

*Міністерство освіти і науки України
Прикарпатський національний університет ім. В. Стефаника
Представництво "Польська Академія Наук" в Києві
Вінницький національний технічний університет
Центр математичного моделювання ІППММ
ім. Я.С.Підстригача НАН України
AGH науково-технологічний університет
ім. Ст.Сташіца, Польща
Лудзький університет, Польща
Інститут кібернетики НАН України
Національний авіаційний університет
Фінансово-економічний інститут Таджикистану
Економічна академія "Д.А.Ценов", Болгарія
Штуттгардський університет, Німеччина
Харківський національний університет радіоелектроніки
НДІ інтелектуальних комп'ютерних систем THEU та ІК НАН України
Новий університет Лісабона, Португалія
Бакинський державний університет, Азербайджан
Об'єднаний інститут проблем інформатики НАН Білорусі
Інститут інженерів з електротехніки
та електроніки (IEEE), Українська секція
Асоціація "Інформаційні технології України"
Громадська організація "Івано-Франківський ІТ кластер"*

"ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ"

**матеріали
міжнародної науково-практичної конференції**

**20-25 травня 2019 року
Івано-Франківськ**

**"INFORMATION TECHNOLOGIES AND COMPUTER MODELLING"
proceedings
of the International Scientific Conference
2019, May, 20th to 25th
Ivano-Frankivsk**

Івано-Франківськ - 2019

УДК (004:004.2/004.9+007):33/37+51+621
ББК 22.17 32.81
I-74 Т

*Науковий редактор: докт. техн. наук., проф. Л.Б.Петришин
(Прикарпатський національний університет, АГН науково-технологічний університет)
Scientific Editor: prof. DSc Lubomyr Petryshyn
(AGH University of Science and Technology, Precarpathian National University)*

Матеріали статей опубліковані в авторській редакції

"Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання"; матеріали статей Міжнародної науково-практичної конференції, м. Івано-Франківськ, 20-25 травня 2019 року. – Івано-Франківськ: п. Голіней О.М., 2019. –с.

Збірка містить матеріали статей Міжнародної науково-практичної конференції з проблем інформаційних технологій в технічних системах, в соціумі, освіті, медицині, економіці та екології; теорії інформації, кодування та перетворення форми інформації; технологій цифрової обробки інформації; захисту інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах; математичного та імітаційного моделювання систем.

УДК
(004:004.2/004.9+007):33/37+51+621
ББК 22.17 32.81
I-74 Т

ISBN 978-617-7468-37-9

© ПНУ ім. В. Стефаніка та автори, 2019

СЕКЦІЯ 1.

Інформаційні технології в технічних та системах спеціального призначення

SECTION 1.

Information technologies in technical systems and systems of special purpose

Оцінка Алгоритмів Машинного Навчання: Продуктивність та Особливості Проектування (на Прикладі Класифікатора та Регресії)

О. Білоконь
Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України
Київ, Україна
sasha_bilokon@ukr.net

Assessment of Machine Learning Algorithms: Performance and Design Features (Logistic Regression and Naive Bayes Classifier)

O. Bilokon
V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of NAS of Ukraine
Kyiv, Ukraine
sasha_bilokon@ukr.net

Анотація—Одними з найбільш частими задачами, що зустрічаються у машинному навчанні є задачі класифікації та регресії. Одні з них більш ефективні інші менше. Тобто найгірші, середні або найкращі випадки визначають клас екземплярів задач. Визначення класу екземплярів задач є важливою процедурою для ефективного проектування систем машинного навчання. В цих рамках у роботі проаналізували та вивчили особливості здійснення емпіричного аналізу алгоритмів та проектування систем та методів машинного навчання, здійснили програмну реалізацію алгоритмів вирішення задач регресії та класифікації мовою програмування – Python, провели дослідно-експериментальні роботи для виявлення продуктивності цих алгоритмів, провели порівняльний аналіз часової складності алгоритмів регресії та класифікації. У результаті дослідження підтвердилась дослідна гіпотеза.

Abstract— One of the most common problems encountered in machine learning is the Logistic Regression and Naive Bayes Classifier tasks. Some are more effective than others. That is, the worst, medium or best cases determine the class of instances of tasks. Defining a class of task instances is an important procedure for efficient design of machine learning systems. In this framework, in the work analyzed and studied the features of empirical analysis of algorithms and the design of systems and methods of machine learning, implemented programmatic implementation of algorithms for solving regression problems and classification in the programming language - Python, conducted pilot and experimental work to identify the performance of these algorithms, conducted a comparative

analysis of time complexity of Logistic Regression and Naive Bayes Classifier algorithms.

Ключові слова—*часова складність алгоритму; ефективність алгоритму; Python; наївний байєсовський класифікатор; логістична регресія.*

Keywords—*time complexity of the algorithm; efficiency of the algorithm; Python; Logistic Regression, Naive Bayes. Classifier.*

I. ВСТУП

В рамках об'єкту дослідження, а саме проектування інструментів машинного зору засобами машинного навчання для робототехнічних систем, перш за все, слід дослідити особливості та здійснити оцінку продуктивності алгоритмів машинного навчання. В окреслених рамках та в якості **предмету** пошуку першорядною дослідною задачею є осягнення елементарних алгоритмів машинного навчання – регресії та наївний байєсовський класифікатор.

З метою оцінки алгоритмів машинного навчання слід провести емпіричний аналіз та дослідити особливості проектування.

Для досягнення поставленої мети дослідження слід виконати наступні дослідні завдання:

- проаналізувати та вивчити особливості здійснення емпіричного аналізу алгоритмів,

- проаналізувати та вивчити особливості проектування систем та методів машинного навчання,
- здійснити програмну реалізацію алгоритмів регресії та класифікації – мовою програмування Python.
- провести дослідно-експериментальні роботи для виявлення продуктивності алгоритмів: регресора та класифікатора. Для цього слід використовувати інфраструктуру хронометражу за допомогою якої здійснимо оцінку часової складності алгоритмів,
- провести порівняльний аналіз часової складності алгоритмів регресії та класифікації.

Гіпотеза–алгоритми логістичної регресії та найвншій байєсовський класифікатор мають різну ефективність та відносяться до різних класів задач.

Відповідно до завдань дослідження були використані наступні методи: систематизація теоретичного матеріалу, моделювання, обчислювальний експеримент, аналіз, узагальнення отриманих результатів.

В ході роботи реалізовані наступні етапи:

- перший етап – дослідницька і пошукова робота, що включає пошук інформації, пошук коду програмної реалізації в довідниках, інтернеті та книжках,
- другий етап – узагальнення отриманого теоретичного матеріалу,
- третій етап – реалізація та тестування алгоритмів мовою програмування Python,
- четвертий етап – реалізація та тестування інфраструктури хронометражу алгоритмів мовою програмування Python,
- п'ятий етап - виведення формул оцінки часової складності алгоритмів,
- шостий етап - проведення обчислювального експерименту,
- сьомий етап - фіксація результатів роботи підпрограм, що реалізують алгоритми регресії та класифікації,
- восьмий етап - аналіз і пояснення результатів,
- дев'ятий етап - висновки.

II. ТЕОРЕТИЧНИЙ АСПЕКТ ДОСЛІДЖУВАНОЇ ПРОБЛЕМИ

A. Особливості емпіричного аналізу алгоритмів

В даній частині дослідження аналізуючи особливості здійснення емпіричного аналізу алгоритмів слід з'ясувати загальний план емпіричного дослідження та його особливості. Даний аналіз здійснюємо за допомогою джерела [1].

Загальний план емпіричного аналізу ефективності алгоритму:

- з'ясування мети майбутнього експерименту – перевірка точності теоретичних висновків про ефективність алгоритму, порівняння ефективності декількох алгоритмів, призначених для вирішення однієї і тієї ж проблеми або різних реалізацій одного і того ж алгоритму, висунення гіпотези про клас ефективності алгоритму, з'ясування ефективності програми, що реалізує алгоритм, на даній конкретній машині,
- визначення вимірюваної метрики М одиниць виміру (кількість операцій або час роботи) – перший варіант полягає у вставці в програму, що реалізує алгоритм, лічильника (або лічильників), які будуть підраховувати кількість виконаних алгоритмом базових операцій. Зазвичай це досить просто, і ви повинні тільки не забувати, що базові операції можуть виконуватися не в одному місці програми, і враховувати всі можливі їх виконання. Само собою, ви завжди повинні перевіряти модифіковану таким чином програму, щоб переконатися в її коректності - як в сенсі вирішення поставленого перед алгоритмом завдання, так і в сенсі коректності роботи внесених в програму лічильників. Другий варіант полягає у визначенні часу роботи програми, що реалізує досліджуваний алгоритм. Найпростіший шлях з'ясування часу роботи - використання системної команди. Можна також визначати час роботи фрагмента коду, запитуючи системне час безпосередньо перед початком виконання фрагмента і відразу після його завершення, а потім просто обчислювати різницю отриманих значень для цієї мети можна використовувати різні вбудовані функції,
- визначення характеристик вхідних даних (їх діапазон, розмір і т.д.),
- створення програми, що реалізує алгоритм (або алгоритми), для проведення експерименту,
- генерація зразка вхідних даних,
- виконання алгоритму (або алгоритмів) над зразком вхідних даних і запис спостережуваних даних,
- аналіз отриманих даних.

Окрім цього переглянемо деякі особливості:

- по-перше, системний час зазвичай не дуже точне, і ви можете отримати декілька що відрізняються один від одного результати при повторних запусках однієї і тієї ж програми з одними і тими ж вхідними даними. Очевидним засобом протидії цьому ефекту є запуск програми і виконання вимірювань кілька разів. З подальшим усередненням отриманих результатів,
- по-друге, висока швидкість сучасних комп'ютерів може привести до того, що час роботи буде неможливо зареєструвати (будуть виходити нульові значення). Обійти цю неприємність легко, запускаючи програму в циклі багато разів, а потім

поділивши зареєстроване час виконання на кількість ітерацій циклу,

- по-третє, на комп'ютері, що працює під управлінням багатозадачності операційної системи, реєстроване час може включати час, витрачений процесором на роботу над іншими програмами, що, зрозуміло, заважає проведенню експерименту. Таким чином, ви повинні запитати у операційної системи час, витрачений конкретно на виконання вашої програми - "призначене для користувача час" і автоматично представленої системної командою. Таким чином, вимір фізичного часу роботи має ряд недоліків як принципового характеру (найбільш важливим з них є залежність від конкретної машини, на якій проводиться експеримент), так і технічних, яких немає у методу підрахунку базових операцій.

V. Особливості проектування систем та методів машинного навчання

Тут розглянемо особливості проектування систем та методів машинного навчання. З'ясуємо процес проектування систем та методів машинного навчання. Даний аналіз здійснюємо за допомогою джерела [2].

Для успішного застосування глибокого навчання недостатньо просто хорошого знайомства з існуючими алгоритмами та принципами їх роботи. Справжній фахівець повинен ще знати, як вибрати алгоритм для конкретного додатка і як зібрати і проаналізувати отримані в ході експерименту дані, щоб поліпшити систему машинного навчання. Для реалізації на практиці процесу проектування існують наступні рекомендації [2]:

- визначте цілі – яку використовувати метрику помилок і з чим порівнювати результати для оцінки помилки. Метрика помилок повинна визначатися розв'язуванням задачі,
- якомога швидше організувати комплексний робочий конвеєр, що включає і оцінку показників якості,
- обладнати систему вимірювальними засобами для визначення вузьких місць. Діагностувати компоненти, що працюють гірше, ніж очікувалося, і виявити, чим викликана погана якість: перенавчанням, недонавчанням або дефектами даних або програм.
- Грунтуватись на результатах вимірювань, та крок за кроком вносити зміни: збір нових даних, налаштування гіперпараметрів або зміну алгоритмів.

III. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА ДОСЛІДЖЕННЯ

В практичній частині дослідження здійснюємо програмну реалізацію алгоритмів логістичної регресії та найвний байесовський класифікатор.

A. Логістична регресія

Тут використовуємо код створеної програми яка реалізує алгоритм логістичної регресії[3].

```
# Завантажуємо бібліотеки
import pickle

>>>import numpy as np
>>>from sklearn import linear_model
>>>import sklearn.metrics as sm
>>>import matplotlib.pyplot as plt

>>>import stopwatch #Імпортуємо створений раніше таймер

>>>timer = stopwatch.Stopwatch()# Вмикаємо таймер для часового заміру роботи алгоритму

# Вхідний файл, що містить дані

>>>input_file = 'data_singlevar_regr400.txt'

# Зчитування даних

>>>data = np.loadtxt(input_file, delimiter=',')

>>>X, y = data[:, :-1], data[:, -1]

# Розділення тренування і тестування

>>>num_training = int(0.8 * len(X))
>>>num_test = len(X) - num_training

# Тренуємо дані

>>>X_train, y_train = X[:num_training], y[:num_training]

# Тестуємо дані

>>>X_test, y_test = X[num_training:], y[num_training:]

# Створимо об'єкт лінійного регресора

>>>regressor = linear_model.LinearRegression()

# Тренуємо модель, використовуючи навчальні набори

>>>regressor.fit(X_train, y_train)

# Прогнозуємо вихід

>>>y_test_pred = regressor.predict(X_test)

# Візуалізуємо роботу лінійного регресора на графіку

>>>plt.scatter(X_test, y_test, color='green')

>>>plt.plot(X_test, y_test_pred, color='black', linewidth=4)

>>>plt.xticks(())

>>>plt.yticks(())

>>>plt.show()

# Обчислюємо показники ефективності
```

```

>>>print("Linear regressor performance:")
>>>print("Mean absolute error =", round
(sm.mean_absolute_error(y_test,
y_test_pred), 2))
>>>print("Mean squared error =", round
(sm.mean_squared_error(y_test,
y_test_pred), 2))
>>>print("Median absolute error =", round
(sm.median_absolute_error(y_test,
y_test_pred), 2))
>>>print("Explain variance score =",
round(sm.explained_variance_score(y_test,
y_test_pred), 2))
>>>print("R2 score =", round
(sm.r2_score(y_test, y_test_pred), 2))
# Модель стійкості
>>>output_model_file = 'model.pkl'
# Зберігаємо модель
>>>with open(output_model_file, 'wb') as
f: pickle.dump(regressor, f)
# Завантажуємо модель
>>>with open(output_model_file, 'rb') as
f: regressor_model = pickle.load(f)
# Виконуємо прогнозування на тестових даних
>>>y_test_pred_new =
regressor_model.predict(X_test)
>>>print("\nNew mean absolute error =",
round (sm.mean_absolute_error(y_test,
y_test_pred_new), 2))
>>>elapsed = timer.elapsedTime() #вмикаємо
таймер
>>>print (elapsed)# виводимо показання
часу роботи алгоритму в секундах

```

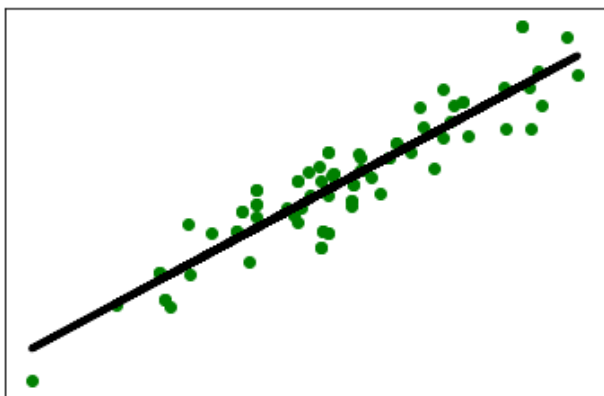


Рис.1. Візуалізуємо роботу лінійного регрессора на графіку

V. Наївний байєсівський класифікатор

Тут використовуємо код створеної програми яка реалізує алгоритм наївний байєсівський класифікатор[3].

```

# імпортуємо потрібні бібліотеки
>>>import numpy as np
>>>import matplotlib.pyplot as plt
>>>from sklearn.naive_bayes import
GaussianNB
>>>from sklearn.model_selection import
cross_val_score # cross_val_score -
функція перехресної перевірки.
>>>from sklearn.model_selection import
train_test_split
>>>from utilities import
visualize_classifier
>>>Import stopwatch # імпортуємо таймер
>>>timer = stopwatch.Stopwatch()# вмикаємо
таймер для вимірювання роботи алгоритма
# Вхідний файл, що містить дані
>>>input_file = 'data_multivar_nb.txt'
# Завантаження даних з вхідного файлу
>>>data = np.loadtxt(input_file,
delimiter=',')
>>>X, y = data[:, :-1], data[:, -1]
# створюємо наївний байєсівський
класифікатор
>>>classifier = GaussianNB()
# тринуємо класифікатор
>>>classifier.fit(X, y)
# передбачення тренувальних даних
>>>y_pred = classifier.predict(X)
# обчислюємо точність
>>>accuracy = 100.0 * (y == y_pred).sum()
/ X.shape[0]
>>>print("Accuracy of Naive Bayes
classifier =", round (accuracy, 2), "%")
# візуалізуємо продуктивність
класифікатора
>>>visualize_classifier(classifier, X, y)
# крос валідація
# Розділюємо дані на навчальні та тестові
>>>X_train, X_test, y_train, y_test =
train_test_split (X, y, test_size=0.2,
random_state=3)
>>>classifier_new = GaussianNB()

```

```
>>>classifier_new.fit(X_train, y_train)
>>>y_test_pred=
classifier_new.predict(X_test)
# точність обчислення класифікатора
>>>accuracy = 100.0 * (y_test ==
y_test_pred).sum() / X_test.shape[0]
>>>print("Accuracy of the new classifier
=", round(accuracy, 2), "%")
```

```
#візуалізуємо продуктивність
класифікатора
```

```
>>>visualize_classifier(classifier_new,
X_test, y_test)
```

```
# функції скорингу
```

```
>>>num_folds = 3
```

```
>>>accuracy_values = cross_val_score
(classifier,
```

```
X, y, scoring='accuracy', cv=num_folds)
```

```
>>>print("Accuracy: " + str (round
(100*accuracy_values.mean (), 2)) + "%")
```

```
>>>precision_values =
cross_val_score(classifier,
```

```
X, y,
scoring='precision_weighted',
cv=num_folds)
```

```
>>>print("Precision: " + str (round
(100*precision_values.mean (), 2)) + "%")
```

```
>>>recall_values =
cross_val_score(classifier,
```

```
X, y, scoring='recall_weighted',
cv=num_folds)
```

```
>>>print("Recall: " +
str(round(100*recall_values.mean (), 2)) +
"%")
```

```
>>>f1_values = cross_val_score(classifier,
X, y, scoring='f1_weighted',
cv=num_folds)
```

```
>>>print("F1: " +
str(round(100*f1_values.mean (), 2)) + "%")
```

```
#вимикаєм таймер
```

```
>>>elapsed = timer.elapsedTime()
```

```
# виводимо показання часу роботи алгоритму
в секундах
```

```
>>>print (elapsed)
```

Accuracy of Naive Bayes classifier = 99.75

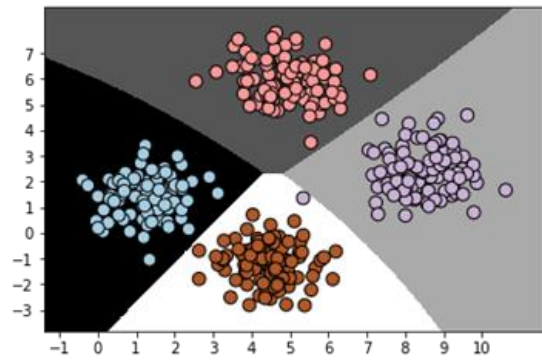


Рис.2. візуалізуємо продуктивність класифікатора

Точність нового класифікатора = 100.0 %

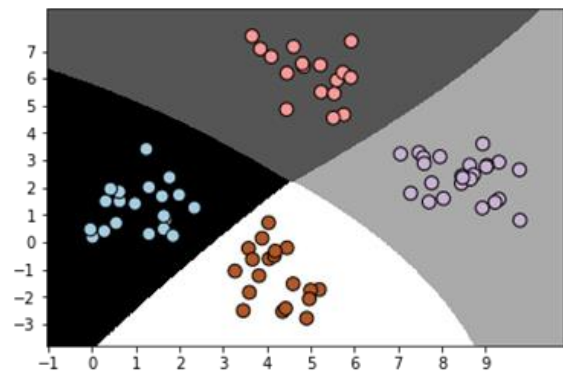


Рис. 3. Візуалізуємо точність нового класифікатора

C. Порівняльний аналіз часової складності алгоритмів

Після проведення дослідно-експериментальних робіт для виявлення продуктивності алгоритмів за допомогою інфраструктури хронометражу надаємо оцінку часової складності алгоритмів, яку викладаємо у таблиці.

TABLE I. Оцінка часової складності алгоритму

№	N кількість строк даних	наївний байєсівський класифікатора	Логістична регресія
1	400	2,59	0,027784109
2	5000	2,945611525	0,046646118
3	10000	2,901728678	0,089525819
4	50000	3,845433474	0,266650359
5	100000	5,221249819	0,489320834
6	500000	16,2655201	2,221902529
7	1000000	30,22287283	4,467516025
8	2000000	60,75962317	9,042296727

Окрім цього ми маємо змогу проілюструвати оцінку часової складності у вигляді графіку

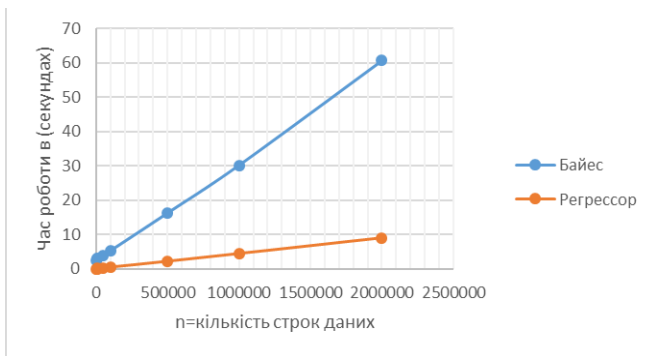


Рис. 4. Порівняльна оцінка часової складності алгоритмів

IV. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Результати дослідно-експериментальної роботи з підрахунку часу роботи програм, що реалізують згадані алгоритми показали наступні показники продуктивності:

Для лалгоритму логістичної регресії

- середня абсолютна похибка = 0.67,
- середньо квадратична похибка = 0.67,
- медіана абсолютної похибки = 0.58,
- показник дисперсії = 0.85,
- коефіцієнт детермінації = 0.84,
- нова середня абсолютна похибка = 0.67,
- час роботи алгоритму у секундах = 0.04665064811706543

Для алгоритму наївний байесівський класифікатор

- Точність: 99,76%,
- Час роботи алгоритма 3.328972578048706

Графік ілюструє що швидкості алгоритму зростають лінійно. Аналіз алгоритмів дозволяє визначити можливу трудомісткість алгоритму в кращому, середньому і найгіршому випадках. Окрім цього виходячи з графіку ми можемо визначити класи екземплярів задач: логістична регресія – ілюструє найкращий випадок трудомісткості, а наївний байесівський класифікатор – середній випадок трудомісткості.

V. ВИСНОВКИ

У процесі дослідження на основі систематизації та узагальнення теоретичного матеріалу і невеликого експериментального дослідження була проведена оцінка часової складності алгоритмів машинного навчання. Виконаний порівняльний аналіз швидкості виконання програм класифікації та регресії мовою програмування Python. Було встановлено, що на швидкість виконання програм, реалізованих алгоритмами регресії та класифікації, впливає безліч різних особливостей конкретного комп'ютера, а також які дані обробляються. На основі проведеного дослідження було зроблено висновок про те, що логістична регресія – ілюструє найкращий

випадок трудомісткості, а наївний байесівський класифікатор – середній випадок трудомісткості.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Anany Levitin. Introduction to the Design and Analysis of Algorithms, Addison Wesley, 3rd edition, 2017.
- [2] Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, Aaron Courville Deep Learning Massachusetts Institute of Technology, 2017.
- [3] Prateek Joshi Artificial Intelligence with Python Build real-world Artificial Intelligence applications with Python Packt Publishing? 2017.

Інформаційна Технологія Навчання та Оцінювання Навичок Застосування Вогнепальної Зброї

Сергій Злепко, Дмитро Штофель, Леонід Коваль, Михайло Паламарчук
кафедра біомедичної інженерії
Вінницький національний технічний університет
Вінниця, Україна
smzlepko@ukr.net

Information Technology for Training and Assessing the Skills of Using Firearms

Sergii Zlepko, Leonid Koval, Dmytro Shtofel, Mykhailo Palamarchuk
Department of Biomedical Engineering
Vinnytsia National Technical University
Vinnytsia, Ukraine
smzlepko@ukr.net

Анотація — Пропонована інформаційна технологія забезпечує визначення характеристик і показників, що оцінюють взаємодію зброї та військовослужбовця, та побудована на основі методу наукового обґрунтування підбору зброї та визначення ступеня її відповідності конкретній людині. Теоретичною основою технології виступають моделі та методи оцінювання сумісності людини і зброї, принципи тренування навичкам володіння зброєю, що в сукупності з оцінкою психологічного статусу бійців забезпечують антропометрично-психофізіологічну сумісність військовослужбовців і короткоствольної вогнепальної зброї, а це підвищує боєздатність особового складу силових відомств.

Abstract — Proposed information technology provides identification of characteristics and indicators, which offer to assess weapons and soldier interaction, and is built on the basis of method for scientific foundation of weapons selection and determining an accordance degree of a weapon type and a certain person. The theoretical basis of the technology is connected with the developing of models and approaches for assessment of human and weapon compatibility, principles of firearms skills training, that in the aggregate provides the determining and implementation of anthropometric-psycho-physiological compatibility of military men and firearms, and that increases the combat capability of the personnel of the official armed forces.

Ключові слова — інформаційна технологія; вогнепальна зброя; індивідуальний підбір; навчання; оцінювання; збройні сили.

Keywords — information technology; firearms; individual assortment; training; assessment; armed forces.

I. ВСТУП

Розроблення та дослідження інформаційних систем і технологій для підбору зброї, навчання та оцінювання рівня володіння нею у бойових умовах є важливою науково-прикладною проблемою, актуальність якої зумовлена високими вимогами до сучасних військових, запитом на інноваційні методи тренування, а також прагненням зберегти життя людям в екстремальних ситуаціях.

Під час стрільби виникає функціональна біотехнічна система «стрілець – зброя». При цьому має місце безпосередній вплив технічного елемента системи (пістолета) на біологічний (людину) та навпаки. Виділення і аналіз характеристик (показників), завдяки яким можна оцінити таку взаємодію, дозволить сформулювати підхід до наукового обґрунтування ступеня відповідності типу зброї антропометричним характеристикам людині.

Однією з основних причин неналежного володіння вогнепальною зброєю є не лише технічна, а й психологічна невідповідність військовослужбовців та працівників

силових структур. Одним із основних недоліків будь-якого тренування є усвідомлення стрільцем штучності модельованої ситуації. Можливості сучасних технічних систем у поєднанні з сюжетними програмами, відео і звуковим спецефектами дозволяють забезпечити ефект максимального «занурення» в екстремальну ситуацію.

З іншого боку, особливо на початкових етапах, основною задачею тренувальної технічної системи є прищеплення стрільцю необхідних функціональних і психофізіологічних навичок у володінні вогнепальною зброєю – утримання, прицілювання, контроль віддачі і т. д. Тому аспект діагностики тренувального процесу і виявлення помилок відіграє важливе значення для успішного використання реальної вогнепальної зброї.

Існують роботи по моделюванню системи «стрілець – зброя», розробленню стрілецьких тренажерів та мультимедійних тирів, які, однак, не можуть в повній мірі забезпечити індивідуальний підбір зброї та оцінку функціонального стану стрільця.

Потребує наукового обґрунтування персоніфікований підбір вогнепальної зброї; створення апаратно-алгоритмічного забезпечення процесу тренування стрільців та контролю їх функціонального стану в процесі тренування.

Основна гіпотеза роботи полягає у забезпеченості оптимальної сумісності між антропометричними параметрами людини і тактико-технічними характеристиками зброї.

II. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

У оглянутих наукових публікаціях висвітлено наукове обґрунтування та найважливіші питання проектування та створення інформаційних технологій фізико-математичного моделювання системи «стрілець – зброя – мішень» та тренування стрільців. Розглядаються лазерні системи навчання і тренування навичок влучної стрільби з короткоствольної вогнепальної зброї.

Існує ряд лазерних стрілецьких тренажерів (наприклад, «Рубін», ЛТ-110ПМ, ЛСК М430 (УБ), ЛТ-111), що забезпечують візуальний контроль за діями курсантів і комп'ютерну обробку результатів стрільби. Популярним стрілецьким тренажером на території країн СНД є «SCATT», який використовується в процесі підготовки стрільців, дозволяє проводити заняття по навчання прийомам стрільби з різних зразків стрілецької зброї, яка використовується як в армії, так і в інших силових структурах. Проте жоден з перерахованих тренажерів не дозволяє визначити рівень сумісності зброї з людиною, не дає інформації про функціональний стан стрільця, не забезпечує задовільної імітації віддачі. Крім цього, названі тренажери не дозволяють виконувати тактичну стрільбу у просторі; обмежують людей, які можуть одночасно тренуватись.

Аналогами тренувальної системи пропонуваного у рамках інформаційної технології апаратно-програмного комплексу є комплекс для навчання стрільбі з пістолета Макарова [1], американські розробки систем для

підвищення майстерності у стрільбі з пістолета [2] та пришвидшеного навчання стрільбі [3].

Крім того, при розробці інформаційної технології будуть проаналізовані й удосконалені методи лазерної передачі інформації і реалізовані в системі бойового тренування [4] та симуляції стрільби з пістолета [5]

Технології фіксації точки прицілювання, передачі мультимедійних зображень на екран мультимедійного стрілецького тренажера описані у [6].

Обґрунтування і вибір технологій професійного навчання (в тому числі психологічного) і підвищення кваліфікації стрільців у поліції розглянуто в [7].

Методика навчання стрільбі за допомогою тренажера «SCATT» наведена у [8].

Питання моделювання балістичних характеристик пострілу на оптоелектронному стрілецькому тренажері розглянуто у [9], а в роботі [10] показані теоретичні особливості фізико-математичного моделювання системи «стрілець – зброя – мішень».

Наш досвід спільного застосування лазерних тирів у сукупності із раніше розробленим програмним «Інтегральним автоматизованим психодіагностичним комплексом» показав, що використання спеціальних тренувальних режимів у підготовці і проведенні навчальних та бойових стрільб дозволяє суттєво (на 25–30 %) підвищити загальну ефективність використання зброї. За попередній час авторами розроблені [моно]: метод імітації пострілу із короткоствольної зброї; інформаційно-структурну модель особистості стрільця; діагностичну систему для визначення психологічної сумісності людини і зброї; біотехнічну систему для підвищення інформативності тренувального процесу; макетні зразки лазерних набоїв; тестовий програмний комплекс для визначення психосоматичного типу особистості.

В той же час, наявна наукова продукція має додатковий потенціал до подальшого розвитку і вдосконалення, створення теоретичного базису, інформаційної технології та методики безперервного супроводження бійця ЗСУ від індивідуального підбору зброї до постійного вдосконалення у володінні нею, виведення єдиного критерію психофізіологічного відбору персоналу, вирішення проблеми раціонального використання бойових набоїв на етапі підготовки та тренування.

III. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

На сьогодні ефективність застосування вогнепальної зброї військовослужбовцями Збройних сил України та бійцями підрозділів особливого призначення є недостатньо високою, що досить часто призводить до невдалого або несанкціонованого застосування зброї та появи інших проблем, пов'язаних з її застосуванням. Така ситуація є наслідком недосконалості або відсутності методів, моделей, апаратно-програмних засобів, систем і технологій, орієнтованих на вирішення зазначеної проблеми.

Складовими проблемами ефективного використання вогнепальної зброї є неадекватне ставлення до неї, а також невміле (неефективне) її застосування; визначення персональної спроможності людини до підвищення власних результатів, швидкості реакції та адекватності дій бійців підрозділів ЗСУ при реагуванні на безпосередню загрозу зі сторони.

Але головним в цьому переліку є індивідуальний підбір типу зброї, яка повинна бути максимально сумісною з особистими параметрами бійця, забезпечуючи при відповідному навчанні максимальну ефективність і безпеку застосування.

Таким чином, оптимальний індивідуалізований підбір зброї, дотримання стратегії тренування навичкам її застосування з точки зору наведеної проблеми є актуальною науково-прикладною задачею.

Існуючі науково-теоретичні підходи до індивідуалізації підбору зброї та оптимального навчання стрільбі передбачають, що для кожної людини існує обмежена кількість типів короткоствольної вогнепальної зброї, які відповідають її антропометричним характеристикам, психофізіологічному та емоційному статусу [11]. Це дозволяє ввести новий оцінювальний критерій – антропометрично-психофізіологічну функціональну сумісність людини і короткоствольної зброї – ергономічно обумовлену, кількісно визначену і психофізіологічно обґрунтовану відповідність масо-габаритних і тактико-технічних характеристик короткоствольної вогнепальної зброї психоемоційному та функціональному статусу людини, що її застосовує.

На теперішній час немає жодної біотехнічної комп'ютеризованої системи, яка б могла визначати відповідність певного типу зброї конкретній людині, хоча потреба в такого роду системах та методологіях їх застосування для зовнішнього і внутрішнього кадрового відбору є. Наголосимо, що технологія повинна використовуватися як для підбору зброї, так і для навчання та оцінювання користування нею. При цьому, згідно з наявними даними, відомі на теперішній день стрілецькі тренажери виявилися непридатними для вирішення цієї задачі.

Мета нашої роботи – підвищення ефективності та покращення якості підбору, навчання і оцінювання рівня володіння вогнепальною зброєю бійцями спецпідрозділів та військових частин Збройних Сил України.

IV. КОНЦЕПЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

В основу технології покладено гіпотезу про те, що необхідною умовою ефективною стрільби є взаємоузгодженість комплексу антропометричних і психофізіологічних характеристик людини з конкретними характеристиками зброї, адекватно підбраною під певний тип особистості людини, що забезпечує ефективне і максимально безпечне застосування зброї в умовах ближнього бою.

Попередньо були формалізовані та апробовані алгоритми виконання прицілювання і пострілу стрільцями

різної кваліфікації, порівняння яких показало, що основною відмінністю при веденні стрільби висококваліфікованими стрільцями є те, що акцент в процесі прицілювання у них покладений не на зорову орієнтацію прицільного пристосування, а на орієнтацію тіла зі зброєю на мішень [11], що в сукупності з індивідуально-типологічними особливостями забезпечує високу точність стрільби і висуває особливі вимоги до процесу тренування стрільців-початківців.

Ще однією особливістю структурно-функціональної організації інформаційної технології можна вважати спільне застосування стандартних блоків апаратно-програмного комплексу із багаторазовим універсальним лазерним набоєм, який використовується разом із табельною зброєю, що повністю забезпечує реалістичність тренувального процесу, оцінювання якості стрільби в режимі реального часу, формування рекомендацій по його структурі і динаміці та побудувати на їх основі відповідну інформаційну технологію.

В роботі розроблено схемотехнічну і конструкторську реалізацію багаторазового універсального лазерного набою для табельної зброї у вигляді стандартного патрону калібру 5,45 мм; 7,62 мм і 9 мм із лазерними випромінювачами червоного та інфрачервоного діапазонів, застосування якого в навчально-тренувальному процесі максимально наближає його до реальних умов.

На базі серійних пістолетів запропоновані їх модифіковані конструкції, які доповнені імітатором віддачі та лазерним випромінювачем; в рук'ї – системою тензодатчиків і давачів шкірно-гальванічної реакції, блоком живлення і блоком підсилювачів, що практично повністю імітує бойову стрільбу і здійснює контроль цього процесу.

Спроектвані та реалізовані бази даних і знань для моделей процесу прицілювання та ефекту віддачі, що дозволило запропонувати нову, більш досконалу процедуру тренування у стрільбі з короткоствольної вогнепальної зброї.

Розроблено інформаційну технологію та відповідний апаратно-програмний комплекс для забезпечення вогневої підготовки бійців ЗСУ, що реалізує низку унікальних властивостей у вигляді функціонально зв'язаних самостійних структур: пістолета, мішені, обчислювального комплексу і військовослужбовця, який у сукупності з програмним забезпеченням забезпечує реалізацію розроблених методів і визначення рівня відповідності вибраної зброї власним об'єктивним індивідуальним характеристикам бійця, формує його оптимальну вогневу підготовку і контроль функціонального стану.

Розроблення лазерних набоїв різних калібрів та їх використання дозволило відмовитись від використання бойових набоїв (що характерно для деяких мультимедійних тирів і стрілецьких тренажерів [12]) та суттєво зменшило фінансові витрати на підготовку бійця без зниження її якості. Крім того, відпала потреба у створенні окремих зразків тренувальної оптоелектронної зброї, оскільки

людина працює із оптимально підбраною, закріпленою за нею табельною зброєю.

Узагальнена структура інформаційної технології навчання та оцінювання навичок застосування вогнепальної зброї військовослужбовцями Збройних Сил України наведена у табл. 1.

TABLE 1. УЗАГАЛЬНЕНА СТРУКТУРА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

Етап	Зміст етапу	Результати етапу
1. Етап моделювання	Моделює віддачу як технічну властивість зброї у взаємодії з біомеханічними характеристиками руки стрільця	Дозволяє оцінити наслідки віддачі і зформувати критерій індивідуального підбору зброї
2. Етап підбору зброї	Автоматизований підбір зброї за критерієм антропометрично-психофізіологічної функціональної сумісності стрільця і зброї	Забезпечує індивідуальний підбір короткоствольної вогнепальної зброї
3. Етап прицілювання	Аналіз результатів стрільб та оцінювання конкретного стрільця	Забезпечує дотримання технічних рекомендацій щодо прицілювання та виконання пострілу
4. Етап розроблення алгоритму імітації пострілу	Формування алгоритму імітації пострілу та оцінювання траєкторії точки прицілювання для визначення координат мішені (цілі стрільця)	Сприяє виявленню помилок прицілювання на початкових етапах тренування і запобігає їх закріпленню
5. Етап розроблення алгоритму навчання і тренування	Формування алгоритму тренування і навчання в умовах мультимедійного або лазерного тиму при дії зовнішніх і внутрішніх чинників	Сприяє формуванню та закріпленню навичок точної і прицільної стрільби, зокрема в екстремальних умовах
6. Етап навчання володінню вогнепальною зброєю	Забезпечення процесу навчання професійним навичкам застосування зброї у різних ситуаціях	Забезпечення тренувального процесу цільовим спрямуванням, адекватним змістом та оптимізованою структурою
7. Етап періодичного контролю	Періодичне оцінювання та підвищення кваліфікації бійців під час служби в ЗСУ	Підвищення боєздатності бійців ЗСУ, зменшення втрат, підвищення ефективності військових операцій

ВИСНОВКИ

Запропонована інформаційна технологія та її реалізація є значно більш функціонально потужною та універсальною, ніж існуючі. Авторами створено технологію, яка забезпечує не лише оптимальні режими тренування, навчання та оцінювання навичок володіння зброєю, а й дозволяє проводити індивідуальний підбір зброї та контроль психологічного і функціонального стану бійця в процесі підготовки.

Основна наукова і практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що:

- обґрунтовано і підтверджено гіпотезу, згідно якої необхідною умовою ефективної стрільби є взаємоузгодженість комплексу антропометричних і

психофізіологічних характеристик людини з конкретним типом зброї, адекватно підбраним під певний тип особистості бійця, що забезпечує надійне і максимально безпечно застосування зброї в умовах ближнього бою та сприяє збереженню його життя;

- отримала практичну реалізацію структурно-функціональна організація інформаційної технології для підбору, навчання та визначення рівня володіння бійцями Збройних Сил вогнепальною зброєю у вигляді логічної сукупності розроблених методів і моделей, взаємопов'язаних блоків і модулів апаратно-програмного комплексу, зразків стрілецької зброї, обчислювальних та комунікаційних ресурсів, направлених на досягнення цільової функції – визначення і забезпечення антропометрично-психофізіологічної функціональної сумісності бійців спецпідрозділів та інших структур ЗСУ і вогнепальної короткоствольної зброї.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] М. Ф. Пічугін та ін., "Апаратно-програмний комплекс для навчання влучної стрільби з пістолета Макарова," *Збірник наукових праць Житомирського військового інституту ім. С. П. Корольова*, № 4, с. 49–56, 2011.
- [2] K. Guenther, S. Macintosh, and Erik Bodegom, "Interactive system and method for shooting and target tracking for self-improvement and training." U.S. Patent No. 9,033,711. 19 May 2015.
- [3] B. Stanley, "System and method for elevated speed firearms training," US Patent 2009/0111073A1 No. 12,202,218. 30 Apr. 2009.
- [4] P. Reardon et al, "Laser transmission system for use with a firearm in a battle field training exercise," U.S. Patent No. 9,163,894. 20 Oct. 2015.
- [5] S. Hadler, "System and method for simulated firearms training," U.S. Patent No. 14,619,046. 2015.
- [6] А. В. Беляев, "Обнаружение объектов заданной формы и определение их координат на изображении в мультимедийном стрелковом тренажере," *Системы обработки информации*, № 10, с. 16–21. 2015.
- [7] C. Beighton, and S. Poma, "Expanding professional learning: inside/outside police firearms training," *Studies in continuing education*, No 37.2, p. 187–201, 2015.
- [8] Р. А. Зубрилов, "Оптимизация методики обучения биатлонистов стрельбе способом «вынос точки прицеливания» с использованием стрелкового тренажера «SCATT»," *Слобожанський науково-спортивний вісник*, № 2(52), с. 48–54, 2016.
- [9] І. П. Заневський, "Імітація латеральної складової польоту кулі на оптоелектронному стрілецькому тренажері," *Педагогіка, психологія та медико-біологічні проблеми фізичного виховання і спорту*, № 11, с. 40–50, 2009.
- [10] А. Лопатев та ін., "Особенности моделирования системы «Стрелок – мишень»," *Теорія та методика фізичного виховання*, № 5, с. 37–42, 2009.
- [11] С. В. Костишин, Д. Х. Штофель, М. В. Московко, Информационные технологии в подготовке стрелков высшей квалификации, Saarbrücken, Lambert Academic Publishing, 2014.
- [12] S. Zlepko, D. Shtofel, S. Kostishyn, S. Tymchuk, "Basic Concepts of Modern Shooting Galleries Design," in *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science*, XI International Conference TCSET'2012, Lviv Polytechnic, Lviv–Slavske, p. 217, 2012.

Методи Розпізнавання Накидів та Коротких Замикань у Високовольтних Електромережах

Олег Люра

кафедра комп'ютерних систем і мереж
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Івано-Франківськ, Україна
oleg.lura14@gmail.com

Methods of Detecting Load Surges and Short Circuits in High-Voltage Electrical Lines

Oleh Liura

Department of "Computer Systems and Networks"
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
Ivano-Frankivsk, Ukraine
oleg.lura14@gmail.com

Анотація—Класифіковані компоненти спецпроцесора та обґрунтовані їх характеристики, орієнтовані на лінії електропересилань 6 кВ. Викладена інформаційна технологія проектування структурних рішень спецпроцесора релейного захисту високовольтних ліній електропересилань. Систематизовані існуючі засоби релейного захисту на основі апаратних та програмно-апаратних мікропроцесорних контролерів цифрового захисту. Подана структура спецпроцесора розпізнавання збурень у високовольтних лініях електропередач ЛЕП.

Abstract—Special processor components are classified and their characteristics referring to 6 kV electricity transmission lines are substantiated. The information technology of designing structural solutions of relay protection special processor for high-voltage electricity transmission lines is presented. Existing means of relay protection based on hardware and software-hardware microprocessor controllers of digital protection are systematized. Special-purpose processor structure of disturbances recognition in high-voltage power lines is shown.

Ключові слова—накид; коротке замикання; спецпроцесор; електродвигун; перехідні процеси

Keywords—load surges; short circuit; special processor; electric motor; transitional processes

I. ВСТУП

У процесі експлуатації високовольтних ЛЕП можуть виникати особливі перехідні режими та пошкодження обладнання електричних та трансформаторних підстанцій. Такі пошкодження призводять до механічного виводу з ладу технологічного обладнання струмами короткого замикання або дугою, яка виникає у місці пошкодження.

Окрім цього, небезпечним також є пониження напруги у вузлових точках електроенергетичної системи внаслідок коротких замикань, що впливає на порушення технологічних процесів споживачів електроенергії та стійкості генераторів енергосистеми. Висока швидкість перехідних режимів у ЛЕП упродовж кількох періодів частоти 50 Гц потребує адекватної швидкодії перетворювачів, пристроїв автоматки релейного захисту (РЗ) та спеціалізованих обчислювальних засобів – контролерів, які опрацьовують режими електропостачання у реальному часі. Тому актуальним завданням є розроблення нових ефективних методів та технічних засобів захисту промислового обладнання ЛЕП від перевантажень та коротких замикань.

У зв'язку з розвитком мікропроцесорної техніки, пристрої релейного захисту, виконані за цифровими принципами, широко використовують в енергосистемах нашої держави.

Істотні переваги, якими володіють цифрові пристрої порівняно із традиційними електромеханічними пристроями релейного захисту, робить їх застосування в енергетичних системах практично безальтернативним.

Основними перевагами цифрових пристроїв є висока точність відтворення заданих характеристик функціонування пристрою; отримання характеристик будь-якої складності; запам'ятовування координат режиму під час спрацювання цифрового пристрою; можливість зміни конфігурації пристрою; універсальність; малі габарити та менше використання електротехнічних матеріалів; можливість самодіагностики; менше споживання енергії для функціонування.

II. МЕТОДИ РОЗПІЗНАВАННЯ ЗБУРЕНЬ У ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ

A. Метод розпізнавання спотворень гармонічних сигналів на основі рандомізації.

Діагностування та розпізнавання спотворень гармонічних сигналів у високовольтних лініях електропередач (ЛЕП) найчастіше виконується на основі спектрального аналізу та методу найменших квадратів Байєського підходу [4].

Обчислення наявності спотворюючих гармонік спектральним аналізом та методом найменших квадратів характеризується великою алгоритмічною, часовою та апаратною складністю, а також потребує великої вибірки – більше 10-15 періодів сигналів промислової частоти.

Названі функціональні обмеження вказані через методи неможливо практично застосовувати при швидкісному моніторингу та розпізнаванні накидів та коротких замикань у високовольтних ЛЕП. Застосування нелінійного перетворення гармонічних сигналів на основі їх рандомізації дозволяє суттєво зменшити об'єм вибірки та підвищити швидкість діагностування збурень та оцінки якості електричної енергії.

Оператором рандомізації $\mathcal{R}an$ послідовності $X = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}$ є дія, яка полягає в переміщенні i -го елемента на місце j -го елемента послідовності X . Відповідність між i та j реалізується законом рандомізації [5]:

$$X = \{x_i\}, \quad \mathcal{R}an(X) = \mathcal{R}an(\{x_i\}) = X^{\mathcal{R}an},$$

$$X^{\mathcal{R}an} = \{x_j\}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = k_i.$$

$K = \{k_i\}$ – масив-ключ (закон) процедури рандомізації $\mathcal{R}an$.

Рандомізація виконується над кожним елементом послідовності X . При цьому i -й елемент послідовності X переміщується на місце $\mathcal{R}an(x_i)$, згідно наступного виразу:

$$\mathcal{R}an(X) = (\mathcal{R}an(x_0), \mathcal{R}an(x_1), \dots, \mathcal{R}an(x_i), \dots, \mathcal{R}an(x_n)).$$

В результаті рандомізації послідовності X утворюється послідовність $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_n\}$, причому $x_i = y_j, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$.

Застосування більшості із N ключів рандомізації не є практично ефективним. Проте серед них є ключі, застосування яких дозволяє виконувати наступні операції: сортування послідовності, за зростанням; сортування послідовності за спаданням; утворення сигналу типу "білий шум"; перетворення сигналу одної форми в сигнал цілісної форми; збільшення або зменшення частоти гармонічного сигналу.

Розглянемо сигнальну рандомізацію одного періоду синусоїди $x_i = \sin\left(\frac{2\pi i}{70}\right)$, де $i = \overline{1, 70}$, з приведенням її

до форми М-послідовності довжиною $n = 7$ біт, яка записується у вигляді 1110100. Оскільки кількість відліків синусоїди більша за кількість бітів М-послідовності, необхідно здійснити розширення М-послідовності з коефіцієнтом $k = 10$, тобто кожен інформаційний біт записувати 10 разів. При цьому утворена послідовність матиме довжину $n \cdot k = 70$ біт.

При сигнальній рандомізації виконується переміщення дискретизованих значень синусоїди x_i з метою отримання форми огибаючої, максимально близької до М-послідовності (рис. 1).

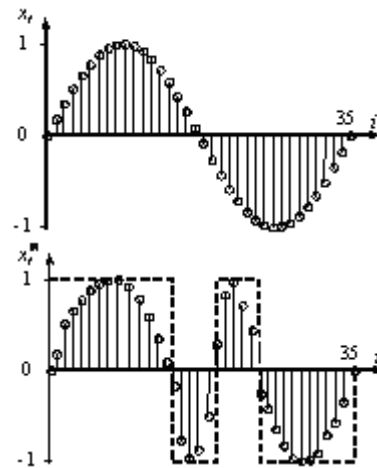


Рис. 1. Сигнальна рандомізація синусоїди та рандомізована послідовність.

На рис. 1 – графік рандомізованого сигналу синусоїди з ваговими коефіцієнтами. Як бачимо, рандомізований сигнал і М-послідовність збігаються, а отже, автокореляційна функція (АКФ) рандомізованого сигналу і АКФ М-послідовності однакові.

Описаний метод рандомізації синусоїдального сигналу та його кореляційної згортки дозволяє його застосувати для ідентифікації та розпізнавання збурень в лініях електропередач при виникненні коротких замикань та накидів. При цьому у випадку виникнення накиду характеристики зміни гармонічного сигналу незалежно від стрибків амплітуди спектрально не змінюються і в результаті кореляційної згортки виникає один пік кореляційного максимуму.

У випадку виникнення короткого замикання спостерігається спотворення гармонічного сигналу, а також з'являється експоненціальна складова його затухання, що приводить до суттєвої зміни спектральних характеристик рандомізованого сигналу. Тому в результаті опрацювання таких збурень в електромережах відбувається різке зменшення амплітуди головного піку та поява інших піків кореляційної функції, що

використовується для ідентифікації даного виду збурень в електромережі.

На рис. 2 показано кореляційні функції неспотвореного гармонічного сигналу, а також АКФ шуму і корисного сигналу.

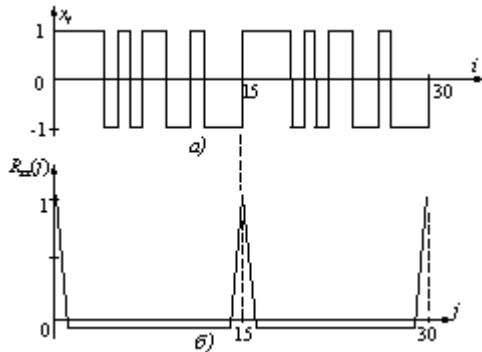


Рис. 2. Гармонічний сигнал без спотворень, АКФ шуму і корисного сигналу.

Розроблений метод рандомізації гармонічних сигналів за рахунок виконання нелінійної операції їх перетворення в АКФ з особливими кореляційними характеристиками дозволяє реалізувати швидкісний (на інтервалі 1-2 періодів) моніторинг якості електроенергії та виконати розпізнавання накидів та коротких замикань в ЛЕП.

Б. Метод інтегрального диференціально-різницевого розпізнавання дискретизованих гармонічних сигналів промислової частоти.

Розглянемо моделі накиду та коротких замикань у лініях електропередач, які зображені на рис. 3.

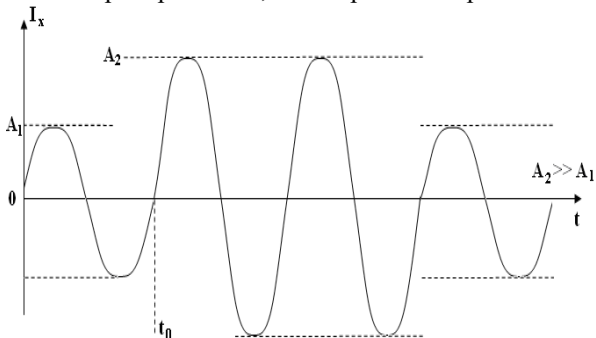


Рис. 3. Модель накиду струму при підключенні у момент t_0 потужного споживача.

Характерними ознаками накиду є:

1. Незмінність якісних характеристик гармонічного сигналу при $t < t_0$ та $t \geq t_0$;
2. Стрибок струму у будь-який момент фази струму від значення $A_1(t < t_0)$ до значення $A_2(t \geq t_0)$. (Цей стрибок може в 1-2 рази перевищувати початкове значення A).
3. До накиду чи спаду навантаження амплітуди струмів є постійними, тобто

-накид $A_1 = const$; $A_2 = const$;

$A_1 \ll A_2$;

-спад $A_1 = const$; $A_2 = const$;

$A_1 \gg A_2$.

Задача розпізнавання такого збурення у ЛЕП може бути успішно вирішена цифровим опрацюванням гармонічних сигналів $X_i = A_i \cos \omega_0 t$ згідно наступного алгоритму (рис. 4).

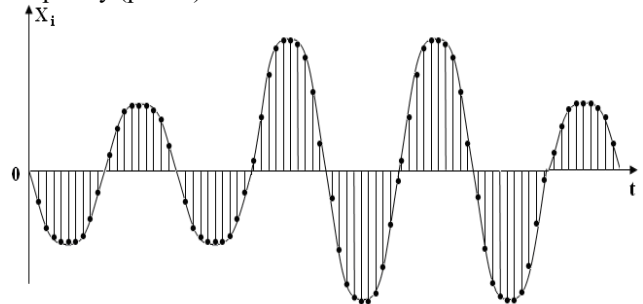


Рис. 4. Модель накиду з врахуванням дискретизації за амплітудою гармонічного сигналу при $\Delta t = const$, $\delta = const$

У результаті на виході АЦП на інтервалі одного періоду гармонічного сигналу отримуємо потік цифрових центрованих відліків $(\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dots, \dot{x}_i, \dots, \dot{x}_n)$, де

$$M_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \dot{x}_i = 0; \quad -A \leq x_i \leq A.$$

З метою спрощення рішення задачі подамо \dot{x} у вигляді $|\dot{x}|$, тобто це можна зробити на виході АЦП шляхом відкидання знаку або до входу АЦП шляхом випрямлення гармонічного сигналу $|\dot{x}|$ (рис. 5) [1,2,3].

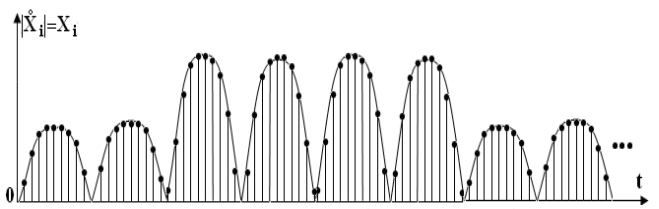


Рис. 5. Модульна характеристика моделі накиду гармонічного сигналу.

Алгоритм опрацювання даних такої моделі виконується з кроком $\Delta t = \frac{\pi}{2}$, тобто у ковзному режимі через напівперіода гармонічного сигналу.

Для виконання різницевого імпульсно-квадратичного методу необхідно рекурентно (у стековому режимі) запам'ятовувати цифрові відліки x_i у регістрі пам'яті $x_i \rightarrow x_{i-1} \rightarrow x_{i-2} \dots \rightarrow x_{i-j} \dots \rightarrow x_{i-n}$ і різницево порівнювати ці запам'ятовані значення з поточними

відліками x_i . Тобто згідно з схемою $\rightarrow x_i \rightarrow x_{i-1} \rightarrow x_{i-2} \dots \rightarrow x_{i-j} \dots \rightarrow x_{i-n} \Rightarrow x_i - x_{i-n}$.

Це означає, що операція віднімання буде виконуватися над даними гармонічного сигналу у моменти, зміщені на $\frac{\pi}{2}$ (рис. 6).

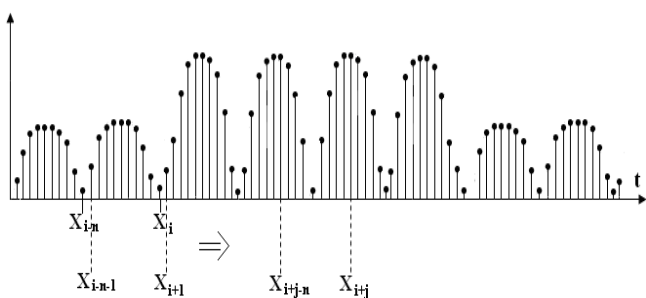


Рис. 6. Модель формування різниць текучих та запам'ятованих значень гармонічного сигналу.

Як результат виконання такої операції у ковзному режимі з кроком Δt отримаємо:

$$Z_i = |x_i - x_{i-n}|,$$

де модульна операція враховує симетрію зміни амплітуд струмів у напрямі зростання – при накиді та спадання – при скиді навантаження в електромережі.

Графік зміни Z_i в часі при накиді показаний на рис. 7.

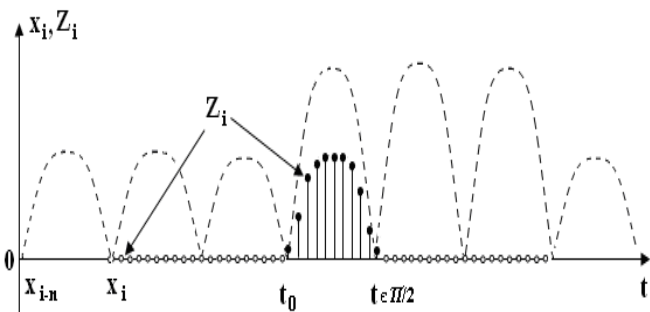


Рис. 7. Характеристика розпізнавання та ідентифікації "накиду" навантаження в електромережі.

З рис. 9 видно, що реакція процесора буде мати зміну амплітуди струму у момент стрибка: $A_1 \rightarrow A_2$; $A_1 \ll A_2$ на інтервалі напівперіоду, але є інваріантна до можливих інших більших чи менших стрибків амплітуди струму у інші моменти часу, тобто

$$Z_i = \begin{cases} 0, t \leq t_0; \\ (A_2 - A_1) \sin \omega t, t_0 \leq t \leq t + \frac{\pi}{2}; \\ 0, t > t_0 + \frac{\pi}{2}. \end{cases}$$

Розглянемо задачу розпізнавання та ідентифікації короткого замикання в електромережі.

Експериментальні дослідження та реєстрація збурень в електромережах за допомогою пристроїв "Альтра" та їх

модифікацій показують, що при виникненні коротких замикань різної природи спостерігається наближення до експоненціального затухання або спотворення форми гармонічного сигналу на кількох періодах синусоїди струму на інтервали часу $t > t_0$. У цьому випадку дискретна модель короткого замикання має вигляд, зображений на рис. 8.

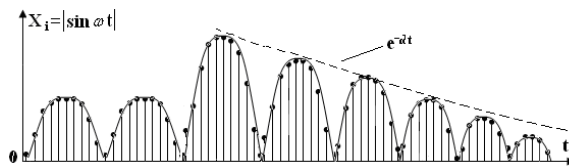


Рис. 8. Дискретні моделі коротких замикань в електромережах з експоненціальним спадом струму.

При виникненні такого роду збурення в електромережах у результаті різницево-імпульсного опрацювання гармонічних сигналів в околі часу t_0 отримаємо графік, що зображений на рис. 9.

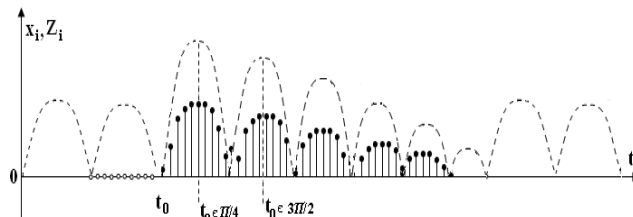


Рис. 9. Характеристика розпізнавання та ідентифікації короткого замикання в електромережах без спотворення гармонічного сигналу.

Таким чином, на основі запропонованого модульно-різницевого методу факт виникнення збурення в електромережі буде зареєстрований на інтервалі часу $t_0 + \frac{\pi}{2}$ або навіть на інтервалі $t_0 + \frac{\pi}{4}$.

На рис. 10 видно, що при виникненні короткого замикання згідно з розробленим методом, його можна ідентифікувати на інтервалі часу $t_0 + \frac{\pi}{4} < t_0 + \frac{\pi}{2} < t_0 + \pi$. Тобто на інтервалі чверті або півперіода після реєстрації збурення в електромережі.

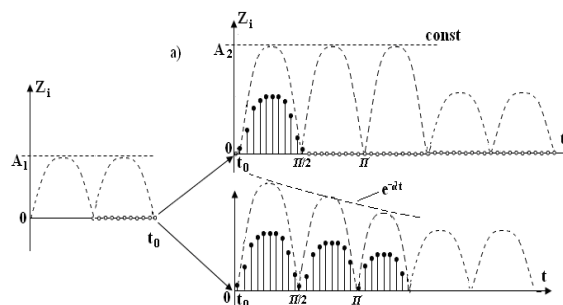


Рис. 10. Часова продукційна модель виявлення, розпізнавання та ідентифікації збурень в електромережах типу накиду та короткого замикання.

З метою підвищення чутливості та дозволяючої здатності ідентифікації факту короткого замикання на початковій стадії його розвитку, а також спрощення алгоритму обчислень та структури спецпроцесора, на інтервалі часу $t > t_0 + \frac{\pi}{2}$ доцільно застосувати квадратично-імпульсний метод цифрового опрацювання даних Z_i за виразом:

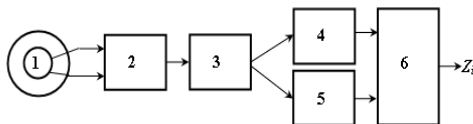
$$S_{\text{д.с.}} = \begin{cases} 1, Z_i^2(t > t_0 + \frac{\pi}{2}) > P_0; \\ 0, Z_i^2(t > t_0 + \frac{\pi}{2}) < P_0, \end{cases}$$

де P_0 - порогове значення, яке вибирається експертним шляхом або після багаторазових випробувань на реальних прикладах. Даний поріг P_0 є інваріантним до величини стрибка струму $A_2 \gg A_1 = \text{var}$, тобто не залежить від можливої різниці $\Delta = |A_2 - A_1|$ у момент виникнення збурення t_0 . Оскільки у випадку накиду коефіцієнт експоненти $\alpha \approx 0$ і на інтервалі часу $t_0 > t_0 + \frac{\pi}{2}$ $Z_i \approx 0$.

У той же час очевидно, що процеси розвитку коротких замикань можуть мати більш складний характер. У процесі пробоїв ізоляції у високовольтних кабелях можуть спостерігатися кілька наростаючих стрибків чи випадкових амплітудних стрибків струму. У цьому випадку може з'явитися необхідність у більш потужному опрацюванні серій ідентифікованих коротких замикань, що є предметом більш глибоких теоретичних, експериментальних та промислових досліджень на основі теорії Марківських моделей ідентифікації станів квазістаціонарних об'єктів управління та джерел інформації.

III. РОЗРОБКА КОМПОНЕНТІВ ТА ЛАБОРАТОРНІ ВИПРОБУВАННЯ ПРИСТРОЮ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ

На рис. 11 показано запропоновану структуру та компоненти пристрою розпізнавання перехідних процесів методом розпізнавання накидів та коротких замикань на основі нормованого коефіцієнта взаємкореляції, який реалізує метод розпізнавання накидів та коротких замикань на основі нормованого коефіцієнта взаємкореляції[4,5].



- 1 – трансформатор струму;
- 2 – діодний випрямляч;
- 3 – аналого-цифровий перетворювач;
- 4 – фільтр опінаючої низьких частот;
- 5 – фільтр опінаючої високих частот;
- 6 – спецпроцесор

Рис. 11. Структура пристрою розпізнавання перехідних процесів при успішному та неуспішному запуску ПЕД.

Розробка алгоритму ідентифікації запусків ПЕД інваріантних до окремо виникаючих накидів, коротких замикань.

Алгоритм інваріантного розпізнавання накидів, коротких замикань та запусків ПЕД реалізується на основі методу сумісного використання трансформаторів струму та напруги.

Під час запуску ПЕД виникає значне споживання реактивної потужності, що супроводжується зсувом фаз між напругою та струмом. Дану ознаку можна використати разом з розробленою системою ідентифікації коротких замикань та накидів для ефективного інваріантного розпізнавання окремо виникаючих перехідних процесів ЛЕП, які ідентифікуються як накиди, к.з. та запуски ПЕД.

Теоретичною основою даного методу є інтегральні та диференціально-різницеві алгоритми, які забезпечують розпізнавання накиду та к.з. на основі діаграм та врахування виникнення різниці фаз при запуску ПЕД.

На рис. 12 показана структурна схема пристрою, який оснащений трансформаторами напруги (Т1) та струму (Т2), двопівперіодними випрямлячами, аналого-цифровими перетворювачами (АЦП), ідентифікатором різниці фаз, пристроєм ідентифікації накидів та к.з. і логічною схемою (ЛС), три виходи якої відповідають: N – накид, С – к.з., Z – запуск ПЕД.

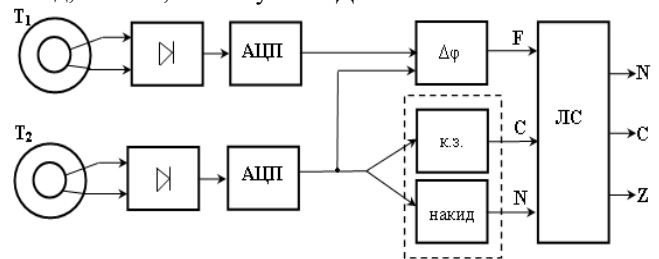


Рис. 12. Структурна схема пристрою ідентифікації накидів, замикань на землю та запусків потужних електроприводів в ЛЕП.

IV. СТРУКТУРА ТА ФУНКЦІЇ УДОСКОНАЛЕНОГО ІНТЕГРУЮЧОГО КВАДРАТОРА

Удосконалений спецпроцесор, який реалізує функції інтегруючого квадратора, складається з першого входу (1), який з'єднаний з першим входом n -розрядного двійкового лічильника-регістра (2), першим входом модуля стартової синхронізації (7) та першим входом регістра пам'яті (4). N -виходів лічильника (2) з'єднанні з відповідними, починаючи з другого молодшого розряду, першими n -входами $(n+k)$ -розрядного комбінаційного суматора (3), перший молодший вхід якого з'єднаний з входом логічної "1" (5), виходи комбінаційного суматора з'єднанні з відповідними другими входами регістра пам'яті (4), прямі виходи D-тригерів якого з'єднанні з відповідними третіми входами комбінаційного суматора та першими входами модуля формування вихідних керуючих сигналів (10), другий вхід якого з'єднаний з пороговою уставкою (11), а виходи (12, 13, 14) є відповідно сигнальні виходи

ідентифікації накиду, замикання на землю та запуску потужних електродвигунів.

Другий вхід модуля стартової синхронізації (7) з'єднаний з другим входом синхронізації пристрою (6) та другим входом скиду в нульовий стан лічильника (2). Третій вхід модуля (7) з'єднаний з третім входом числа циклів накопичень k (8), четвертий вхід з'єднаний з входом порогового значення старту P_0 (9), а вихід з'єднаний з четвертим входом регістра скиду в "нуль" регістра пам'яті (4).

Пристрій містить (рис. 13):

- 1 – перший інформаційний вхід;
- 2 – n -розрядний двійковий лічильник-регістр;
- 3 – комбінаційний двійковий суматор;
- 4 – регістр пам'яті на D-тригерах;
- 5 – вхід логічної "1";
- 6 – другий вхід синхронізації пристрою;
- 7 – модуль стартової синхронізації;
- 8 – вхід числа циклів накопичень k ;
- 9 – вхід порогового значення старту P_0 .

10 – модуль порівняння з пороговою уставкою I_1 та формування вихідних керуючих сигналів;

12, 13, 14 – відповідно сигнальні виходи ідентифікації накиду, замикання на землю та запуску ПЕД.

Схема удосконаленого інтегруючого квадратора представлена на рис. 13.

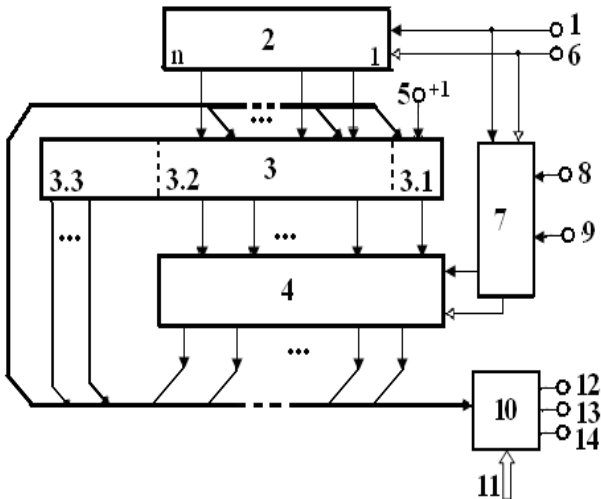


Рис. 13. Скоректована структурна схема спеціального процесора обчислення порогової суми квадратів модульних різниць G_i^2

ВИСНОВКИ.

Проведений аналіз типових архітектур високовольтних електромереж. Розглянуто методи розпізнавання збурень, типу накидів та коротких замикань у високовольтних електромережах.

Викладено теоретичні засади запропонованих методів розпізнавання спотворень гармонічних сигналів та обґрунтовано доцільність застосування інтегрально-

різницевого методу для розробки та реалізації пристроїв релейного захисту високовольтних ліній електропередач.

Виконано розробку компонентів пристрою релейного захисту високовольтних ЛЕП. Запропонована структура та функції удосконаленого інтегруючого квадратора. Розроблені алгоритм цифрового опрацювання сигналів, структурна схема пристрою релейного захисту та мікроелектронна реалізація базового компонента інтегруючого квадратора.

Актуальним завданням є удосконалення методів та спеціалізованих процесорів розпізнавання збурень у високовольтних електромережах напругою 6 – 10 кВ, які дозволять ідентифікувати короткі замикання та накиди.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] O. Liura, I. Ostrovka, I. Sabadash, Ya. Nykolaichuk, "Theoretical Principles and Methods of Distortions Recognition in Load Surges, Short Circuits and Powerful Electric Drives Launching Type Power Lines," TCSET'2016. – PP. 33-36.
- [2] О. Люра, "Методи, перетворювачі та обчислювальні засоби захисту високовольтних ЛЕП від накидів та замикань на землю," Матеріали проблемно-наукової міжгалузевої конференції. Надвірна-Яремче. – 2016. – С. 146-150.
- [3] О. Люра, "Метод розпізнавання накидів на основі цифрового опрацювання сигналів при запуску потужних електроприводів," Матеріали Всеукраїнської конференції з міжнародною участю. Тернопіль. – 2017. – С. 71-73.
- [4] І. Сабадаш, О. Люра, "Алгоритм опрацювання даних та компоненти спеціального процесора релейного захисту високовольтних ліній електропередач," Математичне та комп'ютерне моделювання. Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка. – 2017. – С. 209-215.
- [5] Пат.103938 Україна МПК H02H 9/00 (2015.01) Пристрій релейного захисту високовольтних ліній електропередач / Николайчук Я.М., Возна Н.Я., Люра О.П., Островка І.І., Сабадаш І.І. №u201505713; заявл.09.06.2015; опубл.12.01.2016, Бюл. №1/2016.

Вимірювання Інтенсивності Хмарності на Основі Ознак Розподіленої Кумулятивної Гістограми

Р. А. Мельник

кафедра програмного забезпечення
національний університет «Львівська політехніка»
Львів, Україна
ramelnyk@polynet.lviv.ua

Ю. В. Гаврилко

кафедра програмного забезпечення
національний університет «Львівська політехніка»
Львів, Україна
yurii.havrylko@gmail.com

Cloudiness Intensity Measurement by Distributed Cumulative Histogram Features

R. A. Melnyk

Software Department
Lviv Polytechnic National University
Lviv, Ukraine
ramelnyk@polynet.lviv.ua

Yu. V. Havrylko,

Software Department
Lviv Polytechnic National University
Lviv, Ukraine
yurii.havrylko@gmail.com

Анотація—Представлено алгоритм розрахунку інтенсивності хмарності із зображень супутникових карт. Виділені хмари використовуються для побудови зображень розподілених кумулятивних гістограм. Розроблено програмне забезпечення для вимірювання інтенсивності хмар..

Abstract—In this paper an algorithm for cloudiness intensity calculation from satellite map images is considered. The extracted clouds are being used for distribute cumulative histogram images. The software to measure cloud intensity was developed.

Ключові слова—статистичні ознаки; середня інтенсивність, розподілена кумулятивна гістограма.

Keywords—statistical features, mean intensity, distributed cumulative histogram.

I. INTRODUCTION

Determination of the cloudiness features requires fast algorithms of image segmentation. Nowadays, there are a great number of publications on methods for image segmentation. The paper [1] proposes multilevel image thresholding for image segmentation using several recently presented P-metaheuristic algorithms, including whale optimization algorithm, grey wolf optimizer, teaching-learning-based optimization algorithm and some others.

The paper [2] proposes a method by using cluster organization from the histogram of an image. A new similarity measure proposed is based on inter-class variance of the clusters to be merged and the intra-class variance of the new merged cluster.

A new method of multilevel thresholding for image segmentation using Grey Wolf Optimizer (GWO) is proposed [3]. This metaheuristic algorithm is applied to multilevel thresholding problem using Kapur's entropy and Otsu's between class variance functions.

In this paper we present very fast and simple algorithm. It needs to calculate the image distributed cumulative histogram for extracted cloudiness images

II. CLOUDINESS INTENSITY MEASUREMENT

A simple method for measurement of cloudiness intensity is based on a formula to calculate a mean value of pixel intensity in columns and rows of the image pixels matrix:

$$m_j = 1/H \left\{ \sum_{i=1}^H b_{i,j} \right\}, j = 1, 2, \dots, H, \quad (1)$$

$$m_i = 1/W \left\{ \sum_{j=1}^W b_{i,j} \right\}, i = 1, 2, \dots, W, \quad (2)$$

where $b_{i,j}$ is pixel intensity in i -row and j -column ($1 \leq i \leq H$, $1 \leq j \leq W$), W and H represent the number of columns and the number of rows respectively.

Simultaneously we formulate the distributed cumulative matrix as sets of cumulative histograms of all original image matrix rows or columns. For them we have the following formulas of two matrixes:

$$h_{i,j} = \sum_{k=1}^j f_{i,k}, i = 1, \dots, W, j = 1, \dots, H \quad (3)$$

$$h_{ij} = \sum_{k=1}^i f_{k,j}, i = 1, \dots, W, j = 1, \dots, H \quad (4)$$

where $f_{i,k}$, $f_{k,j}$ are pixel frequencies in row and column.

The matrixes in (3, 4) we present by images in which every pixel has intensity proportionally to the values of the matrix element h_{ij} .

In Fig. 1a the satellite map image is presented. Corresponding distributed histogram image related to the matrix (3) or (4) is given in Fig. 1b. It is called as a view from OY axis.

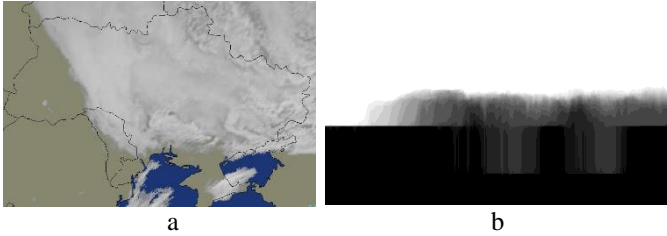


FIG. 1. Satellite map image (a) and its distributed cumulative histogram (b)

Applying the formula (1) to the images in Fig. 1 we obtain the mean intensity values in columns of the image matrixes (Fig. 2).

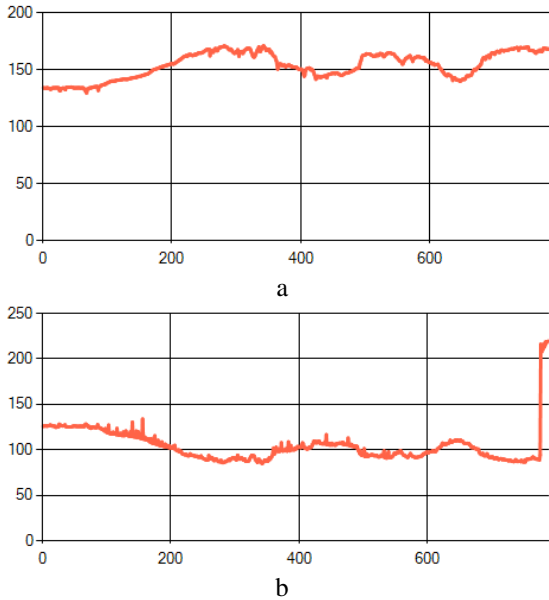


FIG. 2. Mean of pixel intensity in columns for original satellite map image (a) and of its distributed cumulative histogram image (b).

A variance of presented plots is small enough and it is practically difficult to measure cloudiness in different zones of the map. So we transform the satellite map image by the algorithm with following steps: cutting cloudiness on the neighboring territories, segmenting seas, segmenting all territories besides cloudiness. In Fig. 3a the segmented satellite map image is presented. Corresponding distributed histogram image related to the matrix (3) or (4) is given in Fig. 3b. It is a view from OY axis.

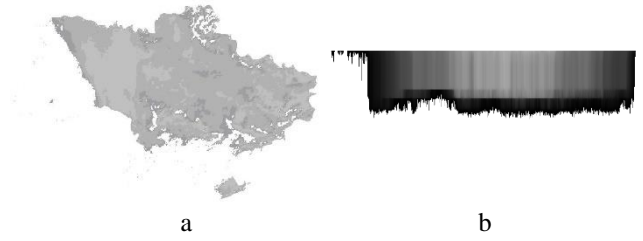


FIG. 3. Segmented satellite map image (a) and its distributed cumulative histogram (b).

Applying the formula (1) to the images in Fig. 3 we obtain the mean intensity values in columns of the image matrixes (Fig.4).

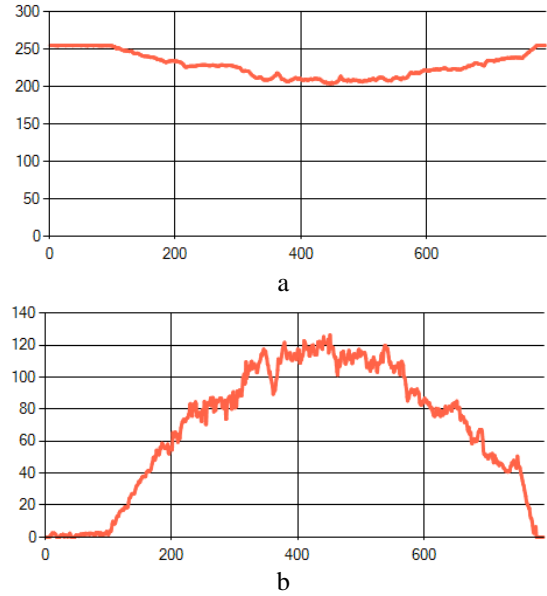


FIG. 4. Mean of pixel intensity in columns for segmented satellite map image (a) and of its distributed cumulative histogram image (b).

The last plot in Fig. 4b definitely illustrates different zones of cloudiness: big, middle and small. This measurement of cloudiness is made only for one direction: from south to north. To get full information about cloudiness in all directions we propose to use the developed computer cloudiness meter.

III. CLOUDINESS INTENSITY MEASUREMENT BY ROTATING IMAGE

Histogram from Fig. 3 has different sizes and intensity. Our task is to measure these properties. Moreover we want to get similar information from different points of viewing. Depending on viewing angle distributed histograms of one map image demonstrate different cloudiness for different coordinates being in a sum as a constant value. Then we can compare cloudiness features got from different rotation angles and to determine directions of the greatest cloudiness intensity. So we organize so-called cloudiness meter. But instead of moving a camera around the image (Fig. 5) we rotate the sample image inside the circle.

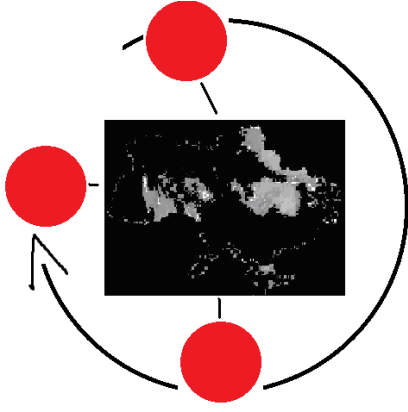


FIG. 5. Scanning the sample image to get cumulative histograms.

The calculation and processing begins with the selection and loading of the image to be analyzed. The value of the RGB image components is averaged, so the pixel component value $R'G'B'$ is calculated by the formula:

$$R'_{ij} = G'_{ij} = B'_{ij} = \frac{R_{ij} + G_{ij} + B_{ij}}{3}, \quad i = \overline{1, B}, \quad j = \overline{1, A} \quad (5)$$

where $R'_{ij}, G'_{ij}, B'_{ij}$ are the color component values of the new image pixels, A, B are the width and height of the original image.

The user has the opportunity to specify the parameters of the processing process, including its mode, the number of rows or columns taken into account for each histogram, the size of the image and the angle of its rotation.

Rotation of the original image is carried out by applying combinations of affine transformations and changing the size of the canvas image. The rotation is automatically applied to displaying the original image in the program window.

Dimensions of a new canvas for an image after a turn can be determined using the formulas:

$$d = \sqrt{A^2 + B^2},$$

$$\alpha = \begin{cases} \operatorname{asin}\left(\frac{A}{d}\right), & |\theta| > \frac{\pi}{2}, \\ \operatorname{asin}\left(\frac{B}{d}\right), & |\theta| \leq \frac{\pi}{2}, \end{cases}$$

$$\beta = \begin{cases} \theta \bmod \frac{\pi}{2}, & |\theta| > \frac{\pi}{2}, \\ \theta, & |\theta| \leq \frac{\pi}{2}, \end{cases}$$

$$A' = \sin\left(|\beta| + \frac{\pi}{2} - \alpha\right) * d,$$

$$B' = \sin(\alpha + |\beta|) * d, \quad (6)$$

where d is the diagonal length of the original image, α is the angle between the diagonal and the base of the original image,

θ is the angle of image rotation, A', B' are the width and height of the canvas of the image turned.

All previous formulas are realized in software allowing rotating the map image to build the distributed cumulative histograms (example in Fig. 6).

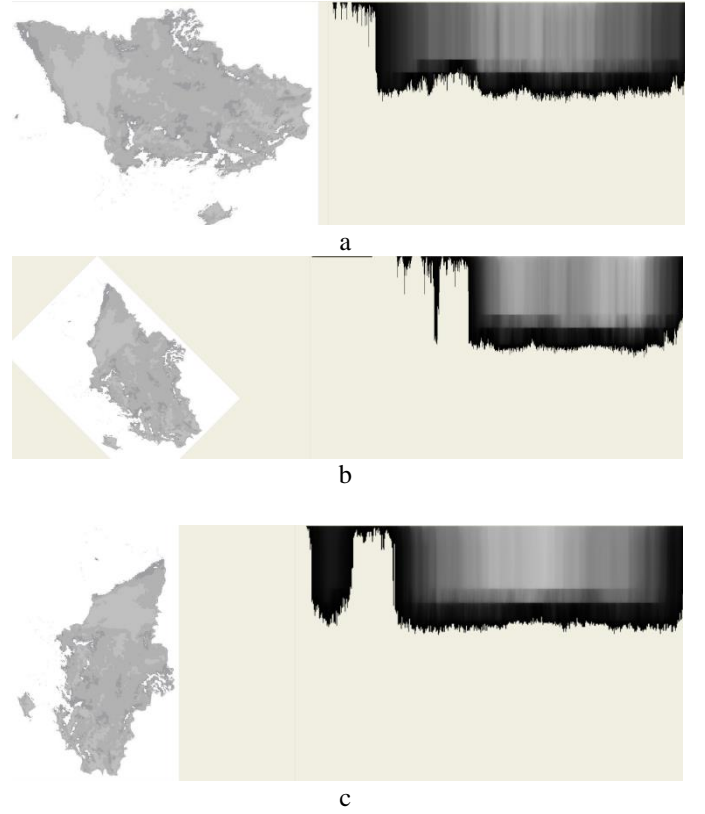


FIG. 6. Examples of the image positions to scan them from OX plane by different angles: a - 0, b - 45 and c - 90 degrees.

For every position of rotating image we calculate the function (1) and a square under the plot using formula (7).

$$S_i = \int_a^b f(x) dx \approx h \left(\sum_{j=1}^{n-1} f(x_j) + \frac{f(a) + f(b)}{2} \right), \quad h = \frac{b-a}{n} \quad (7)$$

where S is a square under plot with i degrees, $f(x)$ is result from formula (1), a, b is a interval.

Rotating the image from 0 to 90 degrees we obtain the cloudiness distribution by the angle of observation (example in Fig.7).

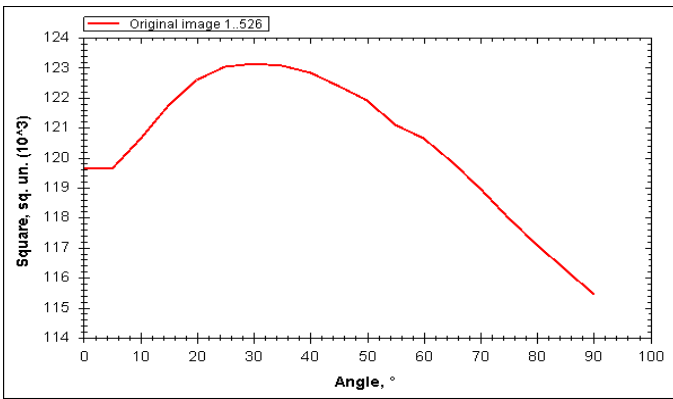


FIG. 7. Pixel intensity for distributed cumulative histogram images for t observation angles from 0 to 90 degrees.

IV. SOFTWARE TO MEASURE CLOUDINESS INTENSITY

To process the satellite map image the application under the Windows operation system was developed. The program has three software tabs: first for loading of image, illustration of distributed cumulative histogram, managements of viewing type, changing of threshold value (Fig. 8); second for intensity mean of original and histogram images illustration (Fig.9); third for results of intensity measurement in different directions (Fig.10).

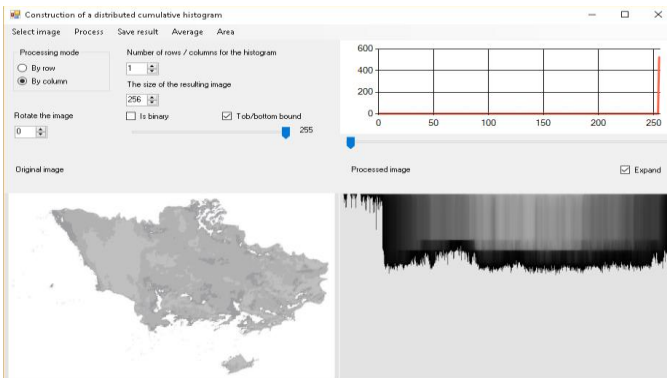


FIG. 8. Main application tab.

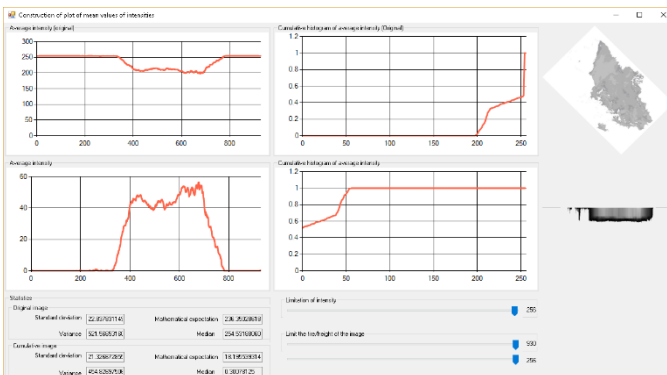


FIG. 9. Application tab of results.

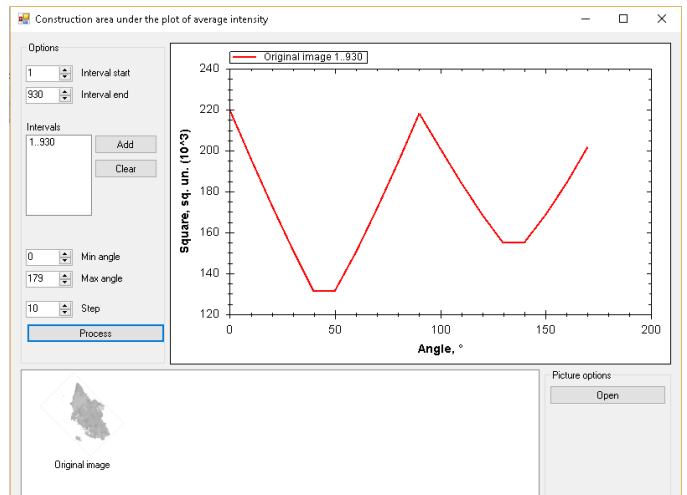


FIG. 10. Application tab of intensity by observation angle.

CONCLUSION

The statistical features of image and its distributed cumulative histogram were calculated to measure the cloudiness intensity on the satellite map images. All proposed algorithms were realized in the software application.

REFERENCES

- [1] S. J. Mousavirad, H. E. Komleh, "Multilevel image thresholding using entropy of histogram and recently developed population-based metaheuristic algorithms", *Evolutionary Intelligence*, vol.10, issue 1–2, pp. 45–75, (2017).
- [2] A. Z. Arifin, A. Asano, "Image segmentation by histogram thresholding using hierarchical cluster analysis", *Pattern Recognition Letters*, vol. 27, pp. 1515–1521, (2006).
- [3] A. K. Md. Khairuzzaman, S. Chaudhury, "Multilevel thresholding using grey wolf optimizer for image segmentation", *Expert Systems with Applications*, vol. 86, 15, pp.64–76, (2017).
- [4] U. Ramer, "An iterative procedure for the polygonal approximation of plane curves", *Computer Graphics and Image Processing*, vol. 1(3), pp.244–256, (1972).
- [5] D. Douglas, T. Peucker, "Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature", *The Canadian Cartographer*, vol.10(2), pp.112–122, (1973).
- [6] Infrared satellite images of Europe, Clouds in Europe at night and in the evening. Weather Europe, Satellite Weather Europe, Rain in Europe - SAT24.com [Online]. – Web Access: <https://es.sat24.com/en>(2018)

Перспективні Топології Систем Управління Реального Часу на Базі Технологій Віртуалізації

Микола Николайчук

кафедра Інформаційно-телекомунікаційних
технологій та систем
Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу
м.Івано-Франківськ, Україна
nmj_2010@ukr.net

Леонід Заміховський

кафедра Інформаційно-телекомунікаційних
технологій та систем
Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу
м.Івано-Франківськ, Україна
leozam@ukr.net

Perspective Topologies of Real-Time Control Systems Based on Virtualization Technologies

Mykola Nykolajchuk

Department of Information and Telecommunication
Technologies and Systems
Ivano-Frankivsk National Technical University
of Oil and Gas
Ivano-Frankivsk, Ukraine
nmj_2010@ukr.net

Leonid Zamikhovsky

Department of Information and Telecommunication
Technologies and Systems
Ivano-Frankivsk National Technical University
of Oil and Gas
Ivano-Frankivsk, Ukraine
leozam@ukr.net

Анотація—В роботі подано результати аналізу, дослідно-конструкторських робіт та тестування перспективних топологій систем управління технологічними об'єктами з розширенням реального часу на базі технологій віртуалізації. Реалізовано клієнт-серверні топології систем управління на базі програмного програмованого логічного контролера реального часу для оптимізації апаратно-програмних засобів розподілених Web-орієнтованих систем управління. Для розширення функціональних можливостей систем управління в напрямку резервування і оптимізації обслуговування застосовано сучасні технології віртуалізації серверів. Виконано тестування компонентів систем управління на базі запропонованих топологій.

Abstract—The paper presents the results of analysis, research and development and testing of perspective topologies of control systems of technological objects with real-time extended on the basis of virtualization technologies. Client-server topologies of control systems are implemented on the basis of software programmable logic controller of real time for optimization of hardware-software of distributed Web-oriented control systems. Modern functional server virtualization technologies are used to extended the functionality of control systems in the direction of redundancy and optimization of service. Testing of components of control systems on the basis of the proposed topologies is performed.

Ключові слова: топології систем управління; Web-орієнтовані системи управління; програмний PLC; SCADA; розширення реального часу; технології віртуалізації

Keywords—topologies of control systems; Web-oriented control systems; software PLC; SCADA; real-time extended; virtualization technologies

I. ВСТУП

Задачі розробки, реалізації і експлуатації сучасних розподілених Web-орієнтованих систем управління технологічними об'єктами тісно пов'язані з такими напрямками розвитку інформаційних технологій, як проектування і дослідження нових ефективних топологій систем управління, створення уніфікованих апаратно-програмних засобів систем управління на базі апаратних і програмних PLC (Programmable Logic Controller), створення комунікаційних середовищ промислового зв'язку з різномірними сегментами і міжмережевими переходами, інтеграція розширення реального часу для операційних систем, віртуалізація компонентів систем управління.

II. АНАЛІЗ ТОПОЛОГІЙ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

Приклад повністю інтегрованої топології автоматизованих систем управління ТІА (Totally Intergration Automation) Simatic PCS7 «Siemens» наведено на рис. 1 [1].

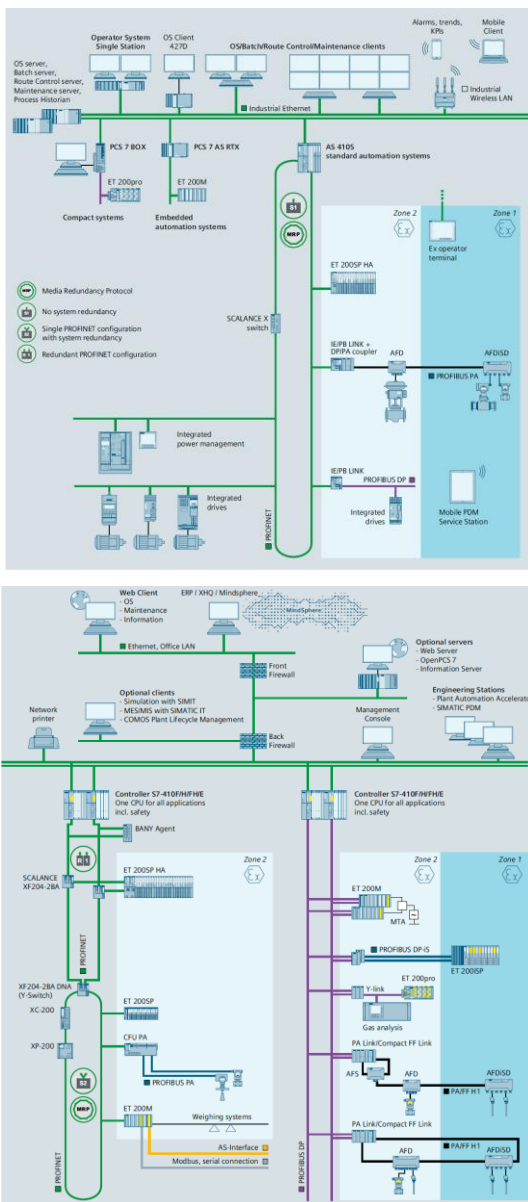


Рис. 1. Повністю інтегрована топологія автоматизованих систем управління ТІА (Totally Intergation Automation) Simatic PCS7 «Siemens»

Топологія включає нижній рівень систем управління на рівні сенсорів і виконавчих пристроїв, що об'єднані через польові шини (AS-interface, Profibus-PA, Modbus, Foundation FieldBus) станціями децентралізованої периферії (ET 200) та модулями міжмережних переходів (IE/PB Link, DP/PA Couple, PA/Compact FF Link).

Середній рівень сучасних систем управління реалізується на базі PLC Simatic S7 і станцій розподіленого вводу/виводу (в тому числі резервованих пар S7-410F/H/FH/E і ET 200SP HA з функціями протиаварійного захисту). На середньому рівні комунікація організовується через промислові шини Profibus-DP та PROFINET [2]. Крім того, на середньому рівні інтегруються компоненти контролю енергетичних параметрів (Integrated Power

Management) і частотного управління електроприводом (Integrated Drives).

Верхній рівень систем управління включає системні операторські станції (Operator System Station) на базі SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) з функціями візуалізації, архівування, сигналізацій, підтримки комунікацій та адміністрування. На верхньому рівні реалізуються також Web-орієнтовані клієнт-серверні сервіси на основі локальних та глобальних Internet-комунікацій [3].

Організація та реалізація комунікаційного середовища на основі Web-технологій дозволяє об'єднати територіально розподілені об'єкти управління за допомогою засобів відкритої комунікації (Open TCP/IP) [4], що, в свою чергу, розширює функціональність та підвищує оперативність процесів контролю та управління.

Досвід експлуатації розподілених систем управління вказує на необхідність всебічного аналізу та дослідження окремих компонентів та інформаційних процесів в таких системах при використанні різних способів доступу до глобальної мережі Internet з боку клієнтських та серверних терміналів [5].

III. ПРОБЛЕМАТИКА ПРОЕКТУВАННЯ WEB-ОРІЄНТОВАНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

Аналіз вищенаведених топологій систем управління вказує на необхідність їх удосконалення і розширення функціональності (особливо в напрямку, коли йде мова про дороговартісне апаратне і програмне резервування, а також серверне забезпечення).

На основі проведеного аналізу і дослідно-конструкторських робіт пропонуються два основні напрямки вирішення задач уніфікації, оптимізації і розширення функціональності апаратно-програмних засобів систем управління:

- застосування програмних PLC, що функціонують на базі OS (Operatig Systems) з розширенням реального часу RTX (Real Time Extended);
- віртуалізація компонентів систем управління і серверів на базі сучасних технологій апаратної і програмної віртуалізації.

IV. ТЕХНОЛОГІЇ ІНТЕГРАЦІЇ РОЗШИРЕННЯ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ В СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

До основних компонентів систем керування реального часу відносяться:

- OS з розширенням реального часу;
- програмні PLC реального часу (Soft PLC RTX);
- SCADA-системи;
- комунікаційне обладнання для забезпечення режимів реального часу.

Розширення реального часу (спеціальне програмне забезпечення) модифікує ядро OS і забезпечує детерміновані інтервали часу обробки запитів. В системах керування технологічними процесами реального часу найбільш поширеними є RTX для OS MS Windows.

Розширення IntervalZero RTX корпорації «IntervalZero, Inc.» - програмний пакет, призначений для інтеграції функціональності реального часу в системи під управлінням OS MS Windows [6]. Програмний продукт

IntervalZero RTX був з успіхом випробуваний в тисячах різних автоматизованих системах управління, роботах та інш. Це дозволило добитися підвищення їх експлуатаційної ефективності, розширення функціональних можливостей, збільшення ступеня масштабованості і надійності функціонування при одночасному скороченні термінів та вартості розробки нової продукції.

Розширення RTX IntervalZero спочатку розроблялося саме як розширення (доповнення) MS Windows, що забезпечувало режими реального часу, а не як операційна система реального часу, перенесена в середовище MS Windows. Воно надає широкі можливості з управління перериваннями IRQ, пристроями вводу/виводу, оперативною пам'яттю і гарантує надійне виконання задач з визначеним пріоритетом.

Розширення RTX підтримує режим «симетричної мультипроцесорності» SMP (Symmetric Multiprocessing) і дозволяє в багатоядерних і багатопроцесорних системах виділяти під завдання RTX до 31-го процесорного ядра. Крім цього, доступний також і режим поділу процесорних ресурсів між MS Windows і RTX.

RTX IntervalZero є справжнім розширенням OS без інкапсуляції MS Windows і будь-якої взаємодії з інфраструктурою для MS Windows (рис. 2) [7].

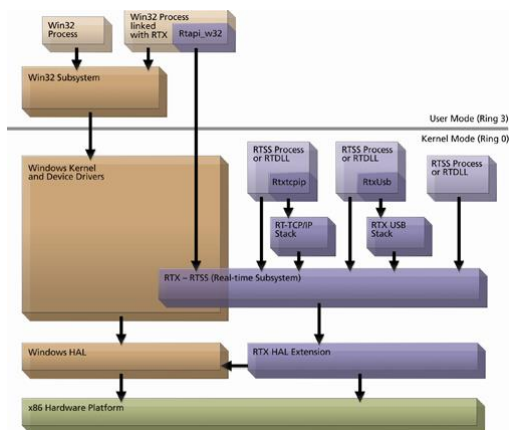


Рис. 2. Архітектура розширення реального часу RTX для MS Windows

Завдяки подібному поділу, додатки підсистеми реального часу RTX будуть виконуватися навіть при повному збої для операційної системи.

Як показано на рис. 2, в складі розширення RTX присутні компоненти, що забезпечують для додатків підсистеми реального часу RTSS (Real-Time Subsystem), комунікаційну мережу реального часу і роботу в реальному часі з пристроями USB. Це стек протоколів RT-TCP/IP і стек RTX USB. Мережевий стек забезпечує роботу всіх мережевих протоколів і фізичного рівня системи управління в детермінованому режимі.

Також, RTX дозволяє виділяти до 31-го процесорного ядра тільки для виконання завдань реального часу. Також RTX працює і на однопоточних конфігураціях (для них доступний лише режим поділу ресурсів процесора). Кількість використовуваних ядер параметрується розробником. Крім того, розробник може управляти завантаженням і розподілом завдань по окремих ядрах.

Управління додатками RTX здійснюється на основі схеми з 128-ма рівнями пріоритетів потоків. При цьому час запуску потоку обслуговування переривання не перевищує 10 мкс (на окремих платформах менше 1 мкс).

Розширення RTX IntervalZero лежить в основі нового підходу до проектування систем управління реального часу, що отримав назву Soft-Control Architecture (архітектура програмного управління).

Soft-Control Architecture дозволяє виробникам відмовитися від застосування спеціалізованих неуніфікованих апаратних засобів на основі PLC або додаткових пристроїв управління на користь програмних PLC. Використання сучасних обчислювальних платформ разом з RTX - економічне і багатофункціональне рішення для побудови систем реального часу на базі MS Windows.

V. ТЕХНОЛОГІЇ ВІРТУАЛІЗАЦІЇ КОМПОНЕНТІВ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

Віртуалізація є технологією для емуляції апаратних засобів, пам'яті, мережевих компонентів і розгортання операційних систем на серверах, що поступово, все ширше застосовується в системах управління технологічними об'єктами і промислової автоматики. Крім того, застосування технологій віртуалізації позитивно впливає на рівень IT-безпеки промислового обладнання і систем управління в цілому.

На рис. 3 наведено топологію розподіленої системи управління з віртуалізованими компонентами на клієнтському і серверному рівнях [8].

При цьому організовується спеціальний рівень віртуалізації між апаратною частиною сервера і операційними системами, так званий гіпервізор. В результаті, реалізується декілька віртуальних машин VM (Virtual Machines), ізольованих одна від одної, з власними віртуальними апаратними компонентами та їх власними операційними системами на фізичному комп'ютері (Host-System) (рис. 4).

Задачами гіпервізора є відповідно:

- організація рівня віртуалізації, на якому запускаються віртуальні машини;
- керування розподілом апаратних ресурсів серверів для віртуальних машин та їх виконанням.

Таким чином, при розробці топологій Web-орієнтованих систем управління необхідно вирішувати наступні задачі:

- створення функціональних схем і визначення параметрів системи управління;
- підбір перетворювачів фізичних величин і виконавчих пристроїв системи;
- конфігурування і параметрування апаратних засобів на основі PLC і промислових мереж;
- розробки управляючих програм для PLC на мовах стандарту IEC 61131-3 (переважно FBD – Functional Block Diagram);
- параметрування уніфікованих комунікаційних функціональних програмних блоків відкритої (Open TCP/IP) комунікації;
- параметрування GSM-маршрутизаторів і протоколів мобільного зв'язку;

- налагодження і тестування окремих компонентів і системи в цілому.

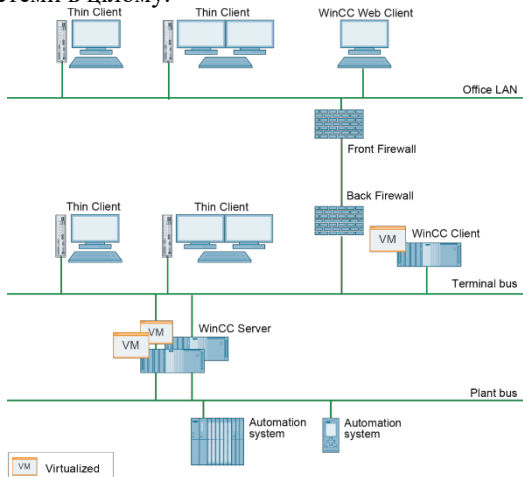


Рис. 3. Топологія розподіленої системи управління з віртуалізованими компонентами

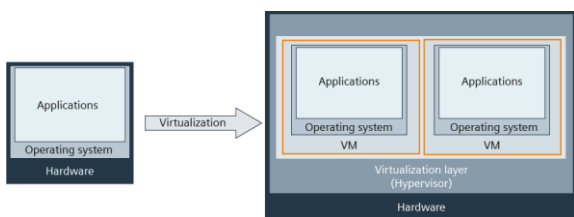


Рис. 4. Реалізація ізольованих віртуальних машин VM з віртуальними апаратними компонентами та окремими операційними системами

Враховуючи вищенаведене, при проведенні дослідно-конструкторських робіт з побудови розподілених Web-орієнтованих систем управління значна увага повинна приділятися саме особливостям і способам організації комунікаційного середовища.

VI. РЕЗУЛЬТАТИ ТЕСТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ РІШЕНЬ

На рис. 5 наведено результат реалізації програмного PLC (WinAC RTX) [9] в програмному середовищі TIA Portal [10] на віртуальній машині VMware Workstation.

На рис. 6 наведено результат функціонування розробленої клієнт-серверної Web-орієнтованої системи управління насосною станцією на базі запропонованих рішень в режимі «on-line» [11].

В результаті виконаних дослідно-конструкторських робіт розроблено і впроваджено на промислових об'єктах комбіновану топологію на базі запропонованих рішень з програмними PLC, що функціонують на віртуальних машинах сервера і дозволяють розширити функціональність за рахунок розпаралелювання доступної кількості конекцій (Open TCP/IP) окремих програмних PLC, а також резервування верхніх рівнів систем управління технологічними об'єктами на базі серверних

SCADA.

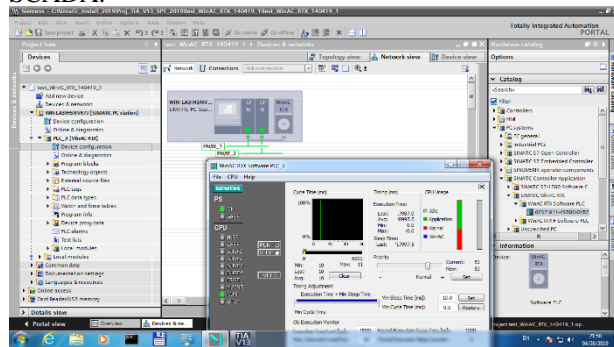


Рис. 5. Реалізація програмного PLC WinAC RTX «Siemens» на віртуальній машині VMware Workstation

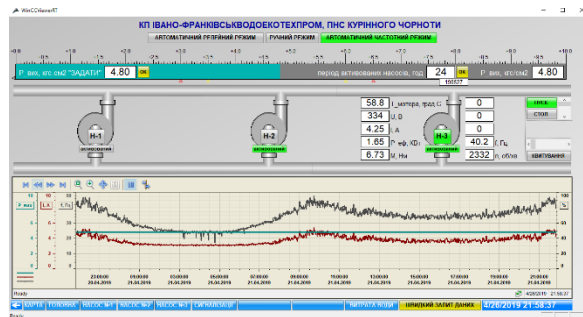


Рис. 6. Клієнт-серверна Web-орієнтована система управління насосною станцією в режимі «on-line»

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] SIMATIC PCS 7. Process Control System. Volume 1: System components. Catalog ST PCS 7: Siemens AG (Article no. E86060-K4678-A111-C5-7600). – November 2017. – 618 p.
- [2] SIMATIC NET. Industrial Ethernet / PROFIBUS IE/PB LINK PN IO. Operating Instructions: Siemens (C79000-G8976-C393-02). – 11/2017. – 92 p.
- [3] Концептуальні технічні рішення та архітектура побудови АСК ТП - [Текст] К.: ПАТ «Укртрансгаз» - 2014. – 67 с.
- [4] Open User Communication with TSEND_C and TRCV_C. Simatic S7-1200 CPU (V1.0, Item ID: 67196808). SIEMENS: – FAQ. - January – 2013 – 22 p.
- [5] Николайчук М.Я. Организация і дослідження елементів комунікаційного середовища WEB-орієнтованих систем управління розподіленими технологічними об'єктами / М.Я.Николайчук // Методи та прилади контролю якості. - Івано-Франківськ: ІФНТУНГ 2014. - №2(33). - С. 133-138.
- [6] IntervalZero RTX Quick Start Guide (Document Number DOC-RTX-912-010). IntervalZero, June 2010. – 28 p.
- [7] Hard Real-Time with IntervalZero RTX® on the Windows® Platform (DOC-RTX-004). IntervalZero, January 2010. – 19 p.
- [8] PCS 7 Virtualization - Project Engineering and Configuration. SIMATIC PCS 7 V9.0: Siemens AG (Entry-ID: 109753671). – 02/2018 Subject to change. – 59 p.
- [9] Windows Automation Center RTX WinAC RTX (F) 2010. Operating Instructions (A5E00486536-04). – Siemens, 07/2010 – 296p.
- [10] SIMATIC. WinCC Professional V14 SP1 - Options. System Manual: Siemens. – 03/2017. – 402 p.
- [11] Заміховський Л.М., Николайчук М.Я., Левицький І.Т. Автоматизована система частотного керування насосними агрегатами з функціями диспетчеризації. Інтелектуальний продукт вчених, винахідників і раціоналізаторів Прикарпаття. Щорічний каталог найвагоміших винаходів, корисних моделей, промислових зразків і раціоналізаторських пропозицій. Довід. вид. Редакційна колегія: Б.І.Середюк, Ж.П.Табанець, Л.М.Шляхтич, Л.Б.Бабій – Івано-Франківськ, 2017. - С. 77-81.

Інформаційно-Вимірювальна Система Визначення Числа Воббе

Ігор Петришин
ДП «Івано-Франківськ
стандартметрологія»
Івано-Франківськ, Україна
petryshyn48@gmail.com

Олександр Бас
ДП «Івано-Франківськ
стандартметрологія»
Івано-Франківськ, Україна
alexandr.sanya@gmail.com

Людмила Присяжнюк
ДП «Івано-Франківськ
стандартметрологія»
Івано-Франківськ, Україна
l-st@ukr.net

Information-Measuring System Determination of Wobbe Number

Igor Petryshyn
State Enterprise "Ivano-Frankivsk
Standard Metrology"
Ivano-Frankivsk, Ukraine
petryshyn48@gmail.com

Alexander Bas
State Enterprise "Ivano-Frankivsk
Standard Metrology"
Ivano-Frankivsk, Ukraine
alexandr.sanya@gmail.com

Lyudmila Prysyazhnyuk
State Enterprise "Ivano-Frankivsk
Standard Metrology"
Ivano-Frankivsk, Ukraine
l-st@ukr.net

Анотація— Для запровадження оперативного визначення числа Воббе природного газу, під яким слід розуміти всю номенклатуру паливних газів, запропоновано здійснювати послідовне вимірювання густини досліджуваного газу із застосуванням газового резонатора та теплоти згоряння з допомогою газового калориметра прямої дії. Для визначення числа Воббе описана математична процедура здійснення необхідних обчислень стосовно визначення густини газу, густини повітря та теплоти згоряння газу. Також, на основі компоновання вимірювальних каналів, розроблена інформаційно-вимірювальна система визначення числа Воббе із застосуванням обчислювача на базі мікроконтролера. Описаний принцип роботи складових елементів розробленої системи.

Abstract— To introduce the operational determination of the Wobbe number of natural gas, which should be understood as the entire range of fuel gases, it was proposed to carry out sequential measurements of the density of the gas under investigation using a gas resonator and heat of combustion using a direct-acting gas calorimeter. To determine the Wobbe index, a mathematical procedure is described to make the necessary calculations to determine the density of a gas, the density of air, and the heat of combustion of a gas. Also, based on the layout of the measuring channels, an information-measuring system for determining the Wobbe number using a microcontroller-based calculator was developed. The described principle of operation of the constituent elements of the developed system. In particular, a gas calorimeter is shown using sensors measuring the temperature of flue gases and residual oxygen content, which, in combination with a sensor measuring the pressure drop between the combustion chamber

and the flue duct, determine the mode of stoichiometric combustion of the gas-air mixture. In addition, the monitoring of impressions of these sensors is a feedback for regulating the amount of air to ensure stable stoichiometric combustion in the column. It also describes the principle of operation of a gas resonator for measuring gas density, it is shown that gas density measurements are carried out using the phenomenon of gas resonance in a closed vessel of a certain volume, which is perpendicular to the direction of gas flow. That is, the principle of a density meter is based on the occurrence of a resonant oscillation of a gas mass with an unknown frequency value, which depends on the geometric parameters of the capacitance, which is filled with gas.

Ключові слова— Число Воббе, густиномір, калориметр, природний газ.

Keywords— Wobbe number, density meter, calorimeter, natural gas.

I. ВСТУП

Основними показниками якості природного газу, поряд із теплоотою згоряння, вмістом та концентрацією його складових, є число Воббе, яке є одним із комплексних показників, оскільки визначається з врахуванням аналітичної залежності, які пов'язує два окремі показники: теплоту згоряння газу та його відносну густину. Крім того, число Воббе є критерієм подібності газів та визначає їхню можливість взаємозамінності і фактично характеризує постійність та стабільність теплової енергії, яка надходить від газу в результаті його спалювання і є показником для

визначення коефіцієнту корисної дії газоспоживачого обладнання. Тобто, гази з однаковим показником числа Воббе за умови рівнозначного надлишкового тиску зазвичай можуть замінюватись один одним без додаткової заміни або регулювання пальників чи газових форсунок. Крім того, слід відзначити, що європейськими нормативними документами встановлюється класифікація різних типів паливних газів по відношенню числа Воббе [1], при цьому виділяється дві основні групи газів, які постачаються споживачам і позначаються H та L, кожна з яких має свої нормовані параметри.

II. МЕТА

Таким чином, актуальною задачею з прикладним застосуванням є забезпечення можливості визначення та послідовного регулювання числа Воббе для природного газу. Слід зазначити, що під природним газом розуміється вся номенклатура паливних газів, в тому числі: піролізний, доменний, коксовий, попутний нафтовий та газове моторне паливо, для яких питання ефективного спалювання особливо актуальне, оскільки їх режим горіння прямо пропорційно впливає на технологічні процеси, пов'язані з виготовленням продукції, та, відповідно, забезпечення її кількісних та якісних параметрів.

III. ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Визначення числа Воббе для природного газу проводиться за наступною залежністю [2]:

$$W = \frac{H}{\sqrt{d}} \quad (1)$$

де H – об'ємна теплота згоряння природного газу, Дж/м³;

d – відносна густина природного газу, яка визначається як співвідношення густини газу ρ_G до густини повітря ρ_A :

$$d = \frac{\rho_G}{\rho_A} \quad (2)$$

Тепер розглянемо детальніше можливість здійснення вимірювання кожного з показників, які є впливовими в формулах (1) та (2).

Для вимірювання теплоти згоряння природного газу авторами, на основі проведеного аналізу, рекомендований до застосування прямий метод, заснований на спалюванні газу безпосередньо в газовому калориметрі, оскільки хроматографічний (роздільний з точки зору компонентного складу природного газу) або опосередкований метод є недоцільним з міркувань точності та застосування для деяких газів, наприклад, піролізного або коксового. Застосування газового калориметра дасть можливість здійснити дослідження газу в комплексі, з врахуванням взаємодії горючих та негорючих компонентів, сірковмісних елементів та наявності вологи у газі при вимірюванні теплоти згоряння. З цією метою розроблений удосконалений газовий калориметр прямої дії шляхом

синтезу принципу прямого згоряння з додатковою функцією контролю параметра стехіометричного згоряння газової суміші шляхом вимірювання вмісту залишкового кисню в димових газах та їх температури.

Основними складовими елементами газового калориметра прямої дії є: калориметрична колонка згоряння із газовим пальником, термоізолюваний теплообмінник із теплоносієм з відомими фізико-хімічними параметрами і пристрій для визначення об'єму та об'ємної витрати природного газу, що надходить в газовий пальник. Крім того, в димохідній частині калориметра додатково встановлені датчик вимірювання температури димових газів та датчик вмісту залишкового кисню в димових газах (рис. 1). Із застосуванням даних датчиків та датчика вимірювання перепаду тиску між камерою спалювання газу та димохідною частиною здійснюється задання стабільного режиму горіння газоповітряної суміші досліджуваного газу. Таким чином підтримується стабільна температура під час проведення заміру, яка є одним із інформативних параметрів при виявленні залежності значення теплоти згоряння природного газу від температури його згоряння. А із допомогою оперативного контролю даних, отриманих від датчиків температури, перепаду тиску та залишкового кисню, здійснюється управління регулятором кількості повітря, чим забезпечується стабільне стехіометричне горіння газоповітряної суміші природного газу.

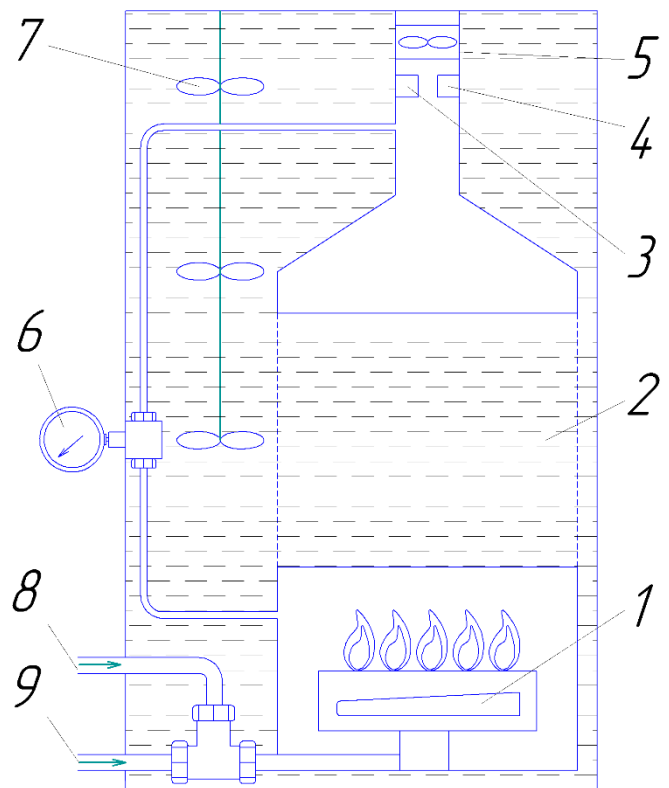


Рис. 1. – Схема газового калориметра

На рис. 1, 1 - газовий пальник; 2 – теплообмінник; 3 – датчик вмісту залишкового кисню в димових газах; 4 – датчик температури димових газів; 5 – регулятор кількості

димових газів; 6 – давач вимірювання перепаду тиску; 7 – механічний перемішувач рідини; 8 – регулятор кількості повітря; 9 – регулятор кількості природного газу

Формула визначення об'ємної теплоти згоряння досліджуваного газу H_G на основі приведення до стандартних умов має наступний вигляд [3]:

$$H_G = \frac{V_W \cdot c_W \cdot (T_{W2} - T_{W1})}{V_G \cdot \left(\frac{(P_A + P_G) \cdot T_A}{P_A \cdot T_G} \right)} \quad (3)$$

де V_W – об'єм рідини в теплообміннику калориметра, м³;
 c_W – теплоємність рідини, складає 4187 Дж/(кг·К);
 T_{W1}, T_{W2} – температура рідини на початку і в кінці заміру, К;

V_G – об'єм досліджуваного газу, який спалюється в калориметрі, м³;

P_G – надлишковий тиск досліджуваного газу, Па;

P_A – тиск навколишнього середовища, Па;

T_G – температура досліджуваного газу, К;

T_A – температура навколишнього середовища, К.

Для визначення густини навколишнього середовища (повітря) ρ_A скористаємось наступною відомою залежністю [4]:

$$\rho_A = \frac{0,0034848 \cdot P_A - 0,009 \cdot \varphi \cdot e^{0,061 \cdot (T_A - 273,15)}}{T_A} \quad (4)$$

де φ – вологість навколишнього середовища (повітря), %.

Останнім параметром, який необхідний для визначення числа Воббе, є густина досліджуваного газу. Також густина газу є показником для визначення масової витрати газу, яка, в свою чергу, є додатковим параметром контролю стехіометричного згоряння досліджуваного газу. За пропозицією авторів, вимірювання густини газу проводиться із застосуванням явища резонансу газового середовища в замкненій ємності визначеного об'єму, яка розташована перпендикулярно до напрямку руху потоку газу. Практичною реалізацією цього явища є резонатор Гельмгольца, принцип якого побудований на виникненні резонансного коливання маси газу з невідомим значенням частоти, яка залежить від геометричних параметрів ємності, яка заповнюється газом. На рис. 2 показана схема застосування акустичного газового резонатора. Слід відзначити, що запропонований спосіб визначення густини природного газу та розроблений газовий резонатор може бути змонтований безпосередньо на газопроводі та застосований в режимі потокового вимірювання густини газу.

При проведенні досліджень газового середовища в акустичному резонаторі проводять визначення частоти резонансних акустичних коливань f згідно наступної формули [5]:

$$f = \frac{v}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{A}{V \cdot L}}, \quad (5)$$

де v – швидкість розповсюдження акустичних коливань газового середовища, м/с, яка визначається за наступним співвідношенням:

$$v = \sqrt{n \frac{P_G}{\rho_G}}, \quad (6)$$

де n – показник політропи для багатоатомних газів;
 ρ_G – густина досліджуваного газу, кг/м³.

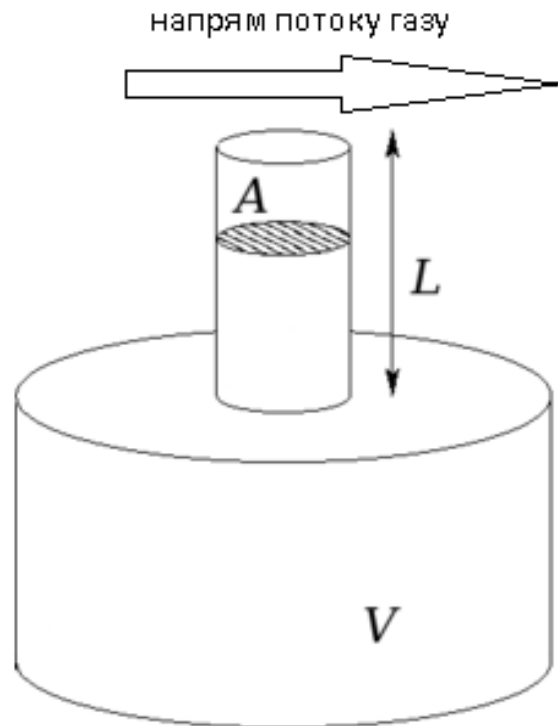


Рис. 2. Схема газового резонатора Гельмгольца для вимірювання густини газу. A – площа поперечного перерізу трубки, L – довжина трубки; V – об'єм ємності, яка заповнюється досліджуванним газом

Таким чином, після перетворення залежностей (5) та (6), отримаємо формулу для визначення густини досліджуваного газу за робочих умов. Для отримання значення густини газу за стандартних умов необхідно здійснити додаткові перетворення, аналогічно формулі (3) в частині приведення.

$$\rho_G = \frac{n \cdot P_G \cdot A}{4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot V \cdot L}, \quad (7)$$

Таким чином, визначення числа Воббе досліджуваного газу буде здійснюватись шляхом підстановки формул (2), (3), (4) та (7) в формулу (1).

Принцип роботи розробленої інформаційно-вимірювальної системи полягає в послідовному встановленні на діючому газопроводі газового резонатора для вимірювання густини досліджуваного газу та калориметра, в якому цей газ буде спалюватись.

IV. РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ ЧИСЛА ВОББЕ

Наступним етапом буде побудова інформаційно-вимірювальної системи визначення числа Воббе природного газу. З цієї метою необхідно оцінити всі впливові величини, які приймають участь у вимірюванні. На рис. 3 продемонстрована загальна модель розташування вимірювальних блоків інформаційно-вимірювальної системи та показано їхнє застосування в розрахунках необхідних величин, відповідно до формул (3), (4) та (7).

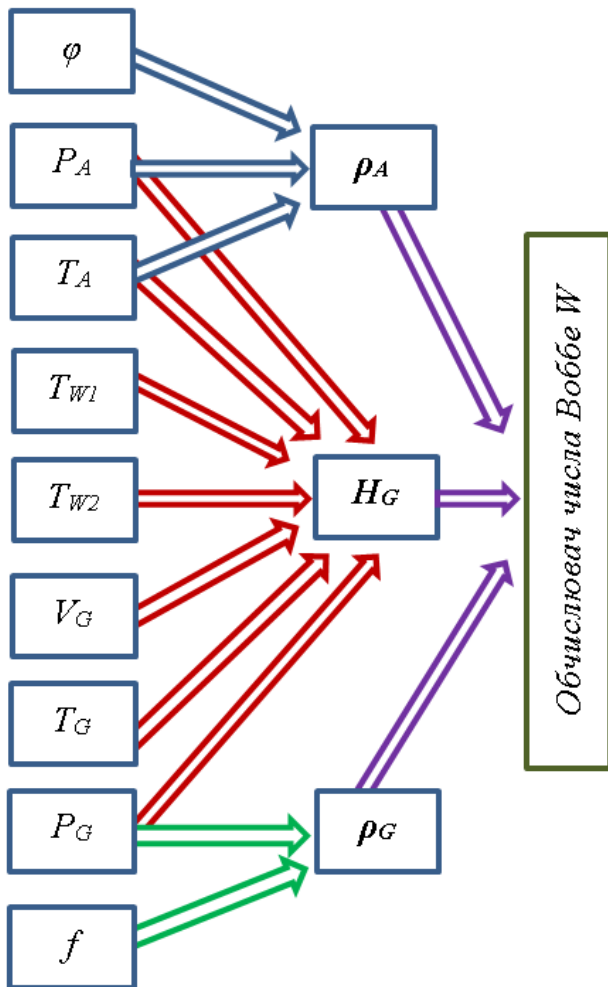


Рис. 3. Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи визначення числа Воббе

Безумовно, що кожен вимірювальний канал з допомогою якого здійснюється вимірювання фізичного параметру і який показаний на рис. 3 має свою індивідуальну структуру, яка включає і елементи фільтрації, за необхідності, і АЦП для перетворення вхідного аналогово сигналу та інші необхідні складові. Зауважимо, що найскладнішим з точки зору коректного та

достовірного проведення замірів і здійснення конструювання є канал вимірювання резонансної частоти газового середовища, оскільки, в даному випадку, можливий сторонній вплив шумів, який спотворюватиме дійсне значення.

Вимірювальний блок розробленої інформаційно-вимірювальної системи визначення числа Воббе представляє собою обчислювач на базі мікроконтролера, який виконує функції оброблення, передавання та представлення вимірювальної інформації. Крім того, мікроконтролер здійснюватиме управління необхідними виконавчими механізмами, які розташовані в газовому калориметрі для забезпечення стабільного значення стехіометричного згоряння досліджуваного газу та, відповідно, регулювання його кількості по відношенню до кількості необхідного повітря.

ВИСНОВКИ

Для здійснення оперативного визначення числа Воббе, яке є комплексним показником якості природного газу, авторами запропоновано проводити вимірювання теплоти згоряння природного газу із застосуванням калориметра газу прямої дії та газового резонатора для здійснення вимірювань густини газу. Для реалізації вказаної процедури розроблений удосконалений газовий калориметр прямої дії шляхом синтезу принципу прямого згоряння з додатковою функцією контролю параметра стехіометричного згоряння газової суміші шляхом вимірювання вмісту залишкового кисню в димових газах та їх температури. Також запропоновано застосування резонатор Гельмгольца, принцип якого побудований на виникненні резонансного колювання маси газу з невідомим значенням частоти для визначення густини газу в потоковому режимі. Розроблена узагальнена структурна схема інформаційно-вимірювальної системи визначення числа Воббе.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Test gases - Test pressures - Appliance categories: EN 437:2018.
- [2] Природний газ. Вимірювання властивостей. Теплота згоряння та число Воббе (ISO 15971:2008, IDT): ДСТУ ISO 15971:2014. – [Чинний від 2015-05-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2014. – 50с.
- [3] Природний газ. Обчислення теплоти згоряння, густини, відносної густини і числа Воббе на основі компонентного складу (ISO 6976:1995/Cor.2:1997, Cor.3:1999, IDT): ДСТУ ISO 6976:2009. – [Чинний від 2011-01-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2010. – 55с.
- [4] Умовне значення зважування в повітрі: ДСТУ OIML D28:2008 (OIML D28:2004, IDT). – [Чинний від 01-01-2010]. – К.: Держспоживстандарт України, 2010. – 13с.
- [5] Борьба с шумом и вибрацией в машиностроении, Алексеев С. П., Казаков А. М. и Колотило в Н. Н. М., «Машиностроение», 1970, 208 стр.

Методологія Контролю Параметрів Технологічного Процесу на Основі Образної- Кластерної Моделі

Igor Pitukh

кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Тернопільський національний економічний університет
Тернопіль, Україна
pirom75@ukr.net

Methodology for Controlling the Parameters of a Technological Process on the Basis of a Figurative- Cluster Model

Igor Pitukh

dept. of Specialized Computer Systems
Ternopil National Economic University
Ternopil, Ukraine
pirom75@ukr.net

Анотація—Викладені теоретичні засади методології побудови образно-кластерної моделі багатопараметричних об'єктів на основі запропонованого функціоналу оцінки стану об'єкту моніторингу. Проаналізовані структурні рішення комп'ютеризованих систем контролю параметрів технологічного процесу. Систематизовані функції інтерактивної взаємодії оператора - комп'ютеризованої системи. Представлена структура розпаралеленого алгоритму побудови та відображення на моніторі образно-кластерної моделі об'єкта.

Abstract—The theoretical principles of the methodology constructing a figurative-cluster model of multi-parameter objects on the basis of the proposed functional of the state of the monitoring object are described. Structural solutions of computerized control systems of technological process parameters are analyzed. Systemized functions of interactive interaction of the operator - the computerized system. The structure of the parallel algorithm for constructing and displaying the image-cluster object model on the monitor is presented.

Ключові слова—образно-кластерна модель; система контролю; інтерактивні комп'ютерні системи.

Keywords— *figurative cluster model; control system; interactive computer systems.*

I. ВСТУП

Актуальною проблемою розв'язання комплексу наукових задач пов'язаних з розвитком теорії

вдосконаленням методології та техніки побудови в інтерактивних комп'ютеризованих систем (ІРКС) є проблемно-орієнтована структуризація потоків даних та їх опрацювання програмно-апаратними засобами.

У зв'язку з наявністю широкого класу об'єктів управління, які характеризуються високим рівнем пожежної, вибухової та екологічної небезпеки особлива увага, при визначенні систем характеристик таких ІРКС, приділяється забезпеченню їх високої надійності, живучості властивостей удосконалення та адаптації до екстремальних умов експлуатації. При цьому в інформаційному середовищі такого класу комп'ютеризованих систем зростають вимоги до рівня функціональної діяльності операторів [1].

Основною класичної концепції є вимога, що інтерактивна система управління є багатометричним об'єктом і повинна проектуватись таким чином, щоб вона була здатна успішно і достатньо надійно виконувати свої функції не тільки в умовах режиму «норма», але насамперед, у невизначених квазістаціонарних та нестационарних екстремальних умовах перехідних, перед аварійних та аварійних режимах.

Запропонована розробка концепції теоретичних засад, методології та способу контролю параметрів технологічного процесу [2] на сонові образно-кластерної

моделі (ОКМ) дозволяють розширити функціональні можливості та підтримати інформативність процедур аналізу технологічних процесів контролем не тільки відхиленнь їх параметрів по амплітуді, але й відхиленнь статистичних значень: ковзного математичного сподівання, середньо-статистичної динаміки ковзної структурної кореляції, матриці нормованих коефіцієнтів взаємодкореляції між парами технологічних параметрів, логіко-статистичних інформаційних, спектральних, кластерних та ентропійних моделей.

II. КОНЦЕПЦІЯ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОГРАМНО-АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ ІНТЕРАКТИВНИХ ТА ДІАЛОГОВИХ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМ ТА СПОСІБ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

Відомий спосіб, який містить циклічний вимір значень кожного параметра і їхнє запам'ятовування, визначення стану технологічного процесу шляхом порівняння вимірюваних значень параметра в області можливих значень норми, ідентифікацію стану квазістаціонарного об'єкта, визначення структурної автокореляційної функції та нормованого коефіцієнта взаємодкореляції, за якими порівнюють:

- ковзні статистичні характеристики математичного сподівання, згідно виразів:

$$L_1 = \begin{cases} 0, a_1 < M_j < a_2 \\ 1, a_1 \geq M_j \geq a_2 \end{cases},$$

де $M_j = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i+j}^{n+j} x_{i+j}, i = 1, 2, \dots, I, n$ - число

контрольованих параметрів технологічного об'єкту;

- структурну кореляційну функцію, згідно виразу:

$$L_2 = \begin{cases} 0, b_1 < C_{xx}(j) < b_2 \\ 1, b_1 \geq C_{xx}(j) \geq b_2 \end{cases},$$

де $C_{xx}(j) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i+j}^{n+j} (x_i - x_{i-j})^2, j = \overline{0, m}$;

- коефіцієнти нормованої взаємодкореляції між двома параметрами, згідно виразу:

$$L_3 = \begin{cases} 0, 0 < \rho_{xy} < 1 \\ 1, 0 \geq \rho_{xy} \geq -1 \end{cases},$$

де $\rho_{xy} = \frac{R_{xy}(0)}{\sigma_x \cdot \sigma_y}, \sigma_x = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i+j}^{n+j} (x_i - M_{xj})^2,$

$\sigma_y = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i+j}^{n+j} (y_i - M_{yj})^2.$

Удосконалений спосіб контролю параметрів технологічного процесу має розширені функціональні можливості та більшу інформативність. Такий спосіб

включає циклічний вимір значень кожного параметра і їхнє запам'ятовування, визначення стану технологічного процесу шляхом порівняння вимірюваних значень параметра з граничними уставками, ідентифікацію стану квазістаціонарного об'єкта, визначення структурної автокореляційної функції та нормованого коефіцієнта взаємодкореляції, за якими порівнюють ковзні статистичні характеристики математичного сподівання, в якому визначають:

- вибіркові математичні сподівання;

- визначають зважені ковзні математичні сподівання параметрів, які дозволяють виконувати екстраполяцію та передбачення зміни станів технологічного процесу в часі;

- виконують порівняння амплітудних, динамічних, фазових та взаємодкореляційних характеристик технологічного процесу на основі побудови логіко-статистичних інформаційних моделей;

- виконують порівняння спектральних характеристик вимірюваних значень параметрів в області можливих значень норми, згідно виразів:

$$L_4 = \begin{cases} 0, S_1 < S_w < S_2 \\ 1, S_1 \geq S_w \geq S_2 \end{cases},$$

де $S_w = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \rho_{xx}(j) \cdot w_j \cdot e^{-a \cdot j}, W$ - кругова частота

косинусного перетворення Фур'є,

$\rho_{xx}(j) = \frac{R_{xx}(j)}{D_x}$ - нормована і центрована автокореляційна

функція контрольованого параметру технологічного процесу, $D_x = \sigma_x^2$ - дисперсія технологічного процесу,

$R_{xx}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \dot{x}_i \cdot \dot{x}_{i+j}$ - центрована автокореляційна

функція параметра технологічного процесу, $\dot{x}_i = x_i - M_x$;

- визначають матрицю ймовірностей переходу технологічного процесу з одного стану в інший P_{ij} , де

$$P_{ij} = \begin{pmatrix} \boxed{P_{11}} & \boxed{P_{12}} & \dots & P_{1j} & \dots & \boxed{P_{1n}} \\ P_{21} & \boxed{P_{22}} & \dots & P_{2j} & \dots & \boxed{P_{2n}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{i1} & \boxed{P_{i2}} & \dots & \boxed{P_{ij}} & \dots & \boxed{P_{in}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \boxed{P_{m1}} & P_{m2} & \dots & \boxed{P_{mj}} & \dots & P_{mn} \end{pmatrix},$$

де $\boxed{P_{ij}}$ - ймовірнісний стан норми, $\boxed{P_{ij}}$ - ймовірнісний стан прогнозу різних видів передаварійних станів, P_{ij} - ймовірнісний стан аварії, $i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$;

- здійснюють оцінку кореляційної ентропії технологічного процесу, яка відображає деградацію

кореляційних характеристик технологічного процесу і передбачає розвиток передавальних станів технологічного процесу, згідно виразу:

$$I_x = n \cdot E \left[\frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (D_x^2 - R_{xx}(j)) \right],$$

де m - число точок автокореляційної функції, $\hat{E}[\bullet]$ - цілочисельна функція з округленням до більшого цілого

- здійснюють оцінку імовірнісної міри ентропії згідно виразу:

$$I_x = - \sum_{i=1}^m P_i \log_2 P_i,$$

де P_i - ймовірність випадкового повідомлення;

- формують еталонне зображення образно-кластерної моделі стану технологічного процесу "норма", додатково порівнюють параметри еталонного стану з вимірними, спостережуваними та розрахованими параметрами технологічного процесу "норма", "прогноз аварії" та "аварія" та ідентифікують стан технологічного процесу додатковим відображенням на моніторі оператора структуризованої образно-кластерної фейс-моделі.

III. ФУНКЦІОНАЛЬНА СТРУКТУРА ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

Підвищення інформативності відображення ОКМ технологічного стану об'єкта управління (ОУ) досягається додатковим супроводженням стилізованої фейс-моделі об'єкта аудіо-повідомленнями про конкретизований характер відхилення технологічного процесу від норми, а також інтерфейсними діалоговими інструкціями та рекомендаціями щодо виведення об'єкту з нештатного стану.

На рис. 1 подана структура системи контролю технологічного процесу, яка реалізує відображення та аудіо супроводження результатів обчислень інформаційних моделей стану ОУ.

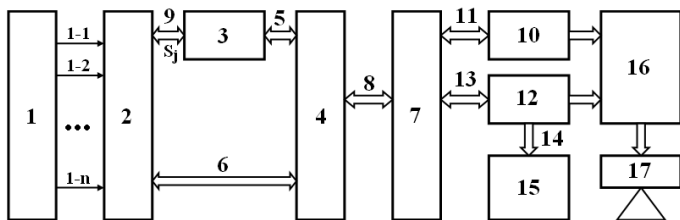


Рис. 1. Структура системи контролю технологічного процесу

Запропонована система контролю параметрів технологічного процесу включає циклічний вимір параметрів 1, 1-2, ... 1-n, блок збору інформації 2, до інформаційного входу якого підключені датчики 1-1, 1-2, ... 1-n, пульт оператора 3, пристрій підготовки інформації 4, першу шину 5, що з'єднує пристрій підготовки інформації 4 і пульт оператора 3, другу шину 6, що з'єднує

пристрій підготовки інформації 4 і блок збору інформації 2, блок введення інформації 1, третю шину 8, що з'єднує блок виведення інформації 7, і пристрій підготовки інформації 4, шину 9, що з'єднує пульт оператора 3 і блок збору інформації 2; яка містить постійний запам'ятовуючий пристрій (ПЗП) 10, вхід якого з'єднаний шиною 11 та першим виходом блоку виводу 7, а вихід ПЗП 10 з'єднаний з першим входом блоку порівняння 12, другий вхід якого з'єднаний шиною 13 з другим виходом блоку виводу 7, а вихід з'єднаний шиною 14 з монітором оператора 15, на якому відображається образно-кластерна модель, містить блок комутації аудіо повідомлень 16, перший вхід якого з'єднаний з другим виходом ПЗП 10, другий вхід з'єднаний з другим виходом блоку порівняння 12, а вихід з'єднаний з випромінювачем звукових сигналів 17.

В основу побудови ОКМ поставлено розрахунок в реальному масштабі часу характеристик інформаційних моделей згідно функціоналу:

$$X_{III} = F(\{x_i\}, \{y_i\}, S_{oy}, M_x, M_j, M_v, D_x, \delta_x, R_{xx}, S_w, L_i, \rho_{ij}, I_x),$$

де: $\{x_i\}, \{y_i\}$ - масиви оцифрованих моніторингових даних параметрів ОУ; S_{oy} - відповідно семантичний, інформаційний та технологічний стани ОУ; M_x, M_j, M_v - відповідно вибіркове, ковзне та вагове математичні сподівання; D_x, δ_x - відповідно дисперсія та середньоквадратичне відхилення; R_{xx} - автокореляційна функція; S_w - спектри параметрів ОУ у різних теоретико-числових базисах; L_i - логіко-статистичні інформаційні моделі (ЛСІМ), $i \in \overline{1, 5}$; ρ_{ij} - матриця коефіцієнтів взаємкореляції; I_x - кореляційна міра ентропії стану ОУ.

Як образно-кластерне відображення динаміки станів "норми", "прогноз аварії" та "аварії" технологічного процесу на моніторі оператора формується структуризована образно-кластерна модель динамічних слайдів стилізовано наближених до ознак обличчя (фейс-моделі) людини з циклічним оновленням слайдів в реальному часі.

Принцип побудови структуризованої образно-кластерної моделі полягає в тому, що в особливих точках монітору, наближених до структуризованого зображення обличчя людини, формуються статичні або динамічні дворівневі чи кольорові символи, що відображають динаміку вимірних та розрахованих параметрів технологічного процесу. При цьому зображення образно-кластерної моделі відповідно відображають стани технологічного процесу - "норма", "прогноз аварії" та "аварія". Відображення на моніторі оператора образно-кластерної моделі технологічного процесу у стані "норма" є еталонним, яке задається постійним запам'ятовуючим пристроєм, порівнюється з вимірними, спостережуваними

та розрахованими параметрами технологічного процесу і динамічно відображається на моніторі оператора. При зміні вимірних та розрахованих параметрів технологічного процесу у відповідних позиціях образно-кластерної фейс-моделі відбувається реструктуризація образно-кластерного відображення станів технологічного процесу, відповідно "норма", "прогноз аварії" та "аварія".

Відображення ОКМ на моніторі оператора повинно здійснюватися згідно вимог ергономіки з кроком часової дискретизації в границях 0,8-2,4с. Тому до швидкодії процесорів, які реалізують алгоритми обчислень та побудови інтерактивних моделей ОУ ставляться жорсткі вимоги максимальної швидкодії. Успішне вирішення цієї проблеми може бути досягнуте глибоким розпаралеленням алгоритмів обчислень інформаційних моделей, максимальним спрощенням математичних перетворень та забезпеченням максимальної швидкодії опрацювання цифрових даних системою відповідних спец процесорів.

Оскільки застосування універсальних мікроконтролерів з обмеженими функціональними можливостями щодо розпаралелення обчислювальних процесів, а також відсутність необхідної кількості аналого-цифрових перетворювачів, співпроцесорів та прискорювачів обчислювальних операцій в принципі не дозволяє вирішити цю задачу в реальному масштабі часу. Крім того виключене застосування перетворення двійкової системи числення в універсальних обчислювальних засобах не дозволяє реалізувати високопродуктивні алгоритми обчислень на основі модульної арифметики системи залишкових класів та спец процесорів в Хаара-Крестенсона.

IV. РОЗПАРАЛЕЛЕНІ АЛГОРИТМИ ПОБУДОВИ ІНФОРМАЦІЙНИХ ОБРАЗНО-КЛАСТЕРНИХ МОДЕЛЕЙ

Розпаралелений алгоритм побудови ОКМ представимо у вигляді системи графів:

1. Аналого-цифрове перетворення сигналів сенсорів та формування по кожному параметру оцінок математичних сподівань центрованих значень, дисперсії та середньоквадратичного відхилення

$$\left. \begin{array}{l} x_1(t) \rightarrow \\ \dots \\ x_k(t) \rightarrow \\ \dots \\ x_p(t) \rightarrow \end{array} \right\} \{x_{ik}\}; i \in \overline{1, n}; k \in \overline{1, m}; (M_{xk}); \{\dot{x}_{ik} = x_{ik} - M_{xk}\};$$

$$D_{xj} = \overline{\dot{x}_{ik}^2}; \delta_{xk} = \sqrt{D_{xk}}$$

2. Визначення оцінок дискретних функцій авто- та взаємкореляції між парами технологічних параметрів та матриці нормованих коефіцієнтів взаємо кореляції

$$\left. \begin{array}{l} \{x_{i1}\} \rightarrow \\ \dots \\ \{x_{ik}\} \rightarrow \\ \dots \\ \{x_{ip}\} \rightarrow \end{array} \right\} \begin{array}{l} H_{xx}(j) \quad H_{xy}(j) \\ P_{xx}(j) \quad P_{yy}(j) \\ K_{xx}(j) \quad K_{xy}(j) \\ R_{xx}(j) \quad R_{xy}(j) \\ \rho_{xx}(j) \quad \rho_{xy}(j) \\ C_{xx}(j) \quad C_{xy}(j) \\ G_{xx}(j) \quad G_{xy}(j) \\ F_{xx}(j) \quad F_{xy}(j) \end{array} \quad \begin{array}{l} j \in \overline{0,} \\ \|\rho_{ik}\|, \\ i \in \overline{1, p}, \\ k \in \overline{1, p}. \end{array}$$

3. Визначення спектрів у різних теоретико-числових базисах (ТЧБ)

$$\left. \begin{array}{l} \{x_{i1}\} \rightarrow \\ \dots \\ \{x_{ik}\} \rightarrow \\ \dots \\ \{x_{ip}\} \rightarrow \end{array} \right\} \begin{array}{l} S(w_1) \rightarrow \text{ТЧБ Фур'є} \\ S(w_2) \rightarrow \text{ТЧБ Радемахера} \\ S(w_3) \rightarrow \text{ТЧБ Хаара} \\ S(w_4) \rightarrow \text{ТЧБ Крестенсона} \end{array}$$

4. Визначення логіко-статистичних інформаційних моделей (ЛСІМ)

$$\left. \begin{array}{l} \{x_{i1}\} \rightarrow \\ \dots \\ \{x_{ik}\} \rightarrow \\ \dots \\ \{x_{ip}\} \rightarrow \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{ЛСІМ.1 - ампліудна} \\ \text{ЛСІМ.2 - динамічна} \\ \text{ЛСІМ.3 - фазова} \\ \text{ЛСІМ.4 - спектральна} \\ \text{ЛСІМ.5 - глобальна} \end{array}$$

ВИСНОВКИ

Вдосконалення алгоритмів обчислень та процесорів побудови інформаційних логіко-статистичних моделей дозволяє збільшити функціональні можливості й інформативність способу контролю параметрів технологічного процесу та формування еталонного зображення ОКМ стану технологічного процесу "норма", порівняння параметрів еталонного стану з вимірними, спостережуваними та розрахованими параметрами технологічного процесу "норма", "прогноз аварії" та "аварія", ідентифікацію стану технологічного процесу відображенням на моніторі оператора образно-кластерної моделі, що дозволяє додатково підвищити швидкодню реакції оператора на відхилення технологічного процесу від норми.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Николайчук Я.М. Коды поля Галуа: Теория та застосування / Монографія / Тернопіль: ТзОВ «Терно-граф», 576с, 2012.
- [2] Возна Н.Я., Прощок Г.Я., Пітух І.Р., Николайчук Я.М. Спосіб контролю параметрів технологічного процесу, Пат.107039 Україна МПК G05B 23/00 (2016.01), G06F 11/277 (2006.01) №u201507057; заявл.15.04.2015; опубл.25.05.2016, Бюл. №10/2016.

Техніко-Економічні Оцінки Автоматизованих Систем Управління у Розвитку Парку Високих Технологій

Наталія Пунченко

кафедра автоматизованих систем та кібербезпеки
Одеська державна академія технічного регулювання
та якості
Одеса, Україна
iioonn24@rambler.ru

Feasibility and Economic Evaluations of Automated Control Systems in the Development of High Technology Park

Nataliia Punchenko

dept. of Automated systems and cyber security
Odessa State Academy of Technical Regulation and Quality
Odesa, Ukraine
iioonn24@rambler.ru

Анотація— Розглянуто модель вибору технічних засобів інформаційних систем. Методика заснована на проведенні техніко-економічного аналізу автоматизованих систем управління, на основі якого вдалося встановити, наскільки повноцінно визначаються характер і призначення робіт, що підлягають реалізації за допомогою технічних засобів, а також наскільки оптимальні з економічної точки зору рішення, покладені в основу обґрунтування характеристик технічних коштів. Це завдання має вирішуватися як на етапах проектування і виготовлення інформаційних систем, так і при виборі ділянок автоматизації, складу і кількості технічних засобів, а також при вивченні проблем надійності і перспективності, при виборі завдань та розроблення програм.

Abstract— The model of choice of technical means of information systems is considered. The considered method is based on a feasibility analysis of automated control systems. On the basis of which it was possible to establish how fully determined the nature and purpose of the work to be implemented using technical means. Also, from the economic point of view, how optimal are the decisions that form the basis for substantiating the characteristics of technical means. This task should be solved both at the stages of designing and manufacturing information systems, and when choosing automation sites, the composition and number of technical means, as well as studying the problems of reliability and availability, when choosing tasks and developing programs.

Ключові слова— коефіцієнт економічної ефективності; інформаційна система; автоматизованих систем управління цілком; методика розрахунку

Keywords— coefficient of economic efficiency; information system; automated control systems altogether; method of calculation

I. ВСТУП

Високотехнологічний сектор завжди виступає важливим ресурсом для росту продуктивності та національної економіки. Таким чином, Парк високих технологій є найбільш перспективною стратегією розвитку економічного потенціалу будь-якої країни і потребує можливості розвитку таких нових наукоємних напрямків, які тісно взаємодіють з ІТ-сферою - це і передача даних, і радіолокація, і радіонавігація, і радіозв'язок, крім цього сюди також можна віднести і захист інформації, створення систем обробки даних [1].

Популярність такої галузі науки, як телекомунікації і вимірювання в цієї галузі, досягла високого рівня, при цьому досить велика ступінь взаємної інтеграції цих галузей науки. Так, в кожній з них потрібне створення систем прийняття рішень [2]. На сьогоднішній день проблема при створенні автоматизованих систем управління цілком очевидно, що, якщо мова йде про параметри надійності системи і про параметри надійності складових елементів,

вони не повинні розглядатися незалежно, тобто надійність системи повинна залежати від параметрів надійності складових елементів. Але при розрахунку надійності системи недостатньо знати тільки кількісні співвідношення система – елементи [3]. Так само необхідно не тільки враховувати витрати, але і знаходження шляхів їх зниження. При аналізі робіт груп під керівництвом Шевчука Б.М., Агєєва С.В., Алексашина А.А., Андрейчика А.В., Вагіна Г.Я., Голоскокова К.П., Гремяченської М.А., Дороніна М.З. увага приділяється розрахунку витрат на проведення всіх операцій, необхідність комплексної оцінки як технічних характеристик, так і економічних показників, при впровадженні будь-яких технічних засобів. Але ніхто з них не призводить методику розрахунку. Звідси випливає, що потрібно приділити увагу при аналізі техніко-економічного обґрунтування автоматизованих систем управління оптимізації параметрів технічних рішень з урахуванням вартості.

II. ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДУ РЕАЛІЗАЦІЇ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНОЇ ОЦІНКИ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

У сучасному інформаційному суспільстві інформаційні технології відіграють важливу стратегічну роль у розвитку кожної галузі. Ця роль швидко зростає за рахунок того, що інформаційні технології активізують і підвищують ефективність використання інформаційних ресурсів [4]. Одним із шляхів підвищення ефективності використання автоматизованих систем є визначення оптимального варіанта автоматизації ще на початковому етапі проектування системи при виборі її структури, що дозволяє уникнути проектних помилок в частині базових елементів, а також мінімізувати вартість і терміни розробки. Вибір оптимального варіанта автоматизації вимагає проведення оцінки передбачуваної ефективності автоматизованої системи управління. Під ефективністю будь-якої системи розуміється ступінь пристосованості системи до вирішення поставлених перед нею завдань або ступінь досягнення заданих цілей функціонування. Раціональна реалізація:

структура;
склад;
архітектура

автоматизованої системи визначається задовольняє замовника співвідношенням між результатами функціонування і необхідними витратами на створення і використання системи. Від сюди проситься висновок, що створення автоматизованих систем управління, що складаються з великої кількості електронної апаратури і розгалуженої мережі ліній зв'язку, пов'язане з великими капіталовкладеннями [5], отже часте оновлення технічних засобів внаслідок фізичного і морального зносу, природно, не тільки вимагає нових капітальних вкладень [6], завдає непрямий збиток в зв'язку з порушенням на певний період роботи системи управління. У зв'язку з такою постановкою питання вирішення проблеми фізичного і морального зносу вимагає, щоб конструювання інформаційних систем базувалося на останніх досягненнях науки і техніки [7].

Вже згадана методика не передбачає вирішення завдання без застосування обчислювальних засобів. В даний час проблема ефективності інформаційних систем повністю

не вирішена. Як правило, всі розрахунки закінчуються знаходженням чисто економічних показників, таких як витрати і немає методики, яка об'єднує витрати з технічними характеристиками (якість, повнота функціоналу, надійність і інш.). Методика заснована на математичних розрахунках з використанням експертних оцінок при нормуванні технічних характеристик спільно з економічними показниками, такими як капітальні витрати і вартість обробки або передачі інформації.

III. ПРИНЦИП РЕАЛІЗАЦІЇ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНОЇ ОЦІНКИ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

Технічні рішення варіантів інформаційної системи і обробки інформації, аналізується і оцінюється з урахуванням технічних і економічних показників. Техніко-економічні оцінки для системи зв'язку набуло величезного значення. Така підвищена увага виходить з наступних факторів: по-перше, вартість системи зв'язку складає до 70% загальних витрат при створенні інформаційних систем [8], по-друге, проектується єдина система прийому і передачі інформації для всіх підсистем і ланок автоматизованих систем управління.

Проведення техніко-економічного обґрунтування інформаційної системи передбачає виконання багаторазових розрахунків, що забезпечують підготовку вихідних даних різних варіантів. Суть методу полягає в тому, що кожен варіант системи перевіряється на умова

$$E \geq E_H \quad (1)$$

де E - коефіцієнт економічної ефективності, який визначається як відношення величини економічного ефекту;

E_{ef} одержуваного від впровадження варіанту системи, до наведених капітальних витрат B , пов'язаним з її створенням;

E_H - нормативний коефіцієнт економічної ефективності. З варіантів, що задовольняють умові (1), яка більше підходить з техніко-економічної точки зору є той, для якого величина E має найбільше значення (за умови, що система зв'язку повністю вирішує поставлені перед нею завдання):

$$E = \frac{C_1 - C_2}{B_2 - B_1} \quad (2)$$

де C_1 і C_2 - вартість передачі інформації в базисному і пропонованому варіантах системи зв'язку, що піддаються порівнянню;

B_1 і B_2 - відповідно капітальні вкладення по порівнюваним варіантів.

Якщо різниця $C_1 - C_2$ позитивна, то вона може служити модифікованим виразом економічного ефекту.

Пропонований метод забезпечує машинним способом вибір варіанта рішення, яке відрізнялося б від інших методів можливістю перегляду реально існуючої кількості варіантів в задані терміни. Рішення завдання важко

виконати вручну. Застосування в якості критерію показника забезпечує також єдину методичну базу оцінки систем на основі використання вказівок і рекомендацій, що містяться в літературі [7].

Цей метод допомагає об'єктивно оцінити різні варіанти системи зв'язку з урахуванням складної взаємодії між різними способами передачі інформації, числом каналів, їх протяжністю і іншими технічними характеристиками, що впливають на вартісні показники системи. Цей метод оцінки варіантів зв'язку може бути також використаний і для вибору технічних засобів обробки інформації, якщо в основі їх порівняння лежить вартість рішення задачі,

Вихідними даними, загальними для всіх розглянутих варіантів, є:

E_n - нормативний коефіцієнт економічної ефективності;
 k - кількість розглянутих варіантів.

Крім того, по кожному варіанту системи зв'язку повинні бути відомі:

F - загальний обсяг інформації, що передається для обробки, прийняття рішень і виконання;
 B - розмір капітальних витрат (вкладень);
 $C_{пер}$ - вартість передачі одиниці інформації;
 η - коефіцієнт завантаження.

Використання каналів зв'язку. Алгоритмом рішення завдання передбачається проведення деяких допоміжних розрахунків за визначенням вартості передачі інформації з урахуванням коефіцієнта завантаження каналів - η .

При порівнянні варіантів технічних рішень, що характеризуються різним обсягом переданої інформації, необхідно привести їх до порівнянної увазі (однаковому обсягу інформації). В цьому випадку зіставлення двох варіантів реалізується за допомогою порівняння елементів стовпців матриці M , що має вигляд

$$M = \begin{vmatrix} F_1 & F_2 \\ B_1 & B_2 \\ C_1 & C_2 \end{vmatrix}$$

де F_i - обсяг переданої інформації;

B_i - розмір капітальних витрат;

$C_i = \eta C_{пер i}$

F_i - вартість передачі інформації по кожному варіанту.

У подальших роботах, для зручності опису алгоритму зручніше використовувати числове значення досліджуваного елемента, що вказує лише місце елемента в матриці (номер рядка, номер стовпця, на перетині яких знаходиться елемент). Конкретний вид елемента однозначно визначається в процесі виконання завдання

За умови, що елементи матриці M містять показники одиничного обсягу порівняння, це дозволяє добитися великої спільності алгоритму і застосовувати його в різних областях дослідження автоматизованих систем управління. Складемо матрицю M^* , що відрізняється від M додаткової рядком-ознакою:

$$M^* = \begin{vmatrix} F_1 & F_2 \\ B_1 & B_2 \\ C_1 & C_2 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Перший елемент четвертого рядка - ознака перестановки стовпців: якщо він дорівнює одиниці, то перестановка мала місце, якщо дорівнює нулю, то перестановка була відсутня. Другий елемент четвертого рядка - ознака вигідності варіанта: якщо він дорівнює одиниці, вигідний варіант, відповідний на одну матриці M , якщо дорівнює нулю, вигідний варіант, відповідний дві колонки. Далі слід приведення варіантів до порівнянної увазі.

Показники варіанту з меншим обсягом інформації завжди перераховуються на обсяг більш продуктивного варіанта. При перерахунку отримують матрицю, у якій елементи першого рядка збігаються, тобто в подальшому порівнюється два варіанти, що відповідають одному і тому ж обсягу інформації. Де передбачено збільшення капітальних витрат і вартості передачі інформації з урахуванням коефіцієнта завантаження каналів зв'язку, необхідні для того, щоб відпрацювати додаткову кількість інформації. отримують матрицю, у якій елементи першого рядка збігаються, т. е. в подальшому порівнюється два варіанти, що відповідають одному і тому ж обсягу інформації, тому перший рядок матриці виключається і розглядається наступна матриця, де стоять ті значення, які виходять в результаті перерахунку.

Хід розрахунку полягає в перетворенні отриманої матриці. Порівнюються елементи першого рядка матриці: якщо чисельне значення досліджуваного елемента першого рядка першого стовпчика менше значення досліджуваного елемента першого рядка другого шпальти, проводиться перестановка стовпців матриці. Слідом за цим формується ознака цієї перестановки: елементу третього рядка першого стовпчика присвоюється значення, рівне одиниці.

Якщо числове значення досліджуваного елемента першого рядка першого стовпчика більше або дорівнює значення досліджуваного елемента першого рядка другого шпальти, перестановка відсутня, і матриці збігаються.

Далі проводимо порівняння елементів другого рядка, в залежності від співвідношення між чисельними значеннями приходимо до результату (перестановка стовпців не проводилася, вигідний перший варіант, і елементу присвоюється значення, рівне одиниці, вигідний другий (впроваджуваний) варіант, обидва варіанти рівноцінні). Визначається коефіцієнт економічної ефективності впроваджуваного варіанту. Потім величина I порівнюється з нормативним коефіцієнтом економічної ефективності n . Впроваджуваний варіант визнається вигідним в порівнянні з базовим, якщо відповідне йому значення задовольняє умові (1).

Ітераційна процедура проводиться для наступних варіантів, поки не будуть вивчені всі k варіантів. В

результаті отримаємо кращий варіант технічного рішення проблеми. Для цього варіанту визначається прямий економічний ефект:

$$E_{ef} = E_H (B_L - B_1) + (C_1 - C_L)$$

де B і C - відповідно елементи першого і другого рядків останньої матриці;

L - індекс найбільш вигідного варіанту.

ВИСНОВКИ

Робота дає можливість зробити оптимальний вибір необхідних технічних засобів. Оптимізація в більшості випадків виражається в розмірному поєднанні технічних характеристик засобів переробки інформації з вимогами, що пред'являються до вирішення завдань, а також таких проблем, як уніфікація, перспективність і стандартизація технічних засобів і математичного забезпечення. Однією з умов проведення даного аналізу є знаходження шляхів зниження витрат на створення автоматизованих систем управління поза розглядом технічних деталей, що відносяться до розробки функціональних схем, елементів. До числа якісних показників технічного рішення створеної системи, що впливають на економічну ефективність нової техніки, слід віднести перспективність засобів автоматизації та їх довговічність.

Тому представлений аналітичний метод вибору системи зв'язку, заснований на техніко-економічному аналізі, може використовуватися при розробці та впровадженні нових засобів зв'язку, при наявних технічних рішеннях, в яких присутня відмінність розміру капітальних вкладень, об'ємом інформації, призначеної до передачі, вартістю передачі одиниці інформації. Цей метод допомагає об'єктивно оцінити різні варіанти системи зв'язку з урахуванням складної взаємодії між різними способами передачі інформації, числом каналів, їх протяжністю і іншими технічними характеристиками, що впливають на вартісні показники системи. Цей метод оцінки варіантів зв'язку може бути також використаний і для вибору технічних засобів обробки інформації, якщо в основі їх порівняння лежить вартість рішення задачі.

ПОДЯКА

Дякую В. Кичаку, проф., І. Троцишину, проф. та Г. Бортнику, проф. за їх глибокі коментарі до попередніх проєктів.

Також хотіла б подякувати Вінницькому національному технічному університету за застосування теоретичних та практичних досліджень у

НДР “Розробка теорії та методології цифрового оброблення радіосигналів у реальному часі” (Міністерство освіти і науки України, Вінницький національний технічний університет);

НДР “Розробка методики проектування волоконно-оптичної системи передавання” (ТОВ „Будівельник-3“, Вінницький національний технічний університет).

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] N. Punchenko, O. Tsyra, G. Kovalova, V. Solodka, M. Levkovska “The strategy of informative redundancy of necessary measurements in the ship navigation as the independent direction in the development of a high tech park.” in 2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC): October, 16-18, 2018 Kyiv, 2018. – P. 110 – 113. IEEE Catalog Number: CFP1852Y-PRT. ISBN: 978-1-5386-5869-7.
- [2] Н.О.Пунченко, “Вплив законів розподілу ймовірностей на вимірювання в галузі телекомунікацій,” VII Міжнародна науково-практична конференція «Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах», 8-10 листопада 2018 року м. Чернівці, Україна: матер. конф. «Місто» – С. 47. ISBN: 978-617-652-226-3.
- [3] Н.О.Пунченко, “Надійність роботи складових інформаційної системи,” [Текст] / Н.О.Пунченко // Вісник Хмельницького національного університету: Технічні науки. — Хмельницький національний університет. — 2019. — №1 (269). — С. 162 – 164. ISSN 2307 – 5732. DOI 10.31891/2307 – 5732 – 2019 – 269 – 1 – 162 – 164.
- [4] Н.О.Пунченко, “Інформаційні технології: сучасний стан та перспективи” монографія / Кол. авторів.– Харків: ТОВ «ДІСА ПЛЮС», 2018. – с. 462. ISBN: 978-617-7384-95-2.
- [5] В.Н. Николаев “Теоинформационные системы и информационные технологии в телекоммуникациях.” [Текст] / В. Н. Николаев // Телекоммуникации. — 2016. — № 5. — С. 38–41.
- [6] А. В. Прилуцкий, Д. Н. Прищепа, “Подход к технико-экономическому обоснованию реконструкции системы энергоснабжения специального объекта министерства обороны Российской Федерации,” [Текст] / А. В. Прилуцкий, Д. Н. Прищепа // Труды Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. — 2016. — № 654. — С. 150–159.
- [7] Л. А. Рабинович, М. Л. Либман, “Основные положения технико-экономического обоснования новых средств автоматизации производственных процессов,” [Текст] / Л. А. Рабинович, М. Л. Либман // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2004. — № 1. — С. 7–9.
- [8] Ю. А. Корякин, С. Ю. Корякина, “Методология тактико-технико-экономического обоснования перспективных систем радиоэлектронного вооружения корабля,” [Текст] / Ю. А. Корякин, С. Ю. Корякина // Информационные технологии в проектировании и производстве. — 2008. — № 4. — С. 58–64.

Спецпроцесори Визначення Хеммінгової Віддалі при Розпізнаванні Образів

Андрій Сидор
кафедра обчислювальної техніки
Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
andrij9997@ukr.net

Наталія Возна
кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Тернопільський національний економічний університет
Тернопіль, Україна
nvozna@ukr.net

Ярослав Николайчук
кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Тернопільський національний економічний університет
Тернопіль, Україна
scs.kafedra@gmail.com

Special Processors for Determining Hamming Distance when Recognizing Images

Andrij Sydor
dept. of Computer Engineering
National University of Water and Environment
Rivne, Ukraine
andrij9997@ukr.net

Nataliia Vozna
dept. of Specialized Computer Systems
Ternopil National Economic University
Ternopil, Ukraine
nvozna@ukr.net

Yaroslav Nykolaychuk
dept. of Specialized Computer Systems
Ternopil National Economic University
Ternopil, Ukraine
scs.kafedra@gmail.com

Анотація— У різних сферах діяльності людини актуальною задачею є – розпізнавання образів. Найбільш алгоритмічно простими та швидкодіючими є методи розпізнавання образів на основі оцінок Евклідової та Хеммінгової відстаней. У роботі запропоновано методи та процесори розпізнавання аналогових та цифрових сигналів згідно лінійної та квадратичної Евклідової відстаней у Хеммінговому просторі, які характеризуються спрощеними алгоритмами та підвищеною швидкодією. Запропоновані схемотехнічні рішення спецпроцесорів розпізнавання образів на основі оцінок Хеммінгової віддалі та структурно оптимізованих компонентів.

Abstract— Image recognition is one of the challenges facing various industries. Image recognition methods based on Euclidean and Hamming distance estimates are the most algorithmically simple and efficient. The paper proposes methods for recognition of analog and digital signals due to the linear and quadratic Euclidean distances in the Hamming space, which are characterized by simplified algorithms and reduced computational complexity. Special-purpose processors for image recognition are designed on the basis of the Hamming distance estimates and structurally optimized components.

Ключові слова— розпізнавання образів, спецпроцесор, Хеммінгова віддаль.

Keywords—paper; image recognition, special-purpose processor, Hamming distance.

I. ВСТУП

Теоретичні засади розпізнавання образів ґрунтуються на математичній формалізації визначення Хеммінгової віддалі між сигналами представленими у векторній формі одномірного, двомірного чи багатомірного простору. Серед відомих методів розпізнавання образів найпоширенішими є: алгебраїчний, кореляційний, структурний, Хеммінгово просторовий, спектральний, геометричний, статистичний, на базі нечітких множин та просторово-зв'язаних процесів. Вагомий вклад у розвиток теорії та методів розв'язання прикладних задач розпізнавання образів на основі оцінок лінійного та квадратичного Евклідового простору внесли відомі вчені: Р. Хеммінг американський математик [1], роботи якого мали великий вплив на розвиток інформатики та телекомунаційних зв'язків. До його наукових здобутків належить розробка коду Хеммінга в якому використані матриці Хеммінга, числа Хеммінга і відстань Хеммінга [1];

Л. Ванга та Дж. Мендель застосували для розпізнавання образів нечітку нейронну мережу Ванга-Менделля [2]; Л.А. Заде – американський математик і логік, запропонував методи розпізнавання образів на основі нечітких множин і нечіткої логіки; Тобі Бергер відомий своїми науковими здобутками в галузі розпізнавання образів на основі теорії випадкових полів [3]; Аміт Кумар Гупта та Яш Пал Сінгх – дослідники застосування оцінки Хеммінгової віддалі у нейронних мережах розпізнавання образів [4]. Фундаментальні теоретичні засади розпізнавання образів розроблені на основі запропонованих оцінок Евклідової та Хеммінгової віддалі розроблені: Мінковським, Махаланубісом, Чебишовим [5]. Перспективним застосуванням для розпізнавання образів є використання різних взаємкореляційних функцій та теоретико-числових базисів. Для побудови високопродуктивних спецпроцесорів розпізнавання образів запропоновано застосування кодових систем теоретико-числових базисів Хаара, Радемахера, Радемахера-Крестенсона та Хаара-Крестенсона, що потребує відповідного синтезу їх базових компонентів типу: АЦП, пристроїв матрично-модульних операцій та асоціативної пам'яті. Застосування оцінки Хеммінгової віддалі, серед відомих методів, характеризується рядом переваг оскільки забезпечує можливість реалізації цифрових спецпроцесорів з високою швидкістю опрацювання сигналів. Крім того, такі процесори можна реалізувати у вигляді кристалів на основі сучасної мікро та нанотехнології, а також синтезувати їхні функції на ПЛІС. Такі спецпроцесори використовуються в різноманітних галузях. Реалізація спецпроцесорів цифрового опрацювання сигналів у залежності від типу вихідних кодів АЦП може здійснюватися у різних теоретико-числових базисах. Наприклад: унітарному, Радемахера, Хаара, Крестенсона та інші. Застосування АЦП паралельного типу з вихідними кодами Хаара-Крестенсона [7] при роботі функціональної схеми та структурної організації пристроїв розрахунку Хеммінгової віддалі забезпечує високу швидкість спецпроцесорів такого класу. У той же час визначаються відповідні вимоги

до швидкодії їх компонентів: міжбазисного перетворення кодів та суматорів.

II. МЕТОД ТА СПЕЦПРОЦЕОР ВИЗНАЧЕННЯ ХЕММІНГОВОЇ ВІДДАЛІ В ТЕОРЕТИКО-ЧИСЛОВИМУ БАЗИСІ РАДЕМАХЕРА

Задача розпізнавання аналогового сигналу x_{ik} реалізується шляхом визначення Хеммінгової віддалі між його оцифрованою кодовою характеристикою та відповідною характеристикою одного з еталонних сигналів x_{jk} згідно виразу [6]:

$$d_{ij} = \sum_{k=1}^z |x_{ik} - x_{jk}| \quad (1)$$

де d_{ij} – значення Евклідової відстані між i -тим і j -тим об'єктами; x_{ik} – числове значення k -тої ознаки для i -того об'єкту; x_{jk} – числове значення k -тої ознаки для j -того об'єкту; z – кількість ознак, якими описуються об'єкти.

Реалізація даного методу здійснюється згідно запропонованого алгоритму:

1. Ввід поточних значень цифрових двійкових кодів базису Радемахера $x_{ik} = (a_{k-1}, \dots, a_1, a_0)$, $x_{jk} = (b_{k-1}, \dots, b_1, b_0)$.
2. Формування інверсних двійкових кодів \bar{x}_{ik} , \bar{x}_{jk} .
3. Додавання прямих та доповнюючих кодів цифрових значень x_{ik} та x_{jk} , а також додавання логічної одиниці у молодший розряд суматора.
4. Визначення прямого коду модульної різниці між цифровими значеннями x_{ik} та x_{jk} .
5. Накопичення суми модульних різниць.
6. Організація z -циклів обчислень.
7. Вивід оцінки Хеммінгової віддалі.

Функціональна схема розробленого спецпроцесора визначення Хеммінгової віддалі у теоретико-числовому базисі Радемахера представлена на рис. 1:

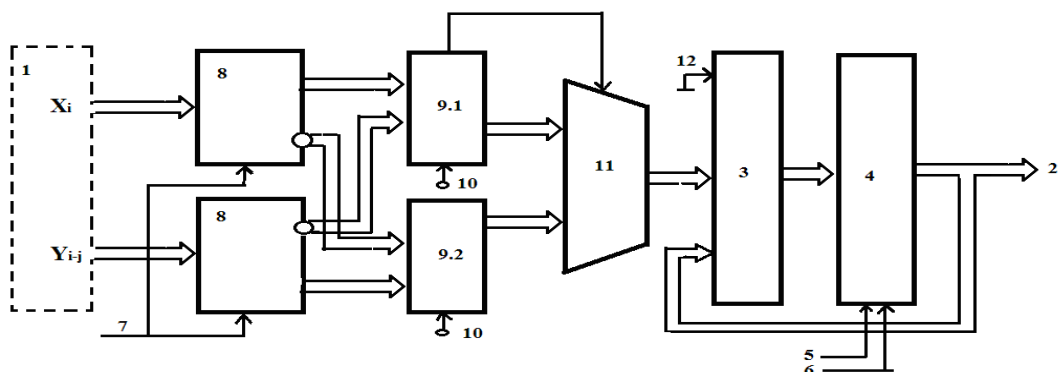


Рис. 1. Функціональна схема спецпроцесора визначення Хеммінгової віддалі у ТЧБ Радемахера.

На рис. 1 представлена схема спецпроцесора: 1 – вхідна $2k$ -розрядна шина (a_0, a_1, \dots, a_{n-1} та b_0, b_1, \dots, b_{n-1} – відповідні входи x_{ik} та x_{jk} багаторозрядних двійкових

чисел); 2 – вихідна $k+m$ -розрядна шина; 3 – $k+m$ -розрядний накопичуючий суматор; 4 – $k+m$ -розрядний паралельний регістр; 5 – перший вхід синхронізації запису; 6 – другий вхід синхронізації скиду у нуль; 7 –

третій вхід синхронізації запису; 8 – D - тригери $2k$ -розрядного паралельного регістра; 9.1 та 9.2 – однорозрядні повні суматори відповідно першого та другого k -розрядних суматорів; 10 – вхід логічної одиниці; 11 – розрядні компоненти мультиплектора; 12 – вхід логічного нуля.

III. МЕТОД ТА СПЕЦПРОЦЕОР ВИЗНАЧЕННЯ ХЕММІНГОВОЇ ВІДДАЛІ В ТЕОРЕТИКО-ЧИСЛОВИМУ БАЗИСІ ХААРА-РАДЕМАХЕРА

Даний метод оцінки Хеммінгової віддалі між сигналами призначений для опрацювання нецентрованих цифрових кодів сигналів, рівномірно дискретизованих у часі та квантованих по амплітуді з однаковим математичним сподіванням, які належать до класу стаціонарних випадкових сигналів.

Реалізація даного методу здійснюється згідно запропонованого алгоритму:

1) Перетворення аналогових сигналів $x(t)$ та $y(t)$ у вигляді паралельних унітарних кодів на виході компараторів (U);

2) формування паралельних унітарних кодів більшого з двох x_i та y_i на виходах логічних елементів АБО (U);

3) формування паралельних інверсних кодів Хаара на виходах логічних елементів І-НЕ (\bar{N});

4) формування паралельного коду Радемахера $u >$ та інверсного паралельного коду Радемахера $x <$ на виходах логічних елементів І-НЕ (R);

5) виконання операції додавання прямого коду y_i , інверсного коду \bar{x}_i та одиниці доповнюючого коду;

6) накопичення суми отриманого коду Радемахера.

На рис. 2 представлена функціональна схема розробленого пристрою, який містить: 1 – синхронізатор; 2 – перший та другий АЦП; 3 – логічні елементи АБО; 4 – логічні елементи І; 5 – логічні елементи Виключаюче АБО; 6 – шифратор; 7 – повний суматор; 8 – багаторозрядний накопичуючий суматор; 9 – вихідна шина пристрою.

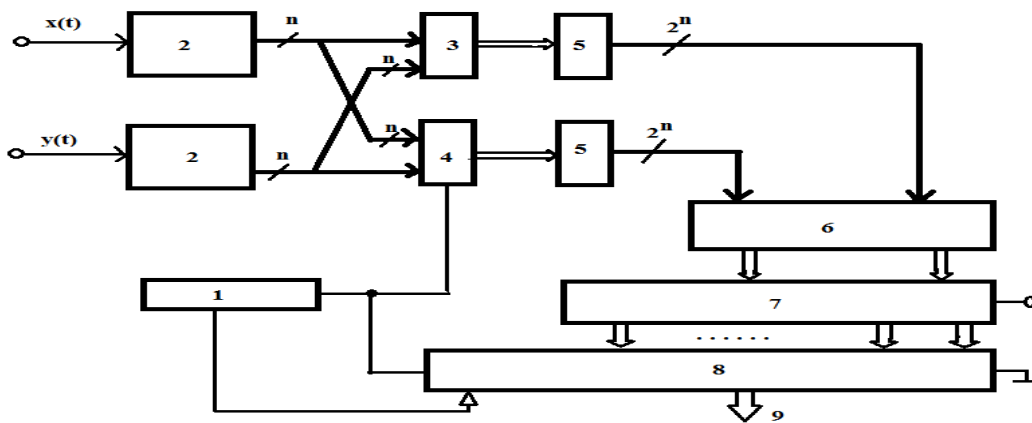


Рис. 2. Функціональна схема спецпроцесора визначення Хеммінгової віддалі між двома аналоговими сигналами.

IV. МЕТОД ТА СПЕЦПРОЦЕОР ВИЗНАЧЕННЯ ХЕММІНГОВОЇ ВІДДАЛІ В ТЕОРЕТИКО-ЧИСЛОВИМУ БАЗИСІ ХААРА-КРЕСТЕНСОНА

Запропонований спецпроцесор на основі різницево-модульного квадратора для визначення накопичених сум оцінок Хеммінгової віддалі у теоретико-числовому базисі Хаара-Крестенсона включає в себе (рис 3): 1 – синхронізатор; 2.1, 2.2 – АЦП паралельного типу з вихідними кодами Хаара-Крестенсона; 3 – вхідна шина еталонного потенціалу; 4 – перша вхідна шина аналогового потенціалу; 5 друга вхідна шина аналогового потенціалу; 6 – різницево-модульні квадратори; 7 – матрично-модульний накопичуючий суматор; 8 – дешифратор кодів Хаара-Крестенсона у двійковий код базису Радемахера; 9 – вихідна шина пристрою.

Пристрій належить до засобів обчислювальної техніки, призначений для визначення Хеммінгової віддалі між двома аналоговими сигналами і може бути використаний у

якості компонента цифрових процесорів розпізнавання образів.

Недоліками відомих пристроїв низька швидкодія, яка обумовлена тим що отримані паралельні, інверсні коди Хаара більшого y_i та меншого x_i цифрових значень аналогових сигналів на входах третіх логічних елементів І-НЕ представлені згідно двійкової системи числення базису Радемахера, що передбачає виконання арифметичних операцій визначення модульної різниці шляхом додавання прямих та інверсних кодів y_i та x_i і накопичення їх суми у двійковій системі числення. Наявність наскрізних переносів у двійковій арифметиці при виконанні операції у багаторозрядних двійкових суматорах приводить до значного зниження швидкодії та відповідно низької швидкодії пристрою визначення Хеммінгової віддалі.

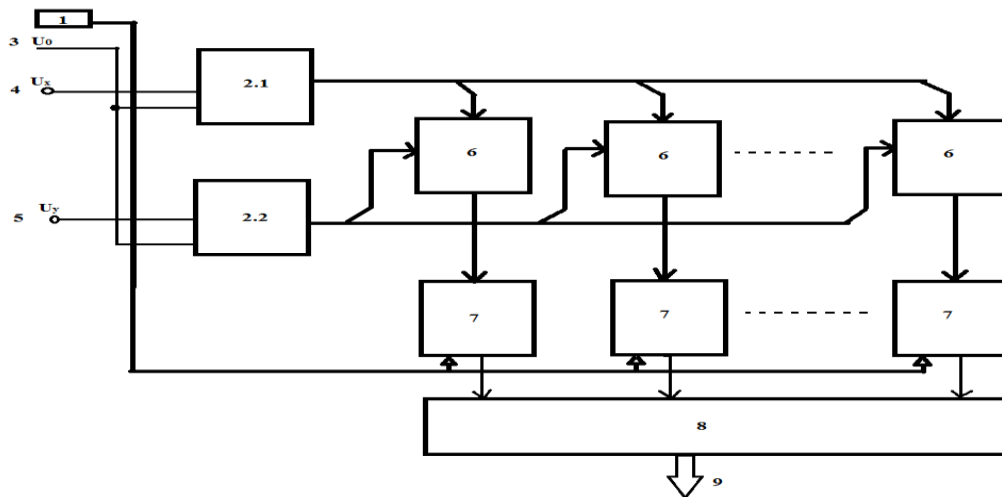


Рис. 3. Структурна схема спецпроцесора визначення Хеммінгової віддалі у ТЧБ Хаара-Крестенсона

Пристрій працює наступним чином: на початку циклу роботи пристрою на першому виході синхронізатора 1 формується сигнал скиду у нульовий стан накопичуваного суматора 7 який з'єднаний з R-входами всіх D-тригерів регістра пам'яті, а на другому виході синхронізатора формується пачка n -імпульсів, які поступають на синхронізуючий вхід накопичуючого суматора 7, з'єданого з C-входами D-тригерів регістра пам'яті. Еталонний потенціал U_0 поступає на перші входи першого 2.1 та другого 2.2 АЦП. Вхідні потенціали U_x 4 та U_y 5 поступають на другі входи відповідних АЦП. На виході першого АЦП 2.1, які відповідають цифровим значенням потенціалу U_x 4, формуються розрядно-позиційні коди Хаара-Крестенсона системи залишкових класів, які постукають на перші входи відповідних різницево-модульних квадраторів 6, на другі входи яких поступають вихідні коди другого АЦП 2.2., які відповідають цифровим значенням потенціалу U_y 5. Отримані значення квадратів модульних різниць з виходів елементів 6 поступають на входи відповідних модульних елементів накопичуючого суматора 7, вихідні коди якого поступають на входи шифратора 8, на виході якого формуються вихідні двійкові коди базису Радемахера оцінки визначеної квадратичної Хеммінгової віддалі між вхідними сигналами.

Найбільш швидкодіючим компонентом такого пристрою є різницево-модульний квадратор який суттєво

пришвидшує роботу спецпроцесора. Швидкодія спецпроцесора визначення Хеммінгової віддалі у теоретико-числовому базисі Хаара-Крестенсона не залежить від розрядності вхідних кодів і є на 2-3 порядки швидшою від швидкодії спецпроцесорів побудованих в інших теоретико-числових базисах.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Хемминг. Р.В. "Теория кодирования и теория информации: " пер. с англ., М.: Радио и связь, 1983., 176 р.
- [2] Лотфі А Заде Рафік, Алієв «Теорія і застосування нечіткої логіки: частина I і частина II», Всесвітня наукова публікація, 2018, .580 с.
- [3] Мустафа Сунгар, Тобі Бергер «Дискретний алфавіт реконструкції в задачах дискретних джерел швидкості спотворення без пам'яті», ISIT, 2018, P.116-120.
- [4] Аміт Кумар Гупта, Яш Каран Сінгх «Аналіз адаптивної теорії резонансу методу нейронної мережі в струнному розпізнаванні» Обчислювальна інтелект і комунікаційні мережі (CICN), 2011, с. 163-167.
- [5] Янковой А.Г. "Мультикативный анализ и статистичні системи Том 1.", Одеса: Оптім 2001, 216 р.
- [6] Круликовський Б.Б., Сидор А.І., Заставний О.М., Николайчук Я.М. «Методи розпізнавання багатовимірних образів у просторі Хеммінга», Матеріали міжнародної конференції: Досвід проектування та застосування САПР в мікроелектроніці (CADSM) 2017 P.195-198.
- [7] Н.Возна, Я.Николайчук, О.Заставний, В.Піх «Критерії системної складності та синтез високоефективних багатифункціональних паралельних АЦП в теоретичних і чисельних основах Радемахера і Хаара-Крестенсона». Досвід проектування та застосування CADSM2017. PP. 218-221.

Особливості Структурно-Параметричного Синтезу Гібридних Нейронних Мереж

Віктор Синєглазов

Кафедра авіаційних комп'ютерно-інтегрованих комплексів,
Навчально-науковий інститут інформаційно-діагностичних систем,
Національний авіаційний університет, Київ, Україна
svm@nau.edu.ua

Олена Чумаченко

Кафедра технічної кібернетики,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ, Україна
chumachenko@tk.kpi.ua

Features of Structural-Parametric Synthesis of Hybrid Neural Networks

Victor Sineglazov

Computer-Integrated Complexes Department,
Educational and Scientific Institute of Information and Diagnostic Systems, National Aviation University
Kyiv, Ukraine
svm@nau.edu.ua

Olena Chumachenko

Technical Cybernetic Department
National Technical University of Ukraine
“Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine
chumachenko@tk.kpi.ua

Анотація—В даній роботі проаналізовано застосування нейронних мереж в різних галузях науки і техніки та різним додаткам їх використання. Показано, що за оцінками аналітиків в найближчі п'ять років сумарний обсяг ринку технологій штучного інтелекту зросте в 4 рази та зроблено висновок, що штучний інтелект в найближчому майбутньому стане невід'ємною частиною персональної та професійної діяльності людей. Обґрунтовано доцільність для розв'язання широкого кола задач використовувати гібридні нейронні мережі, які мають переваги перед мережами одної топології. На основі проведеного аналізу показано, що на даний час не існує методології створення таких мереж. Обґрунтовано загальну методологію створення гібридних нейронних мереж.

Abstract—In this paper, the application of neural networks in different fields of science and technology and various applications of their use are analyzed. It is shown that according to analysts in the next five years the total volume of the market of artificial intelligence technologies will increase in 4 times, and it is concluded that artificial intelligence in the near future will become an integral part of personal and professional activity of people. The expediency to solve a wide range of problems is substantiated by using hybrid neural networks that have advantages over networks of one topology. Based on the analysis conducted, it has been shown that at present there is no methodology for creating such networks. The general methodology of the creation of hybrid neural networks is substantiated.

Ключові слова—штучний інтелект; гібридні нейронні мережі; методологія.

Keywords—artificial intelligence; hybrid neural networks; methodology.

I. ВСТУП ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

За оцінками аналітиків міжнародної консалтингової компанії Frost & Sullivan, у найближчі п'ять років сумарний обсяг ринку технологій штучного інтелекту (ШІ) зросте в 4 рази. Compound Annual Growth Rate в прогнозований період буде зберігатися на рівні 31%. Можна зробити висновок, що штучний інтелект в найближчому майбутньому стане невід'ємною частиною персональної та професійної діяльності людей.

Зокрема, в області охорони здоров'я ШІ все ширше використовується для виявлення закономірностей в медичних даних пацієнтів, що дозволяє значно поліпшити процес встановлення їх діагнозів і підвищити ефективність лікування. У сфері кібербезпеки ШІ забезпечує захист від інформаційних загроз, які традиційними засобами мережевої безпеки здійснити неможливо.

У поточному десятилітті стійке зростання технологій ШІ також спостерігається в аерокосмічній і оборонній галузях, енергетиці, безпілотний транспорті, робототехніці, інформаційно-комп'ютерних технологіях, банківській сфері та фінансах, відеоігрової індустрії, роздрібній торгівлі, в системах когнітивних,

нейроморфних, квантових та масштабних обчислень і багатьох інших областях людської діяльності.

У той же час, основні обмеження відомих методів і технологій ШІ, обумовлені недостатньою ефективністю їх навчання, складнощами настройки і адаптації до проблемної області в умовах неповної і неточною вихідної інформації, складнощами накопичення знань експертів і іншими особливостями.

Таким чином, однією з актуальних проблем на шляху розвитку сучасних систем ШІ є розвиток інтегрованих, гібридних систем на основі глибокого навчання. На жаль, на сьогоднішній день не існує методології побудови топологій гібридних нейронних мереж (ГНМ) і гібридних технологій їх структурно-параметричного синтезу з використанням глибокого навчання.

Основним фактором, який сприяє розвитку таких систем, є розширення масштабів використання нейронних мереж (НМ) для вирішення завдань розпізнавання, класифікації та оптимізації, які при застосуванні інших технологій виявилися б було вирішити або такими, які важко піддаються символічним обчислень.

Однією із провідних тенденцій в сучасній інформатиці став розвиток інтегрованих, гібридних систем. Подібні системи складаються з різних елементів (компонентів), об'єднаних в інтересах досягнення поставлених цілей. Інтеграція і гібридизація різних методів і технологій дозволяє розв'язувати складні задачі, які неможливо розв'язати на основі якихось окремих методів або технологій. Інтегрованість, як фундаментальна властивість складної системи, яка тісно пов'язана з її цілісністю, передбачає не просто об'єднання, але й взаємну адаптацію і сумісну еволюцію її компонентів, що забезпечує появу нових якостей, які не властиві її компонентам окремо.

II. МЕТОДОЛОГІЮ СИНТЕЗУ ГІБРИДНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Побудова комбінованих нейронних мереж, які складаються з різних типів НМ, кожна з яких навчається за певним алгоритмом в багатьох випадках дозволяє значно підвищити ефективність функціонування НМ.

Дослідження принципів гібридизації НМ, нечіткої логіки та генетичних алгоритмів дозволяє створювати нові топології НМ, які мають більш високу якість розпізнавання у разі одночасного зниження обчислювальних витрат на навчання.

Гібридні або мультинейронні мережеві системи часто використовуються для поліпшення результатів розв'язання задач класифікації та прогнозування.

При побудові таких мереж необхідно розв'язати наступні задачі: проектування архітектури мереж; вибору мереж, результати роботи яких мають бути об'єднані, щоб дати найкращий кінцевий результат; використання обмеженого набору даних.

Результатом роботи Харківської наукової школи під керівництвом С. В. Бодяньського є створення гібридних

нейро-фаззі-мереж, які об'єднують у собі універсальні апроксимуючі властивості традиційних нейронних мереж, прозорість, інтерпретованість систем нечіткого висновку. Подальшим розвитком нейро-фаззі-мереж стала їх гібридизація з методами теорії вейвлет-перетворення. Такі системи отримали назву вейвлет-нейро-фаззі-систем. Враховуючи можливості гібридних вейвлет-нейро-фаззі-систем обчислювального інтелекту, щодо їх апроксимуючих властивостей, лінгвістичної інтерпретованості, можливості виявляти локальні особливості оброблюваних сигналів і здатності реалізації м'яких обчислень на основі фаззі-множин в роботах [1–4] було реалізовано створення гібридних адаптивних еволюційних (фаззі-системи з параметрами та структурою, що налаштовуються в послідовному (онлайн) режимі вейвлет-нейро-фаззі-систем.

У роботах [5–7] розроблено нову топологію НПНМ, засновану на генетично-оптимізованому багатошаровому перцептроні з нечіткими поліноміальними нейронами (НПН).

Концепція нейро-фаззі-мереж, що самоорганізуються (СНФМ), мають гібридну архітектуру і поєднують нейро-фаззі-мережі (НФМ) і поліноміальні нейронні мережі (ПНМ), полягає у використанні технологій обчислювального інтелекту, а саме: нечітких множин, нейронних мереж і генетичних алгоритмів.

Архітектура СНФМ є результатом синергетичного використання нейро-фаззі-мереж (НФМ) і поліноміальних нейронних мереж (ПНМ). Нейро-фаззі-мережі вносять внесок у формування вихідної частини, заснованої на правилах, структури СНФМ. Послідовна частина СНФМ розроблена з використанням ПНМ. Поліноміальну нейронну мережу, яка має гнучку й універсальну структуру, побудовано з використанням методу МГУА.

Головними проблемами синтезу ГНМ, на даний час є:

- відсутність формальних методів вибору типу НМ, адекватних класу задач, які необхідно розв'язувати;
- недостатнє опрацювання питань автоматичного формування топології НМ, що не дозволяє створювати НМ високої точності та мінімальної складності (мінімальних обчислювальних витрат);
- недостатня обґрунтованість вибору методів оптимізації в процедурі навчання НМ, що призводить до значних похибок.

З огляду на вище наведене, можна зробити висновок про необхідність створення єдиної методології побудови ГНМ з можливістю поступового нарощування складності їх структури та використання гібридних алгоритмів навчання, у тому числі глибокого навчання, з метою покращення розв'язання поставлених задач.

Методологію синтезу гібридних нейронних мереж можна представити у вигляді такої послідовності дій.

- 1) Оптимальний вибір топології базової нейронної мережі.

2) Модифікація на основі розв'язання поставленої задачі багатокритеріальної оптимізації за рахунок зміни кількості прихованих шарів, нейронів у них, перехресних зв'язків, визначення значень вагових коефіцієнтів.

3) Структурно-параметричний синтез модуля, в склад якого входять базова НМ, двонаправлена асоціативна пам'ять.

4) Структурно-параметричний синтез ансамблю, що складається з модулів НМ.

Кожен з пунктів запропонованої методології представляє собою окрему задачу, тому розглянемо їх розв'язання окремо. Для розв'язання кожної з вище перелічених задач розроблено нові методи та алгоритми, тому запропонований підхід можна вважати методологією.

III. ВИБІР ТОПОЛОГІЇ ТА НАЛАШТУВАННЯ БАЗОВОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

Задача оптимального вибору топології базової НМ розв'язується за допомогою використання методу перебору. Алгоритм має наступний вигляд.

За класом задач, до якого відноситься поставлена задача, визначаються навчальні вибірки, які знаходяться на сайті навчальних задач.

Вибрана навчальна вибірка ділиться у відповідності: 80% – навчальна вибірка, 20% – тестова.

У відповідності до класифікації НМ послідовно для кожної НМ проводиться її навчання згідно визначеного для неї алгоритму.

Використовуючи тестову вибірку для кожної НМ визначається Еузаг.

За базову НМ обирається та, яка має найменшу Еузаг.

Для налаштування базової НМ на конкретну навчальну вибірку, яка відповідає поставленій задачі виконується її модифікація на основі розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації за рахунок зміни кількості прихованих шарів, нейронів у них, перехресних зв'язків, визначення значень вагових коефіцієнтів.

Задача оптимальної модифікації базової нейронної мережі розпадається на дві підзадачі: пошук оптимальної структури (кількість прихованих шарів, нейронів у них і перехресних зв'язків між нейронами) та налаштування вагових коефіцієнтів (підзадача параметричної оптимізації). Для розв'язання обох підзадач використовується двоетапний алгоритм оптимізації, на першому етапі якого застосовується гібридний багатокритеріальний еволюційний алгоритм, за допомогою якого локалізується зона пошуку оптимальної структури і вагових коефіцієнтів НМ. На другому етапі визначення оптимальних значень вагових коефіцієнтів НМ виконується на підставі використання методів зворотного розповсюдження помилок і найшвидшого спуску (стохастичного градієнтного спуску), а визначення оптимальних значень кількості прихованих шарів та нейронів у них буде здійснюватись за допомогою адаптивного алгоритму об'єднання та нарощування, коли для кожного нейрона прихованого шару буде

розраховуватись значимість і у випадку коли її значення менше порогового, маркувати ці нейрони з подальшим обчисленням коефіцієнтів кореляції цих нейронів з немаркованими нейронами цього шару. Кожен маркований прихований нейрон об'єднуватиметься з його найбільш корельованим із цього шару немаркованим аналогом. У випадку, якщо похибка навчання в процесі виконання операцій об'єднання перестає зменшуватись, виконується операція нарощування, тобто додавання одного нейрона в цей прихований шар, тощо.

IV. ПОБУДОВА МОДУЛЮ ТА АНСАМБЛЮ ГІБРИДНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

У випадку, якщо модифікація топології ШНМ, яка вибрана для розв'язання поставленої задачі не дає відчутних результатів, необхідний синтез нової топології. В даній роботі для розв'язання задачі синтезу нової топології пропонується модульний принцип організації ГНМ.

У відповідності до запропонованої у роботі методології побудови ГНМ структуру модуля представлено у вигляді послідовного з'єднання базової НМ і двонаправленої асоціативної пам'яті (мережа Коско).

Вибрана структура модуля ГНМ дозволяє проводити навчання кожної мережі, яка входить до складу модуля окремо, що значно підвищує ефективність процесу параметричного синтезу.

Ансамблем нейронних мереж називається група топологій, об'єднаних в єдину структуру, які можуть відрізнятися архітектурою, алгоритмом навчання, критеріями навчання і типами утворюючих нейронів [8–10]. В іншому варіанті під терміном ансамбль розуміється «об'єднана модель», виходом якої є функціональна комбінація виходів окремих моделей [11].

Вхідні дані можуть розбиватись на певні групи для обробки різними ШНМ чи подаватись на всі мережі одночасно.

Формуючи ансамблі ШНМ, необхідно змістовно оптимізувати два критерії – якісне навчання окремої ШНМ і оптимальне їх об'єднання. Відомі алгоритми прийнято розділяти на два класи [9]: алгоритми, які для нових класифікаторів змінюють розподіл навчальних прикладів, виходячи з показників точності попередніх моделей (*бустінг*), і ті, в яких нові члени ансамблю навчаються незалежно від інших (*бегінг*). На відміну від роботи [12], у даній роботі замість окремих НМ використовуються модулі нейронних мереж.

Необхідність застосування принципу модульності в гібридних НМ ансамблевої структури визначається наступним:

- різномірність даних навчальної вибірки, що веде до нездатності одномодульної НМ правильно апроксимувати необхідну залежність;
- складність алгоритму вирішуваної задачі, який потребує багатомодульної структури;

- відмінність характеристик функції похибок на різних фрагментах навчальної вибірки;
- необхідність накопичення знань експертів в навчених модулях НМ.

На основі вищенаведеного аналізу в роботі використовується паралельна структура ансамблю з шаром об'єднання.

Необхідною й достатньою умовою для побудови ансамблю модулів, який має більшу точність розв'язання задачі класифікації (прогнозування) ніж кожний окремий модуль є включення до його складу модулів, які відповідають критеріям точності та різноманітності. Оскільки різноманітність ансамблю зменшується зі збільшенням точності членів ансамблю, то розв'язання задачі створення ефективного ансамблю зводиться до пошуку компромісу.

У більшості ансамблевих методів різноманітність і точність досягається шляхом маніпулювання даними навчальної вибірки. Однією з проблем, пов'язаних з цими підходами є те, що вони схильні будувати надмірно великі ансамблі. Це вимагає великої кількості пам'яті для зберігання навчених модулів (класифікаторів). Для подолання даної проблеми використовується процедура спрощення (Pruning), яка передбачає оптимальний з точки зору точності, різноманітності та витрат пам'яті вибір підмножини окремих модулів (класифікаторів) із вже побудованого ансамблю.

В якості процедури побудови ансамблю обгрунтовано використання беггінгу, який має переваги перед іншими. З метою побудови ансамблю розроблено алгоритм визначення індивідуального вкладу кожного модуля на основі використання критеріїв точності та різноманітності. Забезпечення різноманітності досягається за рахунок навчання елементів ансамблю на різних наборах даних, які можуть бути отримані за рахунок використання методу бутстрепа.

Одна із проблем ансамблевих підходів полягає в тому, що їх використання призводить до створення невиправдано великих ансамблів, що вимагає значного обсягу пам'яті для зберігання навчених модулів і зменшення часу відгуку для прогнозування. Для оптимізації розміру ансамблю було розроблено алгоритм спрощення за допомогою метода доповнюючої величини, який враховує також взаємодію класифікаторів між собою. Вагові коефіцієнти об'єднання модулів у ансамбль було визначено на основі використання метода динамічного усереднення.

ВИСНОВКИ

Розроблено нову методологію синтезу гібридних нейронних мереж, в якій на першому етапі оптимальним чином вибирається базова нейронна мережа (БНМ); на другому етапі, в результаті розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації вона модифікується за рахунок зміни кількості прихованих шарів, нейронів в них, перехресних зв'язків; на третьому етапі вирішується завдання структурно-параметричного синтезу модуля, до складу якого входить модифікована БНМ; на четвертому

етапі вирішується завдання структурно-параметричного синтезу ансамблю, який складається з модулів, що дозволяє підвищити точність роботи систем за їх мінімальної складності.

Розроблено новий метод модифікації БНМ, в якому для підвищення ефективності (збільшення точності і зниження складності БНМ) розв'язання задачі здійснюється в два етапи: на першому етапі використовується гібридний багатокритеріальний еволюційний алгоритм для локалізації зони пошуку оптимальної структури і вагових коефіцієнтів НМ, а на другому – для більш точного визначення кількості нейронів в прихованих шарах застосовується адаптивний алгоритм об'єднання і нарощування, уточнення вагових коефіцієнтів здійснюється на підставі використання методів зворотного розповсюдження помилки і найшвидшого спуску (стохастичного градієнтного спуску).

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Ye. Bodyanskiy, I. Pliss, and O. Vynokurova, "Hybrid wavelet-neuro-fuzzy system using adaptive W-neurons," *Wissenschaftliche Berichte, FH Zittau/Goerlitz*, no.106 (N.2454–2490), pp. 301–308, 2010.
- [2] Винокурова Е. А. Об одном алгоритме обучения адаптивной вэйвлет-нейронной сети на скользящем окне / Е. А. Винокурова, Н. С. Ламонова // Автоматизация виробничих процесів. – №21(2). – 2005. – С. 71–75.
- [3] Винокурова О. А. Функціонально-зв'язана багатовимірна вейвлет-нейро фаззи система для обробки хаотичних часових рядів / О. А. Винокурова // наук. праці: науково-методичний журнал. Комп'ютерні технології: вип. 130. – Т. 143. – 2010. – С. 71–76.
- [4] Винокурова Е. А. Адаптивный алгоритм обучения фаззи-вэйвлет-нейронной сети / Е. А. Винокурова, А. А. Беднарская, И. П. Плисс // Системы обробки інформації. – №59(1). – 2007. – С. 15–18.
- [5] S. K. Oh, W. Pedrycz, and B. J. Park, "Self-Organizing Multi-layer Fuzzy Polynomial Neural Networks Based on Genetic Optimization," *Fuzzy Sets and Systems*. no. 145(1), pp. 165–181, July, 2004.
- [6] S.K. Oh and B. J. Park, "Self-organizing neuro-fuzzy networks in modeling software data," *Neurocomputing*. no. 64, pp. 397–431, March 2005.
- [7] Sung-Kwun Oh, Witold Pedrycz, Hyun-Ki Kim, and Jong-Beom Lee, "Self-Organizing Multi-layer Fuzzy Polynomial Neural Networks Based on Genetic Optimization," *Computational Science-ICCS 2004, 4-th International Conference*, Krakov, Poland, June 2004, Proceedings, Part II, 179–187.
- [8] Бодянский Е. В. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применения / Е. В. Бодянский, О. Г. Руденко. – Харьков: Телетех, 2004. – 369 с.
- [9] Головки В. А. Нейронные сети: обучение, организация и применение / В. А. Головки. – М.: ИПРЖР, 2001. – 256 с. – (Серия «Нейрокомпьютеры и их применение». Кн. 4).
- [10] <http://mnmstudio.org/neural-networks-kohonen-self-organizing-maps.htm>
- [11] Gonzalo Martinez-Muñoz, Daniel Hernandez-Lobato, and Alberto Suárez, "An Analysis of Ensemble Pruning Techniques Based on Ordered Aggregation," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 31, no. 2, February 2009, pp. 245–259.
- [12] G. Martinez-Muñoz and A. Suárez, "Pruning in ordered bagging ensembles," in *Proc. of the 23rd International Conference on Machine Learning*, 2006, pp. 609–616.

Інтелектуальна Медична Діагностична Система на Основі Нечітких Нейронних Мереж

Чумаченко Олена

Кафедра технічної кібернетики,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря
Сікорського», Київ, Україна
chumachenko@tk.kpi.ua

Кот Анатолій

Кафедра технічної кібернетики,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря
Сікорського», Київ, Україна
anatoly.kot@gmail.com

Intelligent Medical Diagnostic System Based on Fuzzy Neural Networks

Chumachenko Olena

Technical Cybernetic Department
National Technical University of Ukraine
“Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine
chumachenko@tk.kpi.ua

Kot Ananoliy

Technical Cybernetic Department
National Technical University of Ukraine
“Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine
anatoly.kot@gmail.com

Анотація—Розглянуто принцип побудови інтелектуальної системи діагностики патологій щитовидної залози. Визначено основні особливості ультразвукових зображень для пацієнтів з раком щитовидної залози. Запропоновано структурну схему інтелектуальної діагностики, яка включає дві основні підсистеми: підтримки прийняття рішень і обробки зображень. В якості класифікатора використовується нечітка нейронна мережа автоенкодер. Для обробки ультразвукових зображень використовується згорткова нейронна мережа.

Abstract—It is considered a principle of thyroid pathology diagnostics intelligent system structure. It is determined basic ultrasound images features for patients with thyroid cancers. The block diagram of intellectual diagnostics is proposed. It includes two basic subsystems: making decision support and image processing. As a classifier it is used fuzzy neural networks autoencoder. It is used convolution neural networks for ultrasound images processing.

Ключові слова—інтелектуальна система діагностики патологій щитовидної залози; нечіткі нейронні мережі; згорткові нейронні мережі.

Keywords—thyroid pathology diagnostics intelligent system; fuzzy neural networks; convolution neural networks.

I. ВСТУП ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Діагностика злоякісних пухлин виконується на підставі проведення наступних видів досліджень [1, 2, 4, 5 – 8]: консультація лікаря, рентгенологічні методи, ультразвукова, комп'ютерна томографія, ендоскопічний метод, магнітно-резонансна томографія, радіоізотопна діагностика, радіоімуносцинтиграфія, термографія.

В даний час для постановки діагнозу захворювання щитовидної залози лікарі проводять обстеження за певною схемою, яка складається з обов'язкового діагностичного мінімуму і сукупності додаткових обстежень.

Ознаки, що визначають вид патології щитовидної залози [3] за результатами УЗД зображені на рис. 1.

Значеннями факторів, які визначаються за результатами УЗД і використовуються в якості входів НМ інтелектуальної системи діагностики, є [8]: тип обідка новоутворення, структура новоутворення, ехогенність новоутворення, розмір новоутворення.

Додатковими факторами, які використовують в якості входів НМ, є: загальний аналіз крові, раково-ембріональний антиген (РЕА), рівень гормону тиреокальцитонін, рівень ТТГ, рівень Т4, рівень Т3, шийна лімфаденопатія, тверда консистенція вузла, захриплість і

осиплість голосу, опромінення шиї і голови в анамнезі, вік, стать.

Загальну структуру системи діагностики показано на рис. 2.

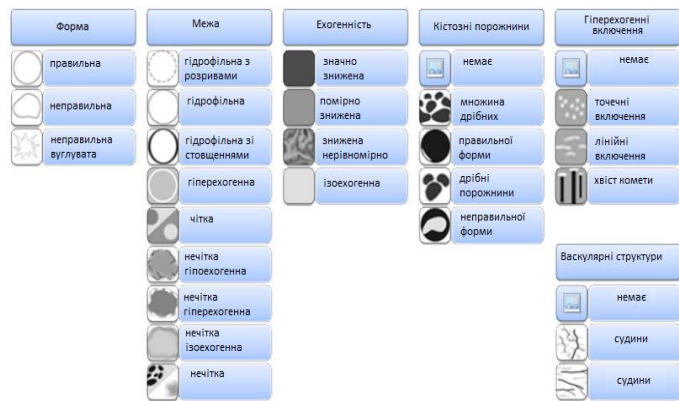


Рис. 1. Ознаки, що визначають вид патології щитовидної залози за результатами УЗД.

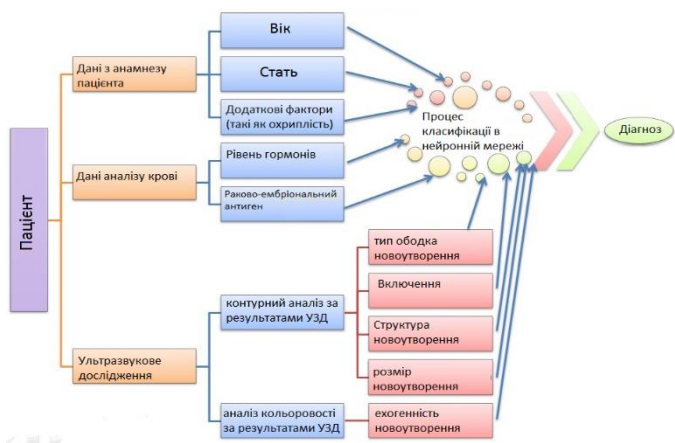


Рис. 2. Загальна структура системи діагностики.

II. ВИКОРИСТАННЯ ГЛИБОКИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБРАЗІВ НЕФОРМАЛІЗОВАНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Структурну схему інтелектуальної діагностичної системи (ІДС) представлено на рис. 3.

Відеозображення у цифровій формі поступають в блоки фільтрації та усунення геометричних спотворень для ліквідації впливу шумів. Після цього відеозображення надходить у блок виділення аномальної області, який реалізовано на базі згорткової нейронної мережі [10]. Оцінювання ознак, що визначають вид патології щитовидної залози за результатами УЗД виконується у блоці оцінювання аномальної області.

Потім проводиться порівняння параметрів ознак, отриманих із аналізу зображень, з нормальним станом органу, який досліджується та з патологічними змінами, що знаходяться у базі даних. У ній зберігаються дані обстеження і типові, заздалегідь сформовані за допомогою блоку статистичної обробки, ознаки захворювань. Даний

блок взаємодіє з блоком підтримки прийняття рішення і створення медичних документів. На підставі даних, отриманих з блоку інформації про сукупність патогенетичних факторів, блок багатофакторного аналізу дозволяє скласти для них рівняння регресії. Далі, за допомогою вирішальних правил з однойменного блоку формується рекомендоване рішення.

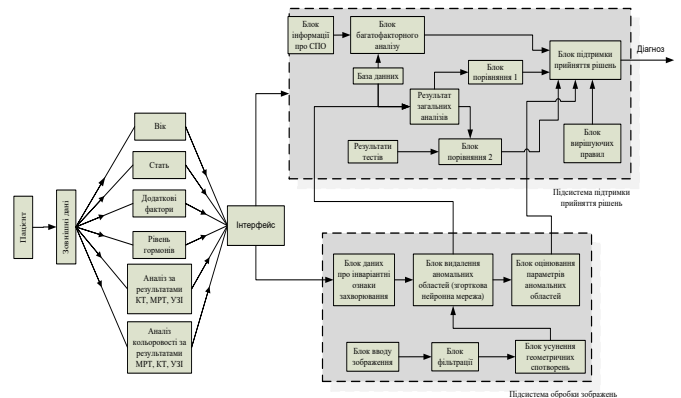


Рис. 3. Структурна схема інтелектуальної діагностики.

Блок прийняття рішень і створення медичних документів формує і виводить на монітор спеціальні дані у зручній для лікаря формі, а також оцінює їх інформаційну достовірність та дає рекомендації лікарю для постановки діагнозу, враховуючи на чинники, що впливають на захворювання.

III. АЛГОРИТМИ ВИЗНАЧЕННЯ ДІАГНОСТИЧНО-ЗНАЧИМИХ ОЗНАК ЗАХВОРЮВАНЬ НА ОСНОВІ ОБРОБКИ ВІДЕОЗОБРАЖЕНЬ УЗД ЗГОРТКОВОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

За допомогою згорткової нейронної мережі, у відповідності до структурної схеми інтелектуальної діагностичної системи, після виділення аномальних областей в результаті обробки відеозображень УЗД, необхідно оцінити їх параметри, а саме: тип обідка новоутворення, вклучення, структуру новоутворення, розмір новоутворення та ехогенність новоутворення (рис. 3).

Тип обідка, структура новоутворення та наявність вклучень визначаються за рахунок побудови автокореляційних функцій фрагментів аномальної області з подальшим порівнянням з еталонними кореляційними функціями, які відповідають можливим видам цих параметрів, наприклад, для вклучень це такі варіанти: немає, точечні вклучення, лінійні вклучення, «хвіст комети». Ехогенність новоутворення визначається на основі використання бібліотеки PIL (Piton Image Library).

IV. ПІДСИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОГО ЛОГІЧНОГО ВИСНОВКУ

В даний час побудова більшості систем нечіткого виводу базується на основі шести етапів:

- 1) формування бази правил логічного висновку;
- 2) фазифікації вхідних змінних;
- 3) агрегування підумови;
- 4) активація підвисновків;

- 5) акумулювання висновків;
- 6) дефазифікація.

В якості пухлин щитовидної залози розглянуто наступні: злоякісні (папілярна (ЗПП), фолікулярна (ЗФП), медулярна (ЗМП), анапластична (ЗАП)), інші захворювання (ІнЗ) (доброякісна фолікулярна аденома (ДФП), інші (Ін)).

Розроблена система нечіткого виведення дозволяє визначити види раку щитовидної залози, а саме: доброякісні (фолікулярна аденома, тощо) та злоякісні (фолікулярна карцинома, папілярна карцинома, медулярна карцинома, тощо).

Значення даних змінних виходять за допомогою чітких логічних перетворень із значень раніше описаних ВихЛЗ (які можуть набувати значень логічних «0» і «1»), що схематично показано на рис. 4.

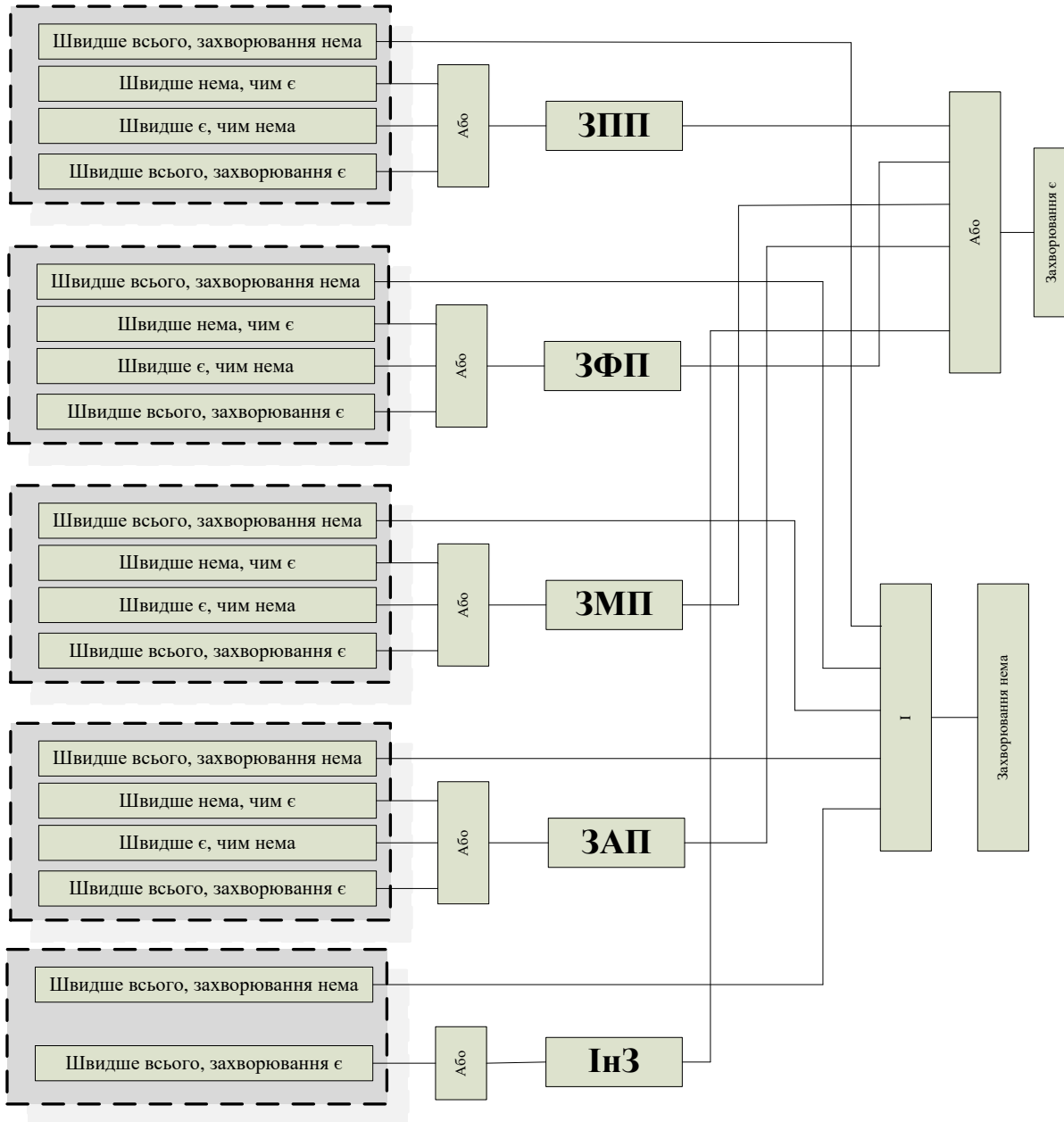


Рис. 4. Отримання вторинних ВихЛЗ в результаті узагальнення первинних.

V. ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВАГ ПРАВИЛ НЕЧІТКИХ ПРОДУКЦІЙ В СИСТЕМІ НЕЙРО-НЕЧІТКОГО ЛОГІЧНОГО ВИСНОВКУ

Розглянута вище схема побудови системи нечіткого логічного висновку використовує знання експертів для визначення ступеня важливості правила нечітких продукцій (ПНП). Однак ваги правил змінюються в залежності від появи нових фактів, а також висновків, ще точніше доводять або, навпаки, спростовують відомі раніше дані. Нарівні з цим, існують такі ПНП, вагу яких не представляється можливим визначити, або вони мають дуже велику ступінь нечіткості. Експерти сильно розходяться в думках, а іноді вони і зовсім суперечливі. Але все ж і в сумнівних випадках необхідно ставити діагнози, а їх правильність можна оцінити згодом при періодичному обстеженні пацієнта.

З метою усунення даної невизначеності пропонується для налаштування ваг ПНП подати систему логічного висновку у вигляді гібридної штучної нейронної мережі (ШНМ).

У порівнянні зі звичайною багат шаровою ШНМ, у даній мережі ускладнилася структура. Однак вона дозволяє чітко простежити логіку роботи системи виведення. Відсутність такої можливості у звичайних ШНМ є їх істотним недоліком. Крім того, нарівні з прозорістю структури, отриманої від системи нечіткого виведення, перевагою мережі є адаптивність. Вона проявляється у вигляді підстроювання ваг ПНП в процесі навчання ШНМ.

Навчання даної ШНМ здійснювалося за алгоритмом зворотного поширення помилки, модифікованого для застосування в нечітких нейронних мережах [9]. Зміни полягали в наступному:

- мережа навчалася по частинах, за кожним ПНП окремо;
- при навчанні налаштовувалися тільки ваги ПНП (шар 4), а інші параметри або вважалися незмінними, або такими, що змінюються згідно до задалегідь відомого закону.

Таким чином, з огляду на те, що шари нейронів з точно визначеними параметрами були представлені одним шаром зі складною активаційною функцією, то запропонована ШНМ, ідентична тришаровій ШНМ (з одним прихованим шаром). Таким чином, навчання нейронечіткої мережі звелось до навчання тришарового перцептрона. Штучну нейронну мережу було навчено в процесі налаштування системи після виконання алгоритму налаштування параметрів СППР.

ВИСНОВКИ

Обґрунтовано необхідність створення інтелектуальної системи діагностики злоякісних пухлин, основними елементами якої є підсистеми обробки зображень УЗД, КТ, МРТ на основі використання згорткових нейронних мереж з метою виділення підозрілих областей, визначення їх геометричних розмірів, прийняття попереднього

рішення на підставі форми області та її ехогенності щодо належності до злоякісної та підтримки прийняття рішень на основі використання нечіткого логічного висновку і гібридних штучних нейронних мереж для визначення ваг правил нечітких продукцій в системі нейро-нечіткого логічного висновку.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Арсеньев С. Б. Извлечение знаний из медицинских баз данных / С. Б. Арсеньев. – 2000. – (<http://crystalway.pspu.ru>).
- [2] Бойко В. В. Анализ клинических данных в медицинских исследованиях на основе методов вычислительного интеллекта / В. В. Бойко, Е. В. Бодянский, Е. А. Винокурова и др. – Харьков: ТО Ексклюзив, 2008. – 120 с.
- [3] Валдина Е. А. Заболевания щитовидной железы / Е. А. Валдина. – Питер, 2006. – 259 с.
- [4] Чумаченко Е. И. Алгоритмическое обеспечение распределенных баз данных / Е. И. Чумаченко, С. С. Захаров // Искусственный интеллект. – 2012. – №3. – С. 37–42.
- [5] Чумаченко Е. И. Построение распределенных баз данных / Е. И. Чумаченко, С. С. Захаров // Искусственный интеллект. – 2011. – №2. – С. 94–98.
- [6] Чумаченко О. І. Розробка структури нейронної мережі в задачах діагностики / О. І. Чумаченко, О. Ю. Левіцький // Вісник НАУ. – К.: – 2012. – №2. – С. 57–65.
- [7] Щепотина И. Б. Алгоритмы современной онкологии / под ред. проф. И. Б. Щепотина, акад. АМН Украины Г. В. Бондаря, чл.-кор. АМН Украины В. Л. Ганула. – К.: Книга плюс, 2006 – 304 с.
- [8] Эпштейн Е.В. Ультразвуковое исследование щитовидной железы. Атлас-руководство / Е.В. Эпштейн, С.И. Матяшук. – К.: КВІЦ, 2004. – С. 43–273.
- [9] Осовский С. Нейронные сети для обработки информации: пер. И. Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика, – 2002. – 344 с.
- [10] Синеглазов В. М. Структурно-параметрический синтез загортковых нейронных сетей / В. М. Синеглазов, О. І. Чумаченко // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання». – Івано-Франківськ-Яремче, Україна (14 – 19 травня 2018 р.). – С. 225 – 228.

СЕКЦІЯ 2.

. Інформаційні технології в соціумі, освіті, медицині, економіці, управлінні, екології та юриспруденції

SECTION 2.

Information technologies in society, education, medicine, economics, management, ecology and law

Виділення Підмножин Ефективних Рішень в Задачах Реінжинірингу Технологічних Систем

Валерій Семенець
кафедра системотехніки
Харківський національний університет
радіоелектроніки
Харків, Україна
valery.semenets@nure.ua

Ольга Шевченко
кафедра системотехніки
Харківський національний університет
радіоелектроніки
Харків, Україна
1375helga@gmail.com

Володимир Безкоровайний
кафедра системотехніки
Харківський національний університет
радіоелектроніки
Харків, Україна
vladimir.beskorovainyi@nure.ua

Оксана Драз
кафедра системотехніки
Харківський національний університет
радіоелектроніки
Харків, Україна
oksana.draz@nure.ua

Selection of Subsets of Effective Solutions in Tasks of Reengineering of Technological Systems

Valerii Semenets
Department of System Engineering
Kharkiv National University of Radio Electronics
Kharkiv, Ukraine
valery.semenets@nure.ua

Olha Shevchenko
Department of System Engineering
Kharkiv National University of Radio Electronics
Kharkiv, Ukraine
1375helga@gmail.com

Volodymyr Beskorovainyi
Department of System Engineering
Kharkiv National University of Radio Electronics
Kharkiv, Ukraine
vladimir.beskorovainyi@nure.ua

Oksana Draz
Department of System Engineering
Kharkiv National University of Radio Electronics
Kharkiv, Ukraine
oksana.draz@nure.ua

Анотація—Проаналізовано підходи до формування підмножин ефективних варіантів у процесах багатокритеріального вибору рішень з реінжинірингу технологічних систем. Для опуклих множин варіантів запропоновані модифікації методів формування множини компромісів, що мають суттєво менші часові й ємнісні складності.

Abstract—The approaches to the formation of subsets of effective variants in the processes of multicriteria choice of decisions on reengineering of technological systems were analyzed. For convex sets of variants, modifications of the methods of forming a set of compromises with substantially less time and capacitive complexities are proposed.

Ключові слова—технологічні системи; проектування; реінжиніринг; багатокритеріальна оптимізація; Парето-оптимальні рішення

Keywords—*technological systems; designing; reengineering; multicriteria optimization; Pareto-optimal solutions*

I. ВСТУП

Сучасні технологічні об'єкти складаються з сукупності функціонально пов'язаних складних засобів технологічного оснащення, предметів виробництва та виконавців для здійснення в регламентованих умовах виробництва заданих технологічних процесів і операцій. Умови конкуренції вимагають постійної модернізації технологічних процесів і обладнання в рамках реінжинірингу технологічних систем (ТС). Процеси їх реінжинірингу передбачають розв'язання множини взаємопов'язаних задач структурної, топологічної та параметричної оптимізації за множиною функціональних і вартісних показників [1]. Методологія розв'язання таких задач базується на сучасній теорії прийняття рішень [2–4].

Переважає більшість задач структурної, топологічної і параметричної оптимізації ТС є комбінаторними по своїй суті. У процесі їх розв'язання здійснюється аналіз потужних множин багатокритеріальних альтернатив, переважна більшість з яких є неефективними [5]. Це обумовлює актуальність задач з розробки методів й інформаційних технологій автоматичного чи автоматизованого виділення підмножин ефективних рішень в задачах реінжинірингу технологічних систем.

II. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ

Сучасні технологічні системи складаються з великої кількості підсистем і елементів зі складними схемами взаємозв'язків між ними, можуть мати значну територіальну чи просторову розосередженість. Технології їх проектування і реінжинірингу базуються на ідеях агрегативно-декомпозиційного підходу, системного аналізу і системного проектування складних систем [6–7]. Властивості варіантів реінжинірингу ТС $P(s)$, що належать множині допустимих $S^* = \{s\}$, кількісно оцінюються за множиною часткових критеріїв $K(s) = \{k_1(s), k_2(s), \dots, k_m(s)\}$. При цьому у загальному випадку множина допустимих варіантів складається з двох підмножин $S^* = S^S \cup S^E$, де S^S - підмножина згоди, в якій часткові критерії варіантів можуть змінюватися узгоджено; S^E - підмножина ефективних (компромісних, Парето-оптимальних) варіантів, в якій хоча б одна пара критеріїв є строго суперечливою. Найкращий варіант реінжинірингу ТС повинен належати множині ефективних $s^o \in S^E$.

У результаті декомпозиції проблеми оптимізації подібних об'єктів виділяється сукупність задач $\{Task_i^l\}$, $l = \overline{1, n_l}$, $i = \overline{1, n_i}$ (де l - номер рівня декомпозиції проблеми; n_l - кількість рівнів декомпозиції; n_i - кількість задач на l -му рівні), для більшості з яких не сконструйовані моделі й ефективні методи розв'язання [1].

Кінцевою в логічній схемі системної оптимізації ТС є процедура розв'язання задачі прийняття рішень $Task^{DM}$. У загальному випадку вона передбачає розв'язання множини задач (підзадач):

$$Task^{DM} = \{Task_i^{DM}\}, i = \overline{1, 6}, \quad (1)$$

де $Task_1^{DM}$ - формалізація мети реінжинірингу системи; $Task_2^{DM}$ - визначення універсальної множини рішень $S^U = \{s\}$; $Task_3^{DM}$ - визначення підмножини допустимих рішень $S^* \subseteq S^U$; $Task_4^{DM}$ - виділення підмножини ефективних рішень $S^E \subseteq S^* \subseteq S^U$; $Task_5^{DM}$ - ранжування рішень $s \in S^E$; $Task_6^{DM}$ - вибір найкращого рішення $s^o \in S^E$.

Знаходження точних розв'язків задачі $Task_4^{DM}$ $S^E \subseteq S^*$ для опуклих і неопуклих множин допустимих варіантів $S^* = \{s\}$ традиційно базується на аналізі властивостей ефективних альтернатив $s \in S^E$ з використанням теорем С. Карліна і Ю. Гермейєра [6]. Внаслідок комбінаторного характеру більшості задач реінжинірингу ТС точне визначення підмножини його ефективних варіантів $S^E = \{s\}$ є досить складним з обчислювальної точки зору. Методи, засновані на попередньому виділенні наближеної множини компромісів, спрощують пошук розв'язків задачі $Task_4^{DM}$ [8–9], проте є прийнятними лише для опуклих множин допустимих варіантів $S^* = \{s\}$ і потребують значних обсягів пам'яті для зберігання даних.

На множині допустимих варіантів реінжинірингу $S^* = \{s\}$ попередньо виділяється наближена підмножина компромісів $S^N = \{s\}$ [8]. При цьому повинна виконуватися вимога $S^E \subseteq S^N$. Для цього на множині S^* здійснюється оптимізація за кожним з часткових критеріїв $k_j(s)$, $j = \overline{1, m}$. У результаті визначаються найкращі за кожним критерієм варіанти $s_i^o = \arg \max_{s \in S^*} k_j(s)$, $j = \overline{1, m}$ і відповідні їм значення інших часткових критеріїв $k_l(s_i^o)$, $l = \overline{1, m}$, $l \neq j$. Тоді, найкраще значення j -го часткового критерію $k_j^+ = k_j(s_j^o)$, а найгірше серед значень j -го часткового критерію в точках екстремумів за іншими критеріями дорівнює $k_j^- = \max_{1 \leq l \leq m} k_j(s_l^o)$, якщо $k_j(s) \rightarrow \min$ і $k_j^- = \min_{1 \leq l \leq m} k_j(s_l^o)$, якщо $k_j(s) \rightarrow \max$. Отримані пари значень $\langle k_j^+, k_j^- \rangle$, $j = \overline{1, m}$ є границями відображення множини $S^E \subseteq S_1^N$ в простір часткових критеріїв K .

Усі варіанти з множини допустимих $s \in S^*$, для яких виконуються умови $k_j^+ \geq k_j(s) \geq k_j^-$, $\forall j \in I$, (де I - множина критеріїв на максимум) і $k_j^+ \leq k_j(s) \leq k_j^-$, $\forall j \in J$ (де J - множина критеріїв на максимум), включаються до наближеної множини компромісів $S_1^N \subseteq S^*$.

Недоліком цього методу є те, що на неопуклих множині допустимих варіантів реінжинірингу ТС $S^* = \{s\}$ він не гарантує виконання умови $S^E \subseteq S^N$.

Метою дослідження є зниження часової та ємнісної складності процедур визначення підмножин ефективних варіантів для технологій проектування і реінжинірингу технологічних систем.

III. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

За результатами аналізу мети реінжинірингу

технологічної системи (задача $Task_1^{DM}$) (1), умов її функціонування й її бажаних властивостей $P'(s)$ визначаються підмножини елементів $E'(s)$, відношень між ними $R'(s)$ і топологій $G'(s)$, на яких вона може бути реалізована (задача $Task_2^{DM}$). З урахуванням економічних, екологічних, політичних інших обмежень визначаються підмножини елементів $E^*(s) \subseteq E'(s)$, відношень $R^*(s) \subseteq R'(s)$ і топологій $G^* \subseteq G'(s)$, які визначають простір існування допустимих варіантів реінжинірингу ТС $S^* \subseteq S^U$ (задача $Task_3^{DM}$). Множина властивостей кожного з варіантів реінжинірингу ТС $P(s)$, $s \in S^*$ може бути кількісно оцінена множиною часткових критеріїв $K(s) = \{k_1(s), k_2(s), \dots, k_m(s)\}$. На отриманій множині $S^* = \{s\}$ виділяється підмножина ефективних варіантів $S^E \subseteq S^*$, жоден з яких не може бути покращений одночасно за всіма частковими критеріями (задача $Task_4^{DM}$). Пошук найкращого варіанту реінжинірингу ТС $s^o = \langle E^o, R^o, G^o \rangle$ здійснюється шляхом розв'язання задач $Task_5^{DM}$ і $Task_6^{DM}$ на підмножині ефективних варіантів $s^o \in S^E$ [10].

При цьому замість множини часткових критеріїв $K(s) = \{k_1(s), k_2(s), \dots, k_m(s)\}$ використовується множина їх перетворень $W(s) = \{w_1(s), w_2(s), \dots, w_m(s)\}$, що приводять їх до безрозмірного вигляду і до задачі мінімізації. Вважається, що всі перетворення $w_j(s) > 0$, $j = \overline{1, m}$ і мінімізуються. Множина ефективних варіантів $S^E = \{s\}$ для множини функцій мети $k_j(s)$, $j = \overline{1, m}$ може бути знайдена об'єднанням варіантів s_j^o , $\forall j = \overline{1, m}$, які відповідають оптимуму за кожним з часткових критеріїв $k_j^o(s)$, $j = \overline{1, m}$, шляхом розв'язання задачі математичного програмування відносно параметрів $\lambda_j \in A^+ = \{\lambda_j : \lambda_j > 0 \forall j = \overline{1, m}, \sum_{j=1}^m \lambda_j = 1\}$ [5, 6]:

$$\min_{s \in S^*} \left\{ F(s) = \sum_{j=1}^m \lambda_j w_j(s) \right\}, \quad (2)$$

де $w_j(s) > 0$, $\forall j = \overline{1, m}$ є увігнутими неперервними функціями, а множина допустимих варіантів $S^* = \{s\}$ є опуклою замкненою множиною. У тому випадку, коли $w_j(s)$, $j = \overline{1, m}$ не є опуклими, або множина допустимих варіантів $S^* = \{s\}$ не є опуклою, шляхом розв'язання задачі (2) не вдається відшукати всю множину ефективних варіантів реінжинірингу ТС $S^E = \{s\}$.

У загальному випадку множину ефективних варіантів реінжинірингу ТС $S^E = \{s\}$ для множини функцій мети

$k_j(s)$, $j = \overline{1, m}$ можна знайти об'єднанням варіантів s_j^o , $\forall j = \overline{1, m}$, які оптимізують кожен з часткових критеріїв мети $k_j^o(s)$, $j = \overline{1, m}$, шляхом вирішення задачі математичного програмування відносно параметрів $\lambda_j \in A^+ = \{\lambda_j : \lambda_j > 0 \forall j = \overline{1, m}, \sum_{j=1}^m \lambda_j = 1\}$ [5, 6]:

$$\min_{s \in S^*} \left\{ F(s) = \max_{1 \leq j \leq m} \left\{ \sum_{j=1}^m \lambda_j w_j(s) \right\} \right\}. \quad (3)$$

У цьому методі вимога угнутості і неперервності функцій $w_j(s)$, $j = \overline{1, m}$ і опуклості множини допустимих варіантів $S^* = \{s\}$ не накладаються. Однак, у разі, коли розв'язок задачі (3) буде не єдиним, для вибраних значень параметрів $\lambda_j \in A^+$, $j = \overline{1, m}$ не всі знайдені варіанти

$$s_j^o = \arg \text{extr}_{s \in S^*} k_j^o(s), \quad j = \overline{1, m}$$

можуть бути ефективними.

Знаходження множини ефективних варіантів $S^E = \{s\}$ наведеними методами зводиться до вирішення задач параметричного програмування для всього набору значень вагових коефіцієнтів часткових критеріїв $\lambda_j \geq 0$, $j = \overline{1, m}$

$\sum_{j=1}^m \lambda_j = 1$, але різних узагальнених критеріїв ефективності. У багатьох випадках визначити всю множину ефективних варіантів $S^E = \{s\}$ не вдається через високу ємнісну або обчислювальну складність розв'язання задач (2) або (3).

Для спрощення часової складності методу розв'язання задачі $Task_4^{DM}$ пропонується формувати наближені множини ефективних варіантів реінжинірингу ТС меншої потужності S_2^N, S_3^N, \dots , для яких:

$$S_r^N \subset \dots \subset S_2^N \subset S_1^N; \quad (4)$$

$$Card(S_r^N) < \dots < Card(S_2^N) \ll Card(S_1^N).$$

Для цього на множині S^* здійснюється оптимізація за кожним з часткових критеріїв $k_j(s)$, $j = \overline{1, m}$ і визначаються: найкращі варіанти за кожним з критеріїв $s_i^o = \arg \text{extr}_{s \in S^*} k_j(s)$, $j = \overline{1, m}$; відповідні їм значення інших часткових критеріїв $k_l(s_i^o)$, $l = \overline{1, m}, l \neq j$; найкращі і найгірші значення часткових критеріїв $k_j^+, k_j^-, j = \overline{1, m}$ у точках екстремумів за всіма критеріями. Отримані пари значень $\langle k_j^+, k_j^- \rangle$, $j = \overline{1, m}$ визначають крайні точки границі S^E за частковими критеріями $k_{ij} = k_i(s_j^o)$,

$i, j = \overline{1, m}$ (рис.1).

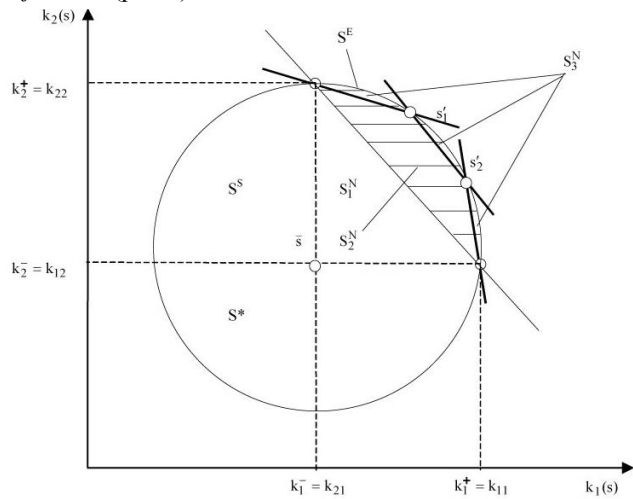


Рис. 1. Структура опуклої області допустимих варіантів S^* для $k_1(s) \rightarrow \max$ і $k_2(s) \rightarrow \max$.

Побудувавши площину, що проходить через граничні точки $k_{ij} = k_i(s_j^o)$, $i, j = \overline{1, m}$, визначимо границю наближеної множини ефективних варіантів S_2^N . Для подальшого скорочення наближеної множини ефективних варіантів необхідно визначити додатково опорні варіанти $s_1^E, s_2^E \in S^E$, що рівномірно розосереджені по границі множини S^* між точками $k_{ij} = k_i(s_j^o)$, $i, j = \overline{1, m}$.

Зі збільшенням кількості часткових критеріїв m і кількості опорних варіантів $s_1^E, s_2^E, \dots, s_r^E \in S^E$ спостерігається подальше скорочення потужності підмножин (4), однак при цьому пропорційно збільшується часова складність методу.

Для звуження наближених підмножин $S_1^N, S_2^N, \dots, S_r^N$ до S^E може бути використана процедура парних порівнянь, що полягає у порівнянні всіх можливих пар варіантів $s_i, s_j \in S_r^N$ та видаленні з подальшого розгляду варіантів $s_i \in S_r^N$, які за всіма частковими критеріями гірші хоча б за один з інших $s_j \succ s_i, s_j \in S_r^N$.

У системах автоматизації проектування ТС при розв'язанні задач їх реінжинірингу, коли множина допустимих варіантів $S^* = \{s\}$ ще не сформована, пропонується формувати множин ефективних варіантів $S^E = \{s\}$ у процесі їх синтезу, що дозволить суттєво скорочувати часову і ємнісну складність процедур прийняття багатокритеріальних рішень [5, 9, 11-12]. У комбінаторних задачах оптимізації розмірністю $n = 15 \div 40$ відносні потужності підмножин ефективних варіантів $Card(S^E) / Card(S^*)$ склали від 0,0105 % до 3,05 %, що дозволило відповідно скоротити час і необхідну комп'ютерну пам'ять для їх розв'язання.

ВИСНОВКИ

Запропоновано модифікацію методів формування підмножин Парето для опуклих множин варіантів реінжинірингу технологічних систем, що базується на виділенні наближених підмножин компромісів. Вони мають суттєво нижчі часові й ємнісні складності, ніж традиційні методи. Отримані результати можуть бути узагальнені і використані в процедурах прийняття багатокритеріальних рішень у системах проектування та управління технічними й організаційно-технічними об'єктами. Їх застосування дозволить підвищити ступінь автоматизації процесів, скоротити час прийняття рішень та підвищити якість рішень, що приймаються.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Безкорований В., Шевченко О. Модель системної оптимізації технологічних об'єктів // Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання: матеріали статей Міжнародної науково-практичної конференції, м. Івано-Франківськ, 14-19 травня 2018 року. – Івано-Франківськ: п. Голіній О.М., 2018. – С. 327–330.
- [2] Greco S., Ehrgott M., Figueira J.R. . Multiple Criteria Decision Analysis – State of the Art Surveys. – New York: Springer, 2016. – 1346 p.
- [3] Kaliszewski I., Kiczowski T., Miroforidis J. Mechanical design, Multiple Criteria Decision Making and Pareto optimality gap // Engineering Computations. – 2016. Vol. 33(3). – P. 876-895.
- [4] Малаяр М.М. Моделі і методи багатокритеріального обмежено-раціонального вибору: Монографія. – Ужгород: РА «АУТДОР-ШАРК», 2016. – 222 с.
- [5] Бескоровайный В.В., Красько А.Ф. Автоматизация процессов выбора эффективных решений при автоматизированном проектировании систем управления и автоматики // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2007. – №4 (27). – С. 208–212.
- [6] Михалевич В.С., Волкович В.Л. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем. – М.: Наука, 1982. – 288 с.
- [7] Тимченко А.А. Основи системного проектування та аналізу складних об'єктів: У 2-х кн. Кн. 1. Основи САПР та системного проектування складних об'єктів / За ред. В.І.Бикова. – К.: Либідь, 2000. – 272 с.
- [8] Петров Э.Г., Новожилова М.В., Гребенник И.В., Соколова Н.А. Методы и средства принятия решений в социально-экономических и технических системах. Херсон: ОЛДИ-плюс, 2003. 380 с.
- [9] Бескоровайный В.В. Формирование множества эффективных вариантов при решении задач структурного синтеза территориально распределенных объектов // Радиоэлектроника и информатика. – 2003. – №. 4. – С. 113 – 116.
- [10] Овезгельдыев О.А., Петров Э.Г., Петров К.Э. Синтез и идентификация моделей многофакторного оценивания и оптимизации. – К.: Наукова думка, 2002. – 161 с.
- [11] Бескоровайный В. В., Подоляка К.Е. Выбор многокритериальных решений при реинжиниринге топологических структур систем крупномасштабного мониторинга // Системы обработки информации. – 2016. – № 5(142). – С. 80–86.
- [12] Beskorovainyi V., Podoliaka K. Reengineering the topological structure of large-scale monitoring systems // ECONTECHMOD. – 2015. – Vol. 4 (3). – P. 13-18.

Оцінювання Ефективності Процесу Очищення Повітря Газотурбінного Устаткування із Застосуванням Нечіткого Виведення

Людмила Бугаєва

кафедра кібернетики хіміко-технологічних процесів
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»
Київ, Україна
bugaeva_l@ukr.net

Юрій Безносик

кафедра кібернетики хіміко-технологічних процесів
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»
Київ, Україна
yu_beznosyk@ukr.net

Микола Іванов

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»
Київ, Україна
mukolaaaa@gmail.com

The Efficiency Assessment of Air Cleaning Process by Means Gas Turbine Equipment using Fuzzy Inference

Liudmyla Bugaieva

Department of Cybernetics of Chemical
Technology Processes
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
Kyiv, Ukraine
bugaeva_l@ukr.net

Yurii Beznosyk

Department of Cybernetics of Chemical
Technology Processes
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
Kyiv, Ukraine
yu_beznosyk@ukr.net

Mykola Ivanov

Department of Cybernetics of Chemical
Technology Processes
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
Kyiv, Ukraine
mukolaaaa@gmail.com

Анотація—Останнім часом нечітка логіка стає все більш використовуваною в прикладних інженерних задачах. Оскільки технологічні параметри процесів не завжди задані точними значеннями, а можуть бути визначені такими термінами як високий, середній, низький і т. ін., то застосування нечіткого виведення стає цілком виправданим.

В даній роботі пропонується рішення задачі оцінювання ефективності роботи газотурбінного устаткування при різних значеннях характеристик повітря, що надходить до повітроочисного пристрою газотурбінного двигуна. Зрозуміло, що характеристики повітря, що надходить, можуть змінюватись у широкому діапазоні й навряд чи

мають передбачувані значення, тому «нечітке» представлення подібних задач цілком природно. Задача було вирішено у пакеті Fuzzy Logic середовища Matlab.

Abstract—Recently, fuzzy logic has become increasingly used in applied engineering problems. Since the technological parameters of the processes are not always defined by exact values, but can be defined by such terms as high, medium, low, etc., the use of fuzzy inference becomes fully justified. In this paper, we propose a solution to the problem of evaluating the efficiency of gas turbine equipment at various values of the characteristics of the air that enters the air cleaning device of a gas turbine engine. It is clear that the characteristics of the incoming air can vary over a wide range of values and are unlikely to have predictable values, therefore the “fuzzy” presentation of such tasks is quite appropriate. The problem was solved in Matlab's Fuzzy Logic package.

Ключові слова—система нечіткого логічного виведення; алгоритм Мамдані; газотурбінний двигун; очищення повітря

Keywords—Fuzzy logic system; Mamdani algorithm; gas turbine engine, air purification

I. ВСТУП

Газотурбінні установки (ГТУ) широко застосовуються в багатьох галузях промисловості і в транспорті в усьому світі. Одним з перспективних напрямів розвитку електроенергетики в наш час є створення електростанцій з використанням ГТУ.

Великий вплив на загальну економічність, надійність, довговічність і екологічну безпеку ГТУ має якість повітря, що поступає в ГТУ. У газотурбінному устаткуванні повітря використовується для здійснення процесу згорання газу і є технологічним середовищем. Повітря всмоктується з атмосфери і проходить через елементи газотурбінної установки. Недостатньо ефективне очищення атмосферного повітря призводить до істотного зносу проточної частини двигуна, змінює швидкість робочого тіла по проточній частині компресора і турбіни, погіршує процес згорання палива, а в сучасних двигунах з високим коефіцієнтом корисної дії (34-39%) може викликати засмічення каналів системи охолодження лопаток турбіни [1]. Тому проблема очищення повітря, яке подається до ГТУ, є надзвичайно актуальною.

II. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Атмосферне повітря завжди містить якусь кількість пилових частинок природного походження, пов'язаного з ерозією ґрунтів, генерацією пилу різними природними джерелами. Додаткове забруднення повітря викликається техногенними чинниками, пов'язаними з життєдіяльністю людини (вихлопи від автотранспорту, вентиляційні викиди промислових підприємств та ін.).

Найбільш важливі параметри, що характеризують забруднення повітря, – це розподіл частинок по розмірах і концентрації частинок. Фактичні розміри частинок, звичайно, змінюються залежно від місця знаходження. Метеорологічні чинники, зокрема туман, сніг або дощ, а так само інші місцеві умови можуть впливати на розподіл

частинок по розмірах. Повітря в приморських районах, наприклад, може містити велику кількість солі.

Для видалення часток пилу з атмосферного повітря, що поступає до газових турбін, використовуються різні системи фільтрації. Зазвичай за нормальних умов найбільший розмір твердих часток, що надходять з повітря, не перевищує 10 - 15 мкм. Якщо розмір частинок перевищує 10 мкм, то це призводить до ерозії лопаток компресора. З другого боку, частки менші за 5 мкм відкладаються на лопатках, тобто маємо в результаті забруднення компресора. У випадку, коли розмір часток коливається у діапазоні від 5 до 10 мкм, то ерозія або забруднення можуть мати місце в залежності від твердості, хімічного складу та фізичних властивостей часток.

Очищення повітря від зважених частинок здійснюється із допомогою газоочисних апаратів і фільтрів [2]. Пиловловлювачі призначені для уловлювання частинок пилу і очищення повітря, що подається в двигун. Для очищення атмосферного повітря в нашому дослідженні розглядалися патронні фільтри.

У нас в країні і за кордоном останніми часом для тонкого санітарного очищення газу знаходять усе більше застосування регеновані патронні фільтри, основною особливістю яких є застосування фільтруючих елементів із складчастою поверхнею. Це надає їм ряд переваг: велику поверхню фільтрації на одиницю об'єму фільтру, відносно низькі швидкості фільтрації, що призводить до більш високої ефективності очищення, надає можливість збирати фільтри будь-якої продуктивності з універсальних блоків.

Значний об'єм накопичених даних дослідження фільтрів надає можливість моделювати процес як традиційними методами обробки інформації, так і з застосуванням інтелектуальних методів аналізу даних, які останнім часом набули широкого розповсюдження для прийняття рішень у різних галузях. В нашому випадку, знання, отримані в результаті такої обробки, можуть бути основою для прийняття управлінських рішень, спрямованих на підвищення ефективності процесу. Тому можна стверджувати, що створення інтелектуальних засобів підтримки прийняття рішень для підвищення якості процесу очищення повітря, що подається на вхід газотурбінного двигуна, є актуальною задачею.

Неякісна фільтрація повітря призводить до забруднення лопаток компресора промислової газотурбіни. У перших промислових газових турбінах швидкості повітря на краю лопатки та на кореновому перерізу були відносно низькими, і великі частки не мали достатнього імпульсу, щоб пошкодити лопатки і викликати дефекти деталей турбіни. З розвитком газових турбін швидкості лопаток компресора зросли (як і температури горіння), що стало причиною появи ерозії лопаток. Якщо для машин старого покоління досить найгрубішою фільтрації, то нові установки вимагають фільтрувальних систем із ще більш високим рівнем фільтрації.

До основних характеристик пиловловлюючих пристроїв відносяться ефективність (міра) очищення

повітря від пилу, яку також іноді називають коефіцієнтом корисної дії апарату.

Ефективність (міра) очищення повітря від пилу η обчислюється як різниця концентрації пилу в повітрі до очищення C_{ex} , і після очищення $C_{вих}$ (відповідно mg/m^3), виражається у відсотках (або в долях одиниці):

$$\eta = \frac{C_{ex} - C_{вих}}{C_{ex}} \cdot 100\%$$

Ефективність очищення – це найважливіша характеристика апарату. На неї орієнтуються при виборі пиловловлюючого пристрою відповідно до допустимого осадового вмісту в повітрі, що надходить на очищення.

Враховуючи актуальність проблеми, авторами було вивчено сучасний стан проблеми очищення атмосферного повітря для ГТУ за допомогою патронних фільтрів. Зібрано дані, пов'язані з очищенням атмосферного повітря для газотурбінних установок. За відсутності інформації по розрахунку та моделюванню процесу очищення повітря за допомогою патронних фільтрів в літературних джерелах авторами роботи було поставлено та вирішено задачу побудови легкого у користуванні інженером-технологом програмного інструменту для рішення задачі кількісного оцінювання ефективності процесу очищення повітря на патронних фільтрах при зміні характеристик повітря, що надходить в ГТУ.

III. РЕЗУЛЬТАТИ

Як вже зазначалось раніше, на якість очищення повітря фільтром впливає велика кількість чинників, серед яких температура повітря, що поступає на очищення, його швидкість та діаметр частинок пилу. Висока ступень невизначеності цих параметрів стала мотивацією для застосування апарату нечіткої логіки. Всі перелічені числові параметри повітря були замінені відповідними лінгвістичними змінними. При виборі програмного середовища для реалізації механізму нечіткого виведення авторами був обраний пакет Fuzzy Logic середовища Matlab.

Слід зауважити, що пакет Fuzzy Logic, вже на протязі майже 20 років із успіхом використовується в навчальному процесі кафедри кібернетики хіміко-технологічних процесів КПІ імені Ігоря Сікорського.

Було виконано багато магістерських досліджень для рішення технологічних та екологічних задач з його використанням. В пакеті Fuzzy Logic виконуються навіть завдання комп'ютерного практикуму із прийняття рішень з вибору методів очищення за алгоритмом Мамдані. Алгоритм Сугено, що дозволяє будувати нейро-нечіткі системи, застосовувався для прогнозування забруднення повітря в місті Києві та ін.

В даній роботі показано, як за допомогою пакету Fuzzy Logic середовища Matlab було виконано оцінювання ефективності патронного фільтру з урахуванням невизначеності значень параметрів атмосферного повітря.

Як було сказано, пакет Fuzzy Logic дозволяє побудувати систему нечіткого виведення на базі двох алгоритмів Мамдані та Сугено [7,8].

Алгоритм Мамдані дозволяє розробити класичну систему нечіткого виведення за три основні кроки:

1. Фазифікація - завдання досліджуваних кількісних характеристик, як нечітких лінгвістичних змінних.
2. Задання правил виведення на основі знань та досвіду експертів (рис.1).
3. Дефазифікація - повернення від нечітких параметрів до конкретного чисельного результату (рис.2).

Алгоритм Сугено реалізує побудову адаптивних нечітких нейронних мереж на основі даних. На відміну від алгоритму Мамдані цей алгоритм автоматизує деякі етапи побудови системи, але потребує на значну кількість достовірних даних, як будь-яка нейронна мережа.

Обидва алгоритми завдяки низці графічних засобів пакету Fuzzy Logic дозволяють відслідковувати та аналізувати поведінку системи нечіткого виведення.

Для рішення поставленої нами задачі авторами був застосований алгоритм Мамдані.

Як нечіткі на вході було обрано такі параметри:

- температура, що поступає на очищення;
- швидкість повітря;
- діаметр частинок пилу.

Вихідною характеристикою було обрано ефективність фільтру, що вимірювалась в %. На етапі фазифікації вхідні параметри були переведені у лінгвістичні змінні у відповідності з інтервальними значеннями, що відповідають категоріям низький, середній та високий. Деякі параметри мали проміжні значення типу вище або нижче середнього.

Враховуючи безперервний характер значень усіх розглянутих параметрів процесу очищення, було обрано функції приналежності, що розподіляються за Гаусовим законом. При чому ступень невизначеності легко корегувати, як задаючи конкретні значення параметрів Гаусових функцій приналежності у вікні значень (їх два - середнє значення та відхилення), так і використовуючи перетягування мишею до необхідного рівня нахилу кривих, що відображують ці функції приналежності.

Далі необхідною складовою є завдання правил, за якими має працювати система виведення. На основі знань експертів та експериментальних даних було сформовано 10 правил, що встановлюють взаємозв'язок між вхідними змінними та вихідною змінною – ефективністю (рис. 1).

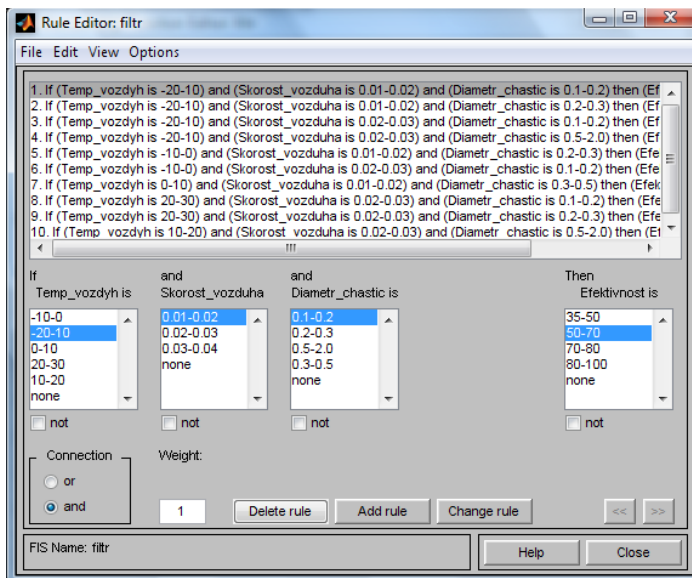


Рис. 1. Правила системи нечіткого виведення

На завершальному етапі роботи системи нечіткого виведення необхідно отримати конкретні чисельні результати. Етап дефазифікації здійснюється програмним середовищем Fuzzy Logic Matlab за обраним алгоритмом Мамдані.

Отримана в результаті побудови нечіткої системи виводу діаграма (рис. 2) дає можливість оцінювати ефективність фільтру (%) за різних значень вхідних параметрів повітря [1, 2]. Тестування роботи системи проводилось на основі даних попередніх досліджень з літератури та наявних експериментальних даних.

Тобто з точки зору пошуку найбільш ефективної системи нечіткого виведення середовище пакету Fuzzy Logic надає найбільш дружній інтерфейс користувачеві й не вимагає ні спеціальних навичок програмування, ні знань про роботу в командному вікні Matlab. Слід зауважити, що та ж сама робота по створенню системи нечіткого виведення може бути здійснена і безпосереднім створенням програмного коду, що надає середовище Matlab.

Зрозуміло, що побудована таким чином система нечіткого виведення дає можливість проводити численні комп'ютерні дослідження для будь-якого процесу за умови коректної постановки задачі. Під час реалізації системи в середовищі Fuzzy Logic Matlab важливо відповідно до суті задачі провести етап фазифікації (обрати функції приналежності вхідних-вихідних нечітких змінних та визначити їх параметри) та здійснити формулювання релевантного задачі набору правил виведення.

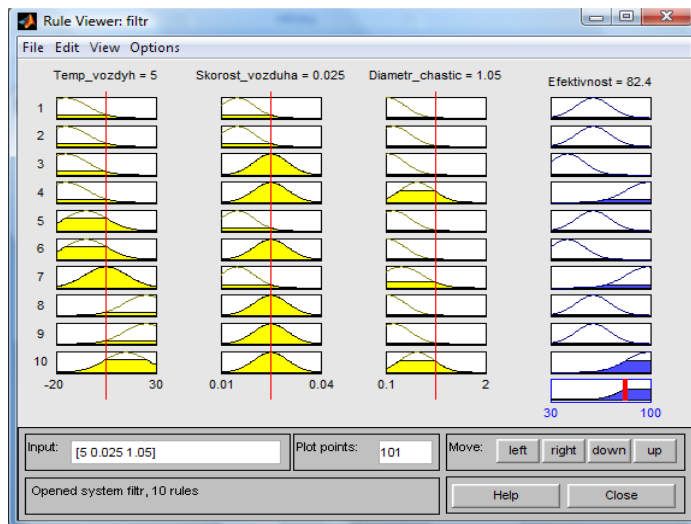


Рис. 2. Діаграма нечіткого логічного виведення

Таким чином, модель оцінки ефективності процесу фільтрації через патронний фільтр на основі інструментарію нечіткої логіки дає можливість досить швидко і точно оцінити якість процесу очищення повітря при будь-яких значеннях параметрів повітря, що надходить.

ВИСНОВКИ

Засобами середовища Fuzzy Logic Matlab була побудована система нечіткого виведення, для оцінки ефективності фільтру газотурбінної установки при різних значеннях вхідних параметрів повітря.

Така система надає можливість швидко здійснювати процедуру оцінювання ефективності процесу фільтрації на основі інструментарію нечіткої логіки і кількісно оцінити якість процесу очищення повітря.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Л. А. Хоменок, В. Е. Михайлов, А. А. Страшников, Д. В. Милоков Организация воздухоподготовки для газотурбинных энергетических установок различной мощности, *Теплоэнергетика*, № 1, 37-41, 2008.
- [2] Е. А. Штокман *Очистка воздуха*. М.: изд-во АСВ, 1998. – 320 с.
- [3] В. А. Кирш *Моделирование аэрозольных волокнистых фильтров при накоплении частиц: автореф. канд. дисерт.* М., 2001. – 20 с.
- [4] И. Н. Рыжинский, В. Г. Цодок, В. Г. Михайлов Высокоэффективные устройства подготовки циклового воздуха для ГТУ. *Газотурбинные технологии*, № 5, 28-30, 2004.
- [5] О. В. Лисицына, С. Н. Подлегаев, В. В. Пчелкин, Д. И. Сивков Современные воздухоочистительные устройства для ГТУ. *Газотурбинные технологии*, №1, 12-14, 2006.
- [6] Т. О. Косогорова *Исследование низкоскоростной фильтрации газов в волокнистых и керамических осадителях и разработка методов их расчета, дис. канд. техн. наук*. М., 2009. – 113 с.
- [7] Л. М. Бугаева, Т. В. Бойко, Ю. О. Безносик Системний аналіз хіміко-технологічних комплексів. Київ, Інтерсервіс, 2017
- [8] С. Д. Штовба *Проектирование нечетких систем средствами MATLAB*. М: Горячая линия-Телеком, 2007. – 288 с.

Дослідження Інформаційної Технології Індивідуалізації Процесу Навчання у Розподіленому Віртуальному Університеті

Артур Васильєв
кафедра програмної інженерії
Харківський національний університет
радіоелектроніки
Харків, Україна
artur.vasyliiev@nure.ua

Ігор Шубін
кафедра програмної інженерії
Харківський національний університет
радіоелектроніки
Харків, Україна
igor.shubin@nure.ua

Research of the Information Technology of the Training Process Individualization in Distributed Virtual University

Artur Vasyliiev
dept. of Software Engineering
Kharkiv National University of Radio Electronics
Kharkiv, Ukraine
artur.vasyliiev@nure.ua

Igor Shubin
dept. of Software Engineering
Kharkiv National University of Radio Electronics
Kharkiv, Ukraine
igor.shubin@nure.ua

Анотація—У роботі досліджується те, яким чином можна індивідуалізувати навчальний процес у віртуальному університеті. Аналізуються основні етапи освітнього процесу, які можна покращити за допомогою налагодження індивідуального підходу до студентів. Також аналізується процес формування індивідуальної траєкторії навчання, що базується на вивченні обов'язкових та вибіркових дисциплін. Пропонується аналізувати потреби студента та використовувати статистичні дані, що стосуються навчального курсу, для рекомендації ефективної траєкторії навчання.

Abstract—The paper examines how the training process in a virtual university can be individualized. The main stages of the educational process, which can be improved by establishing an individual approach to students, are analyzed. The process of forming an individual trajectory of training based on the study of compulsory and selective disciplines is also analyzed. It is suggested to analyze student needs and use statistics related to the training course to recommend an effective learning path.

Ключові слова—віртуальний університет; індивідуалізація; навчання; дисципліна

Keywords—virtual university; individualization; training; subject

I. ВСТУП

Технологічний прогрес все активніше впливає на світ, що нас оточує, змінюючи його для того, щоб він краще відповідав потребам людей в даний період розвитку суспільства. Одним з методів поліпшення є діджиталізація, в результаті якої процеси і об'єкти реального світу переносяться в Інтернет і стають більш доступними і зручними. Наприклад, висока потреба в соціальній взаємодії між людьми стала причиною появи соціальних мереж і розвитку гаджетів, які дозволяють безперервно залишатися на зв'язку. Об'єктом дослідження даної роботи є програмна система, що дозволяє надавати людям можливість дистанційного навчання в університеті. Дана система є результатом активного розвитку інформаційних технологій і наявності незручностей в традиційній освітній системі, що не відповідає потребам сучасної людини в отриманні максимально якісної освіти та ефективному управлінні власним часом.

II. ВІРТУАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

У даній роботі під віртуальним університетом [1] буде матися на увазі інформаційна технологія, яка надає доступ до можливостей і процесів вищих навчальних закладів, що співпрацюють між собою, тим самим надаючи студентам освітні послуги дистанційно, в залежності від їх потреб і мотивації. Віртуальний університет потрібен не тільки для того, щоб перенести традиційний університет в Інтернет, але і для того, щоб зробити деякі процеси більш ефективними за допомогою їх автоматизації. Наприклад, у віртуальному університеті одним з можливих видів оцінювання є тестування, яке повинно бути створене викладачем дисципліни, і яке студент повинен буде пройти дистанційно в певний проміжок часу, щоб перевірити якість набутих знань. Даний процес в кращу сторону відрізняється від такого в традиційному університеті, де необхідна присутність викладача і студентів для того, щоб із використанням додаткових ресурсів (канцелярських товарів або комп'ютерів) пройти тестування. Також в залежності від того, комп'ютерне це тестування або аудиторне, оцінювання студентів може зайняти від кількох хвилин до кількох годин, що у випадку з віртуальним університетом гарантовано триватиме не більше хвилини.

Також, згадуючи про віртуалізацію університетів, слід зазначити, що університет – це масштабне підприємство, яке складається з великої кількості структурних підрозділів, таких як деканати, факультети, кафедри, адміністративні та господарські частини. Для того, щоб віртуалізувати дані підрозділи, необхідно реалізувати систему документообігу, функції, що надають можливість взаємодії між працівниками, виконання бухгалтерських операцій, формування звітності, контролю активів підрозділів, вивчення дисциплін і контролю знань студентів. У даній роботі буде розглянута головна частина віртуального університету – процес навчання студентів, так як мета університету полягає саме в тому, щоб давати студентам знання високого рівня для того, щоб вони ставали висококласними професіоналами в обраній галузі.

У роботі [2] були виділені деякі основні характеристики, які відрізняють віртуальний університет від традиційного. Поряд з можливістю здійснення навчального процесу на відстані і реалізацією освітньої взаємодії в інтерактивному режимі, необхідно додати можливість вести освітню діяльність, динамічно підлаштовуючись під індивідуальні запити студента. Саме ця можливість є найбільш важливою і безпосередньо впливає на рівень знань студента, на відміну від віддаленості або інтерактивності навчання. Це пов'язано з тим, що для поліпшення ефективності освітнього процесу, студентів одного напрямку варто розглядати не як єдину сутність, а як самостійних учнів, які бажать здобувати вищу освіту в певному обсязі, заглиблюючись в деякі теми глибше, ніж це роблять інші студенти того самого напрямку. З огляду на це, є необхідність в тому, щоб дослідити, як саме можна індивідуалізувати освітній процес, і на яких саме етапах навчання студента це можна зробити.

III. НАВЧАННЯ У ВІРТУАЛЬНОМУ УНІВЕРСИТЕТІ

У процесі отримання освіти, з боку студента можна виділити наступні етапи:

- вибір напрямку навчання;
- вибір дисциплін;
- вивчення дисциплін.

Перед тим, як починати навчання, студенту необхідно визначитися з напрямком, в якому він бачить свою подальшу професійну діяльність. Вже на цьому етапі університет повинен допомогти студенту з вибором, для цього необхідно представити достатню кількість інформації про кожен з існуючих спеціальностей. Для будь-якої спеціальності може бути зазначено в яких галузях студент отримає знання, які навички він опанує в процесі навчання і ким він зможе реалізуватися в професійному плані. Для того, щоб процес вибору спеціалізації пройшов ефективно і студентом був зроблений правильний вибір, віртуальний університет повинен мати інтелектуальну підсистему, що дозволяє студентам висловлювати свої побажання про те, що саме студент очікує від навчання і в залежності від цього рекомендувати спеціальності, які максимально відповідають вимогам студента. Для реалізації такої підсистеми необхідна інформація про кожен з напрямів навчання, представлена в структурованому вигляді для того, щоб провести порівняльний аналіз цих напрямків. На основі цих даних можна створити покрокове опитування, яке з кожним кроком буде видаляти зі списку рекомендованих напрямів навчання ті, які не відповідали очікуванням опитуваного на попередньому кроці.

Навчання в університеті передбачає вивчення різних дисциплін, які стосуються основного напрямку навчання. У різних університетах світу є різні можливості взаємодії з дисциплінами. На деяких спеціальностях в українських університетах можна вибрати одну з декількох дисциплін, що стосуються специфічної області в спеціалізації. Наприклад, в ХНУРЕ на напрямку «Інженерія програмного забезпечення» можна вибрати одну з наступних дисциплін: банківські системи і системи машинного зору. Обидві дисципліни докладно описують специфічну галузь, що базується на застосуванні нових підходів в програмній інженерії, тобто обравши одну з дисциплін студент детально ознайомиться з теоретичним і практичним застосуванням вже отриманих знань за фахом в прикладній галузі. З точки зору ефективності, немає сенсу зобов'язувати студента вивчати дані дві дисципліни, так як вони мають спільну мету – показати на прикладі існуючої предметної області як саме розробка програмного забезпечення дозволяє її поліпшити. В даному випадку поділ двох дисциплін дозволяє запропонувати студентам більшу кількість варіантів предметних областей, на прикладі яких їм буде цікавіше розглядати процес розробки програмного забезпечення.

У європейських і американських університетах, які перебувають на найвищих позиціях світових рейтингів, процес вибору дисциплін є ще більш гнучким. Основною базою для складання набору дисциплін є використання

кредитної системи під час навчання [3]. Кредити – це числове представлення навантаження студента в освітньому процесі. Наприклад, в Європі використовується поняття ECTS-кредиту, один такий кредит в різних країнах є еквівалентом 25-30 годин вивчення матеріалів і виконання завдань.

Університети використовують кредитну систему для того, щоб представляти кількість часу та сил, витрачених на вивчення курсу в числовому вигляді. Очевидно, що даний підхід не є ідеальним через відносність складності вивчення дисципліни в залежності від студента, який її вивчає. Незважаючи на це, кредитна система використовується у вищих навчальних закладах у всьому світі. Критеріями успішності студента при завершенні навчального семестру є вивчення набору дисциплін, кредити яких в сумі дають певну кількість кредитів і наявність хоча б задовільної оцінки з кожної з вивчених дисциплін. Тому можливість індивідуалізації процесу вибору дисциплін буде розглядатися в рамках моделі університету, що використовує систему кредитів і надає для вивчення як обов'язкові дисципліни, так і дисципліни на вибір.

IV. ІНДИВІДУАЛІЗАЦІЯ НАВЧАННЯ

Індивідуалізація процесу вибору дисциплін в розподіленому університеті, в якому використовується кредитна система оцінювання, складається з наступних етапів:

- прийняття до уваги дисциплін, вивчених раніше;
- надання повної інформації про обов'язкові та вибіркові дисципліни;
- надання можливості вибору варіанту дисципліни.

Перший етап допоможе студенту в ситуації, коли для вивчення певної дисципліни потребується наявність у студента знань, які могли з'явитися тільки при вивченні іншої дисципліни. Наприклад, для вивчення курсу фізики в університеті необхідно мати знання про інтеграли і похідні, які надають на курсі вищої математики. Студенту має бути повідомлено про те, що для вивчення дисципліни потрібна попередня підготовка. У свою чергу він може зайнятися вивченням курсу, якого йому бракує, або покласти на свої сили і почати вивчення основної дисципліни. Даний етап є рекомендаційним і пропонує студенту достатню свободу вибору для визначення своєї освітньої траєкторії.

Студент повинен мати інформацію про те, які дисципліни є обов'язковими, а які можна замінити. Обов'язкові дисципліни, найчастіше, є базою для придбання основних знань і навичок, які допоможуть простіше освоювати інші предмети, таким чином студент не має можливості пропустити обов'язкову дисципліну або замінити її. Свобода вибору траєкторії навчання на цьому етапі забезпечується управлінням курсами, наданими на вибір. Можна виділити 2 види зв'язків між альтернативними дисциплінами:

- дисципліни відрізняються по темі, але схожі за навичками, які отримувє студент;

- дисципліни схожі по темі, але одна з них частково або повністю включає в себе іншу.

На етапі вибору дисциплін студент повинен розуміти, які дисципліни пов'язані між собою і яким саме зв'язком. Як приклад до першого виду зв'язку можна навести курси, пов'язані з вивченням програмування на різних мовах. Очевидно, що мова Python відрізняється від мови C#, але курси програмування в першу чергу розвивають у студентів математичне мислення, навчає базовим принципам програмування і показує, що мова – це інструмент, яким програміст втілює свої ідеї. Якщо студент вивчить одну мову програмування, то ґрунтуючись на ній він зможе з меншими витратами приступити до вивчення іншої мови програмування. Таким чином, якщо дисципліни мають спільну ідею, яку вони бажають донести до студента, вони повинні бути об'єднані в групу альтернативних дисциплін з першим видом зв'язку. При виборі дисципліни з такої групи альтернатив студент не повинен обмежуватися однією дисципліною, оскільки незважаючи на схожість курсів, їх об'єднує спільна ідея, а не зміст і тема курсу. Це також говорить про те, що в разі, якщо студент пройде два курси з однієї групи альтернатив, кількість кредитів має підсумовуватися.

Другий вид зв'язку має власні особливості, що відрізняються від першого. Якщо в першому випадку ми говорили про те, що курси мають достатньо відмінностей для того, щоб кредити за них підсумовувалися, то в другому випадку вивчення декількох дисциплін не повинне надавати додаткові кредити, бо студент не вивчає новий матеріал. Припустимо, що в спеціалізації є дві дисципліни, що стосуються вищої математики, але один курс позначений як вступний, а другий як поглиблений. В такому випадку поглиблений курс може повністю покривати вступний курс і за рахунок різниці в їх обсягах буде виникати різниця в кредитах за кожен з дисциплін.

Поділ дисциплін на групи альтернатив – це необхідний процес, який повинен бути виконаний перед запуском віртуального університету і кожний раз після поповнення університету дисциплінами, групи, як і зв'язки всередині них можуть змінюватися. Цей процес повинен бути автоматизований таким чином, щоб адміністратору або викладачеві, відповідальному за додавання дисциплін, було простіше порівняти новий курс з існуючими альтернативами, але в будь-якому випадку, через складність і розмаїття матеріалів в різних дисциплінах, етап формування зв'язків між дисциплінами повинен проводитися фахівцем.

Розподілений віртуальний університет є об'єднанням декількох віртуальних університетів, в якому учасники діляться між собою освітніми ресурсами (методичними матеріалами, навчальними виданнями, викладачами і дисциплінами). Такий вид взаємодії університетів робить процес вибору дисциплін більш гнучким за рахунок того, що одну і ту ж дисципліну можуть викладати в різних університетах, при цьому дисципліни в різних університетах можуть відрізнятися викладачем, якістю і обсягом матеріалу, з чого виходить різниця в кількості кредитів для кожної з дисциплін.

Останнім етапом процесу індивідуалізації процесу навчання в розподіленому віртуальному університеті є надання можливості вибору варіанту дисципліни, який студент хоче вивчати. Під варіантом дисципліни мається на увазі поєднання викладача, матеріалів і навчального плану. Наприклад, якщо дисципліну «Анатомія людини» викладають в двох вищих навчальних закладах, які перебувають в одному віртуальному університеті, то студент може вибрати, курс котрого з університетів він буде вивчати. Даний вибір може залежати від викладача, виду і якості досліджуваних матеріалів або навчального плану (кількості лекцій, практичних занять та тестувань). Розподілений віртуальний університет повинен надавати студентам можливість ознайомитися з усіма варіантами тієї чи іншої дисципліни, при цьому важливо, щоб кількість кредитів для кожного варіанту не відрізнялася, тому що інакше це вже будуть не різні варіанти одного курсу, а альтернативні дисципліни. Студенту повинна бути надана інформація, на основі аналізу якої він зробить свій вибір. Один з можливих варіантів – порівняння рейтингів викладачів, які ведуть курс. Рейтингова система оцінювання викладачів і студентів може стати досить зручною для аналізу, але при цьому часто такі системи провокують зловживання оцінюванням і це може бути використано для примусового підвищення або зменшення значення рейтингу.

Для того, щоб інформація про дисципліну була більш правдивою, потрібно відкрито надавати статистику про те, скільки людей починало проходити курс, який відсоток цих людей завершив курс та яка успішність студентів, що проходили цей курс. Для ще більшої ефективності процесу вибору дисципліни, зібрану раніше статистичну інформацію про попередній досвід вивчення варіантів дисциплін різними студентами можна використовувати для створення рекомендацій для нових студентів. Система рекомендацій може аналізувати пройдену іншими студентами траєкторію навчання і успішність в кожній дисципліні, представляти траєкторію у вигляді графа і пропонувати рекомендації базуючись на тих траєкторіях, які максимально близькі до обраного студента. Це допоможе студенту дізнатися який вибір робили ті, хто вже пройшов навчання на тому ж напрямку зі схожою траєкторією вивчення дисциплін та успішністю.

ВИСНОВКИ

Індивідуалізація навчального процесу є дуже важливим етапом в побудові освітньої діяльності університету. Структура розподіленого віртуального університету дозволяє персонально підійти до адаптації навчального процесу на етапах вибору напрямку навчання та досліджуваних курсів, що дозволяє поліпшувати ефективність побудови освітньої траєкторії студента, ґрунтуючись на його потребах і навантаженості.

Для побудови моделі, що представляє освітню траєкторію студента, необхідно розглядати такі фактори, як зв'язок між дисциплінами, зібрані статистичні дані про проходження курсів, вимоги студента і його успішність. На підставі цих даних може бути створена рекомендаційна система всередині віртуального університету, яка буде

формуєвати і адаптувати освітній процес під потреби студента.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] В. А. Сухомлин, Віртуальний національний університет ІТ-освіти: проект створення // Прикладна інформатика. – 2008. – № 3 (15). – С. 89-115.
- [2] М. Ю. Кадемія, Організація навчального процесу у віртуальному університеті // Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання у підготовці фахівців: методологія, теорія, досвід, проблеми. – 2016. – Вип. 46. – С. 191-197.
- [3] М. М. Фіцула, Педагогіка вищої школи: навчальний посібник [Електронний ресурс] / Режим доступу: http://npu.edu.ua!/e-book/book/html/D/ispu_kiovist_Ficyla_Pedagogika_VSh

Оптимізація Структури Проекту Стратегічного Розвитку Туризму в Карпатському Регіоні

Мар'яна Грицюк
кафедра інформаційних
технологій
Національний лісотехнічний
університет України
Львів, Україна
mariana.grytsiuk@gmail.com

Юрій Грицюк
кафедра програмного
забезпечення
Національний університет
"Львівська політехніка"
Львів, Україна
yurii.i.hrytsiuk@lpnu.ua

Павло Грицюк
кафедра програмного
забезпечення
Національний університет
"Львівська політехніка"
Львів, Україна
pgrytsiuk1992@gmail.com

Optimization of Structure of Project of the Strategic Development of Tourism in the Carpathian Region

Mariana Grytsiuk
Department of Information
Technologies
Ukrainian National
Forestry University
Lviv, Ukraine
mariana.grytsiuk@gmail.com

Yuriy Hrytsiuk
Software Department
Lviv Polytechnic
National University
Lviv, Ukraine
yurii.i.hrytsiuk@lpnu.ua

Pavlo Grytsyuk
Software Department
Lviv Polytechnic
National University
Lviv, Ukraine
pgrytsiuk1992@gmail.com

Анотація — Розроблено методику розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації структури проекту стратегічного розвитку туризму в Карпатському регіоні. Методика враховує різні обмеження при заданих альтернативах виконання робіт, представлених у вигляді мережеских моделей. Методика придатна для розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації методом послідовних уступок з врахуванням умови реалізації проекту, коли будь-яка робота подальшого етапу в проекті може починатися тільки тоді, коли будуть завершені всі роботи попереднього етапу, пов'язані з нею. Розроблена математична модель задачі оптимізації структури проекту стратегічного розвитку туризму є багатокритеріальною, динамічною, з булевими змінними, алгоритмічними і аналітичними цільовими функціями та обмеженнями.

Abstract — The method of solving the problem of multi-objective optimization project structure of the strategic development of tourism in the Carpathian region has been developed. The method takes into account various restrictions at given alternatives to the execution of works, presented in the form of network models. The method is suitable for multi-objective optimization problem solving by method of successive concessions with regard to the conditions of the project implementation, if any further work in the project phase can start only when all the work of the previous stage associated with it will be completed. The developed mathematical model of the problem of optimization of the structure of the strategic tourism development project is multi-criteria, dynamic, with boolean variables, algorithmic and analytical objective functions and constraints.

Ключові слова — стратегічний розвиток туризму, структура проекту, критерії оптимізації, задача багатокритеріальної оптимізації, метод послідовних уступок.

Keywords — *strategic tourism development, project structure, optimization criteria, multi-objective optimization setting, successive concessions method.*

I. INTRODUCTION

The strategic purpose of tourism development in Ukraine is the creation the economically-effective national touristic product in the domestic market and competitive on world markets, and expanding areas for domestic tourism and increase the number of visitors from abroad [1]. For realization of this multicomponent purpose is needed to provide an complex development of resorts and recreational areas, and tourist centers considering socio-economic interests of the local population, the conservation and restoration of natural areas, historical and cultural heritage [15, 9, 10]. An important factor in socio-economical development of certain territory is the effective introduction of regional policy of strategic tourism development based on the principles of balanced environmental management and sustainable development [18]. The need to attract the attention of scientists and practitioners for develop the perfect project of strategic tourism development at the regional level caused the choice of the theme of this work and other researches [2, 3].

Analysis of recent research and publications. Nowadays a lot of scientists are actively exploring the various features of tourism development at the regional level [17]. The main problems of regional policy of tourism are in detail described in the work of V. K. Yevdokymenko, the process of formation and functioning a market of provision of tourist services are thoroughly described in the works of O. O. Lyubitsevoyi [11, 12]. The results of research a tourist and recreational potential of different regions of Ukraine are described in numerous publications O. O.

Beydyka. Such scientists as M. M. Blaga, V. I. Getman, V. S. Grytsevych, O. P. Dudkina, V. I. Matsola [14], Malska [13], O. A. Marchenko, S. P. Kuzyk, M. M. Pokoklodna and others in their works are actively exploring the tourism attractiveness of individual regions of Ukraine. However, the problem of optimization the structure of strategic tourism development project at the regional level are not enough opened and need the further development which determines the relevance of this work.

In the works [6, 7] are described the tasks of multi-criterion optimization of project contents with taking into account the limitations under given alternatives of execution the works and its mathematical model by such criteria as profit, duration, cost, quality and risk of the project realization. The author divided the process of implementation of project contents into stages, on the each of which the possible alternatives of execution the individual work are presented in the form of network models. For experts are very difficult to set the values of weighting coefficients in optimization tasks for different criteria. So is much easier to just set their priorities for each of the criteria. To solve this task in work [8] described a method of multi-criterion optimization of project contents based on the method of successive concessions [2, 4]. The specified formulation of task, its mathematical model and methods of optimization we take as a basis for solving the task of optimization the project structure of strategic tourism development in the Carpathian region [3, 5].

The purpose of work lies in developing the methods of solving the task of multi-criterion optimization of project structure of strategic tourism development at the regional level with taking into account the various limitation under given alternatives of execution of works, presented in the form of network models.

II. METHODS OF SOLVING THE TASK OF MULTI-CRITERION OPTIMIZATION

Given in [6] the mathematical model we adapt for solving the task of multi-criterion optimization the project structure of strategic tourism development by the following criteria: cost, duration and risk of realization the strategic tourism development project; profit from realization the tourism product and the quality of the tourism product [2, 3]. We assume that the structure of strategic tourism development is given in the form of network model in which the types of performed work are presented as nodes, and the links between them – in the form of directed arcs.

As a result of execution the qualitative analysis of the relative importance of particular criteria of task we give the priority to each of them, after that we ranks them from most important to least popular. With regard to our problem, the above criteria have received such order of decreasing their priority: profit from realization the tourist product, quality of tourism product; costs, risks and the duration of realization the strategic tourism development project [3, 5]. Methods of solving the task of multi-criterion optimization the project structure of strategic tourism development we will consider as execution of individual steps.

Step 1. We optimize the value of first criterion by granting the priority, which characterize the profit from realization the tourism product taking into account relevant restrictions. To do this, we solve the following task: find the maximum profit from realization the tourist product

$$P = P(\tilde{C}, \tilde{D}, \tilde{E}, \tilde{W}, \tilde{X}, \tilde{G}) = \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^{L_t} c_{tl} d_{tl} + \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^{M_h} (e_{hj} - w_{hj}) \cdot x_{hj} - \sum_{t=1}^T \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^{M_h} u_t(\mathbf{G}, x_{hj}) \rightarrow \max_{x_{hj}} \quad (1)$$

under the following restrictions on:

- the positive cash balance after the execution the work on the h -th stage of realization the strategic tourism development project

$$s_h = s_{h-1} + k_h - \sum_{j=1}^{M_h} w_{hj} x_{hj}; s_h \geq 0, h = \overline{1, H}; \quad (2)$$

- the maximum duration the execution of work within the project realization of strategic tourism development during the investment phase

$$T_{gr} = T_{gr}(\mathbf{G}, \tilde{X}) = \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^{M_h} \varphi_t(\mathbf{G}, x_{hj}) \leq T^{\max}; \quad (3)$$

- the number of variants of simultaneous execution of works on h -th stage of realization the project of strategic tourism development

$$\sum_{j=1}^{M_h} x_{hj} = 1, h = \overline{1, H}; x_{hj} \in \{0, 1\}, \quad (4)$$

where: T – duration of the life cycle of the tourist product;

$\tilde{L} = \{L_t, t = \overline{1, T}\}$ – number of types of tourism product, which is planned to realize in the t -th year of its life cycle;

$\tilde{C} = \{\tilde{C}_t = \{c_{tl}, l = \overline{1, L_t}\}, t = \overline{1, T}\}$ – the cost of tourist product of l -th type, which is planned to realize in the t -th year of its life cycle;

$\tilde{D} = \left\{ \tilde{D}_t = \left\{ d_{tl} = \begin{cases} a_{tl}, & \text{if } a_{tl} \leq b_{tl}; \\ b_{tl}, & \text{if } a_{tl} > b_{tl}, \end{cases} l = \overline{1, L_t}, t = \overline{1, T} \right\} \right\}$ – the amount of tourism product of l -th type, which is planned to realize in the t -th year of its life cycle;

$\tilde{B} = \{\tilde{B}_t = \{b_{tl}, l = \overline{1, L_t}\}, t = \overline{1, T}\}$ – the projected demand on tourism product of l -th type, which is planned to realize in the t -th year of its life cycle;

$\tilde{A} = \left\{ \tilde{A}_t = \left\{ a_{tl} = \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^{M_h} a_{tl}(\mathbf{G}, x_{hj}), l = \overline{1, L_t}, t = \overline{1, T} \right\} \right\}$ – the production capacity of tourist facilities of implementing the product of l -th type, which is planned to realize in the t -th year of its life cycle;

H – the number of stages of realization the project of strategic tourism development;

$\tilde{M} = \{M_h, h = \overline{1, H}\}$ – the number of variants the execution of works at the h -th stage of realization the project of strategic tourism development;

$\tilde{X} = \{\tilde{X}_h = \{x_{hj} \in \{0, 1\}, j = \overline{1, M_h}\}, h = \overline{1, H}\}$ – a boolean variable, which is equal to one if activated the execution of the j -th variant of work at the h -th stage of realization the project of strategic tourism development and equal to zero – otherwise;

$\tilde{W} = \{\tilde{W}_h = \{w_{hj}, j = \overline{1, M_h}\}, h = \overline{1, H}\}$ – the cost of execution the j -th variant of works at h -th stage of realization the project of strategic tourism development (may consist of several costs of work);

$\tilde{S} = \{s_h, h = \overline{1, H}\}$ – the amount of cash remaining after the execution works at h -th stage of realization the project of strategic tourism development;

$\tilde{K} = \{k_h, h = \overline{1, H}\}$ – the amount of cash allocated at h -th stage of realization the project of strategic tourism development;

$\tilde{E} = \{\tilde{E}_h = \{e_{hj}, j = \overline{1, M_h}\}, h = \overline{1, H}\}$ – the residual cost of capital assets that are eliminated at the execution of the j -th variant of works at h -th stage of realization the project of strategic tourism development;

T^{\max} – the maximum duration of the investment phase of realization the project of strategic tourism development;

$\tilde{U} = \{u_t = u_t(\mathbf{G}, x_{hj}), t = \overline{1, T}\}$ – the current costs, associated with the exploitation or consumption the tourism product in the t -th year of its life cycle.

Limitation (2) suggests that after completing the each phase of realization the project of strategic tourism development should be no financial indebtedness on the following types of work. Limitation (3) means that the marginal duration of the investment phase of realization the project of strategic tourism development should not be greater than its maximum value T^{\max} , which is a pre-specified customer. Limitation (4) creates a situation according to which at h -th stage of realization the project of strategic tourism development should be carried out only one variant of types of works. In model (1)–(4) can be and other limitations, such as the expenditures of certain resources, the need for appropriate engineering and technical personnel, construction equipment, raw and complete materials, on the sequence of execution the variant of work types, etc.

The network model of execution of works in realization the project of strategic tourism development that contains their alternatives has the following form:

$$\mathbf{G} = \{\tilde{\mathbf{A}}, \tilde{\mathbf{Z}}, \tilde{\mathbf{T}}, \tilde{\mathbf{W}}\}, \quad (5)$$

where: $\tilde{\mathbf{A}} = \{\tilde{A}_h = \{\tilde{A}_{hjk} = \{a_{hjk}, k = \overline{1, N_{hj}}\}, j = \overline{1, M_h}\}, h = \overline{1, H}\}$ – multiple value of network nodes, where a_{hjk} – the work of the k -th type which is executed by the j -th variant (alternative) of network model at realization the project of strategic tourism development in h -th stage;

$\tilde{N} = \{\tilde{N}_h = \{N_{hj}, j = \overline{1, M_h}\}, h = \overline{1, H}\}$ – the number of types of work which are executed by the j -th variant (alternative) of network model at project realization of strategic tourism development in h -th stage;

$$\tilde{\mathbf{Z}} = \left\{ \begin{matrix} \tilde{Z}_h = \left\{ \begin{matrix} \tilde{Z}_{hj} = \left\{ \begin{matrix} \tilde{z}_{hj}^{(m) \rightarrow (i)}, & i = \overline{1, N_{hj}} \\ \tilde{z}_{hj}^{(m)}, & m = \overline{1, N_{pf}} \end{matrix} \right\}, & j = \overline{1, M_h} \\ \tilde{z}_{hf}^{(m)}, & f = \overline{1, M_p} \end{matrix} \right\}, & h = \overline{1, H} \\ \tilde{z}_{hp}^{(m)}, & p = \overline{1, P} \end{matrix} \right\} \quad -$$

multiple value of directed network arcs, where $\tilde{z}_{hj}^{(m) \rightarrow (i)}$ – arc that goes from the i -th node (i -th work type) by the j -th variant (alternative) of network model at project realization of strategic tourism development on the h -th stage and enters in the m -th

node (m -th work type) by the f -th variant (alternative) of network model at project realization of strategic tourism development on the p -th stage; $i \neq m$ at $p = h$; $p \geq h$;

$\tilde{\mathbf{T}} = \{\tilde{T}_h = \{\tilde{T}_{hjk} = \{\tau_{hjk}, k = \overline{1, N_{hj}}\}, j = \overline{1, M_h}\}, h = \overline{1, H}\}$ – multiple value of the performance terms of work types in the nodes of network, where τ_{hjk} – the performance term of the i -th work type, which is implemented by the j -th variant (alternative) of network model at project realization of strategic tourism development on the h -th stage;

$\tilde{\mathbf{W}} = \{\tilde{W}_h = \{\tilde{W}_{hjk} = \{w_{hjk}, k = \overline{1, N_{hj}}\}, j = \overline{1, M_h}\}, h = \overline{1, H}\}$ – multiple value of costs the performance terms of work types in network nodes, where w_{hjk} – cost of execution the i -th work type which is implemented by the j -th variant (alternative) of network model at project realization of strategic tourism development in the h -th stage.

If we have got the solution of task (1)–(4) (denote it as P^{\max}), we proceed to step 2. If the task haven't solution, so the initial statement of a task also haven't solution.

Step 2. We assign the value of concession Δp in parts from the gained value of criterion that characterizes the profit from realization of tourist products. We form the following limitations:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^{L_t} c_{tl} d_{tl} + \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^{M_h} (e_{hj} - w_{hj}) x_{hj} - \sum_{t=1}^T \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^{M_h} u_t(\mathbf{G}, x_{hj}) \geq (1 - \Delta p) P^{\max}. \quad (6)$$

Step 3. We optimize the value of the second important criterion, which characterizes the quality of the tourist product taking into account limitations and before made a concession by the criteria which characterizes the profits from the realization the tourist product (1). To do this, we solve the following task: to find the minimum quality of tourism product

$$Q = Q(\tilde{\mathbf{B}}, \tilde{\mathbf{\Omega}}^h, \tilde{\mathbf{X}}) = \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^{M_h} x_{hj} \sum_{r=1}^{R_h} \beta_{hjr} \omega_{hjr}^h \rightarrow \min_{x_{hj}} \quad (7)$$

at comply with limitations (2)–(4) and (6). The value of purpose function (7) points to the minimum quality, below which the proposed tourism product can not be exploited or consumed by potential clients. In expression (7) entered the following notation:

$\tilde{R} = \{R_h, h = \overline{1, H}\}$ – the total number of indicators of quality the tourism product which be taken into account on h -th stage of its realization;

$\tilde{\mathbf{B}} = \{\tilde{B}_h = \{\tilde{B}_{hjr} = \{\beta_{hjr}, r = \overline{1, R_h}\}, j = \overline{1, M_h}\}, h = \overline{1, H}\}$ – weight coefficient of the r -th indicator of quality the tourism product, which is planned to get after the execution the j -th variant of works on the h -th stage of the project realization of strategic tourism development, the value should meet the following

requirements: $0 < \beta_{rh} < 1$, $\sum_{r=1}^{R_h} \beta_{hjr} = 1$, $j = \overline{1, M_h}$;

$\tilde{\mathbf{\Omega}}^h = \{\tilde{\Omega}_h^h = \{\tilde{\Omega}_{hjr}^h = \{\omega_{hjr}^h, r = \overline{1, R_h}\}, j = \overline{1, M_h}\}, h = \overline{1, H}\}$ – normalized value of the r -th indicator of quality the tourism product, which is planned to get after the execution the j -th variant

of works on the h -th stage of the project realization of strategic tourism development, is determined by the following formulas:

$$\omega_{hjr}^H = \frac{\omega_{hjr}^{\max} - \omega_{hjr}^{\min}}{\omega_{hjr}^{\max} - \omega_{hjr}^{\min}}, \forall r \in H_h^{(1)}; \omega_{hjr}^H = \frac{\omega_{hjr}^{\min} - \omega_{hjr}^{\max}}{\omega_{hjr}^{\max} - \omega_{hjr}^{\min}}, \forall r \in H_h^{(2)}; \quad (8)$$

$\tilde{\Omega} = \{\tilde{\Omega}_h = \{\tilde{\Omega}_{hj} = \{\omega_{hjr}, r = \overline{1, R_h}, j = \overline{1, M_h}, h = \overline{1, H}\} - \text{natural value of the } r\text{-th indicator of quality the tourism product, which is planned to get after the execution the } j\text{-th variant of works on the } h\text{-th stage of the project realization of strategic tourism development};$

$\tilde{\Omega}^{\min} = \{\tilde{\Omega}_h^{\min} = \{\tilde{\Omega}_{hj}^{\min} = \{\omega_{hjr}^{\min}, r = \overline{1, R_h}, j = \overline{1, M_h}, h = \overline{1, H}\} - \text{the minimum possible value of the } r\text{-th indicator of quality the tourism product, which is planned to get after the execution the } j\text{-th variant of works on } h\text{-th stage of the project realization of strategic tourism development};$

$\tilde{\Omega}^{\max} = \{\tilde{\Omega}_h^{\max} = \{\tilde{\Omega}_{hj}^{\max} = \{\omega_{hjr}^{\max}, r = \overline{1, R_h}, j = \overline{1, M_h}, h = \overline{1, H}\} - \text{the maximum possible value of the } r\text{-th indicator of quality the tourism product, which is planned to get after the execution the } j\text{-th variant of works on } h\text{-th stage of the project realization of strategic tourism development};$

$H_h^{(1)}, H_h^{(2)}, h \in H - \text{the number of indicators of quality the tourism product, which maximize or minimize on the } h\text{-th stage of its realization.}$

The value of purpose function (7) is a generalized indicator of quality the tourism product as a result of its realization. What it is smaller, then the quality of tourism product is higher. We remind that the quality of tourism product characterized by a combination of interrelated indicators: appointment, aesthetics, comfort, processability, reliability, unification, exclusivity, environmental, safety, etc. [16, p. 5]. If we have got the solution of task (7), (2)–(4) and (6) (denote it as Q^{\min}), we proceed to step 4. If the task haven't solution, we go back to step 2 and increase the value of concession Δp by the criterion, which characterizes the profit from the realization of tourist products.

Step 4. We assign the value of concession Δq in parts of gained value of criterion, which characterizes the quality of tourism product. We form the limitation of the following form:

$$\sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^{M_h} x_{hj} \sum_{r=1}^{R_h} \beta_{hjr} \omega_{hjr}^H \leq (1 + \Delta q) \cdot Q^{\min}. \quad (9)$$

Step 5. We optimize the value of the third most important criterion, that characterizes the cost of project realization the strategic tourism development with taking into account limitations and previously made concessions by the criteria, that characterize the profits from realization the tourist product (1) and the quality of tourist product (7). To do this, we solve the following task: we need to find the minimum cost of project of strategic tourism development

$$F = F(\tilde{W}, \tilde{X}) = \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^{M_h} w_{hj} x_{hj} \rightarrow \min_{x_{hj}} \quad (10)$$

at comply with limitations (2)–(4), (6) and (9). The value of purpose function (10) points to the one-time cost of realization the project of strategic tourism development. If we have got the

solution of task (10), (2)–(4), (6) and (9) (denote it as F^{\min}), we proceed to step 6. If the task haven't solution, we go back to step 4 and increase the value of concession Δq by the criterion, which characterizes the quality of tourist products.

Step 6. We assign the value of concession Δf in parts of gained value of criterion, which characterizes the cost of realization the project of strategic tourism development. We form the limitation of the following form:

$$\sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^{M_h} w_{hj} x_{hj} \leq (1 + \Delta f) \cdot F^{\min}. \quad (11)$$

Step 7. We find the optimal value of the fourth most important criterion, that characterizes the risks of realization the project of strategic tourism development with taking into account limitations and previously made concessions by the criteria, that characterize the profits from realization the tourist product (1), the quality of tourist product (7) and the cost of realization the project of strategic tourism development (10). To do this, we solve the following task: we need to find the minimal risks of realization the project of strategic tourism development

$$R = R(\tilde{P}, \tilde{V}, \tilde{X}) = \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^{M_h} x_{hj} \sum_{k=1}^{K_{hj}} p_{hrk} v_{hrk} \rightarrow \min_{x_{hj}} \quad (12)$$

at comply with limitations (2)–(4), (6), (9) and (11). The value of purpose function (12) points to the risk assessment, below which realization the project of strategic tourism development is inappropriate. In expression (12) entered the following notation:

$\tilde{P} = \{\tilde{P}_h = \{\tilde{P}_{hj} = \{p_{hjk}, k = \overline{1, K_{hj}}, j = \overline{1, M_h}, h = \overline{1, H}\} - \text{the probability of occurrence the } k\text{-th risk events at performance the } j\text{-th variant of works on } h\text{-th stage of realization the project of strategic tourism development};$

$\tilde{V} = \{\tilde{V}_h = \{\tilde{V}_{hj} = \{v_{hjk}, k = \overline{1, K_{hj}}, j = \overline{1, M_h}, h = \overline{1, H}\} - \text{negative consequences in costs equivalent from occurrence the } k\text{-th risk events while performing the } j\text{-th variant of works on the } h\text{-th stage of realization the project of strategic tourism development};$

$\tilde{K} = \{\tilde{K}_h = \{K_{hj}, j = \overline{1, M_h}, h = \overline{1, H}\} - \text{number of risk events, which can occur while performing the } j\text{-th variant of works on the } h\text{-th stage of realization the project of strategic tourism development.}$

If we have got the solution of task (12), (2)–(4), (6), (9) and (11) (denote it as R^{\min}), we proceed to step 8. If the task haven't solution, we go back to step 6 and increase the value of concession Δf by the criterion, which characterizes the cost of realization the project of strategic tourism development.

Step 8. We assign the value of concession Δr in parts of gained value of criterion, which characterizes the risks of realization the project of strategic tourism development. We form the limitation of the following form:

$$\sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^{M_h} x_{hj} \sum_{k=1}^{K_{hj}} p_{hrk} v_{hrk} \leq (1 + \Delta r) \cdot R^{\min}. \quad (13)$$

Step 9. We find the optimal value of criterion, that characterizes the duration of realization the project of strategic tourism development with taking into account limitations and

previously made concessions by the criteria, that characterize the profits from realization the tourist product (1), the quality of tourist product (7), the cost (10) and risks (12) of realization the project of strategic tourism development. To do this, we solve the following task: we need to find the minimal marginal duration the execution of work during the investment phase of realization the project of strategic tourism development

$$T_{ip} = T_{ip}(\mathbf{G}, \tilde{\mathbf{X}}) = \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^{M_h} \varphi_{\alpha}(\mathbf{G}, x_{hj}) \rightarrow \min_{x_{hj}} \quad (14)$$

at comply with limitations (2), (4), (6), (9), (11) and (13). The value of purpose function (14) indicates the duration of realization the project, which in the network model (5) calculated by using the method of critical path (<http://library.if.ua/book/66/4926.html>) or another method. If the task (14), (2), (4), (6), (9), (11) and (13) have a solution, it can be considered as the solution of the initial task of multi-criteria optimization the project structure of strategic tourism development at the regional level for a given priorities of criterion with taking into account the concessions by the several of them. If the task haven't solution, we go back to step 8 and increases the value of concession Δr by the criterion, which characterizes the risks of realization the project of strategic tourism development.

Presented above model of task optimization the project structure of strategic tourism development at the regional level is the five-criterial, dynamical, with Boolean variables, algorithmical and analytical objective function, algorithmical and analytical limitations. For solving this task, we used the method of successive concessions in the presence of various limitations and given alternatives of execution the works, presented in the form of a network model. There is also used the generalized indexes (7), obtained by method of linear clotting of criteria. In solving the task was taken into account the condition when any kind of work on further phase of realization the project of strategic tourism development can not begin until not be completed all type of works in the previous phase.

CONCLUSIONS

1. The author established that in many scientific researches not enough described the problem of optimization the project structure of strategic tourism development at the regional level, that needs further study, which determines the relevance of this work.

2. The author has developed the method of solving the optimization task of project structure of strategic tourism development by the five criteria when such given priorities: the profits from realization the tourist product and the quality of tourist product, the cost, risks and duration of realization the project of strategic tourism development. In this case takes into account a various limitations with given alternative of execution the works, presented in the form of network models.

3. The method is suitable for problem solving at multi-criterion optimization the project structure method through successive concessions taking into account the condition, where any work of the following stage of the project shall not start, until all the preceding tasks are completed.

4. The author's mathematical model of setting the strategic tourism development project optimization is multi-objective and dynamic, includes boolean variables, algorithmic and analytical objective function, algorithmic and analytical limitations.

REFERENCES

- [1] Boruschak, M. (2006). *Problems of development strategy of tourist regions: monograph*. Lviv: Publishing House IRD NAS of Ukraine, 288 p. [In Ukrainian].
- [2] Grytsiuk, M. Yu., & Hrytsiuk, Yu. I. (2015). Optimization project of strategic development of tourism in the region of the Ukrainian Carpathians. *Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". Series: Computer Science and Information Technology*, 826, 13–21. Retrieved from: <http://ena.lp.edu.ua/bitstream/ntb/31294/1/04-13-21.pdf>. [In Ukrainian].
- [3] Grytsiuk, M. Yu., & Hrytsiuk, Yu. I. (2017). Building a strategy for sustainable development of tourism in the Carpathian region of Ukraine. *Scientific Bulletin of UNFU. Economical series*, 27(2), 130–136. <https://doi.org/10.15421/40270228>. [In Ukrainian].
- [4] Grytsiuk, M. Yu., & Hrytsiuk, Yu. I. (2017). Risk analysis in managing projects of sustainable development of tourism in the Carpathian region of Ukraine. *Scientific Bulletin of UNFU*, 27(5), 164–74. <https://doi.org/10.15421/40270532>. [In Ukrainian].
- [5] Hrytsiuk, Yu. I., & Grytsiuk, M. Yu. (2017). The formalization of the strategic planning of regional tourism in Ukraine. *Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". Series: Computer Science and Information Technology*, 864, 24–36. Retrieved from: <http://vlp.com.ua/node/18034>. [In Ukrainian].
- [6] Kononenko, I. V., Lobach, E. V., & Kharazii, A. V. (2013). Multi-criteria optimization of project content with given priorities for criteria. *Open information and computer integrated technologies*, 59, 6–13. Retrieved from: <http://www.khai.edu/csp/nauchportal/Arhiv/OIKIT/2013/OIKIT59/p6-13.pdf>. [In Russian].
- [7] Kononenko, I. V., & Kolesnik, M. E. (2012). Optimization of project content by the criteria of profit, time, cost, quality, risks. *East European Journal of Advanced Technology*, 1/10(55), 13–15. [In Russian].
- [8] Kononenko, I., Fadeyev, V., & Kolisnyk, M. (2012). Project scope optimization model and method on criteria profit, time, cost, quality, risk. *Integrating Project Management Standards. Proceedings of the 26th IPMA World Congress*, (pp. 286–292), 29–31 October 2012, Conference Centre Creta Maris, Hersonissos, Crete, Greece.
- [9] LOSA. (2019). *Site Department of Tourism LOSA*. Retrieved from: <http://www.lviv-land.com.ua/vidpochynok>. [In Ukrainian].
- [10] Lviv region. (2016). *The development strategy of Lviv region by 2021*. Retrieved from: <http://www.loda.gov.ua/ua/priorities/strategy>. [In Ukrainian].
- [11] Lyubitseva, A. (2006). *Tourism market*. Kyiv: Publishing House "Alterpres", 436 p. [In Ukrainian].
- [12] Lyubitseva, A. A., Pankov, E., & Stafyichuk, V. (2007). *Travel Resources Ukraine*. Kyiv: Publishing House "Alterpres", 369 p. [In Ukrainian].
- [13] Malska, M. P., Antoniuk, N., & Ganych, M. (2008). *International tourism and services*. Kyiv: Publishing House "Knowledge", 661 p. [In Ukrainian].
- [14] Matsola, V. (1997). *Recreation and tourism of Ukraine: Monograph*. Lviv: Publishing House IRD NAS of Ukraine, 259 p. [In Ukrainian].
- [15] Milashovska, A. (2008). *Regional policy of socio-economic development of border regions: Monograph*. Uzhgorod: Printed "Carpathians", 512 p. [In Ukrainian].
- [16] Shvets, I. Yu. (2005). Quality management travel services. *Culture of the peoples of the Black Sea region*, 61, 61–72. [In Russian].
- [17] Svyda, I. (2009). Current status, problems and prospects of development of the domestic tourism market. *Scientific Bulletin of Uzhgorod University*, 28(3), 64–69. [In Ukrainian].
- [18] Tkachenko, T. (2006). *Sustainable tourism development: theory, methodology, business realities: monograph*. Kyiv: Publishing House KNTEU, 537 p. [In Ukrainian].

The Problem of Regional Electric Power Systems Reengineering

Volodymyr Beskorovainyi
Department of System Engineering
Kharkiv National University of
Radio Electronics
Kharkiv, Ukraine
vladimir.beskorovainyi@nure.ua

Maryna Hubarenko
Department of System Engineering
Kharkiv National University of
Radio Electronics
Kharkiv, Ukraine
maryna.solona@nure.ua

Yevhen Hubarenko
Department of System Engineering
Kharkiv National University of
Radio Electronics
Kharkiv, Ukraine
evgen.gubarenko@nure.ua

Проблема Реінжинірингу Регіональних Електроенергетичних Систем

Володимир Безкоровайний
кафедра системотехніки,
Харківський національний
університет радіоелектроніки
Харків, Україна
vladimir.beskorovainyi@nure.ua

Марина Губаренко
кафедра системотехніки,
Харківський національний
університет радіоелектроніки
Харків, Україна
maryna.solona@nure.ua

Євген Губаренко
кафедра системотехніки,
Харківський національний
університет радіоелектроніки
Харків, Україна
evgen.gubarenko@nure.ua

Анотація – Проаналізована проблема реінжинірингу регіональних електроенергетичних систем як великомасштабних об'єктів, виділена множина проблемно пов'язаних оптимізаційних задач мікрорівня. Сформульована постановка і математична модель загальної задачі реінжинірингу системи за функціонально-вартісним показником ефективності.

Abstract – This paper analyses the problem of reengineering of regional electric power systems as large-scale objects, and defines the main optimisation tasks on the micro-level. It describes the formulation principles and mathematical model of the main task of reengineering based on the functional and cost efficiency markers.

Ключові слова – регіональні електроенергетичні системи; структура; топологія; оптимізація; реінжиніринг; ефект; витрати

Keywords – regional electric power systems; structure; topology; optimisation; reengineering; effect; costs

I. INTRODUCTION

Despite the widespread introduction of efficient technologies, the vast majority of countries around the world still tend to increase the production levels and use of electric power. A growing importance for improving the technical and economic base of Ukraine gain the problems of finding rational

ways of production organisation, transportation, distribution and use of electric power. Currently, there is a whole range of energy issues immediately affecting all areas of human life and defining the principles of stable civilisation development [1]:

- the deficit of energy resources and affordable electric power (Energy Efficiency);
- the threat of electric power system objects to the environmental safety (Ecological Safety);
- geopolitical and social threats (Energy Safety).

Given the fast economic and technological transformations as well as the moral and physical ageing of equipment, an increasing concern have the issues of efficient development planning and reengineering of current electric power systems (EPS). The electric power systems of Ukraine require urgent modernisation not only because of the obsolete equipment (the depreciation value of the country's main electric power generators constitutes 82.6% (in 2015) [2], 92% of power units have reached the capacity of 100 thousand hours [3]), but also because the equipment does not correspond to the international safety and environmental standards. The extend of the electric power systems is so wide, that even the strongest economy cannot afford funding their overall modernisation. It is also important to mind that these electric power systems are functioning.

The importance of making informed decisions throughout all stages of object functioning as well as immense material, time and financial costs lead to the need for setting and elaborating new tasks related to these objects' structural, specification and topologic optimisation based on diverse factors and constantly changing conditions. This also proves the relevance of analysis and methodological development of varied tasks concerning efficient regional electric power systems reengineering.

II. ANALYSIS OF THE STATE-OF-THE-ART OF THE SUBJECT

Production, transportation and distribution of electric power are the principal strategic functions of regional EPS. Their main subsystems are composed of power stations, substations and transmission grids. Competition-based model of market organisation is one of the most wide-spread in the area of electric power industry, this model implies competition on the wholesale and retail levels, free competition between suppliers and consumers and also division between electric power production, transportation, transmission and distribution processes. The structural elements of a regional EPS built according to such a model include a complex of state and stock institutions, companies and organisations [1]:

- infrastructural organisations;
- power-generating companies;
- distribution companies;
- service companies;
- scientific and project institutions.

The modern understanding of EPS reengineering defines it as activities aiming at a prompt radical change of fundamental processes leading to significant quantitative and qualitative improvements of previous values [4]. In its essence lies designing a radically new system with the objects of the old one. In most cases, construction of EPS infrastructure objects 'from scratch' requires additional costs and is time-consuming and thus unreasonable.

In the most general case, reengineering of an EPS with a relatively small geographical spread raises the problem of determining acceptable efficient principles of its construction $\pi \in \Pi$ among the set of acceptable ones, as well as sets of interconnected elements (power stations and substations) $e \in E$, their types $\alpha \in A$, grids and types of power transmission lines $r \in R$. A vast majority of regional EPS is characterised by large geographical spread and can be classified as large-scale objects, the structural, cost and functional properties of which $p \in P$ are primarily determined by the topology (location) of their subsystems and elements $g \in G$, thus $p = \varphi(\pi, e, \alpha, r, g)$. The topology of their subsystems and elements is in its turn determined by the topology of the transmission lines in them [5]. Therefore, the process of designing or planning the EPS development requires a thorough examination of a set of structural, functional, topological and technological reengineering tasks.

Changes to the number of electric power consumers, their topology, increase of consumption levels, obsolete equipment,

emerging efficient technologies and equipment all gradually lead to reduced efficiency of currently functioning EPS. Modernisation of certain elements, subsystems or parts of EPS contribute to their improved efficiency due to optimal local project solutions. In order to achieve higher efficiency, it is necessary to conduct reengineering processes including complex re-planning and reconstruction of EPS on particular stages of its lifecycle. In its essence reengineering is 'the examination and alteration of a system to reconstitute it in a new form' [6]. The theory of reengineering was primarily described and developed in relation to economics and business processes [7-8].

To date the concept of reengineering including methods of solving its fundamental tasks is elaborated primarily for the business processes. Though, it is being further developed and applied for the following tasks: optimisation of electric grids, corporate computer networks, large-scale monitoring systems and other objects [9-12]. Lacking for the modern theoretical definition and practical application of optimisation, namely of geographically spread and large-scale objects, remain improved methodological background in regard to structural and topological optimisation meant for the objects development planning and reengineering. Particularly important are the tasks to assure systematic analysis of regional electric power systems reengineering, as well as to elaborate mathematical models, methods and information technologies for structural, parametric, topological and technological optimisation meant for design technologies, development planning and reengineering.

III. RESEARCH RESULTS

The main goal of regional EPS reengineering is ensuring a secure and stable electric power supply according to the estimated consumption level, affordable pricing and ecological requirements. Estimated electric power consumption level may be secured either by means of increased power production within the framework of the current system (modernisation, construction of new production objects and transmission lines) or by means of purchase from the neighbouring systems (modernisation, construction of new transmission lines), comparing the production costs of the two options. Making the right decision is only possible upon a careful analysis and assessment of costs of the overall technological cycle of renewal (construction, modernisation, raw materials delivery, electric power production, delivery of electric power to consumers).

Considered should also be the particular characteristics of electric power systems, their role in regional complexes, operating and reengineering conditions:

1) *Advanced electric power technologies cause moral ageing of current power production and transmission technologies*

Introduction of new technologies is to bring positive effects (reducing the costs of electric power production and transfer, reducing the costs of converting one type of energy into another and increasing the energy conversion efficiency of the system). That said, increased efficiency of one element or subsystem may result in reduced efficiency of other elements. Therefore,

the decision to change or modernise outdated equipment is to be made based upon a complex analysis of costs and effects of the system in general.

2) *Electric power systems are in constant operation*

Regional EPS are one of the most important elements of the local infrastructure. Power shortages may lead to various emergencies with considerable social, ecological and material consequences. Thus, reengineering of EPS is to meet increased stability, safety and endurance requirements.

3) *Physical depreciation of equipment and planned measures*

Eventually all operational equipment of power stations, substations, transmission lines and automatic systems depreciate. Operational as well as technical and economic properties of equipment deteriorate and no longer meet functional or environmental requirements, thus resulting in the inappropriateness of its further use.

4) *Need for electric power demand estimations*

Reengineering of regional EPS is time-consuming and should correspond to the local development perspectives [13]. This requires careful examination of regional system development processes, estimation of necessary power demand levels, geographical distribution of demand and possible tendencies of their change. Thus, the decision to conduct the EPS reengineering is to be made according to the modelling results of regional development perspectives taking into consideration the estimated alterations to electric power demand.

5) *Lack of funding and traditional partial modernisation of systems*

Complexity of modern regional EPS, combination of state and stock institutions, companies and organisations, and considerable financial needs provoke either rational or locally optimal modernisation solutions. In order to improve the efficiency of local solutions, it is necessary to single out reengineering projects as a chain of continuous modernisations.

Modern regional EPS consist of a wide range of elements (power stations, substations, automatic and control systems, consumers), which form a complex interaction scheme delivered by a broad electrical grid. Arranging these elements in one system is a difficult and poorly structured problem with lacking finalised tasks as well as solution models and methods.

Let us examine an aggregate decomposition approach to geographically spread objects optimisation; suppose that within this approach optimisation is a *MetaTask* consisting of a set of tasks $\{Task_i^l\}$, $l = \overline{1, n_l}$, $i = \overline{1, n_i}$, which belong to different hierarchical levels with a particular set of interactions based on input data and solution results [5]:

$$MetaTask = \{Task^l\}, Task^l = \{Task_i^l\}, l = \overline{1, n_l}, i = \overline{1, n_i} \quad (1)$$

with n_l as the number of description levels and i_l as the number of tasks on the level l .

Each task on this stage is presented as a data converter:

$$Task_i^l : In_i^l \rightarrow Out_i^l, l = \overline{1, n_l}, i = \overline{1, n_i} \quad (2)$$

with In_i^l, Out_i^l as the corresponding input and output data of the i task on the l level.

Macro level tasks ($l = 1$) are in their essence systematic optimisation tasks and are defined by the particularities of various lifecycle stages of an EPS, whereas meta level tasks ($l = 2$) cover all issues of systematic optimisation in the process of reengineering:

$$Task^2 = \{Task_i^2\}, i = \overline{1, 6}, \quad (3)$$

with $Task_1^2$ as the principles of an EPS construction; $Task_2^2$ as the system structure optimisation; $Task_3^2$ as the elements and interconnections topology definition task; $Task_4^2$ as the operational technology definition task; $Task_5^2$ as the setting of parameters of elements and interconnections; $Task_6^2$ as the efficiency evaluation and solution determination task.

Formally speaking, the main task of regional EPS reengineering is maximisation of their efficiency; the level of efficiency may be determined as comparison between the scope of potential effect Q and the scope of resources spent C . Depending on the decision-making level, the efficiency marker may be considered as the scope of the region's power supply, the system's secure functioning, its endurance or the amount of profit from power distribution, etc. Generally speaking, the efficiency marker of the EPS reengineering Q_i , $i = \overline{1, I}$ may be considered the monotonic functions of the spent material, financial and other resources C_j , $j = \overline{1, J}$, $\overline{Q}_i = F_k(\overline{C})$ (with I, J as the number of types of potential efficiency markers and resources spent; \overline{Q} , \overline{C} as the general scale of the EPS reengineering efficiency markers and amount of resources spent; F_k , $k = \overline{1, K}$ as the operator, which reflects the k strategy of the use of resources for reengineering). Summarised task of the regional EPS reengineering may be presented as follows:

$$s^o = \arg \max_{s \in S^*} \left(\overline{Q}(s) / \overline{C}(s) : \overline{Q}(s) \geq \overline{Q}^*, \overline{C}(s) \leq \overline{C}^* \right),$$

with $S^* = \{s\}$ as the set of acceptable system reengineering options, which are determined by the strategies of the required resources use; \overline{Q}^* , \overline{C}^* as the limit values of the given efficiency and expenses markers.

Presented below is the sequence, in which the task of the EPS optimisation is considered on the early stages of reengineering. Given are the following sets: geographically spread power consumers of the region $I = \{i\}$, $i = \overline{1, n_o}$ and their characteristics (location, amount of power consumed, etc.); typical elements (power stations and substations), which make up the system $\Omega_E = \{\omega\}$ and transmission lines $\Omega_C = \{\omega\}$; possible location of the elements $G = \{g\}$; acceptable operational technologies $\Gamma = \{\gamma\}$.

Defined should be: number of elements in the system $s \in S^*$ following the reengineering n_E ; types of the elements $X = \{x_i^\omega\}$, $\omega \in \Omega_E$, $k = \overline{1, n_E}$; location of the elements $Y = \{y_i^g\}$, $g \in G$, $k = \overline{1, n_E}$; set of the transmission lines and their types $R = \{r_{ij}^\omega\}$, $\omega \in \Omega_C$, $i, j = \overline{1, n_E}$; subsets of consumers, which access every element of the system $I_k = \{i\}$, $\bigcup_{k=1}^{n_E} I_k = I$, $k = \overline{1, n_E}$ and their operational modes $Z = \{z_k^\gamma\}$, $\gamma \in \Gamma$, $k = \overline{1, n_E}$, which reflect most appropriately the sets of the chosen efficiency and expenses markers.

General mathematical model of such a task reads as follows:

$$\begin{cases} \overline{Q}(n_E, X, Y, R, V, Z) \\ \overline{C}(n_E, X, Y, R, V, Z) \end{cases} \rightarrow \max_{n_E, X, Y, R, V, Z}, \quad (4)$$

$$\overline{Q}(s) \geq \overline{Q}^*, \quad \overline{C}(s) \leq \overline{C}^*,$$

with \overline{Q} , \overline{C} as the general scale efficiency markers (profits, security, endurance, etc.) of reengineering and its costs; \overline{Q}^* , \overline{C}^* as the limit values of the given efficiency and expenses markers.

In order to formulate the function of the task (1), it is necessary to take into account the values of the EPS reengineering efficiency markers Q_i , $i = \overline{1, I}$ and expenses on the spent material, financial and other resources C_j , $j = \overline{1, J}$.

The EPS reengineering efficiency markers Q_i , $i = \overline{1, I}$ list namely improved characteristics of power supply for consumers, stability, security and endurance of the estimated construction model. Reengineering expenses markers C_j , $j = \overline{1, J}$ include the costs of construction of new or modernisation of main power generating objects (power stations, power units, low power stations), infrastructure elements, required for the system's operation, construction of transmission lines, including set up of distribution lines and transformer substations. Thus, the abovementioned markers are used to evaluate the return on investment of an EPS reengineering project in general and to determine the most economically attractive elements of reengineering and the rational sequence of its application.

IV. CONCLUSIONS

Given the interconnections between the objectives of structural, topological, parametric and technological optimisation, we formalised the systematic description and tasks of the EPS reengineering, which reflect its efficiency and expenses markers. We applied the process of decomposition to the problem of the EPS systematic optimisation and determined the main tasks of its analysis and synthesis, which are performed on the main stages of reengineering. Making reasonable and comprehensive decisions on all stages of the EPS reengineering process ensures their improved technical, economic and environmental characteristics and facilitates the optimisation of power production and transportation costs.

Carrying out the process of large-scale system reengineering requires detailed modelling based on the forecasts of the consumption geography development. The target function will help to compare various alternative reengineering projects and determine the most effective one.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] V.Ya. Ushakov, *Electric power systems and networks*. M.: Yurayth Publishing House, 2019.
- [2] Derzhkomstat of Ukraine, Industry of Ukraine from 2011–2015 years: statistical collection, Kiev.
- [3] V.B Klepikov., S.A Mekhovich., S.V Klepikova. "Economic, energy saving and environmental aspects of energy saving in Ukraine," *Energy saving. Energy. Energy audit*, no. 12. pp 43-47, 2010.
- [4] A.E. Uskov, "Reengineering of business processes in the electric grid company," *Economic Sciences*, vol. 81, no. 8, pp 219-224, 2011.
- [5] V.V Beskorovainy, "Systematic analysis of the problem of structural synthesis of geographically distributed systems," *Automatic Control Systems and Automatic Equipment*, vol. 120, pp. 29-37, 2002.
- [6] E. Chikofsky, J. Cross, "Reverse Engineering and Design Recovery: A Taxonomy," *IEEE Software*, vol. 7, no.1, pp. 13-18, 1990.
- [7] M. Hammer, J. Champy, *Reengineering the Corporation: A Manifesto for Business Revolution*, New York: Harper Business, 1993.
- [8] M. Robson, P. Ullah, *A Practical Guide to Business Process Re-engineering*, Gower Publishing, Ltd., 1996.
- [9] V.V. Beskorovainy, "The method of structural and topological optimization for the reengineering of geographically distributed objects," *Information processing systems*, vol. 4, pp. 26-33, 2004.
- [10] V. Beskorovainyi, K. Podoliaka, "Reengineering the large-scale monitoring systems," *ECOTECHMOD*, vol. 3, no.4, pp. 13-18, 2015.
- [11] S.A Nesterenko., J.S. Nesterenko, "Costs evaluation method of energy efficient computer network reengineering," *Works of Odessa Polytechnic University*, vol. 49, no. 2, pp. 70-75, 2016.
- [12] S.A. Nesterenko, "Selection of the optimal plan for energy-efficient reengineering of a creative computer network," *Electrical and computer systems*, vol. 101, no. 25, pp. 341-346, 2017.
- [13] I.V. Hubarenko, A.O. Ovezgeldyev, E.G. Petrov, *Models and methods of managing the sustainable development of socio-economic systems*. Kherson: Gray D.S., 2013.

Підхід до Вирішення Нечіткої Багатокритеріальної Задачі Вибору Варіантів Розміщення Територіально-Розподілених Об'єктів В ГІС

Світлана Кузніченко
кафедра інформаційних технологій
Одеський державний екологічний
університет
Одеса, Україна
skuznichenko@gmail.com

Ірина Бучинська
кафедра інформаційних
технологій
Одеський державний екологічний
університет
Одеса, Україна
buchinskayaira@gmail.com

Людмила Коваленко
кафедра інформаційних
технологій
Одеський державний екологічний
університет
Одеса, Україна
l.b.kovalenko@ukr.net

Approach to Solving Fuzzy Multicriteria Problem of Choosing Variants of Accommodation of Territorially Distributed Objects in GIS

Svitlana Kuznichenko
dept. of Information Technologies
Odessa State Environmental
University
Odessa, Ukraine
skuznichenko@gmail.com

Iryna Buchynska
dept. of Information Technologies
Odessa State Environmental
University
Odessa, Ukraine
buchinskayaira@gmail.com

Ludmila Kovalenko
dept. of Information Technologies
Odessa State Environmental
University
Odessa, Ukraine
l.b.kovalenko@ukr.net

Анотація—В роботі запропонована методологія нечіткого багатокритеріального аналізу рішень в растровій моделі даних ГІС для визначення оптимальних місць розміщення просторових об'єктів. Надані рекомендації щодо етапів скринінгу альтернатив за просторовими та непросторовими обмеженнями. Показано, що фазифікація критеріїв, тобто перетворення їх значень атрибутів у нечітку множину, на підставі експертної оцінки нечіткої функції належності, дозволяє виконати скринінг альтернатив шляхом визначення порогів α -зрізів нечітких множин для кожного критерію з подальшим об'єднанням атрибутів критеріїв за допомогою операторів агрегування: мінімум, максимум, зважена сума, OWA оператора Ягера.

Abstract—The paper proposes a methodology for fuzzy multicriteria analysis of decisions in a raster-based geographical information system (GIS) to determine the optimal locations for territorial objects. Recommendations about the stages of choosing alternatives for spatial and non-spatial constraints are given. It is shown that the fuzzyfication of criteria, that is, the conversion of

their attribute values into a fuzzy set, based on expert evaluation of a fuzzy membership function, allows screening alternatives by determining thresholds of α -cut of fuzzy sets for each criterion, followed by combining criteria attributes using aggregation operators: minimum, maximum, weighted sum, OWA operator Jager. Adding to the procedure of multicriteria analysis of the additional stage of filtration of alternatives gives the opportunity to reduce the number of alternatives, and in the future and the processing time of the criteria layers by aggregator operators. The proposed algorithm for screening alternatives can be performed in a GIS environment using Fuzzy Membership, Overlay and raster calculators tools.

Ключові слова—геоінформаційні системи; мультикритеріальний аналіз рішень; теорія нечітких множин; задача розміщення

Keywords—geographic information systems; multiple-criteria decision analysis; fuzzy set theory; site selection

I. ВСТУП

Просторові проблеми, зокрема проблема вибору раціонального місця розміщення об'єкта, за своєю природою завжди є багатокритеріальними [1] і потребують врахування чисельних економічних, екологічних, соціальних та інших факторів, які дозволяють оцінити придатність території.

Для вирішення задачі розміщення часто застосовують різні комбінаторні методи, методи з використанням мережевих моделей, чисельні методи, імітаційне моделювання тощо. Наявність просторових факторів обумовлює використання методів, заснованих на ГІС-технологіях. Можливості ГІС для генерації набору альтернатив і вибору найкращого рішення, як правило, ґрунтуються на операціях просторового аналізу поверхні, близькості і накладання. Недоліками більшості згаданих методів розміщення є вимога до наявності чіткої інформації, але на практиці проблеми розміщення просторових об'єктів є слабо структурованими [2], тобто такими, що потребують використання неформалізованих (нечітких) знань, заснованих на досвіді експертів. Тому алгоритми рішення задачі розміщення з використанням нечіткої інформації на основі ГІС-технологій представляють практичний і теоретичний інтерес. Перспективним підходом, який дозволяє найбільш адекватно описувати цей процес є математичний апарат теорії нечітких множин [3].

II. ПОСТАНОВКА НЕЧІТКОЇ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ЗАДАЧІ

Останні декілька десятиліть ГІС використовують в поєднанні з іншими системами і методами, такими як системи підтримки прийняття рішень (СППР) і методи багатокритеріального аналізу рішень (БКАР) [4]. На елементарному рівні поєднання ГІС-БКАР можна розглядати як процес, який перетворює і об'єднує географічні дані і оціночні судження, тобто переваги особи, що приймає рішення (ОПР) для отримання інформації для прийняття рішень.

Розглянемо формальний опис процедури багатокритеріального аналізу рішень в географічному контексті. Відбір придатних місць проводиться шляхом просторового аналізу із застосуванням ГІС, на основі критеріїв, що враховують різні фактори впливу: природоохоронні вимоги, особливостей рельєфу місцевості, морфологію ландшафту, соціально-економічні чинники тощо. Для цього виконують процедуру декомпозиції множини об'єктів, які належать території, що досліджується, і впливають на прийняття рішення, після чого отримують карту K , що представляє собою набір тематичних шарів-критеріїв K_i [5]:

$$K = \{K_i\}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (1)$$

Для проведення просторового моделювання з метою вибору придатного місця розміщення просторового об'єкта, будемо використовувати растрову модель даних. Тому всі отримані тематичні шари об'єктів доцільно

представити у вигляді набору комірок (пікселів) в растровій моделі ГІС, яка має вигляд двовимірної дискретної прямокутної сітки $m_x \times m_y$ комірок, де $\Delta x = \Delta y = \Delta r$ – розмір комірки. Кожна комірка є альтернативою, яка описується своїми просторовими даними (географічними координатами) та атрибутивними даними (значеннями критеріїв). Запишемо множину альтернатив A , що оцінюються за критеріями C_j :

$$A = \{a_{ij} \mid i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}\}, \quad (2)$$

де a_{ij} – значення атрибуту альтернативи, тобто значення атрибуту за j -им критерієм і за i -ою альтернативою; n – кількість критеріїв; $m = m_x \cdot m_y$ – кількість альтернатив.

Переваги ОПР щодо оцінки критерію визначаються через призначення ваг критеріїв w_j , де $j = 1, 2, \dots, n$. Будемо вважати, що переваги ОПР є просторово однорідними, тобто кожному критерію C_k призначена одна вага w_k . Таким чином, матриця прийняття рішень буде мати вигляд, наведений в табл. I.

TABLE I. МАТРИЦЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

Альтернативи	Просторові координати		Критерій/атрибути C_j			
	X_i	Y_i	C_1	C_2	...	C_n
A_1	x_1	y_1	a_{11}	a_{12}	...	a_{1n}
A_2	x_2	y_2	a_{21}	a_{22}	...	a_{2n}
A_3	x_3	y_3	a_{31}	a_{32}	...	a_{3n}
...
A_m	x_m	y_m	a_{m1}	a_{m2}	...	a_{mn}
Вага, w_j			w_1	w_2	...	w_n

Для відбору придатних місць розміщення об'єктів доцільно застосовувати процедуру, що складається з двох етапів: макро та мікроаналізу (рис. 1) [6]. Двоетапний підхід відбору передбачає, що для тих альтернатив, які на першому етапі пройшли перевірку відповідності мінімальним вимогам, на другому етапі проводиться більш детальний аналіз методами БКАР. Попередній скринінг альтернатив може бути виконаний з урахуванням обмежень: на значення атрибутів (непросторові обмеження) або на розташування (просторові обмеження). Обмеження можуть бути представлені растровими шарами, у яких атрибути комірок з неприпустимими альтернативами мають значення 0, а з припустимими альтернативами – значення 1. Використовуючи шар обмежень в якості кон'юнктивного фільтру можна визначити множину можливих альтернатив. Загальна діаграма процедури ГІС-БКАР для розміщення просторового об'єкта наведена на рис. 1.

Шари критеріїв, як правило, мають різні діапазони чи шкали значень атрибутів, тому потребують перетворення в порівнянні одиниці. Крім того, критерії можуть бути не тільки кількісними, але і якісними. Процедури перетворення необроблених даних у порівнянні одиниці

називають методами масштабування значень або стандартизації. Процедура стандартизації дозволяє виконати масштабування атрибутів у шкалу [0, 1]. Підхід до масштабування атрибутів на основі методів нечіткої логіки базується на перетворенні значень атрибутів j -го шару у значення ступені належності до нечіткої множини $B_j \subseteq A$:

$$B_j = \{(a, \mu_b^j(a)) \mid a \in A\}, \mu_b^j(a) : a \rightarrow [0, 1], \quad (3)$$

де a – значення атрибуту, A – множина значень атрибутів.

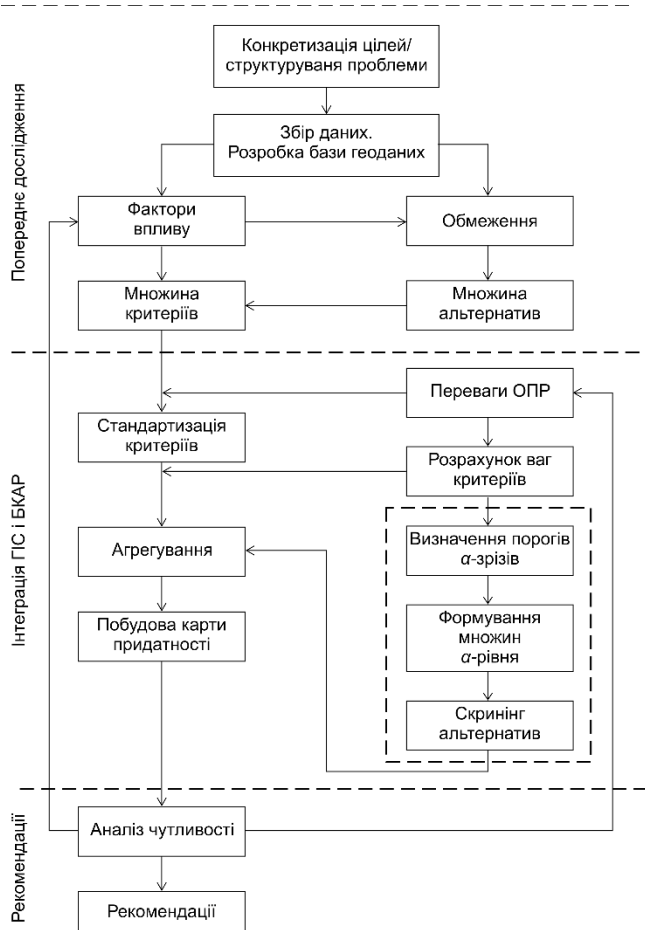


Рис. 1. Діаграма запропонованої процедури БКАР в ГІС

Після стандартизації атрибутів ОПР може виконати додатковий етап фільтрування (скрінінгу) альтернатив, застосувавши непросторові обмеження на значення атрибутів. Для цього пропонується наступний метод. Експертні оцінки альтернатив за критеріями представимо як нечіткі множини, що виражені через функції належності:

$$\tilde{C}_j = \{\mu_j(a_i) / a_i\}, \mu_j(a_i) \in [0, 1], j = \overline{1, n}. \quad (4)$$

Далі виконаємо ранжування критеріїв C_j за важливістю і пронумеруємо їх в порядку спадання ваг критеріїв w_j . Для розрахунку ваг критеріїв може бути використаний метод аналізу ієрархій (MAI) [7]. В роботі [8] запропонований модифікований нечіткий варіант MAI.

Задамо поріг рівня α_j і побудуємо множину α -рівня виду:

$$A_j = \{a \mid a \in A_{j-1}, \mu_j(a) \geq \alpha_j\}, A_0 \equiv A, j \leq n. \quad (5)$$

Розрахунок повторюється до тих пір, поки на останній ітерації множина A_n не буде містити тільки придатні за оцінками експертів альтернативи. ОПР може змінювати множину A_n шляхом варіювання ваг критеріїв w_j або порогів рівня α_j . Якщо критерії за важливістю рівнозначні, то для кожного критерію C_j розраховується окремо множина α -рівня A_j за заданими порогоми α_j , а далі будується множина виду:

$$A^* = \bigcap_{j=1}^n A_j. \quad (6)$$

Для отриманої множини альтернатив A^* виконується згортка оцінок критеріїв. Для цього в середовищі ГІС зазвичай використовуються різні оператори агрегування: мінімум, максимум, середнє арифметичне, зважена сума, OWA оператор Ягера [9]. Один з самих простих компенсаторних операторів агрегування, що реалізований в ГІС – це оператор зважена сума:

$$\mu(a_i^*) = \sum_{j=1}^n w_j \mu_j(a_i). \quad (7)$$

Приклад використання запропонованого алгоритму скрінінгу альтернатив для трьох шарів критеріїв $C = \{C_1, C_2, C_3\}$, представлений на рис.2.

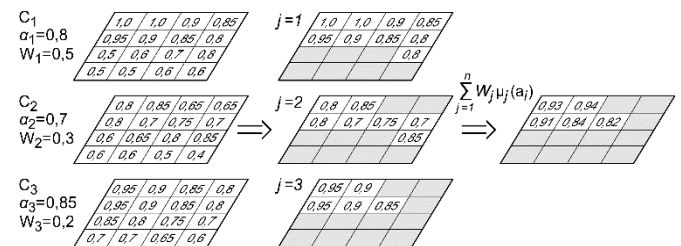


Рис. 2. Приклад реалізації алгоритму скрінінгу альтернатив для трьох критеріїв

III. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

Для ілюстрації запропонованого алгоритму скрінінгу альтернатив за нечіткими множинами α -рівня, використаємо дані багатокритеріальної моделі прийняття рішень по розміщенню полігону твердих побутових відходів (ТПВ) на півдні Одеської області, запропонованої авторами в роботі [5]. Модель враховує будівельні норми,

фізичні, екологічні та соціально-економічні фактори розміщення полігону ТПВ. Розглянемо реалізацію алгоритму для трьох критеріїв моделі: C_1 – Відстань від автомобільних та залізничних шляхів ($w_1=0.5$); C_2 – Відстань від меж міст ($w_2=0.3$); C_3 – Відстань від житлової та громадської забудови ($w_3=0.2$). Атрибути критеріїв стандартизовані за експертною оцінкою їх нечітких функцій належності. В якості оператора агрегування використовується оператор зважена сума (7). На рис. 4 наведені альтернативні моделі придатності для розміщення полігону ТПВ для різних значень порогів ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$). Характеристики виконання моделей у ГІС середовищі представлені в табл.ІІ.

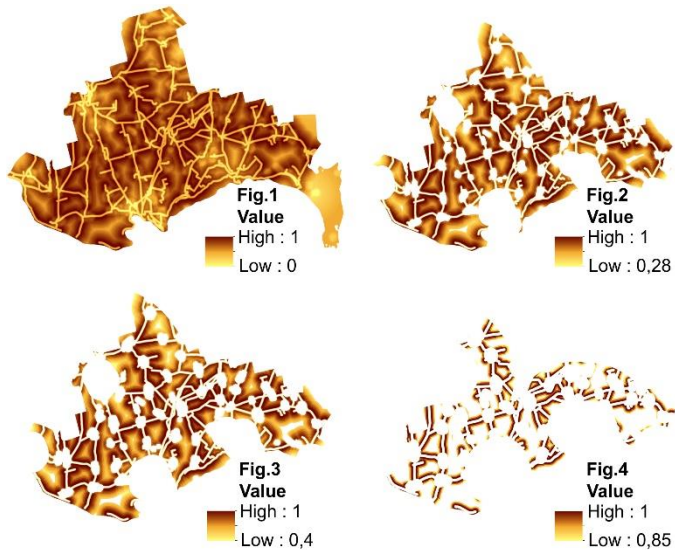


Рис. 3. Комбіновані карти придатності для розміщення полігону ТПВ для різних значень α -порогів нечітких множин

TABLE II. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИКОНАННЯ МОДЕЛЕЙ В ГІС

Значення порогів α -зрізів ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$)	Кількість альтернатив (комірок растру зі значенням)	Час виконання оператора агрегування зважена сума
(0, 0, 0)	6900583	4870 ms
(0.2, 0.35, 0.3)	4084035	4800 ms
(0.3, 0.5, 0.45)	3540798	4760 ms
(0.8, 0.85, 0.9)	1079139	4580 ms

Комбіновані карти придатності для розміщення полігону ТПВ, які наведені на рис.3, побудовані для чотирьох різних наборів α -порогів нечітких множин критеріїв. Чим вище значення порогів, тим менша кількість альтернатив залишається для подальшого аналізу і тим швидше виконується оператор агрегування зважена сума (час виконання оператора розрахований для середовища ArcGIS).

ВИСНОВКИ

Використання у багатокритеріальному аналізі растрової моделі даних дозволяє відображати безперервні поверхні, здійснювати їх аналіз та виконувати накладання (оверлей) з використанням складних наборів даних. При дослідженні

великих територій набори растрових даних можуть бути досить великими, що призводить до значного збільшення обсягів даних та зменшення швидкості їх обробки. Додавання в процедуру багатокритеріального аналізу додаткового етапу фільтрування альтернатив, шляхом задавання на основі переваг ОПП порогів рівня α_i за якими згідно (5) будується нечітка множина α -рівня, дає можливість зменшити кількість альтернатив, а в подальшому і час обробки шарів критеріїв операторами агрегування. Запропонований алгоритм скринінгу альтернатив може бути виконаний у середовищі ГІС за допомогою інструментів Fuzzy Membership, Overlay та калькулятора растра.

Застосування апарату теорії нечітких множин та методів прийняття рішень дозволяє враховувати експертні знання і судження, а також отримати більш інформативну карту придатності, шляхом визначення рангу придатності альтернатив.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] S. Chakhar, V. Mousseau, "Spatial multicriteria decision making" in *Encyclopedia of GIS*, Springer-Verlag, New York, 2008. pp. 747–753.
- [2] H. Simon, "The Structure of Ill-structured Problems" in *Artificial Intelligence*. Vol. 4. 1973. pp. 181 – 202.
- [3] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets" in *Information and Control*, vol. 8, No. 3, 1965, pp. 338–353.
- [4] J. Malczewski, "GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature". *International Geographical Information Science*, Vol. 20(7). 2006. pp. 703–726.
- [5] С. Кузнiченко, Ю. Гунченко, І. Бучинська, "Нечітка модель обробки геопросторових даних в мультикритеріальному аналізі придатності територій". Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. К.: ВІКНУ, № 61. 2018. с. 90-103.
- [6] A. Rikalovic, I. Cosic, D. Lazarevic, "GIS Based Multi-Criteria Analysis for Industrial Site Selection". *Procedia Engineering* 69. 2014. pp.1054 – 1063
- [7] T. Saaty, "The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resources allocation". New York, NY: McGraw, 1980. P. 287.
- [8] S. Kuznichenko, L. Kovalenko, I. Buchynska, Y. Gunchenko, "Development of a multi-criteria model for making decisions on the location of solid waste landfills". *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018. Vol.2, No. 3(92). P. 21–31. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.129287
- [9] R. Yager "On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making", *IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics*, 1988. Vol. 18. P. 183–190.

On Estimation and Discovery of Surgical Clinic Standards

Alexander Litvinov
Dept. of Computer Systems Engineering
Dnipro National University named after Oles' Honchar
Dnipro, Ukraine
lishu.dnepr.ua@gmail.com

Maksim Pavlenko
Clinic of modern surgery "GARVIS"
Dnipro, Ukraine
director@garvis.com.ua

Nadiia Karpenko
Dept. of Computer Systems Engineering
Dnipro National University named after Oles' Honchar
Dnipro, Ukraine
nad.v.karpenko@gmail.com

Оцінювання і Виявлення Медичних Стандартів Хірургічної Клініки

Олександр Литвинов
Кафедра електронних обчислювальних машин
Дніпровський національний університет
імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна
lishu.dnepr.ua@gmail.com

Максим Павленко
Клініка сучасної хірургії «ГАРВІС»
Дніпро, Україна
director@garvis.com.ua

Надія Карпенко
Кафедра електронних обчислювальних машин
Дніпровський національний університет
імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна
nad.v.karpenko@gmail.com

Анотація—Медичні стандарти включають найкращі методи діагностики та лікування пацієнтів. Ці стандарти можна розглядати як основу для аналізу, планування та прийняття рішень, що впливають на ефективність та якість медичної допомоги.

Метою статті є забезпечення методу автоматизованого вдосконалення існуючих та впровадження нових стандартів з врахуванням параметрів, що впливають на стратегію лікування.

Існують два методи створення стандартів: створення експертом, що керується досвідом і інтуїцією; автоматизоване виявлення стандартів на основі

статистичного аналізу. Запропоноване рішення поєднує обидва методи. Робота експерта полягає у створенні комплексу сировинних стандартів відповідно до принципу «клінічний стан - хірургічна операція». Після впровадження стандарту, служба автоматизованого моніторингу починає відстежувати стандарт. Досліджуються відхилення обраних параметрів від визначеного порогового значення. Відсутність відхилень підвищує рівень зрілості та стійкості стандарту. Факт відхилення викликає автоматичну процедуру пошуку причин його появи. Метою такого дослідження є отримання пацієнтів, об'єднаних за параметрами (стать, вік, вага, реакція на лікарські засоби), що завжди роблять такі відхилення. Отже, викликається відкриття нового протоколу.

У роботі описано алгоритм оцінювання та відкриття медичних стандартів хірургічної клініки з еволюційними дослідженнями з покрововим відстеженням додаткових параметрів. Такий підхід дозволяє виявити об'єктивну причину відхилення «стандарт - факт», отримати стабільні статистичні групи, поліпшити стандарти, побудувати міцний фундамент для планування ресурсів хірургічної клініки.

Abstract—Medical standards incorporate best diagnostic and treatment practices allowing to find an effective treatment procedure faster, reduce the risks. The standards can be regarded as a foundation for analysis, planning and decision-making activities affecting the quality of medical care. Literally, the standard is a set of protocols comprised the services should be provided in response to defined clinical patient's state described by the clinical diagnosis and a number of additional parameters which may significantly affect the treatment.

The goal of the paper is providing a method of automated improving of the existed and discovering new standards, considering the parameters affected the treatment strategy.

There are two polar ways of standards creation: creation by the expert governed by experience and intuition; automated discovery of standards based on statistical analysis. The suggested solution combines both methods. The initial work done by the expert lies in making a set of raw standards in accordance with the principle “clinical state – surgical operation”. Once the standard is implemented, the service of automated monitoring (estimation and analysis) starts tracking of the standard. The research is based on exploring the deviations of the selected parameters (the duration of surgical operation, the number of hospitalization days, resources and costs). The exploration depends on defined threshold value used to detect the deviation in either direction. The absence of deviations increases the level of maturity and robustness of the standard. The fact of deviation causes the automated exploration procedure searches for the reasons of its appearance. The goal of such exploration is to get a sample of patients united by the parameters (sex, age, weight, reaction to drugs), which always makes such deviations and thus causes the discovery of a new protocol.

And, as a result, the algorithm of estimation and discovery of surgical clinic medical standards was described. This approach allows to discover the objective reason of deviation, improving the standards.

Ключові слова—стандарт, протокол, аналіз інформації, сервіс.

Keywords— *standard, protocol, information analysis, service.*

I. INTRODUCTION

Today the role of high-quality healthcare standards is extremely important for public as well as private clinics. The standards make a foundation for analysis, planning and decision-making activities and, thus, affect the effectiveness and quality of medical care. The standards incorporate best diagnostic and treatment practices and help to find an effective treatment procedure faster, predicting the complexities and reducing the risks, making planning process more precise and accurate. Such standardization depends on activities of discovery, generalization, documenting, implementation,

monitoring, optimization of the best organization practices and cannot be effectively done without information technologies [1]. The standards can be regarded as a set of enterprise assets which build the foundation of the enterprise strategy to achieve the high level of its robustness [2]. Literally, the medical standard can be thought of as a set of protocols comprised the services should be provided in response to defined clinical patient's state. Clinical state can be defined as an expanded description of patient's disorder detailed enough to perform concrete activities for its treatment. The core of the clinical state is a clinical diagnosis [1, 3], but in some cases the additional parameters (age, sex, weight, reaction to drugs etc.) affect the treatment and should be also considered. Activities and resources connected to the services could be divided into two groups: as required (mandatory) and optional (the best variant is using a priority scale) and, that is notable, there can be different protocols for the same group of patients (for example, more expensive medicines can guarantee better results).

The protocol can be defined as an “if-then” rule which describes the reaction of surgery clinic system to patient's state predicting the results of the treatment. The reaction can be defined as a workflow consisted of a number of activities each of which can be defined in terms of spatial (resources, materials, responsible actors) and temporal (surgery duration, duration of hospital stay) restrictions. The expected results defined by three main indicators: hospitalization duration, surgery duration and costs of treatment.

Task definition. The important aspect of standard-oriented information system is implementation of monitoring and optimization activities based on information technologies [4]. The goal of the paper is providing a method of automated improving of the existed and discovering new standards, considering the parameters affected the treatment strategy.

II. MAIN PART

There are two polar ways of standards (we use the notion “standard” instead of the “protocol” to omit irrelevant details, literally, the standard is a container for protocols) creation: creation by the expert governed by experience and intuition; automated discovery of standards based on statistical analysis. The main disadvantage of the expert creation method is its complexity. Despite the strength and diversity of existing analysis tools there are a number of significant limitations affecting their use for solving the problem of discovery and improvement standards. The main negative factors are as follows: high price; high expenses and the complexity of maintenance and support of systems, which makes a barrier to work with analytical reports for ordinal users without special education. The suggested solution combines both methods. The initial work done by the expert lies in making a set of raw standards in accordance with the principle “clinical state – surgical operation”. Then, once the standard is implemented into the operational environment, an automated monitoring (i.e. estimation and analysis) of the raw standard is started. The research is based on exploring the deviations of the selected parameters (the duration of surgical operation, the number of hospitalization days, resources and costs). The exploration depends on defined threshold value (i.e. scopes within which the situation regarded as normal) used to detect the deviation in

either direction. Whether the deviations are absent, the level of maturity and robustness of the standard increases. The fact of deviation triggers the automated exploration procedure search for the causes of its appearance. The goal of such exploration is to get a sample of patients united by the parameters (sex, age, weight, reaction to drugs), which always makes such deviations and thus proves the need to introduce new standard. Another important detail should be kept in mind: we need to have a mechanism able to indicate that the standard needs upgrades. It happens when the most of the patients within the group defined by the standard do not satisfy the values defined by the standard. Thus we need to have two thresholds – one for reestimation-upgrade, another – for selecting a new standard from the basic one.

The initial state of the patient can be described as a number of properties (age, height, weight, medical history, etc), defining the patient image, the core of which is “diagnosis – planned operation” pair. Generally, patient’s treatment workflow can be divided into three main stages: pre-operation stage, operation stage, post-operational stage. All these stages can be different in comparison with the planned, because of different types of complications etc. Patient transition between the stages triggers standard reestimation procedure.

III. ALGORITHM

Let us take the following notation for formal description of the algorithm:

$d_i \subseteq D$ - Subset of patients with the same clinical diagnosis;

$o_j \subseteq O$ - Subset of operated patients with the same surgery;

$w_k \subseteq W_l$ - Subset of patients with the same value of w parameter;

$W_l \subseteq W$ - Parameter defined by the set of values, which is a subset of the total set of parameters that define the image and the state of the patient. For example, age group, gender, and complication of operation, etc.

$\delta_1 \in \Delta$ - Deviation from the parameter defined in the standard. For example, the fact of 2 days divergence for the post-operation period provided by the standard.

The process of new standard discovery is represented in the figures below (see Fig.1, Fig.2, Fig.3). The situation when the standard S_m works within the scopes defined by the thresholds (upper and lower limits) is shown in Fig. 1. The appearance of the deviation (in Fig.2 the number of patients exceeds the upper bound) triggers the search for the cause by going through all the additional parameters (in Fig. 2 parameter W_l explains the situation and leads to the discovery of a new standard. Representation of S_{n+1} standard discovery using the set theory is shown in Fig 3.

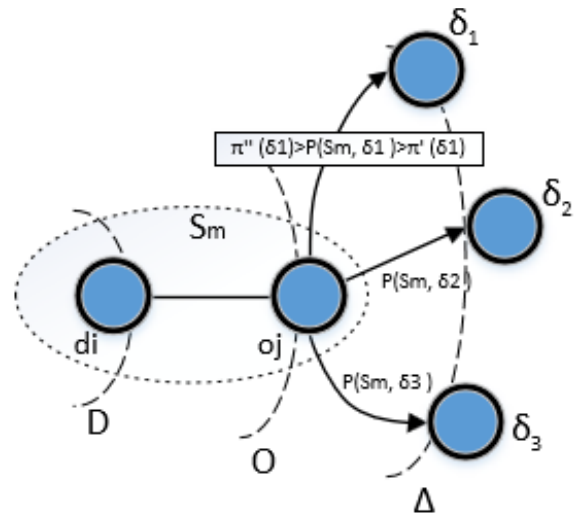


Рис. 1. The appearance of deviation from the value defined by the standard (e.g. surgery duration).

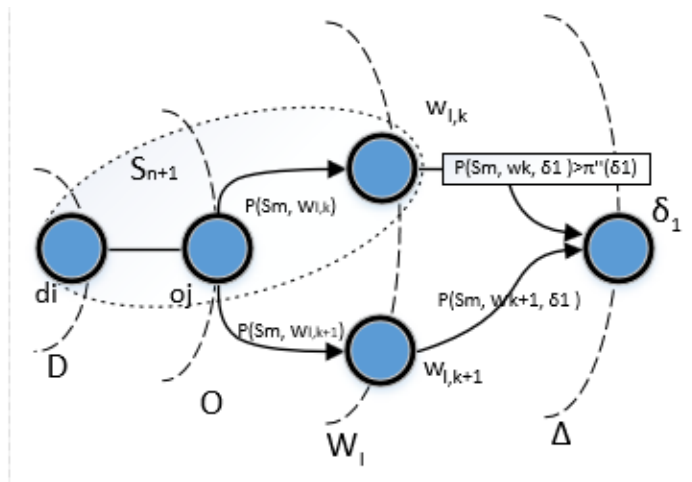


Рис. 2. The appearance of deviation triggers an «insertion» of additional parameters W_l searching for the cause of such deviation.

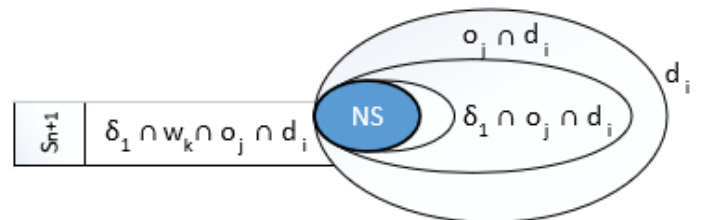


Рис. 3. The discovery of new standard S_{n+1} discovery

$s_m^t \equiv d_i \cap o_j$, $s_m \in S^t$, $m \leq |S^t|$ – pair of "clinical diagnosis - operation" composes a standard at time t before the search procedure start working at time $t+1$.

π_{δ_1}' , π_{δ_1}'' - pair of thresholds (lower and upper limits) triggers the search and update the standard accordingly. π_{δ_1}'' - causes the update of the standard, because the significant part of the patient within the group does not meet the requirements (e.g. time and costs) defined by the standard. Exceeding of π_{δ_1}' triggers the search for the cause of deviation (possible creation of the new standard), using additional parameters. Obviously, it is true that $\pi_{\delta_1}' < \pi_{\delta_1}''$.

In general, adding new patient (or patient transition between the stages, as mentioned above) triggers the run of standard estimation procedure which analyzes the deviations for selected "diagnosis-surgery" pair. The most important parameters are surgery duration and the period of treatment.

If the value exceeds the threshold π_{δ_1}'' , it causes the correction of standard (1).

$$\frac{|s_m^t \cap \delta_1|}{|s_m^t|} > \pi_{\delta_1}'' \rightarrow Update(s_m^t, \delta_1) \quad (1)$$

If the deviation exceeds the π_{δ_1}' , it causes additional parameters influence research (2).

$$\pi_{\delta_1}'' \geq \frac{|s_m^t \cap \delta_1|}{|s_m^t|} > \pi_{\delta_1}' \rightarrow Search(s_m^t, \delta_1, W) \quad (2)$$

If the influence of analyzed parameter is high and it makes the deviation more than π_{δ_1}'' - threshold, then it causes the creation of a new standard s_{n+1}^{t+1} on the base of previous s_n^t , and we can say that s_n^t splits into two standards s_{n+1}^{t+1} and s_m^{t+1} (3).

$$\forall w_k \subseteq W_l \subseteq W \cdot \frac{|s_m^t \cap \delta_1 \cap w_k|}{|s_m^t \cap w_k|} > \pi_{\delta_1}'' \rightarrow s_{n+1}^{t+1} = s_m^t \cap w_k,$$

$$n = |S^t|,$$

$$s_{n+1}^{t+1} \in S^{t+1} \cdot s_m^{t+1} \equiv s_m^t \setminus s_{n+1}^{t+1},$$

$$s_m^{t+1} \in S^{t+1},$$

$$m \leq |S^t|. \quad (3)$$

If the parameter influences the deviation in comparison of basic one, but its value does not exceed the threshold π_{δ_1}'' , the parameter will be added to the ordered set (bag) R , which contains all explored samples of such type (4).

$$\forall w_k \subseteq W_l \subseteq W \cdot \pi_{\delta_1}'' \geq \frac{|s_m^t \cap \delta_1 \cap w_k|}{|s_m^t \cap w_k|} > \frac{|s_m^t \cap \delta_1|}{|s_m^t|} \rightarrow s_m^t \cap w_k \subseteq R \quad (4)$$

Then select the most significant parameter from the bag and explore its intersection with other parameters are in the bag searching for increase of current maximum of deviation and creating new standard. Thus, the algorithm allows finding deviations, using additional parameters, which may be prioritized and ordered. Such prioritization of parameters makes available evolutionary step-by-step search, reducing the time of exploration. The procedure can be run in background mode, making the propositions of new standards, which can be then confirmed by the manager and started using by the system.

IV. CONCLUSION

The algorithm of estimation and discovery of surgical clinic medical standards with evolutionary research with step-by-step exploration of additional parameters was described. This approach allows to discover the objective reason of «standard – fact» deviation, improve standards, build the strong foundation for surgical clinic resources planning.

REFERENCES

- [1] Г. В. Дзяк, Я. С. Березникий, Ю. А. Филиппов и др. Библиотека практического врача. Унифицированные клиничко-статистические классификации болезней органов пищеварения (ведомственная инструкция). – Киев, 2004. – 93 с.
- [2] Mary Beth Chrissis. CMMI® for Development Guidelines for Process Integration and Product Improvement, Addison-Wesley Professional; 3 edition (March 20, 2011). – 688 p.
- [3] О. А. Литвинов Формалізація клінічного діагнозу і модель електронної класифікації діагнозів для Медичних Інформаційних Систем України. // Системные технологии. Рег. межвуз. сб. научн. работ. – Выпуск 2(49). – Днепропетровск, 2007. – С.46-56.
- [4] В. Н. Лехан, М. В. Павленко, А. А. Литвинов. Подход к автоматизации планирования лечения больных хирургического профиля. // Системные технологии. Рег. межвуз. сб. научн. работ. – Выпуск 5(64). – Днепропетровск, 2007. в 89-102 с.

Застосування Машинного Навчання для Просторового Аналізу Потенціалу Розвитку Гідроенергетики

Петро Топилко

Кафедра прикладної математики
Національний університет «Львівська політехніка»
Львів, Україна
petro.i.topylko@lpnu.ua

Богдан Любінський

Кафедра прикладної математики
Національний університет «Львівська політехніка»
Львів, Україна
bogdan.lybinsky@gmail.com

Usage of Machine Learning for Spatial Analysis of the Potential of Hydropower Development

Petro Topylko

Department of Applied Mathematics
Lviv Polytechnic National University
Lviv, Ukraine
petro.i.topylko@lpnu.ua

Bohdan Lyubinsky

Department of Applied Mathematics
Lviv Polytechnic National University
Lviv, Ukraine
bogdan.lybinsky@gmail.com

Анотація—Проаналізовано можливості та доцільність використання машинного навчання для просторового аналізу потенціалу розвитку малої гідроенергетики. Охарактеризовано основні методології та алгоритми машинного навчання, їх переваги та недоліки. Запропоновано та обґрунтовано підхід до просторового аналізу потенціалу розвитку гідроенергетики на малих річках.

Abstract— The possibilities and feasibility of using machine learning for spatial analysis of the potential of small hydropower development have been analyzed. The main methodologies and algorithms of machine learning, their advantages and disadvantages are described. The approach for spatial analysis of the potential of hydropower development on small rivers was proposed and substantiated.

Ключові слова— просторовий аналіз, геоінформаційна система, машинне навчання, відновлювальна енергетика, гідроенергетика

Keywords—spatial analysis, geoinformation system, machine learning, renewable energy, hydroenergy

I. ВСТУП

Енергетична галузь та її розвиток прямо пропорційно залежить від стану економіки в державі та рівня життя її громадян. І одним з досить важливих аспектів розвитку

даного сектору господарської діяльності людини в кожній країні є забезпечення стабільного виробництва електроенергії з використанням відновлювальних джерел енергії. І саме розвиток відновлювальної енергетики спостерігається в багатьох країнах, які прагнуть скоротити використання викопного палива для виробництва електричної енергії.

Значний акцент світова спільнота робить на розвитку сонячної та вітрової енергетики. Проте дані види відновлювальних джерел характеризуються певними особливостями функціонування. Наприклад, генерація електроенергії з використанням сонця неможлива в темну пору доби, а також суттєво зменшується процент виробництва при несприятливих погодних умовах: затяжні дощі чи значна хмарність. Подібні особливості функціонування і вітрової енергетики, яка залежить від стабільності вітрових потоків.

Проте, для забезпечення стабільності виробництва електроенергії важливу роль відіграє гідроенергетика і саме цей сегмент відновлювальної енергетики є найбільш освоєним способом продукування електроенергії в технологічному сенсі та активно використовується в світі. Зокрема, понад 16% всього світового виробництва електроенергії припадає саме на гідроенергетику. Особливістю даного типу відновлювальної енергії є висока

здатність регулювання кількості виробленої енергії, що дозволяє забезпечувати стабільність роботи енергетичної системи на рівні держави в пікові години споживання електроенергії, а також є резервом потужності на випадок аварійних ситуацій.

В останні роки в світі зберігається тенденція розвитку малих гідроелектростанцій (МГЕС), які здатні покривати потреби населення на локальному рівні, забезпечувати стабільне виробництво електроенергії і, найголовніше, не вимагає формування великих водосховищ, як у випадку з великими станціями [1]. Сучасні технології дозволяють раціонально використовувати водні потужності з врахуванням особливостей рельєфу відповідної території. Але для забезпечення більш динамічного розвитку МГЕС виникає необхідність розроблення відповідного підходу до аналізу водного потенціалу певного регіону з можливістю визначення оптимальних місць для побудови об'єктів малої гідроенергетики.

II. АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Аналіз потенціалу розвитку гідроенергетики на малих річках зводиться до задачі класифікації та прогнозування. В свою чергу виникає необхідність пошуку відповідного методу і типу нейронної мережі, зокрема, порівняльний аналіз переваг і недоліків кожного з них.

Визначення оптимальних локацій для будівництва МГЕС полягає у розв'язанні задачі класифікації на основі сформованого набору гіпотез та відповідної вибірки даних. Враховуючи значну кількість вхідних параметрів, виникає необхідність пошуку відповідної методології машинного навчання, яка забезпечить найбільш оптимальний розв'язок. Розглянемо основні моделі, їх переваги та недоліки в сенсі можливості застосування для аналізу потенціалу малих річок та будівництва МГЕС.

Байєсове навчання (Bayesian Learning).

Даний підхід базується на формуванні апіорного розподілу ймовірностей для вибірок та використанні теореми Байєса для знаходження апостеріорної ймовірності [2]. Перевагами даного машинного навчання є можливість роботи з малою кількістю даних та високий рівень гнучкості підходу. Активно використовується в інженерії та медицині. До недоліків слід віднести труднощі явного задання адекватної апіорної величини, часто спостерігається висока обчислювальна складність та обмежена автоматизація процесу.

Графічні / генеративні моделі (Graphical / generative Models).

Даний тип машинного навчання базується на байєсівському підході, але вибірка в даному випадку представляється графічно, як умовно незалежні величини, закодовані у графі [3]. Перевагою такого підходу є менша складність обчислювальних процесів у порівнянні з класичним байєсівським підходом, можливість отримання апіорної величини. Даний підхід успадкував недоліки байєсівського підходу, а також результати навчання швидко погіршуються в результаті систематичної помилки під час трактування умовної незалежності, яка в реальних задачах зустрічається досить рідко.

Оптимізація за допомогою опуклої функції втрат (Convex Loss Optimization).

Особливістю цього підходу до машинного навчання є використання стандартної функції втрат, яка є опуклою в деякій параметрично прогнозованій системі. Пошук глобального оптимуму відбувається шляхом оптимізації прогнозованої системи [4]. До позитивних особливостей цього методу машинного навчання слід віднести можливість зменшення обчислювальної складності шляхом використання математично чистих рішень, а також можливість автоматизації підходу. Негативними сторонами цього методу є погіршення результату при використанні неопуклих функцій втрат, а також обмеженість моделей при переході до опуклої функції втрат.

Метод найшвидшого спуску (Gradient Descent).

Даний метод базується на архітектурі з вільними параметрами, який можна застосувати до даних градієнтного спуску при налаштуванні параметрів [5]. Перевагами даного методу машинного навчання є відносно незначна обчислювальна складність, що забезпечується модульністю градієнтного спуску та прямою оптимізацією об'єму вибірки для прогнозування. Недоліками є проблеми при ініціалізації параметрів, а також перенавчання системи.

Навчання на базі ядер (Kernel - based learning).

Суть даного підходу полягає у виборі певного ядра з необхідними характеристиками та використанні його як міри подібності в процесі навчання [6]. До переваг методу можна віднести практичність алгоритмів навчання, а також використання апіорної інформації в задачах машинного навчання. Негативними сторонами підходу є складність ініціалізації характеристик ядра, а також необхідність підвищення обчислювальної складності для великих об'ємів даних, щоб забезпечити достатню ефективність.

Онлайн навчання з експертами (Online Learning with Experts).

Цей метод полягає у створенні декількох базових предикатів між якими автоматично перемикається майстер-алгоритм для мінімізації похибки. Це дозволяє забезпечити ефективність і автоматизацію методу для досягнення продуктивності з використанням набору предикатів. Негативною стороною такого підходу є висока складність обчислень і залежність від ефективності експертів, які створюють предикати.

Спрощення завдань машинного навчання (Learning Reductions).

Особливістю даного підходу полягає у зведенні складних задач машинного навчання до системи з простих і добре вивчених завдань. Суттєвою перевагою є можливість отримання високо автоматизованих алгоритмів навчання. Проте, можливість допустимого спрощення алгоритмів не завжди дозволяє отримати хороші результати на виході, а також практична відсутність інформації, що стосується базових алгоритмів навчання.

Наближено правильне навчання (Probably Approximately Correct (PAC) Learning).

Даний підхід базується на припущенні, що випадкові величини з відповідної вибірки є незалежними однаково розподіленими і з невідомим розподілом. При цьому потрібно розглядати навчання, як пошук оптимальної гіпотези з певного набору гіпотез з врахуванням обчислювальної складності. Позитивною стороною такого підходу є фокусування основної уваги на обчисленнях, оскільки обчислювальні потужності є обмеженим ресурсом. Проте, такий підхід не забезпечує суттєвих задовільних результатів, особливо при динамічній зміні розподілу випадкових величин.

Теорія статистичного навчання (Statistical Learning Theory).

Суть методу полягає у визначенні кількості вибірок, необхідних для отримання оптимальної гіпотези з набору гіпотез. При цьому вибірка повинна складатися з незалежних однаково розподілених випадкових величин з невідомим розподілом. В даному випадку результативність методу істотно більша у порівнянні з наближено правильним навчанням. Слід відмітити, що на основі цього підходу розроблено декілька практичних алгоритмів. До негативної сторони цього методу слід віднести те, що вхідні дані не завжди є однаково розподіленими випадковими величинами, а також недооцінювання складності обчислень призводить до ускладнень застосування цього підходу на практиці.

Навчання на основі дерева рішень (Decision tree learning).

Даний підхід до машинного навчання базується на процесі розрізання вхідного простору і присвоюванні відповідних прогнозів фрагментам простору [7]. Перевагами такого методу навчання є швидкість виконання та автоматизація алгоритмів. Проте, не всі завдання можна вирішити даним підходом, незважаючи на існування розв'язку. Часто використання інших методів дозволяє збільшити продуктивність. Крім цього, для багатьох алгоритмів, які базуються на цьому підході, відсутнє теоретичне обґрунтування.

Базуючись на проведеному аналізі основних підходів до машинного навчання визначено, що найбільш оптимальним для аналізу потенціалу розвитку гідроенергетики на малих річках є дерево рішень. Даний метод дозволяє здійснювати аналіз та прогнозування на основі вхідних даних, забезпечуючи найменшу похибку результатів у порівнянні з іншими підходами.

III. ЗАСТОСУВАННЯ ДЕРЕВА РІШЕНЬ ДЛЯ АНАЛІЗУ РОЗВИТКУ ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ НА МАЛИХ РІЧКАХ

Дерево рішень являє собою певну структуру даних, при обході якої в кожному вузлі здійснюється перевірка умови і на основі цього визначається напрямок руху по тій чи іншій гілці, починаючи від кореня і закінчуючи кінцевими вершинами. Саме у кінцевих вершинах міститься значення відповідного атрибута. У першому випадку виконується завдання класифікації об'єкта, а у другому – оцінка кількісної величини [7].

Варіантів побудови дерева рішень може бути безліч. Все залежить від того, в якому порядку аналізувати атрибути, перевірку яких умов здійснювати у вузлах дерева, коли і за яких умов здійснювати зупинку процесу. Але в даному випадку слід фокусуватися на деревах, які здатні найбільш точно оцінити значення атрибутів з мінімальною похибкою, передбачають можливість виявлення залежностей між ними, а також успішно реалізують прогнозування значень атрибутів, використовуючи нові дані. Проте, зараз не існує таких алгоритмів, які б забезпечили формування оптимального дерева рішень за адекватний часовий проміжок. Однак є алгоритми, які можуть сформувати таке дерево рішень, що буде максимально наближеним до оптимального. Суть їх роботи полягає в тому, що на кожній ітерації використовується відповідний, локальний, критерій оптимальності. А в цілому, це дозволяє максимально наблизити наше дерево до оптимального.

Побудова дерева відбувається за принципом «зверху-вниз», починаючи від кореня. А сам процес починається з визначення атрибута для перевірки в його корені. Кожен атрибут необхідно проаналізувати та сформувати усі характеристики, які б відображали однорідний набір даних. Наступним кроком є створення гілки дерева, при цьому набір даних потрібно розділити відповідно до значень кожної гілки. Дана операція виконується рекурсивно до моменту виконання умови зупинки, яку заздалегідь треба означити.

Важливим елементом при побудові дерева рішень є вибір атрибутів. Базуючись на суті методу, необхідно забезпечити після кожного розбиття набору даних у вузлах формування все більш однорідних підгруп даних. Наприклад, при побудові дерева рішень для розв'язання задачі аналізу малих річок в сенсі розвитку МГЕС в кінцевому результаті необхідно отримати набір об'єктів, які б задовольняли необхідні умови будівництва об'єктів гідроенергетики. Слід також не забувати і про важливість кількісного критерія для оцінки однорідності розбиття.

IV. ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ АНАЛІЗУ МАЛИХ РІЧОК

Проектування МГЕС зазвичай починається з аналізу можливостей і потенціалу водного об'єкта (річки) на певній ділянці, формування найбільш оптимальних параметрів проекту і включає наступні пункти:

- визначення локації (створу) для електрогенеруючої станції;
- формування вимог до технічних характеристик майбутнього об'єкта (тиск, врахування балансу потужності при роботі з енергосистемою, планові параметри водосховища та ін.);
- обґрунтування технічних рішень при проектуванні гідровузлів та врахування фактору впливу на локальну екосистему;
- аналіз необхідної кількості обладнання та його типу.

Будівництво МГЕС вимагає також ґрунтового аналізу рельєфу прилеглої території та її технічного призначення, водного потенціалу річки з врахуванням сезонності (пори року, сезон дощів чи посухи), а також потенційно можливі шляхи підключення до єдиної енергетичної системи країни. Крім технічних особливостей, великий вплив на подальший розвиток проєктованого гідроенергетичного об'єкта мають і соціально-економічні чинники, які слід включати в перелік атрибутів при побудові дерева рішень.

Важливу роль в процесі аналізу річок в сенсі потенціалу розвитку гідроенергетики відіграють сучасні можливості геоінформаційних систем. На даний час вже сформовані досить детальні (глобальні) бази даних, які включають інформацію про рельєф (отримані за допомогою дистанційного зондування планети) та кліматичні умови. Слід зазначити, що дана інформація постійно оновлюється і проблема неактуальності даних практично відсутня. Використання таких даних дозволяє суттєво скоротити час досліджень ландшафту і проводити гідрологічні розрахунки для локалізації МГЕС.

Підхід до аналізу перспективних річок, придатних для будівництва МГЕС ґрунтується на розбитті всієї протяжності кожного з водних об'єктів на окремі ділянки з певним кроком і безпосередньому оцінюванні кожної з них на основі сформованих критеріїв. Такий метод аналізу потенціалу річок складається з наступних послідовних кроків:

- 1) формування критеріїв відбору найбільш оптимальних ділянок річок;
- 2) визначення послідовності застосування критеріїв відбору;
- 3) розробка методики визначення перспективних, в сенсі будівництва МГЕС, ділянок річок;
- 4) формування набору вхідних даних для аналізу водних об'єктів;
- 5) безпосередній просторовий аналіз кожної з ділянок річок на предмет відповідності сформованим критеріям відбору;
- 6) комплексне оцінювання усіх проаналізованих ділянок річок, які пройшли відбір по сформованих критеріях відповідності і є актуальними в сенсі будівництва МГЕС.

Набір критеріїв оцінювання потенціалу річок для будівництва МГЕС включає:

- 7) характеристики рельєфу місцевості відповідної ділянки річки (природні та інфраструктурні об'єкти);
- 8) швидкість водяного потоку;
- 9) перепад висоти русла річки (враховується при обчисленні висоти греблі);
- 10) відстань до гирла річки;
- 11) кут нахилу вертикального профілю;
- 12) загальна площа водозбору.

Перелічені вище критерії являють собою основні параметри, які можуть використовуватися при дослідженнях потенційно придатних місць для

будівництва МГЕС. Крім них присутні й інші, не менш важливі, які також впливають на кінцеве рішення щодо створення відповідного електрогенеруючого об'єкта, зокрема екологічні чи соціальні. Але використання описаних вище критеріїв при дослідженні річок дає змогу сформувавши набір тих ділянок річок, які могли б бути цікавими в сенсі будівництва та подальшого розвитку гідроенергетики в певному регіоні.

ВИСНОВКИ

В останнє десятиліття спостерігається значна динаміка розвитку відновлювальної енергетики, що є ключовим рішенням міжнародної спільноти щодо зменшення антропогенного впливу людської діяльності на навколишнє середовище, зокрема скорочення емісій парникових газів при виробництві електроенергії. Крім цього, розвиток енергетики є першопричиною зростання економіки будь-якої держави та рівня життя населення.

Використання енергії води для генерації електроенергії є найбільш технологічно освоєним методом на даний час, але все ж залишається одним з перспективних сегментів галузі відновлювальної енергетики. І в даному випадку найбільш правильним підходом до розвитку галузі є застосування сучасних інформаційних технологій, які можуть забезпечити суттєве заощадження ресурсів та часу для дослідження потенціалу водних ресурсів окремого регіону, зокрема малих річок, в сенсі актуальності і доцільності будівництва електрогенеруючих об'єктів на певній території.

В представленій роботі запропоновано підхід до оцінювання потенціалу малих річок з використанням машинного навчання. Зокрема здійснено аналіз моделей машинного навчання та визначено їх основні переваги та недоліки. Обґрунтовано доцільність використання дерева рішень для аналізу потенціалу розвитку гідроенергетики. Відповідно до цього сформовано критерії оцінювання потенціалу річок та розроблено алгоритм для визначення доцільних та перспективних ділянок річок в сенсі розвитку гідроенергетики.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Wagner, H., Mathur, J. Introduction to Hydro Energy Systems: Basics, Technology and Operation / Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2011. ISSN: 1865-3529. DOI: 10.1007/978-3-642-20709-9
- [2] Barber D. Bayesian Reasoning and Machine Learning / David Barber., University College London - 2012. ISBN-10: 0521518148.
- [3] Snyder J. M. Generative Modeling for Computer Graphics and Cad / John M. Snyder., 2014. ISBN-10: 148324671X.
- [4] Zhu J. Power Systems Applications of Graph Theory / Jizhong Zhu., Nova Science Publishers Inc, New York, United States 2011. ISBN-10: 1607413647.
- [5] Qian, Ning. On the momentum term in gradient descent learning algorithms. Neural Networks, Vol. 12, no. 1, 1999. pp. 145-151.
- [6] N. Cristianini and J. Shawe-Taylor. An introduction to Support Vector Machines. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000.
- [7] Rokach L., Maimon, O. Data mining with decision trees : theory and applications - 2nd edition / Lior Rokach, Oded Maimon. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Singapore. ISBN 978-9814590075.

Особливості Формування Правової Культури в Українському Інформаційному Суспільстві

Любов Николайчук
кафедра суспільних наук
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
м. Івано-Франківськ, Україна
lmnukolaychuk@gmail.com

Theoretical, Functional and Applied Advantages of the Residual Classes at Processing of Digital Information

Ljubov Nykolaychuk
dept. of social sciences
Ivano-Frankivsk national technical university of oil and gas
Ivano-Frankivsk, Ukraine
lmnukolaychuk@gmail.com

Анотація— Дослідженні особливості формування правової культури в українському інформаційному суспільстві.

Сформульовані завдання для досягнення розвитку та динамізації трансформаційних процесів, становлення в Україні правової держави і громадянського суспільства. Обґрунтована концепція формування правової культури у Державній національній програмі «Освіта».

Показано важливу роль розбудови української держави в умовах широкого застосування комунікаційних та інформаційних технологій. Обґрунтована актуальність наукового розроблення нової системи громадянського виховання молоді у середовищі сучасного інформаційного суспільства.

Узагальнені цілі вирішення Україною проблеми розвитку інформаційного законодавства яким формується правова культура особистості.

Abstract— Research features of formation of legal culture in the Ukrainian information society.

Formulated tasks for the achievement of the development and dynamization of transformation processes, the emergence of a law-governed state and civil society in Ukraine. The concept of formation of legal culture in the State national program "Education" is grounded.

The important role of building the Ukrainian state in the conditions of wide application of communication and information technologies is shown. The urgency of scientific development of a new system of civic education of youth in the environment of modern information society is substantiated.

Generalized solutions to Ukraine's problem of the development of information legislation, which forms the legal culture of the individual.

Ключові слова— інформаційне суспільство, правова та комунікаційна культура, інформаційні технології

Keywords— information society, legal and communication culture, information technologies.

I. ВСТУП

Проблеми, пов'язані з формуванням інформаційного суспільства, викликають велику увагу учених та політиків. Дослідженню цієї теми присвячено роботи багатьох зарубіжних та українських вчених, у яких обґрунтовуються та прогнозуються суспільні зміни, які відбуваються під впливом нових інформаційно-комунікаційних технологій у різних сферах життєдіяльності суб'єктів права.

У сучасних умовах, коли відбувається глибока трансформація суспільного буття, зміна соціальних

цінностей, норм діяльності та поведінки людей, особливого значення набуває ефективне нормативно-правове інформаційне впорядкування процесів суспільного розвитку.

Вирішення цього завдання зумовлює необхідність підвищення ролі та значення правової культури, посилення впливу її цінностей на нормування суспільних відносин.

Правова та комунікативна культура, процес її інформатизованого формування, функціонування та розвитку є неодмінною умовою динамізації трансформаційних процесів, становлення в Україні правової держави і громадянського суспільства.

Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати наступні завдання:

- з'ясувати загальні тенденції формування правової та комунікативної культури особи та конкретизувати їх прояви стосовно сучасних умов державотворення в Україні, переходу її до ринкової економіки;
- провести комплексний аналіз чинників, які впливають на процес формування правової та комунікативної культури особи;
- визначити інформаційні моделі належної правової та комунікативної культури особи на засадах Конституції України та у відповідності до загальноєвропейських та світових стандартів у сфері прав і свобод людини, відповідного рівня економічного, інформаційного та правового мислення;
- визначити шляхи й засоби формування такого рівня правової культури особи у середовищі інформаційного суспільства, який максимально відповідав би правовим цінностям світового співтовариства.

II. ТЕНДЕНЦІ ФОРМУВАННЯ ПРАВОВОЇ ТА КОМУНІКАТИВНОЇ КУЛЬТУРИ ОСОБИ

Економічні і політичні реформи супроводжуються суттєвою кризою суспільного життя. Перенасиченість інформаційного поля, ідеологічне розшарування, культ удаваних цінностей (грошей, свободи-свавилля, "правомірного" насильства) унеможливує належне усвідомлення теоретичних доказів соціальної цінності права.

Все це обумовлює актуальність проблеми моделювання процесів формування правової та комунікативної культури громадян України.

У Державній національній програмі "Освіта" (Україна ХХІ століття) зазначається, що формування правової культури – це один з елементів мети національного виховання. Становлення демократичної держави, розвиток на основі духовності, моральності неможливі без

високоосвіченого інформатизованого суспільства з розвинутою правовою культурою і глибокою правосвідомістю. Тому формування правової та комунікативної культури в умовах становлення інформаційного суспільства є одним з основних напрямків розвитку освіти.

Розбудова української держави в умовах широкого застосування комунікаційних та інформаційних технологій, ставить на порядок денний надзвичайно важливе і невідкладне завдання – виховання високоосвіченого громадянина і патріота рідної землі. Лише люди, безмежно віддані національній ідеї, здатні усвідомити визначальну роль сучасних інформаційних знань та проблем захисту інформаційного простору України.

Такі ознаки сучасної молоді здатні відстояти незалежність, соборність України, вивести її з тимчасових соціально – економічних труднощів на шлях прогресу і процвітання.

З огляду на це побудова нового демократичного, гуманного суспільства, яке орієнтується на високі національні і загальнолюдські цінності в умовах впливу великих інформаційних потоків та атак набуває, насамперед, виховного характеру. Особливо це стосується підростаючого покоління, якому в недалекому майбутньому відстоювати та примножувати здобутки нашої незалежності.

Зараз, в умовах економічної кризи, відбувається інтенсивний процес соціальної і моральної деградації частини учнівської та студентської молоді, надмірного захоплення негативними формами комерційного бізнесу і низькопробною зарубіжною культурою.

Відтак, притуплюються природні потреби в пізнанні своєї участі та ролі в інформаційному суспільстві, що може призводити до втрати інтересу до чесної праці та знецінювання духовних ідеалів.

III. ІНФОРМАЦІЙНІ ФАЗИ РОЗВИТКУ ЛЮДСТВА

Сучасний розвиток інформаційного суспільства та його наступної фази – суспільства знань, кардинально змінює існуючу світову та національну економіку, життя, взаємовідносини людей та спосіб влаштування сучасного світу. Пошук нової парадигми організації суспільних відносин став передумовою виникнення сучасної інформаційної фази розвитку людства та його побудови на основі знань.

Бурхливий розвиток сучасних суспільних відносин формування, передавання, опрацювання та використання інформаційних ресурсів отримав назву інформаційної революції.

Актуальними є наукове розроблення і практичне забезпечення, по суті нової системи громадянського виховання, мета якого - сформувати у студентів на основі високого рівня інформаційних знань комплексу громадянських якостей з усвідомленням потреби захищати

інтереси України, реалізувати свій особистісний потенціал на благо зміцнення Української держави.

У викладеній концепції права культура виховання з високим рівнем інформаційних знань є серцевиною напрямку удосконалення системи освіти і розглядається як цілеспрямована, систематична дія на духовний і фізичний розвиток особистості, зумовлена законами розвитку суспільства, людини та об'єктивними і суб'єктивними умовами.

Система виховання, також зумовлює формування навичок поведінки в середовищі потужних інформаційно-комунікаційних зв'язків, в сім'ї, під час навчання, на виробництві, культурно – освітній, професійній та політичній діяльності.

Зміст виховання визначається пріоритетністю вимог часу, потребами соціально – економічного розвитку і зумовлюється суспільними відносинами, станом науки, інформаційних технологій, культури, родинно-сімейними стосунками, традиціями та рівнем системи освіти. Дані аспекти є взаємозалежними, динамічними, тобто система виховує особистість, а особистість виховує систему.

Збільшення і наростання якісної різноманітності людських потреб, особливо в критичних ситуаціях, поява нових засобів їх задоволення, як порівняння свого рівня життєдіяльності з навколишнім середовищем, так і в наслідок розвитку науково – технічного прогресу, спричиняють виникнення суперечностей між необхідністю дотримання цінностей і стимуляцією щодо їх порушення або ігнорування.

Формування сучасного інформаційного суспільства створює передумови для підтримки стабільності демократичного устрою та утвердження позитивних, реальних і потенційних, безпосередніх і опосередкованих, абсолютних і відносних, політичних, соціальних, моральних, естетичних, наукових, християнських цінностей і блокування негативних тенденцій.

Беручи до уваги рівень розвитку і організації, самоорганізації людини як суб'єкта права та національного патріота, незалежно від рівня організації суспільних відносин розрізняють загальнолюдські, загальнонаціональні, народні, сімейні, колективні, особистісні цінності.

Пріоритетність системи виховання у діючому інформаційному суспільстві забезпечується виконанням цілей освіти і розглядається як гарант демократичності суспільного устрою та державотворення і служить ефективним засобом, за допомогою якого існуюче покоління і держава на основі набутого досвіду, аналізу суспільних досягнень та усвідомлених причин невдач формують людей підготовлених до активної позитивної діяльності у майбутньому.

В умовах, коли інформаційні технології стають все більш доступними для кожної окремої людини, права, обов'язки і відповідальність кожного суб'єкта інформаційних відносин мають бути визначені як національним законодавством, так і міжнародними

правовими нормами і забезпечувати розумне використання наукових знань і бібліотек, накопичених інформаційних ресурсів для потреб економічного розвитку і безпеки своєї держави.

Визначеність стратегічної орієнтованості діяльності України на адаптацію до нового середовища існування є сьогодні, на нашу думку, найважливішим для держави завданням глобального масштабу.

Варто зазначити, що наука відіграє центральну роль у розвитку інформаційного суспільства. Багато компонентів інформаційного суспільства – це результат науково-технічних досягнень, можливих завдяки спільному використанню результатів досліджень.

Освіта, знання, інформація і спілкування становлять основу розвитку, ініціативності і добробуту людської особистості. Інформаційні і комунікаційні технології суттєво впливають на всі аспекти нашого життя.

IV. ФОРМУВАННЯ Й РОЗВИТОК ІНФОРМАЦІЙНОГО СУСПІЛЬСТВА УКРАЇНИ

Таким чином, важливість вирішення Україною проблеми розв'язання і необхідності подолання негативних тенденцій у створенні в правовому і організаційному плані логічно завершеної системи управління, формування, розвитку, використання й захисту інформаційних ресурсів, ліквідування відставання у розвитку інформаційного законодавства дозволяє зробити висновок про те, що в процесі формування й розвитку інформаційного суспільства України мають бути досягненні такі цілі:

- забезпечення конституційних прав громадян на інформацію;
- створення й підтримка інформаційного потенціалу, достатнього для стійкого й безпечного розвитку українського суспільства;
- забезпечення оперативного доступу до наявних інформаційних ресурсів та їхнє включення в інформаційний простір України за умов доступності до них на законній підставі - органів державної влади, господарюючих суб'єктів і громадян;
- підвищення рівня узгодженості рішень, що приймаються органами державної влади, регіональними (обласними) органами влади й органами місцевого самоврядування;
- надання можливості громадянам і громадським організаціям на законних підставах здійснювати контроль за діяльністю органів державної влади й органів місцевого самоврядування;
- підвищення рівня правосвідомості, ділової й суспільної активності громадян шляхом надання їм вільного доступу до правових і нормативних документів, які визначають їхні права й обов'язки, а також, рівної можливості користатися відкритою науково-технічною, соціально-економічною,

правовою, суспільно-політичною інформацією, інформаційними фондами сфер освіти, культури тощо;

- побудова інформаційного суспільства в Україні та її входження у світове інформаційне співтовариство за умов забезпечення захисту всіх елементів національного інформаційного простору, прав і свобод суб'єктів України, що діють у ньому, як важливому чинникові збереження інформаційно-захисного державного суверенітету України.

Правова та інформаційно-комунікаційна культура — це необхідний рівень творчої діяльності особистості, у процесі якої вона здобуває і розвиває свої правові знання, уміння, навички - виступає як результат діяльності у інформаційно-правовій сфері.

Правова та інформаційно-комунікаційна культура окремої особистості включає в себе позитивну правосвідомість, розуміння принципів права, повагу до права, впевненість у соціальній цінності права та правового регулювання, знання своїх прав і обов'язків та їх виконання.

Отже, правова культура особистості підвищує сукупність правових та інформаційних знань, емоцій, почуттів, вольових компонентів, які проявляються у правомірній поведінці.

ВИСНОВОК

Викладені дослідження особливостей формування правової культури в Українському у демократичному суспільстві обґрунтовують що, вона має бути спрямованою на виховання таких людей, які поважають закон, і можуть чинити супротив у тому разі, коли їх права порушуються..

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Гринькова Я.Г. Правова культура фахівця – важливий чинник успішної професійної діяльності. Засоби навчальної та науково-дослідної роботи: Збірник наукових праць / За заг. ред. проф. В.І. Євдокимова і проф. О.М. Микитюка / Я.Г. Гринькова: Харк. нац. пед. ун-т імені Г.С. Сковороди. – Харків, 2013. – Вип. 40. – С.44-51.
- [2] Журавський В.С. Україна на шляху до інформаційного суспільства/ В.С. Журавський, М.К. Родіонов, І.Б. Шилієв; за заг. ред. М.З. Згуровського. – К.: ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2004. – 484с.
- [3] Закон України «Про інформацію» від 2 жовтня 1992 року //ВВР України, 1992.- № 48.
- [4] Коваленко Н. Ю. Правосвідомість студентської молоді в сучасний період / Н. Ю. Коваленко // Бюлетень Міністерства юстиції України. – 2006. – № 5. – С. 118.
- [5] Кохановська О.В. Теоретичні проблеми інформаційних відносин у цивільному праві: Монографія./ О.В. Кохановська.- К.: Видавничо-поліграфічний цент «Київський університет», 2006.-463 с.
- [6] Nykolaichuk L. Generalization of information models classer and communication interaction of the subjects of law of information society / Proceedings of 13th international Conference: The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics, CADSM 2015 72300820, pp.143-146.
- [7] Николайчук Л.М. Інформаційні моделі у галузі юриспруденції та комунікацій суб'єктів права / Спеціалізовані комп'ютерні технології в інформатиці /за загальною редакцією Я.М.Николайчука.- Тернопіль: «Бескиди», 2017.- с.695-725.

- [8] Николайчук Л.М. Теоретичні аспекти формування правової та комунікативної культури студентів нафтогазової справи / Правові, управлінські та економічні аспекти трансформації сучасного громадянського суспільства: Тези допов. Всеукр. наук. – практ. конф., Київ 25 березня 2016 р. У 2 ч. Ч. I / М-во культури України; Київ. нац. ун-т культури і мистецтв. – Київ: Видав. Центр КНУКіМ, 2016. – С. 458-461.
- [9] Николайчук Л.М. Правове виховання - основний чинник формування правової культури особи / Матеріали міжнародної науково-практичної конференції : Якість вищої освіти: українська національна система та європейські практики.- Київ, 6-7- грудня 2018 р.- с.104-105.

Оптико-Частотний Перетворювач Газу для Діагностики Штамів Бактерії *Helicobacter Pylori*

Олександр Осадчук
кафедра радіотехніки
Вінницький національний технічний університет,
Вінниця, Україна
osadchuk.av69@gmail.com

Неоніла Осадчук
кафедра мікробіології
Вінницький національний медичний університет
ім.М.І.Пирогова, Вінниця, Україна
osadchuk.n70@gmail.com

Ярослав Осадчук
кафедра радіотехніки
Вінницький національний технічний університет,
Вінниця, Україна
osadchuk.j93@gmail.com

Optical Frequency Gas Transducer for Diagnostics Battery *Helicobacter Pylori*

Alexander Osadchuk
Department of Radio Engineering
Vinnytsia National Technical University,
Vinnitsa, Ukraine
osadchuk.av69@gmail.com

Neonila Osadchuk
Department of Microbiology
Vinnytsia National Medical University
named M.I. Pirogov, Vinnitsa, Ukraine
osadchuk.n70@gmail.com

Iaroslav Osadchuk
Department of Radio Engineering
Vinnytsia National Technical University,
Vinnitsa, Ukraine
osadchuk.j93@gmail.com

Анотація — В статті розглянуто оптико-частотний перетворювач концентрації газу для діагностики штамів бактерії *Helicobacter Pylori*. Даний оптико-частотний перетворювач концентрації газу побудований на основі транзисторної структури з від'ємним диференційним опором з чутливими до оптичного випромінювання МДН транзисторами з спектром поглинання в діапазоні інфрачервоного випромінювання 1590 – 1610 nm відповідного для спектру поглинання NH₃. Розроблено математичну модель оптико-частотного перетворювача концентрації газу, що враховує вплив оптичного випромінювання на канал, витокові та стокові р-п переходи МДН транзисторів. Фоточутливі польові транзистори реалізують ємність і індуктивність коливального контуру оптико-перетворювача газу, які змінюються під дією оптичного випромінювання, а відповідно концентрації газу,

що дозволило підвищити чутливість перетворювача концентрації газу.

Abstract — The optic-frequency transducer of gas concentration for diagnosing strains of bacteria *Helicobacter Pylori* is considered in the article. This optic-frequency transducer of gas concentration is constructed on the basis of a transistor structure with a negative differential resistance with sensitive to optical radiation of MOSFET transistors with absorption spectrum in the range of infrared radiation 1590 - 1610 nm corresponding to the absorption spectrum of NH₃. The mathematical model of the opto-frequency transducer of gas concentration was developed, which takes into account the influence of optical radiation on the channel, turning and flow of p-n transitions of MOSFET transistors. Sensitive field-effect transistors realize the capacitance and inductance of the oscillatory circuit of an opto-transducer of gas, which change

under the influence of optical radiation, and, accordingly, the concentration of gas, which allowed to increase the sensitivity of the transducer of gas concentration.

Ключові слова — оптико-частотний перетворювач; від'ємний диференційний опір; фоточутливий МДН транзистор; *Helicobacter Pylori*; концентрація газу.)

Keywords — *optic-frequency transducer*; *negative differential resistance*; *photosensitive MOSFET transistor*; *Helicobacter Pylori*; *gas concentration*.

I. ВСТУП

Підвищення ефективності діагностування різних захворювань з використанням новітніх методів та пристроїв і в той же час більш повний і різнобічний аналіз ознак є актуальним напрямом сучасної медицини. Неінвазивний метод аналізу повітря, що видихається пацієнтом в останній час викликає підвищений інтерес. На сьогоднішній день визначення різних штамів бактерії *Helicobacter pylori* (*H.pylori*) набуло великої значимості у зв'язку з розповсюдженням та її ролі у розвитку багатьох серйозних шлунково-кишкових захворювань [1–3]. Інфекція *Helicobacter pylori* залишається однією з найпоширеніших у нашій країні. До 80 % дорослих інфіковані цією бактерією. Відомо, що ця інфекція може проявлятися в дуже широкому діапазоні — від безсимптомного носійства до раку шлунка [4]. У медичній практиці використовуються сучасні засоби діагностики хелікобактерної інфекції і застосовується нова протиінфекційна стратегія лікування гастродуоденальних захворювань [3, 4]. В даний час із методів дихальної діагностики *H.pylori* переважає неінвазивний C^{13} -уреазний дихальний тест, який має високу діагностичну достовірність. Альтернативним методом дихальної діагностики є метод заснований на визначенні аміаку (NH_3) в повітрі, що видихається альвеолами і концентрацією аміаку, що надходить зі шлунка, при оцінці сумарної концентрації аміаку [5].

Перспективним напрямком при побудові перетворювачів концентрації газу для дихальної діагностики є використання оптико-частотних перетворювачів концентрації газу на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним диференційним опором [6, 7]. Даний тип перетворювачів дозволяє розв'язати задачу використання аналогово-цифрових перетворювачів, оскільки реалізує метод перетворення "інформативний сигнал – частота", який є одним з найкращих для подальшої обробки на комп'ютері [8]. Проведені теоретичні та практичні дослідження показали, що використовуючи реактивні властивості напівпровідникових приладів та транзисторні структури, в яких існує від'ємний диференційний опір, можна значно підвищити чутливість та точність вимірювання концентрації газу, зокрема NH_3 [9].

II. ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

В ході аналізу оптимального варіанта конструкції вторинного перетворювача концентрації газу, було зроблено висновок про доцільність використання

частотного методу перетворення інформації, що дозволить підвищити чутливість вимірювання контрольованого параметра, зокрема NH_3 , в діагностичних медичних систем, а також забезпечити високу завадостійкість інформативного сигналу.

Автогенераторні транзисторні структури з від'ємний диференційним опором, який забезпечується внутрішнім зворотним зв'язком і слугує компенсацією втрат енергії на активних опорах схеми. Повний опір такої транзисторної структури, в залежності від вигляду його вольт-амперної характеристики, має ємнісний або індуктивний характер, а величина залежить від прикладеної до її входу напруги [9]. Якщо величина падіння напруги і величини повного опору транзисторної структури залежить від величини вимірювального параметра, то за зміною частоти коливань такого автогенераторного пристрою можна визначати величину вимірюваної фізичної величини.

На рис. 1 подана схема оптико-частотного перетворювача концентрації газу з чутливими елементами до оптичного випромінювання на основі польових МДН транзисторів з активним індуктивним елементом.

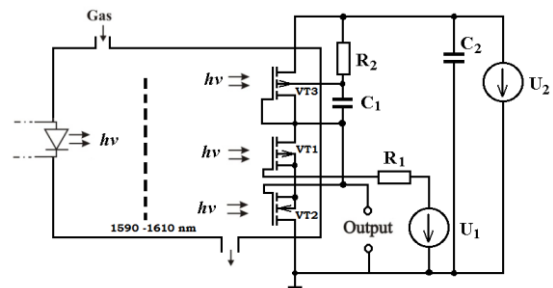


Рис. 1. Схема оптико-частотного перетворювача газу

На рис.1 представлена схема фоточутливого перетворювача, у якому ємність коливального контуру автогенератора реалізується ємнісною складовою повного опору на електродах стік-стік польових фоточутливих транзисторів VT1 і VT2, а індуктивність реалізується індуктивною складовою повного опору на електродах джерело-стік фоточутливого транзистора VT3. Спектр поглинання NH_3 знаходиться в діапазоні інфрачервоного випромінювання 1590 – 1610 nm [10].

Польові фототранзистори зі структурою метал-діелектрик-напівпровідник (МДН) знайшли широке використання в системах прийому й обробки оптичної інформації [11]. На даний час розроблена теорія фотопольового ефекту в МДН транзисторах, що досить точно описує статичні характеристики таких приладів [12]. Однак у динамічному режимі, коли на канал діє невеликий змінний сигнал і оптичне випромінювання, теоретичні питання зміни параметрів транзистора вивчені недостатньо повно. З іншого боку, залежність параметрів польових фототранзисторів від оптичного випромінювання в динамічному режимі дозволяє створювати оптико-частотні перетворювальні пристрої з оптичною перебудовою частоти, які по своїх характеристиках значно краще аналогових

пристроїв [13]. Використання польових транзисторних структур з від'ємним опором дозволяє реалізувати автогенератор перетворювача, у якого як ємність, так і індуктивність на основі польових транзисторів залежить від оптичного випромінювання, що поліпшує чутливість і точність перетворювача. У даній роботі уточнена надвисокочастотна еквівалентна схема польового фототранзистора, що включає залежність параметрів від оптичного випромінювання з урахуванням фотопровідності каналу й фотовольтаїчних ефектів витокового та стокового р-п переходів. На її основі розраховані параметри оптико-частотного перетворювача газу.

Для одержання основних аналітичних співвідношень скористаємося звичайною структурою МДН транзистора з індукованим р-каналом [14]. При цьому вважається однорідним і невідродженим напівпровідниковий матеріал з постійною рухливістю носіїв заряду в каналі, відсутність оптично стимульованого перезарядження поверхневих станів і фотоемісії в діелектрик, однорідність часу життя нерівноважних носіїв заряду в об'ємі та на поверхні напівпровідника. Вважаємо, що енергія квантів оптичного випромінювання перевищує ширину забороненої зони напівпровідника та має місце біполярна фотогенерація.

Для визначення залежності повного опору каналу від оптичного випромінювання необхідно вирішити рівняння безперервності з урахуванням оптичної генерації. В умовах слабкої інверсії основним компонентом струму є дифузійна [14], тому скористаємося одномірним рівнянням безперервності для р-каналу [14]

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \nabla(D\nabla p) - (\mu_E j / \sigma \nabla p) - \frac{p - p_0}{\tau_p} + G, \quad (1)$$

де

$$D = (D_n D_p) / (D_p p + D_n n) = 2 / (b + 1) D_p \quad (2)$$

- коефіцієнт біполярної дифузії,

$$\mu_E = (\mu_n \mu_p (n - p)) / (\mu_n n + \mu_p p) \quad (3)$$

- коефіцієнт біполярної рухливості носіїв заряду, j - щільність струму, σ - провідність каналу, τ_p - час життя дірок, p, n - концентрація нерівноважних носіїв заряду, μ_p, μ_n - рухливість дірок і електронів, $b = \mu_n / \mu_p$ - відношення рухливості електронів і дірок, D_n, D_p - коефіцієнти дифузії електронів і дірок, G - швидкість фотогенерації носіїв заряду.

При стаціонарному режимі роботи МДН транзистора з врахуванням (2) і (3) рівняння (1) приймає вид

$$D \frac{d^2(p - p_0)}{dx^2} - \mu_E E \frac{d(p - p_0)}{dx} - \frac{p - p_0}{\tau} = -G(x). \quad (4)$$

Введемо позначення

$$\frac{\mu_E E}{D} = \frac{\mu_E E \tau}{D \tau} = \frac{l_E}{L_*^2}, \quad (5)$$

$$L_*^2 = D \tau, \quad (6)$$

тоді рівняння (4) з врахуванням (5) і (6) записується у вигляді

$$\frac{d^2(p - p_0)}{dx^2} - \frac{l_E}{L_*^2} \frac{d(p - p_0)}{dx} - \frac{p - p_0}{L_*^2} = -\frac{G(x)}{D}. \quad (7)$$

При генерації світлом носіїв заряду швидкість генерації описується рівнянням [15]

$$G(x) = G(0)e^{-\alpha x}, \quad (8)$$

де α - коефіцієнт поглинання світла. Якщо вважати, що нерівноважна концентрація дірок складається із двох доданків

$$p = p_{01} + p_1 e^{j\omega t}, \quad (9)$$

де p_{01} - концентрація дірок, що визначається постійною напругою, а p_1 - змінною напругою, то рівняння (7) приймає вид

$$\frac{d^2 p_1}{dx^2} - \frac{l_E}{L_*^2} \frac{dp_1}{dx} - \frac{p_1(1 + j\omega \tau)}{L_*^2} = -\frac{G(x)}{D}. \quad (10)$$

Граничні умови при розв'язанні рівняння (10) описуються виразами

$$p_1(0, t) = p_0 \exp[\beta(\psi_s + \varepsilon_b)] + p_0 \exp[\beta(\psi_s + \varepsilon_b)] \beta U_{1b}(t) \quad (11)$$

$$p_1(L, t) = p_0 \exp[\beta(\psi_s + \varepsilon_c)] + p_0 \exp[\beta(\psi_s + \varepsilon_c)] \beta U_{1c}(t) \quad (12)$$

де $\beta = kT / q$, $\varepsilon_b, \varepsilon_c$ - величина фото ЕРС на р-п переходах витоку та стоку, U_D - постійна напруга на стоці, $U_{1b}(t), U_{1c}(t)$ - змінна напруги на електродах витоку і стоку, L - довжина каналу, ψ_s - поверхневий потенціал, що пов'язаний з напругою на затворі U_G та ефективному рівні фотогенерації $\xi = \Delta n / n_i = \Delta p / n_i$ наступним співвідношенням [14]

$$U_G - U_{FB} = \psi_s + \frac{\varepsilon_s \varepsilon_0 \varphi_s}{\beta C_0 L_{Di}^* |\varphi_s|} F(\varphi_s \varphi_F^*), \quad (13)$$

$$\text{де } \varphi_S = \beta\psi_S, \quad L_{Di}^* = \frac{\varepsilon_S \varepsilon_0 kT}{2q^2 n_i^*},$$

$$\varphi_F^* = \left[\ln(\xi + e^{\varphi_F}) - \ln(\xi + e^{-\varphi_F}) \right] / 2,$$

$$n_i^* = n_i \exp\left(\left[\ln(\xi + e^{\varphi_F}) - \ln(\xi + e^{-\varphi_F}) \right] / 2 \right),$$

U_{FB} - потенціал площинних зон, φ_F - потенціал Фермі, C_0 - питома ємність діелектрика, n_i - концентрація носіїв заряду у власному напівпровіднику, $\varepsilon_S, \varepsilon_0$ - діелектрична постійна напівпровідника та вакууму відповідно. У режимі слабкої інверсії справедливе наближення [14]

$$F(\varphi_S, \varphi_F^*) \approx \sqrt{(\varphi_S - 1)e^{\varphi_F^*}}. \quad (14)$$

При підстановці (14) в (13), одержуємо

$$\varphi_S = U_G - U_{FB} - \sqrt{\frac{\varepsilon_S \varepsilon_0}{\beta^2 C_0 L_{Di}^*} (\beta U_G - 1) e^{\varphi_F^*/2}}. \quad (15)$$

Розв'язок рівняння (10) складається із загального рішення однорідного рівняння і часткового розв'язку неоднорідного рівняння. Загальний розв'язок однорідного рівняння має вигляд

$$P_1(x, t) = A_1 e^{K_1 x} + A_2 e^{K_2 x}, \quad (16)$$

де A_1 і A_2 корені квадратного рівняння

$$K^2 - \frac{l_E}{L_*^2} K - \frac{1}{L_*^2} = 0. \quad (17)$$

Таким чином, маємо

$$K_{1,2} = \frac{l_E}{2L_*^2} \pm \sqrt{\left(\frac{l_E}{2L_*^2} \right)^2 + \frac{1}{L_*^2}}. \quad (18)$$

Якщо позначити

$$\frac{1}{l_1} = \sqrt{\left(\frac{l_E}{2L_*^2} \right)^2 + \frac{1}{L_*^2}} + \frac{l_E}{2L_*^2}, \quad (19)$$

$$\frac{1}{l_2} = - \left(\sqrt{\left(\frac{l_E}{2L_*^2} \right)^2 + \frac{1}{L_*^2}} - \frac{l_E}{2L_*^2} \right), \quad (20)$$

тоді розв'язок однорідного рівняння приймає вид

$$P_1(x, t) = A_1 e^{x/l_1} + A_2 e^{-x/l_2}. \quad (21)$$

Коефіцієнти A_1 і A_2 визначаються із граничних умов (11) та (12), отже

$$A_1 = \frac{P_1(L, t) - P_1(0, t) e^{-l_1 C_0^*/2}}{e^{l_1 C_0^*/l_1} - e^{-l_2 C_0^*/l_2}}, \quad (22)$$

$$A_2 = \frac{P_1(0, t) e^{l_1 C_0^*/l_1} - P_1(L, t)}{e^{l_1 C_0^*/l_1} - e^{-l_2 C_0^*/l_2}}, \quad (23)$$

де $C_0^* = \sqrt{1 + j\omega\tau}$, ω - кругова частота.

Частковий розв'язок неоднорідного рівняння (10) шукається у вигляді $\bar{P}(x) = R_K e^{\alpha x}$, де R_K багаточлен ступеня a , якщо права частина рівняння має вигляд $f(x) = Q_K e^{\alpha x}$ [15]. Таким чином, часткове рішення рівняння (10) має вигляд

$$\bar{P}(x) = G(0) e^{-\alpha x} / \left(D \left[\alpha^2 - \alpha \frac{l_E}{L_*^2} - \frac{1}{L_*^2} \right] \right) \quad (24)$$

Загальне рішення рівняння (10) записується у вигляді

$$P_1(x, t) = A_1 e^{\frac{x C_0^*}{l_1}} + A_2 e^{-\frac{x C_0^*}{l_2}} - \frac{G(0) e^{-\alpha x}}{D \left[\alpha^2 - \alpha \frac{l_E}{L_*^2} - \frac{1}{L_*^2} \right]}. \quad (25)$$

Повний опір каналу польового транзистора визначається

$$Z_K = U_1 / S j_1, \quad (26)$$

де U_1 - змінна напруга в каналі, S - площа поперечного перерізу каналу. Використання виразу (25) дозволяє визначити

$$Z_K = - \frac{1}{q\mu_p S(b+1)} \cdot \frac{\int_0^L \frac{A_1(C_0^*/l_1) - A_2(C_0^*/l_2)}{A_3} dx}{A_1(C_0^*/l_1) - A_2(C_0^*/l_2)} - \frac{kT}{q^2(b+1)SD_p} \cdot \frac{\int_0^L \frac{A_1(C_0^*/l_1) e^{\frac{x C_0^*}{l_1}} - A_2(C_0^*/l_2) e^{-\frac{x C_0^*}{l_2}}}{A_3} dx}{A_1(C_0^*/l_1) - A_2(C_0^*/l_2)}. \quad (27)$$

де

$$A_3 = A_1 \frac{C_0^*}{l_1} e^{\frac{x C_0^*}{l_1}} + A_2 \frac{C_0^*}{l_2} e^{-\frac{x C_0^*}{l_2}} - \frac{G(0) e^{-\alpha x}}{D \left[\alpha^2 - \alpha l_E / L_*^2 - 1 / L_*^2 \right]}.$$

Рішення інтегралів рівняння (27) зроблено чисельним методом на персональному комп'ютері. При поділі на

дійсну та уявну частини виразу (27) одержимо активну і реактивну складові повного опору каналу. Під час розрахунків повного опору були використані значення параметрів транзисторів BSS84P та BSS7728. У повній моделі фотореактивного МДН транзистора необхідно врахувати вплив малосигнальних параметрів активної зони кристала, фотодіодних структур витoku та стоку, а також паразитних параметрів корпусу.

Розрахунки функції оптико-частотного перетворювача газу, що являє собою залежність частоти генерації від потужності оптичного випромінювання і відповідно концентрації газу, можна одержати на основі рішення системи рівнянь [16] відповідно до перетвореної еквівалентної схеми (рис.2).

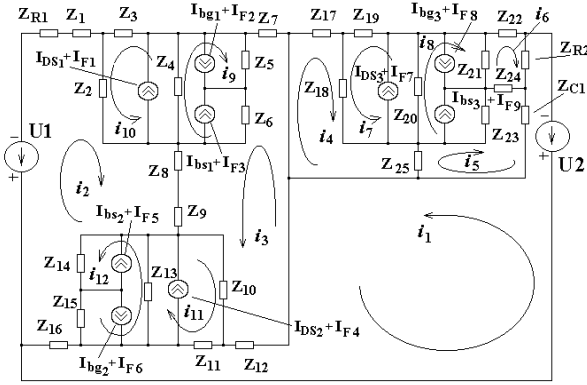


Рис. 2. Еквівалентна схема оптико-частотного перетворювача газу

Система рівнянь Кірхгофа має вигляд

$$\begin{aligned}
 U_2 &= (Z_{R2} + Z_{C1} + Z_{12} + Z_{11} + Z_{16})i_1 + Z_{R2}i_6 + Z_{C1}i_5 - Z_{12}i_3 + \\
 &+ Z_{11}i_{11} + Z_1(I_{DS2} + I_{F4}) + Z_{16}i_2, \\
 U_1 &= (Z_{R1} + Z_1 + Z_2 + Z_8 + Z_9 + Z_{14} + Z_{15} + Z_{16})i_2 + Z_2(i_{10} + I_{DS1} + I_{F1}) + \\
 &+ Z_8i_5 + Z_9i_3 + Z_{14}i_{12} + Z_{15}(I_{BS2} + I_{F5} + I_{DS2} + I_{F4}) - Z_{14}(I_{BG2} + I_{F6}) + Z_{15} \times \\
 &\times (i_{12} + I_{BS2} + I_{F5} - I_{BG2} - I_{F6} + I_{DS2} + I_{F4}) + Z_{16}i_1, \\
 0 &= (Z_7 + Z_5 + Z_6 + Z_8 + Z_9 + Z_{10} + Z_{12})i_3 + Z_9i_9 - Z_5(I_{BG1} + \\
 &+ I_{F2}) + Z_5(I_{BS1} + I_{F3} + I_{DS1} + I_{F1}) + Z_6(I_{BS1} + I_{F3} - I_{BG1} - \\
 &- I_{F2} + I_{DS1} + I_{F1}) + Z_8i_2 + Z_9i_2 + Z_{10}(i_{11} + I_{DS2} + I_{F4} + I_{BS2} + \\
 &+ I_{F5} - I_{BG2} - I_{F6}) - Z_{12}i_1, \\
 0 &= (Z_{17} + Z_{18} + Z_{25})i_4 + Z_{18}i_7 + Z_{18}(I_{DS3} + I_{F7}) + Z_{18}(I_{BS3} + \\
 &+ I_{F9}) - Z_{18}(I_{BG3} + I_{F8}) - Z_{25}i_5, \\
 0 &= (Z_{24} + Z_{C1} + Z_{25} + Z_{23})i_5 - Z_{24}i_6 + Z_{C1}i_1 - Z_{25}i_4 + Z_{23} \times \\
 &\times (-I_{DS3} - I_{F7} - I_{BS3} - I_{F9} + I_{BG3} + I_{F8} - i_8), \\
 0 &= (Z_{22} + Z_{R2} + Z_{24} + Z_{21})i_6 + Z_{R2}i_1 - Z_{24}i_3 - Z_{21}i_8 + Z_{21} \times \\
 &\times (I_{BG3} + I_{F8} - I_{BS3} - I_{F9} - I_{DS3} - I_{F7}),
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 0 &= (Z_{18} + Z_{20} + Z_{19})i_7 + Z_{18}i_4 + Z_{18}(I_{DS3} + I_{F7} - I_{BG3} - I_{F8} + I_{BS3} + I_{F9}) + \\
 &+ Z_{20}i_8 - Z_{20}(I_{DS3} + I_{F7}) + Z_{20}(I_{BS3} + I_{F9}) - Z_{20}(I_{BS3} + I_{F9}) + Z_{19}(I_{DS3} + \\
 &+ I_{F7}) - Z_{19}(I_{BG3} + I_{F8}) + Z_{19}(I_{BS3} + I_{F9}), \\
 0 &= (Z_{21} + Z_{23} + Z_{20})i_8 - Z_{21}i_6 - Z_{21}(I_{BG3} + I_{F8}) + Z_{21}(I_{BS3} + \\
 &+ I_{F9}) + Z_{21}(I_{DS3} + I_{F7}) - Z_{23}i_5 + Z_{23}(I_{BS3} + I_{F9}) - Z_{23}(I_{BG3} + \\
 &+ I_{F8}) + Z_{23}(I_{DS3} + I_{F7}) + Z_{20}i_7 - Z_{20}(I_{DS3} + I_{F7}) - \\
 &- Z_{20}(I_{BS3} + I_{F9}) + Z_{20}(I_{BG3} + I_{F8}), \\
 0 &= (Z_4 + Z_5 + Z_6)i_9 - Z_4(I_{DS1} + I_{F1}) - Z_4(I_{BS1} + I_{F3}) + \\
 &+ Z_4(I_{BG1} + I_{F2}) + Z_4i_{10} + Z_5i_3 - Z_5(I_{BG1} + I_{F2}) + \\
 &+ Z_5(I_{BS1} + I_{F3}) + Z_5(I_{DS1} + I_{F1}) + Z_6i_3 + Z_6(I_{DS1} + I_{F1}) + \\
 &+ Z_6(I_{BS1} + I_{F3}) - Z_6(I_{BG1} - I_{F2}), \\
 0 &= (Z_2 + Z_4 + Z_3)i_{10} + Z_2i_2 + Z_2(I_{BS1} + I_{F3}) - \\
 &- Z_2(I_{BG1} + I_{F2}) + Z_2(I_{DS1} + I_{F1}) + Z_4i_9 - Z_4(I_{DS1} + I_{F1}) - \\
 &- Z_4(I_{BS1} + I_{F3}) + Z_4(I_{BG1} + I_{F2}) + Z_3(I_{DS1} + I_{F1}) + \\
 &+ Z_3(I_{BS1} + I_{F3}) - Z_3(I_{BG1} + I_{F2}), \\
 0 &= (Z_{10} + Z_{11} + Z_{13})i_{11} + Z_{10}(i_3 + I_{DS2} + I_{F4} + I_{BS2} + I_{F5} - \\
 &- I_{BG2} - I_{F6}) + Z_{11}i_1 + Z_{13}i_{12} + Z_{11}(I_{DS2} + I_{F4} + I_{BS2} + I_{F5} - \\
 &- I_{BG2} - I_{F6}) + Z_{13}(-I_{BS2} - I_{F5} + I_{BG2} + I_{F6} - I_{DS2} - I_{F4}), \\
 0 &= (Z_{13} + Z_{14} + Z_{15})i_{12} + Z_{13}(i_{11} - I_{DS2} - I_{F4} - I_{BS2} - I_{F5} + \\
 &+ I_{BG2} + I_{F6}) + Z_{14}(i_2 + I_{BS2} + I_{F5} - I_{BG2} - I_{F6} + I_{DS2} + I_{F4}) + \\
 &+ Z_{15}(i_2 + I_{BS2} + I_{F5} - I_{BG2} - I_{F6} + I_{DS2} + I_{F4}).
 \end{aligned} \tag{28}$$

де $Z_{R1} = R1$, $Z_1 = R_{G1}$, $Z_3 = -j/(\omega C_{GD1})$, $Z_4 = Z_K$,

$Z_5 = -j/(\omega C_{BD1})$, $Z_7 = R_{D1}$, $Z_8 = R_{S1} + j\omega L_{S1}$,

$$Z_2 = \frac{R_{GS1}}{1 + \omega^2 R_{GS1}^2 C_{GS1}^2} - j \frac{R_{GS1}^2 \omega C_{GS1}}{1 + \omega^2 R_{GS1}^2 C_{GS1}^2},$$

$$Z_6 = \frac{R_{B1}}{1 + \omega^2 R_{B1}^2 C_{BS1}^2} - j \frac{R_{B1}^2 \omega C_{BS1}}{1 + \omega^2 R_{B1}^2 C_{BS1}^2},$$

$Z_{12} = R_{G2}$, $Z_{11} = -j/(\omega C_{GD2})$, $Z_{13} = Z_K$,

$Z_{15} = -j/(\omega C_{BD2})$, $Z_{16} = R_{D2}$, $Z_9 = R_{S2} + j\omega L_{S2}$,

$$Z_{10} = \frac{R_{GS2}}{1 + \omega^2 R_{GS2}^2 C_{GS2}^2} - j \frac{R_{GS2}^2 \omega C_{GS2}}{1 + \omega^2 R_{GS2}^2 C_{GS2}^2}, \quad Z_{R2} = R2,$$

$$Z_{14} = \frac{R_{B2}}{1 + \omega^2 R_{B2}^2 C_{BS2}^2} - j \frac{R_{B2}^2 \omega C_{BS2}}{1 + \omega^2 R_{B2}^2 C_{BS2}^2},$$

$Z_{17} = R_{G3}$, $Z_{19} = -j/(\omega C_{GD3})$, $Z_{20} = Z_K$,

$Z_{21} = -j/(\omega C_{BD3})$, $Z_{22} = R_{D3}$, $Z_{25} = R_{S3} + j\omega L_{S3}$,

$$Z_{18} = \frac{R_{GS3}}{1 + \omega^2 R_{GS3}^2 C_{GS3}^2} - j \frac{R_{GS3}^2 \omega C_{GS3}}{1 + \omega^2 R_{GS3}^2 C_{GS3}^2},$$

$$Z_{23} = \frac{R_{B3}}{1 + \omega^2 R_{B3}^2 C_{BS3}^2} - j \frac{R_{B3}^2 \omega C_{BS3}}{1 + \omega^2 R_{B3}^2 C_{BS3}^2}, \quad Z_{C1} = -j/(\omega C_{C1}).$$

Рішення системи рівнянь (28) отримано чисельним методом на персональному комп'ютері в обчислювальному середовищі "Matlab 9.3". У загальному виді функція перетворення описується рівнянням

$$\omega_0 = [L_{eq}(P)C_{eq}(P)]^{1/2}, \quad (29)$$

де ω_0 - кругова частота генерації, $L_{eq}(P)$ - еквівалентна індуктивність коливального контуру, $C_{eq}(P)$ - еквівалентна ємність коливального контуру автогенератора, що визначається на основі рішення системи рівнянь (28). Чутливість оптико-частотного перетворювача газу визначається на основі (29)

$$\frac{d\omega_0}{dP} = -\frac{1}{2} [L_{eq}(P)C_{eq}(P)]^{-3/2} \times \left[C_{eq}(P) \frac{dL_{eq}(P)}{dP} + L_{eq}(P) \frac{dC_{eq}(P)}{dP} \right]. \quad (30)$$

Для перевірки теоретичних розрахунків повного опору МДН транзисторів від потужності оптичного випромінювання проведений їхнє порівняння з експериментальними даними, які проводилося в діапазоні 1-1250 МГц за допомогою вимірювача комплексних коефіцієнтів передачі Р4-37. Джерелом оптичного випромінювання слугував світловипромінюючий діод на основі InGaAsP типу XL3528IRC/1500 з максимумом спектрального розподілу на довжині хвилі $\lambda = 1550$ нм. Потужність випромінювання контролювалася за допомогою приладу ОМЗ-65.

На рис. 3 представлені теоретичні та експериментальні залежності частоти генерації від потужності оптичного випромінювання. Частота вимірювалась за допомогою частотоміра типу АТ-Г2700. Зменшення частоти генерації пов'язане зі зростанням еквівалентної ємності й індуктивності коливального контуру автогенератора, що обумовлено фотогенерацією нерівноважних носіїв заряду в областях каналу, витокового і стокового р-п переходів МДН транзисторів.

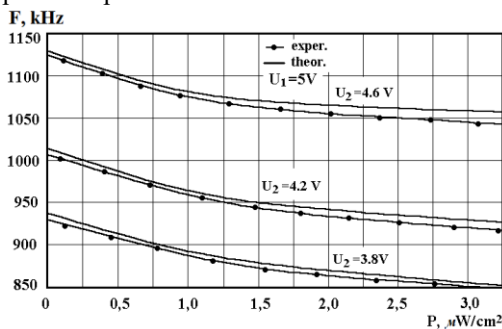


Рис. 3. Теоретичні та експериментальні залежності частоти генерації від потужності оптичного випромінювання

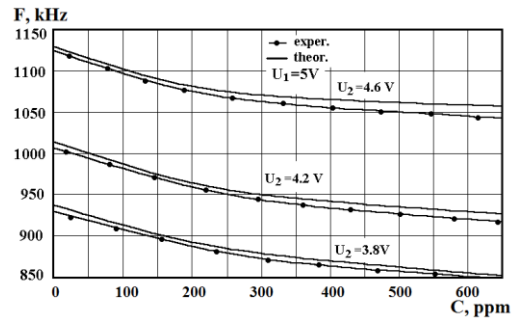


Рис. 4. Теоретичні та експериментальні залежності частоти генерації від концентрації NH₃

ВИСНОВКИ

Розроблено математичну модель оптико-частотного перетворювача концентрації газу для діагностики штамів бактерії *Helicobacter pylori*, що враховує вплив оптичного випромінювання на канал, витокові та стокові р-п переходи МДН транзисторів. Фоточутливі польові транзистори реалізують ємність і індуктивність коливального контуру оптико-перетворювача газу, які змінюються під дією оптичного випромінювання, а відповідно концентрації газу, що дозволило підвищити чутливість перетворювача концентрації газу.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Лукаш С.И. "Проблемы диагностики некоторых заболеваний в выдыхаемом воздухе" в *Компьютерные инструменты, сети и системы*. 2010, №9. – с.62-71.
- [2] "Методы диагностики *Helicobacter pylori*: учебное пособие" И. Г. Акоюн, Н. В. Барышникова, Т. М. Григорян, Ю. С. Евстратова, А. В. Козлов, И. Ю. Мельникова и др. Под ред. Козлова В.П. - СПб.: «Издательство Диалект», 2008. - 88 с.
- [3] Хомерики С.Г., Касьяненко В.И. "Лабораторная диагностика инфекции *Helicobacter pylori*" - Санкт-Петербург: ООО АМА, 2011, - 110 с.
- [4] Семенова Н.В., Шубина Н.А. "Устойчивость к лечению инфекции HELICOBACTER PYLORI. Новые возможности решения задачи с использованием масс-спектрометрического метода" в *Биомедицинская химия*, 2005, т.51, №6, с. 679-687.
- [5] Барышникова Н.В. "Актуальные проблемы диагностики *Helicobacter pylori*" в *Терапевтическая гастроэнтерология*. №2, 2009. С. 50-56.
- [6] Osadchuk V.S., Osadchuk A.V. "Radiomeasuring Microelectronic Transducers of Physical Quantities" in *Proceedings of the 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. 21-23 May 2015. Omsk.
- [7] O.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, I.O. Osadchuk, Maksat Kolimoldayev, Pawel Komada, Kanat Mussabekov "Optical transducers with frequency output" in *Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2017, 104451X* (August 7, 2017)
- [8] Novitsky P. V., Knoring V. G., Gutnikov V. S. "Digital instruments with frequency sensors". – Leningrad: Energy, 1970. - 424 p.
- [9] V. S. Osadchuk, A. V. Osadchuk, Y. A. Yushchenko, "Radiomeasuring thermal flowmeter of gas on the basis of transistor structure with negative resistance," in *Elektronika ir Elektrotechnika*, – Kaunas: Technologija. vol. 84, № 4, pp. 89-93, 2008.
- [10] Тарасевич Б.Н. "ИК спектры основных классов органических соединений. Справочные материалы" МГУ имени М.В.Ломоносова, химический факультет, кафедра органической химии. –Москва, 2012. – 55 с.

- [11] Бисурин В.И., Носов Ю.Р. "Волоконно-оптические датчики" – Москва: Энергоатомиздат, 1990. –255 с.
- [12] Суэмацу Я., Катаока С., Кисино К. и др. "Основы оптоэлектроники" –Москва: Мир, 1988. –288 с.
- [13] Зуев В.А., Попов В.Г. "Фотоэлектрические МДП-приборы" – Москва: Радио и связь, 1983. – 160 с.
- [14] Овсяк В.Н. "Электронные процессы в полупроводниках с областями пространственного заряда" –Новосибирск: Наука, 1984. –254 с.
- [15] Одобецкий С.И., Осадчук В.С. "Фотореактивный эффект в транзисторах со структурой метал-диэлектрик-полупроводник" в *Радиотехника и электроника*, т.34, №11, 1989. –С.2387-2393.
- [16] Осадчук В.С. "Индуктивный эффект в полупроводниковых приборах" –Киев: Высшая школа, 1987.–155 с.

Формалізація Етапів Мамографічних Обстежень в Медичних Системах Підтримки Прийняття Рішень

Анатолій Поворознюк

кафедра обчислювальної техніки та програмування
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
Харків, Україна
ai.povoroznjuk@gmail.com

Халед Шехна

кафедра обчислювальної техніки та програмування
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
Харків, Україна
khaled-shehna@hotmail.com

Formalization of Mammographic Examination Stages in Medical Decision Support Systems

Anatoliy Povoroznjuk

Department of Computer Science and Programming
National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"
Kharkiv, Ukraine
ai.povoroznjuk@gmail.com

Khaled Shehna

Department of Computer Science and Programming
National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"
Kharkiv, Ukraine
khaled-shehna@hotmail.com

Анотація—У роботі розглянуто формалізацію етапів мамографічних обстежень при проектуванні медичних комп'ютерних систем підтримки прийняття рішень. Розроблено функціональну модель, яка є основою для розробки інформаційної, структурної і математичної моделі, а також для розробки структури системи підтримки прийняття рішень при проведенні мамографічних обстежень, що в кінцевому підсумку призводить до підвищення ефективності надання медичних послуг.

Abstract—The article considers the formalization of mammographic examination stages in the design of medical computer decision support systems. There is developed the functional model that is the basis for the development of information, structural and mathematical models, as well as for the development of the decision support system structure for mammographic examinations, which ultimately leads to an increase in the efficiency of medical services.

Ключові слова—мамографічне обстеження; формалізація етапів; комп'ютерна система; прийняття рішення; функціональна модель.

Keywords—mammographic examination; formalization of stages; computer system; decision making; functional model.

I. ВСТУП

На теперішній час комп'ютеризація медичних послуг привела до створення широкого спектру медичних інформаційних систем (МІС) від електронних історій хвороб до складних систем підтримки прийняття рішень (СППР), в яких використовуються різні математичні методи підтримки прийняття рішень [1] (детермінована логіка, імовірнісний похід, нечітка логіка, нейронні мережі і т.д.) і сучасні інформаційні технології, включаючи телемедицину [2].

Так як істотну частку діагностичної інформації містять біомедичні сигнали і зображення, то методам їх обробки з метою підвищення якості візуалізації, морфологічного аналізу (виділення діагностично-значущих структурних елементів на тлі перешкод), визначення діагностичних ознак, приділяється велика увага [3].

Біомедичні зображення (БМЗ) такі як рентгенограми, мамограми, УЗД та ін. є одним з важливих засобів отримання візуальної інформації про внутрішні структури і функції людського тіла, яка не сприймається безпосередньо зором. Робота зі зразками з будь-якої предметної області передбачає не тільки поліпшення якості зображень, але морфологічний аналіз даних, класифікацію

знімків, роботу зі складно-структурованих зразками, з неочевидними закономірностями і особливостями, часто помітними тільки фахівцям в цій галузі, що дозволяє полегшити процес роботи з зображеннями, підвищити достовірність діагностики та вибору адекватної лікувальної тактики.

БМЗ, зокрема мамограми, є напівтоновими зображеннями з локально зосередженими ознаками (ЛЗО), тобто мають таку структуру, при якій діагностичні ознаки зосереджені на невеликих фрагментах їх області визначення. Завданням морфологічного аналізу є виділення на тлі перешкод інформативних фрагментів (структурних елементів), в результаті чого формуються діагностичні ознаки у вигляді параметрів знайдених структурних елементів.

Існуючі методи цифрової обробки зображень не враховують особливості БМЗ з ЛЗО, мають обмежену сферу застосування при обробці БМЗ, так як зазначені зображення є малоконтрастними, містять значну шумову складову, а діагностичні елементи – значну варіабельність. Крім того, деякі елементи мають нерегулярну (фрактальну) структуру (наприклад - мікрокальцинати в мамографії). Тому актуальність теми полягає в розробці спеціалізованих методів поліпшення візуалізації і морфологічного аналізу, які засновані на врахуванні особливостей розглянутих зображень у вигляді моделей корисних сигналів, зокрема моделей фрактальної розмірності з метою підвищення якості інструментального обстеження пацієнта при проектуванні біомедичних систем на основі морфологічного аналізу БМЗ з ЛЗО.

Метою роботи є формалізація етапів обробки цифрових мамограм при проектуванні медичних СППР, яка в подальшому є основою для розробки спеціалізованих методів обробки, заснованих на врахуванні особливостей розглянутих зображень у вигляді моделей корисних сигналів, зокрема моделей фрактальної розмірності.

II. РОЗРОБКА УЗАГАЛЬНЕНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ МАМОГРАФІЧНОГО ОБСТЕЖЕННЯ

Результатами мамографічного обстеження вузькими лікарями-фахівцями є висновки, які формуються на основі аналізу мамограм. Для підвищення ефективності обстеження необхідно виконати системний аналіз процесу вироблення рішень з метою виділення критичних елементів СППР, які можуть привести до вироблення некоректних рішень або відмови від прийняття рішень.

Представимо процес мамографічного обстеження у вигляді узагальненої моделі M_G виду: $M_G = \{M_F, M_I, M_S, M_M\}$, де M_F, M_I, M_S, M_M – функціональна, інформаційна, структурна та математична моделі процесу мамографічного обстеження відповідно.

Розглянемо більш докладно функціональну модель. Представимо функціональну модель M_F за допомогою методології функціонального моделювання IDEF0 [4]. Для побудови контекстної діаграми, яка представляє мамографічне обстеження як єдине ціле і показує зв'язок із зовнішнім світом, необхідно визначити входи, виходи, управління і механізми.

В якості входу розглядаються дані про пацієнта (ПІБ, стать, вік, анамнез, показання для мамографічного обстеження та інше). В результаті обстеження пацієнт повинен отримати протокол обстеження і рекомендації з тактики подальшого обстеження та/або лікування, які будемо розглядати як виходи функціональної моделі M_F . У якості управління виступають різні законодавчі акти і нормативна документація (в тому числі стандарти формування протоколів обстеження), що регулюють процес мамографічного обстеження пацієнта. І нарешті, обстеження пацієнта проводить медперсонал (вузький лікар-фахівець, медсестра, лаборант, технік і т.д.) з використанням спеціалізованого мамографічного комплексу, що дозволяє реєструвати мамограми, і персонального комп'ютера (ПК), за допомогою якого проводиться введення, зберігання та переробка інформації. Тобто основними механізмами в контекстній діаграмі є пацієнт, вузький лікар-фахівець, діагностичний комплекс і ПК.

Таким чином, на підставі виділених входів, виходів, управління і механізмів була побудована контекстна діаграма функціональної моделі M_F мамографічного обстеження пацієнта, що зображена на рис.1.

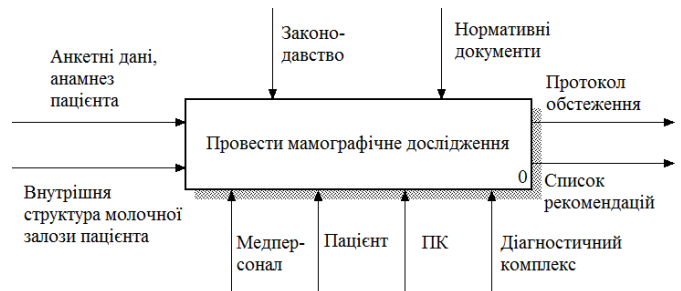


Рис. 1. Контекстна діаграма функціональної моделі M_F мамографічного обстеження.

Виконаємо функціональну декомпозицію контекстної діаграми моделі M_F . Для цього були виділені чотири основних функціональних блока (роботи): зареєструвати пацієнта (робота 1); виконати реєстрацію та аналіз мамограм (робота 2); виконати діагностику (робота 3); сформулювати протокол обстеження (робота 4).

З урахуванням основних виділених робіт виконана декомпозиція контекстної діаграми функціональної моделі мамографічного обстеження, яка зображена на рис.2. Для роботи 1 «Зареєструвати пацієнта» вхідними даними є дані про пацієнта, що зазначені вище, а вихідними даними – медична карта. Медична карта заповнюється за допомогою ПК медперсоналом на підставі даних про пацієнта, отриманих з направлення на обстеження і в результаті опитування пацієнта. Таким чином, пацієнт, медперсонал та ПК є механізмами даної роботи, при цьому законодавство і нормативна документація є управлінням для роботи 1.

Входом роботи 2 «Виконати реєстрацію та аналіз мамограм» є внутрішня структура молочної залози пацієнта, управління – нормативна документація та дані з медичної карти.

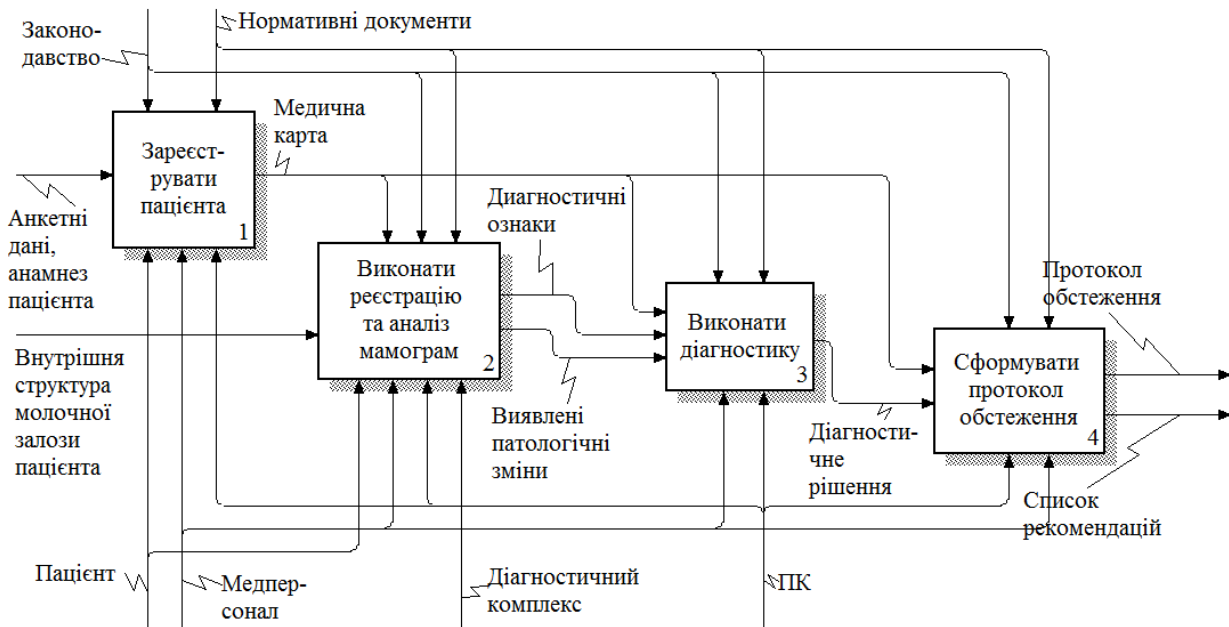


Рис. 2. Декомпозиція контекстної діаграми функціональної моделі M_F мамографічного обстеження.

Ці дані дозволяють настроїти (якщо це потрібно) необхідні параметри діагностичного комплексу (наприклад, тривалість та параметри рентгеновського випромінювання).

За допомогою діагностичного комплексу, зв'язаного з ПК, медперсонал виконує реєстрацію і подальший аналіз мамограм з метою визначення діагностичних ознак (параметри структурних елементів), а також патологічних змін (морфологічні зміни структурних елементів, відсутність структурних елементів, які присутні при нормі, і/або наявність артефактів у вигляді додаткових структурних елементів, яких не повинно бути в нормі). Таким чином, вихідними даними роботи 2 є діагностичні ознаки і виявлені патологічні зміни, а механізмом – пацієнт, медперсонал, діагностичний комплекс та ПК.

Виходи роботи 2 і дані з медичної карти є входами роботи 3 «Виконати діагностику», на виході якої формується діагностичне рішення. Діагностичне рішення приймає вузький лікар-фахівець, використовуючи ПК, на якому можуть бути встановлені різні спеціалізовані програми, в тому числі й СППР.

В результаті виконання роботи 4 «Сформувати протокол обстеження» на підставі даних з медичної карти і сформованого діагностичного рішення (входи роботи 4) медперсоналом за допомогою ПК (механізми роботи 4) заповнюється протокол обстеження і складається список рекомендацій (виходи роботи 4), при цьому законодавчі акти та нормативна документація є управлінням роботи 4.

Легко помітити, що перша і остання роботи досить легко автоматизуються, особливо при наявності стандартів ведення медичних карт і оформлення протоколів обстеження. При цьому 2-а та 3-я роботи є найбільш відповідальними, що впливають на якість і ефективність обстеження. Крім того, помилки на етапі аналізу мамограм є критичними для всього процесу мамографічного

обстеження. Тому була виконана подальша декомпозиція функціональних блоків 2 та 3.

Для декомпозиції роботи 2 «Виконати реєстрацію та аналіз мамограм» були виділені такі роботи (рис.3.): зареєструвати мамограму (робота 21); виконати попередню обробку (робота 22); виконати морфологічний аналіз (робота 23); проаналізувати параметри структурних елементів (СЕ) (робота 24).

Входом роботи 21 «Зареєструвати мамограму» є внутрішня структура молочної залози пацієнта. В результаті виконання роботи за допомогою цифрового мамографа медперсоналом з пацієнта знімаються рентгеновські знімки молочної залози в заданих проєкціях, тому виходом є зареєстровані цифрові мамограми, в якості управління виступають дані з медичної карти, а також законодавство та нормативні документи, а механізмами є пацієнт, медперсонал і діагностичний комплекс.

Зареєстровані мамограми надходять на вхід роботи 22 «Виконати попередню обробку», в якій медперсоналом за допомогою ПК методами цифрової обробки сигналів і зображень [5] (механізми) здійснюється різного роду попередня обробка мамограм (наприклад, фільтрація, зміна яскравості або підвищення контрасту і т.д.), яка забезпечує підвищення якості візуалізації.

З виходу роботи 22 оброблені БМС/З з ЛЗО надходять на вхід роботи 23 «Виконати морфологічний аналіз», в результаті виконання якої формуються діагностичні ознаки у вигляді параметрів знайдених структурних елементів. Так як деякі елементи мамограм (мікрокальцинати) мають нерегулярну структуру, то

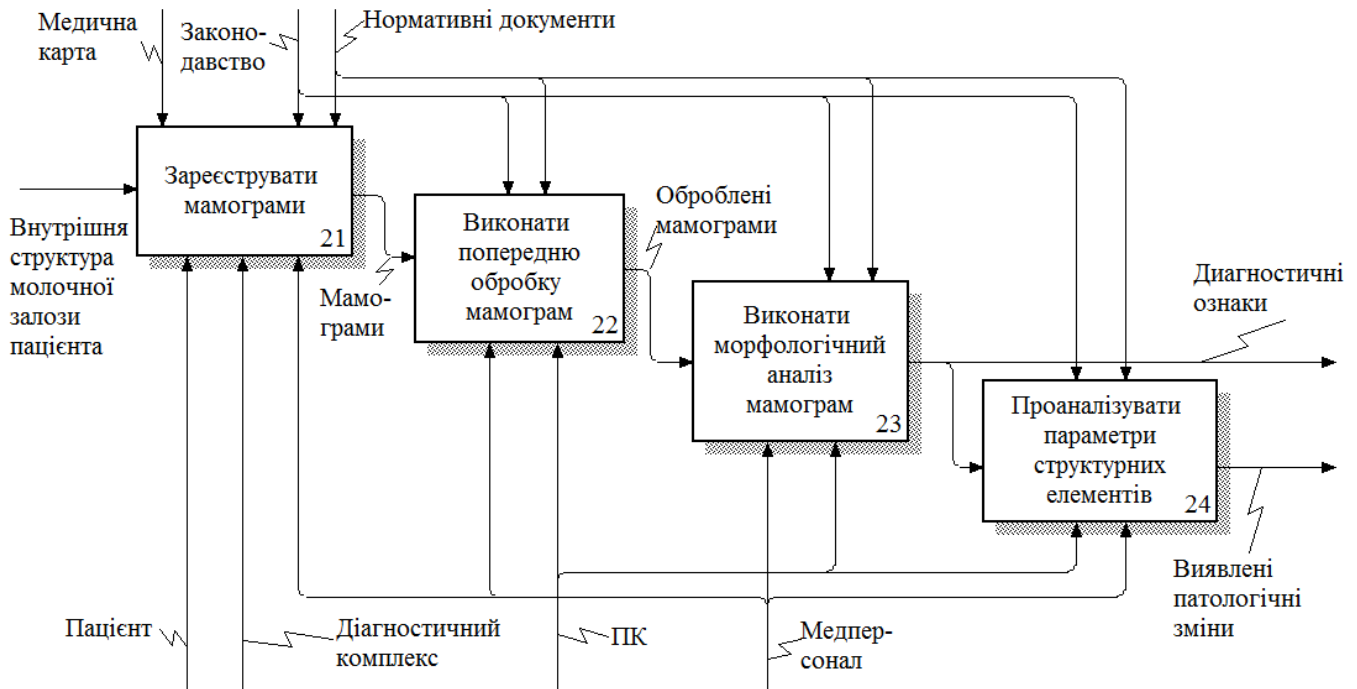


Рис. 3. Декомпозиція функціонального блоку 2 «Виконати реєстрацію та аналіз маммограм» функціональної моделі M_F маммографічного обстеження.

застосовуються спеціалізовані методи морфологічного аналізу, які засновані на врахуванні особливостей розглянутих зображень і методів їх перетворення у вигляді моделей корисних сигналів, зокрема моделей фрактальної розмірності [6].

Морфологічний аналіз може проходити як в автоматичному, так і в напівавтоматичному або ручному режимах. В автоматичному режимі лікар-фахівець тільки підтверджує правильність результатів морфологічного аналізу, тобто, підтверджує, що всі структурні елементи знайдені правильно і їхні параметри виміряні коректно.

У разі напівавтоматичного режиму після виділення спеціалізованими комп'ютерними програмами структурних елементів лікар-фахівець проводить корекцію результатів морфологічного аналізу за допомогою спеціалізованої комп'ютерної програми, тобто відзначає пропущені структурні елементи і/або прибирає позначки з ділянок зображення, які були визнані як структурні елементи, але такими не являються. Якщо ж використовується ручний режим, то морфологічний аналіз повністю виконується лікарем-фахівцем, при цьому спеціалізовані програми застосовуються для візуалізації зображень або їх окремих вибраних ділянок.

Отримані в результаті виконання роботи 23 діагностичні ознаки є виходами роботи 2, крім того надходять на вхід роботи 24 «Проаналізувати параметри структурних елементів», виходом якої є виявлені патологічні зміни, якщо вони були знайдені, або висновок про те, що таких патологічних змін немає. Аналогічно роботі 23, лікар-фахівець виконує роботу 24 з використанням спеціалізованих програм, встановлених на ПК (механізми). Ця робота також може бути виконана в автоматичному (лікар тільки підтверджує рішення,

вироблене СППР), напівавтоматичному (лікар має можливість коригувати рішення, вироблене СППР) або ручному (спеціалізовані програми використовуються як засіб візуалізації) режимах. У роботах 22, 23 та 24 управління є різного роду законодавчі акти і нормативна документація.

Внаслідок декомпозиції роботи 3 «Виконати діагностику» були виділені такі роботи (рис.4): проаналізувати попередні обстеження (робота 31); оцінити динаміку (робота 32); оцінити ефективність лікування (робота 33); прийняти рішення (робота 34).

Досить часто зустрічається ситуація, коли пацієнт проходить маммографічне обстеження повторно або багаторазово (наприклад, в разі скринінгу або оцінки динаміки розвитку деякого захворювання, в тому числі і внаслідок лікування), тому для вироблення повноцінного діагностичного рішення лікарю-фахівцю необхідно отримати дані щодо попередніх обстежень, якщо такі мали місце. Тому на вхід роботи 31 «Проаналізувати попередні обстеження» надходить інформація з медичної карти пацієнта. Медперсонал за допомогою комп'ютерних інформаційно-пошукових систем (механізми) виконує пошук даних стосовно попередніх обстежень (вихід).

Якщо попередні обстеження були знайдені, то далі можуть бути виконані одна з робіт: робота 32 «Оцінити динаміку» або робота 33 «Оцінити ефективність лікування». Треба відзначити, що для виконання робіт 32 та 33 дані щодо результатів попередніх обстежень виступають в якості управління. У разі, коли попередні обстеження проводились в результаті скринінгу, то виконується робота 32 «Оцінити динаміку».

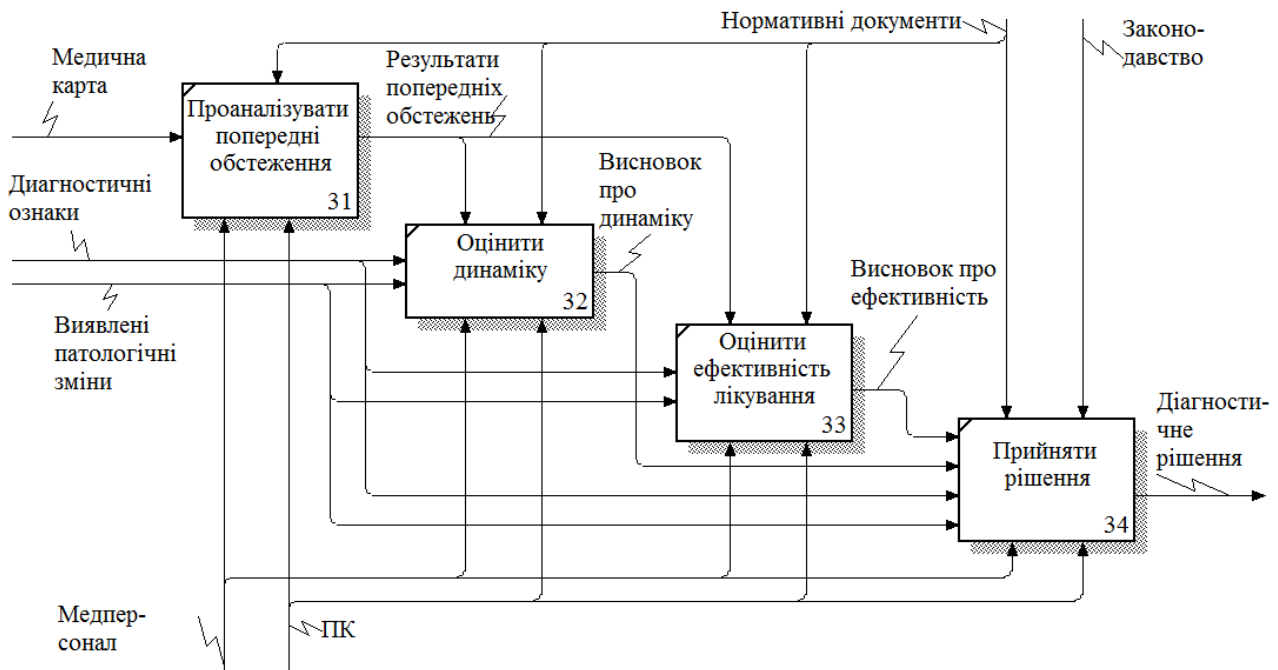


Рис. 4. Декомпозиція функціонального блоку 2.3 «Виконати діагностику» моделі M_F мамографічного обстеження.

При цьому діагностичні ознаки і виявлені патологічні зміни є входами роботи 32, а на виході формується висновок про динаміку розвитку патологічного процесу або його відсутності. Якщо ж попередні обстеження проводилися після проведення лікування, то виконується робота 33 «Оцінити ефективність лікування», для якої входами також є діагностичні ознаки і виявлені патологічні зміни, а виходом – висновок про ефективність лікування.

Крім зазначених вище управлінь для робіт 31, 32 та 33 управління є різні нормативні документи, що регламентують, яку інформацію і в якій формі необхідно надати для виконання пов'язаних з ними робіт.

Якщо попередні обстеження не проводилися, то робота 34 виконується тільки на підставі даних про діагностичні ознаки і виявлені патологічні зміни. В іншому випадку додатковими входами роботи 34 є висновок про динаміку або про ефективність лікування. Після обробки всіх даних на виході формується остаточне діагностичне рішення. Управління роботи 34 виступають нормативні документи і законодавчі акти. Як і робота 31 роботи 32, 33 та 34 виконуються медперсоналом з використанням ПК (механізми).

Декомпозиція робіт 2 і 3 показала, що однією з найважливіших є робота 23 «Виконати морфологічний аналіз мамограм», оскільки можливі помилки при визначенні діагностичних ознак, отриманих на підставі знайдених структурних елементів, можуть привести до невірних діагностичних рішень. При цьому причинами виникнення подібних помилок можуть бути зареєстровані мамограми поганої якості, тому також дуже важлива робота 22 «Виконати попередню обробку мамограм».

ВИСНОВКИ

При проектуванні медичних комп'ютерних систем підтримки прийняття рішень виділені основні етапи мамографічних обстежень та виконана їх формалізація шляхом розробки та декомпозиції контекстної діаграми функціональної моделі. Визначено входи, виходи, управління і механізми кожного функціонального блоку. Розроблена функціональна модель мамографічного обстеження є основою для розробки інформаційної, структурної та математичної моделей, а також структури медичної СППР.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Поворознюк А.И. Системы поддержки принятия решений в медицинской диагностике. Синтез структурированных моделей и решающих правил / А.И. Поворознюк – Saarbrücken Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. – 314 с.
- [2] Владимирский А. В. Телемедицина : монография / А. В. Владимирский. – Донецк: ООО «Цифровая типография», 2011. – 437 с
- [3] Современные стандарты анализа лучевых изображений: руководство для врачей / Т.Н. Трофимова, А.В. Мищенко, Б.А. Минько и др.; под ред. проф. Т.Н. Трофимовой. – СПб.: Балтийский медицинский образовательный центр, 2017. – 300 с.
- [4] Маклаков С.В. Создание информационных систем с AllFusion Modeling Suite / С.В. Маклаков. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2007. – 432 с.
- [5] Яне Б. Цифровая обработка изображений / Б. Яне. – М.: Техносфера, 2007. – 584 с.
- [6] Поворознюк А.І. Фрактальна обробка цифрових медичних зображень при проектуванні систем підтримки прийняття рішень в медицині / А.І. Поворознюк, Х. Шехна // Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання; матеріали статей Міжнародної науково-практичної конференції, м. Івано-Франківськ, 14-19 травня 2018 року. – Івано-Франківськ: п. Голіней О.М., 2018. – С. 77-80.

Перспективи Вивчення Кросплатформного Програмування в Школі

Віра Козінчук

Кафедра математики та інформатики і методики навчання
ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника»
Івано-Франківськ, Україна
vira_kozinchuk@comp-sc.if.ua

Марія Семаньків

Кафедра комп'ютерних наук та інформаційних систем
ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника»
Івано-Франківськ, Україна
dlyamarii@gmail.com

Даріуш Сала

кафедра управління
Університет АГН
Краків, Польща
dsala@zarz.agh.edu.pl

Prospects for Studying Cross-Platform Programming at School

Vira Kozinchuk

Department of Mathematics and Informatics and teaching methods
Precarpathian National University
Ivano-Frankovsk, Ukraine
vira_kozinchuk@comp-sc.if.ua

Maria Semankiv

Department of Computer Sciences and Information Systems
Precarpathian National University
Ivano-Frankovsk, Ukraine
dlyamarii@gmail.com

Dariusz Sala

dept. of Enterprise Management
AGH University
Krakow, Poland
dsala@zarz.agh.edu.pl

Анотація — розглянуто проблему вибору першої мови програмування для вивчення у школі, досліджено особливості кросплатформних мов програмування, переваги мови програмування Python, відзначено його графічну бібліотеку Tkinter.

Abstract — the problem of choosing the first programming language for study at the school was considered, the features of the crossplatform programming languages were explored, the advantages of the Python programming language were determined, and its graphical library Tkinter was noted..

Keywords — кросплатформне програмування, Python, Tkinter.

Ключові слова — crossplatform programming, Python, Tkinter

I. ВСТУП

Вміння програмувати називають грамотністю XXI століття. Воно корисно всім, а не лише тим, хто планує працювати в ІТ: програмування вчить мислити логічно, розвиває аналітичне мислення та креативність. Програмування включено в обов'язкову державну програму інформатики і тому перед вчителями постає питання вибору першої мови програмування для учнів. І це складне питання, що включає в себе вирішення наступних умов: мова повинна бути і простою для вивчення, і, в той же час, мова ще має бути перспективною на ринку праці та активно розвиватись. І що не маловажно: обрана мова програмування повинна мати потужний інструментарій для розробки практичних програм. Мова

програмування, повинна відповідати даним критеріям для того, щоб її було доцільно використовувати в школі.

Неабияку популярність сьогодні здобуває кросплатформність – властивість програмного забезпечення працювати більш, ніж на одній програмній або апаратній платформі. Кросплатформність дозволяє суттєво скоротити витрати на розробку нового або адаптацію існуючого програмного забезпечення. Однією з широко використовуваних мов програмування, що мають властивість кросплатформності, є Python. Це – мова програмування, якої легко навчитися, вона має дуже корисні для програміста-початківця властивості, тому дуже добре підходить для вивчення у закладах загальної середньої освіти. Порівняно з іншими мовами програмування, її код досить легкий для прочитання та розуміння, що визначає актуальність її вивчення у школі.

II. КРОС-ПЛАТФОРМНІ МОВИ ПРОГРАМУВАННЯ

Кросплатформність – здатність програмного забезпечення працювати більш, ніж на одній апаратній платформі і (або) операційній системі. Воно забезпечується завдяки використанню високорівневих мов програмування, середовищ розробки і виконання, що підтримують умовну компіляцію, компоновку і виконання коду для різних платформ. Типовим прикладом є програмне забезпечення, що призначене для роботи в операційних системах Linux і Windows одночасно. Кросплатформність дозволяє суттєво скоротити витрати на розробку нового або адаптацію існуючого програмного забезпечення [1].

Залежно від засобів реалізації, кросплатформність можна класифікувати так:

- на рівні апаратної (програмної) платформи;
- на рівні мов програмування;
- на рівні середовища виконання.

Апаратна платформа комп'ютера (архітектура комп'ютера) – нижній шар багаторівневої організації обчислювальної системи, утворений мікроархітектурою, мікропрограмою керування ядром мікропроцесора і архітектурою набору команд на апаратній базі конкретних мікросхем процесора, чіпсета, інших фізичних компонентів, які в сукупності складають апаратну модель обчислювальної системи. Призначений для запуску певних сімейств програмних продуктів (операційна система, прикладне програмне забезпечення). Апаратні платформи відрізняються один від одного архітектурою центрального процесора і використовуваними шинами зв'язку функціональних блоків. Під програмними платформами розуміють операційні системи, програмні середовища (або комбінацію програмного середовища та ОС) та незалежні від ОС віртуальні машини для виконання байт-коду.

Варто уточнити, що часто апаратні та програмні платформи не розрізняють та вважають, що апаратне та

програмне забезпечення логічно еквівалентне, оскільки будь-яка операція, виконувана програмним забезпеченням, може бути реалізована апаратним забезпеченням, і навпаки.

Мови програмування, які можна використати для кросплатформної розробки програм, поділяють на три групи:

- кросплатформні мови на рівні компіляції (компілятор для цієї мови має змогу генерувати програмні модулі в рідному для цільової платформи форматі);
- кросплатформні мови на рівні виконання (тобто їх виконувати файли можна запускати на різних платформах без попередньої перекомпіляції);
- кросплатформні інтерпретатори (такі мови програмування мають інтерпретатори для різних платформ).

Для порівняння мов скористаємося індексом ТЮВЕ, який є показником популярності мов програмування. Згідно з даними за січень 2019 року маємо такі результати, що подані на рис. 1.

Jan 2019	Jan 2018	Change	Programming Language	Ratings	Change
1	1		Java	16.904%	+2.69%
2	2		C	13.337%	+2.30%
3	4	▲	Python	8.294%	+3.62%
4	3	▼	C++	8.158%	+2.55%
5	7	▲	Visual Basic .NET	6.459%	+3.20%
6	6		JavaScript	3.302%	-0.16%
7	5	▼	C#	3.284%	-0.47%
8	9	▲	PHP	2.680%	+0.15%
9	-	▲▲	SQL	2.277%	+2.28%
10	16	▲▲	Objective-C	1.781%	-0.08%
11	18	▲▲	MATLAB	1.502%	-0.15%
12	8	▼▼	R	1.331%	-1.22%
13	10	▼	Perl	1.225%	-1.19%
14	15	▲	Assembly language	1.196%	-0.86%
15	12	▼	Swift	1.187%	-1.19%

Рис.1. Рейтинг мов програмування згідно індексу ТЮВЕ

Тобто трійку лідерів представляють Java (16.904%), C++ (13.337%) та Python (8.294%).

У багатьох школах ще досі вчать процедурну мову програмування Pascal, яка хоч і є добрим засобом для навчання та є універсальною мовою для розв'язання широкого класу задач, проте вже давно втратила свою актуальність. У навчальній програмі з курсу інформатики вказано, що у закладах загальної середньої освіти пропонується уникати використання штучних навчальних

або застарілих середовищ програмування. Усі програми, які розроблятимуть учні, мають відповідати принципам функціонування сучасного програмного забезпечення в середовищі операційної системи з графічним інтерфейсом. Тому методичні розробки для старших класів вимагають оновлення та спрямування на вивчення більш популярних засобів. У навчальних програмах з інформатики для закладів загальної середньої освіти зокрема не передбачено єдиного підходу до вивчення кросплатформного програмування.

III. МОВА ПРОГРАМУВАННЯ PYTHON

Кросплатформними можна назвати більшість сучасних високорівневих мов програмування.

Особливу увагу слід звернути на мову програмування Python. Python – це потужна багатопарадигмова мова комп'ютерного програмування, оптимізована для продуктивності програміста, легкої читаності коду та якості програмного забезпечення. Дана мова чудово підходить як засіб вивчення програмування у закладах загальної середньої освіти. Python – мова програмування з відкритим вихідним кодом, відносно легка та надзвичайно цікава [2].

Мова Python є однією з найпростіших у вивченні й використанні серед найбільш поширених мов програмування. Програмний код мовою Python досить легко читати й писати. І все це завдяки тому, що Python – вельми виразна мова, що дозволяє вмістити код у меншу кількість рядків, ніж це потрібно, наприклад, при використанні інших мов, таких як C++ або Java.

Однією з переваг мови Python є, зокрема, наявність повної стандартної бібліотеки, що дозволяє задовольнити різноманітні вимоги користувачів. Крім того, існують тисячі додаткових бібліотек сторонніх виробників, які забезпечують складніші та потужніші можливості, наприклад, бібліотека для організації мережних взаємодій Twisted, бібліотека для виконання обчислювальних завдань NumPy або пакет моделювання Simpy.

Досліджено причини, чому саме Python набуває такої популярності.

- Якість програмного забезпечення. Узгодженість, читабельність коду та якість програмного забезпечення в цілому відрізняє Python від інших інструментів у світі програмування.
- Виробнича продуктивність. Код цієї мови багаторазово перевищує продуктивність такого ж коду, написаного на «компільованих» Java чи C++, наприклад. Він зазвичай становить від однієї третини до однієї п'ятої еквівалентного коду Java чи C++. Простий синтаксис, динамічне введення, відсутність компіляційних кроків і вбудований набір інструментів дозволяють програмістам розробляти програми набагато швидше, ніж з використанням іншої мови програмування.
- Підтримка різноманітних бібліотек.

Python має деякі властивості, що значно доповнюють навчальний процес, дозволяючи складати прості анімації для створення власних ігор, що є надзвичайно цікавим саме для дітей. Вони представлені такими модулями як, наприклад, turtle, *OpenGL* та tkinter. Python поєднує об'єктно-орієнтовану, функціональну, процедурну парадигми, що відображає багатство мови та розкриває сфери її застосування.

Тим не менш, варто зауважити, що Python часто називають мовою сценаріїв, хоча це визначення не є зовсім коректним. Люди часто використовують слово «скрипт» замість «програма» для опису файлу коду. Проте термін «мова сценаріїв» у даному випадку застосовується для опису простоти мови, яка використовується для швидкого написання коду, порівняно, наприклад, із C++.

Кількість користувачів Python невинно зростає. Про це свідчать різні статистичні дані, кількість завантажень, веб-статистика, опитування розробників.

Оскільки Python є кросплатформною мовою програмування, то програми можуть працювати на багатьох платформах, зокрема на таких: системи Linux і Unix, Microsoft Windows, Mac OS, BeOS, OS / 2, VMS і QNX, системи реального часу, такі як VxWorks, суперкомп'ютери Cray та мейнфрейми IBM тощо.

Проте, незважаючи на велику кількість переваг вивчати саме Python, вона має й певні недоліки. Автор книги [3] Марк Лутц, який знайомий з Python більше двадцяти років, пише, що йому вдалося знайти тільки один недолік даної мови. Це – швидкість виконання програм. Він порівнює її із мовами, які працюють на рівні компіляції, такі як C та C++. Швидкість роботи програм не завжди може бути такою ж високою. Справа в тім, що стандартні реалізації Python перетворюють оператори вихідного коду до проміжного формату, що називається байт-кодом, який пізніше інтерпретується. Байт-код забезпечує портативність (переносимість) програм, оскільки він є незалежним від платформи форматом. Python не створює двійковий машинний код, тому деякі програми будуть працювати повільніше, ніж, наприклад, скомпільовані на мові C++.

Проте Python багаторазово оптимізується, і в окремих прикладних областях програмний код виконується достатньо швидко. Хоч і в шкільному курсі цього не використовуватимуть, проте варто знати, що існує спосіб пришвидшення роботи програм. Він полягає у розділенні коду та виділення його фрагментів, що вимагаються оптимізації швидкості їхнього виконання, у вигляді компільованих розширень і зв'язуванні зі сценаріями на мові Python. Яскравим прикладом реалізації такого подвійного процесу є розширення для математичних обчислень NumPy.

Проведене дослідження підручників для вивчення Python учнями загальноосвітніх шкіл відзначило їх обмежену кількість. Проте варто згадати про книгу з програмування мовою Python, які здобувачі освіти можуть використовувати як додаткову, наприклад, для самостійного навчання. Це – літературно-художнє видання Джейсона Р. Брігса «PYTHON для дітей. Веселий вступ до програмування» (переклад О. Гординчук). Книга є вступом до мови та програмування в цілому. Кожна глава містить дотепні приклади та завершується вправами. Для створення малюнків та простих анімацій використовується графічна бібліотека tkinter.

Крім паперових носіїв існує безліч інтернет-ресурсів для вивчення кросплатформних мов програмування за різною методикою, матеріали яких можна було б використовувати на уроках інформатики. Наприклад:

- code.org – неприбуткова організація, яка містить велику базу курсів з програмування, матеріалів, які можна використовувати у ЗЗСО; також організовує щорічну кампанію «Година коду», яка залучає 10% всіх учнів у світі;
- codecademy.com – інтерактивна онлайн-платформа, де можна вивчити Python, PHP, jQuery, JavaScript, Ruby, HTML та CSS;

- pluralsight.com – платформа курсів по вивченню Java, Python, JavaScript, C#;
- coursera.org – сайт технологічної компанії, яка дає можливість прослухати онлайн-курси по програмуванню; у разі успішного закінчення можна отримати сертифікат;
- geekbrains.ru – платформа онлайн-курсів;
- teamtreehouse.com – платформа, що навчає написанню веб-додатків на таких мовах, як HTML, CSS, Java, PHP, Objective-C, JavaScript і Ruby;
- stepik.org – сайт з інтерактивними лекціями по JavaScript, C#, C, C++, Python;
- prometheus.org.ua – громадський проект масових відкритих онлайн-курсів, зокрема присвячених кросплатформному програмуванню.

IV. ГРАФІЧНІ БІБЛОТЕКИ PYTHON

Однією з характеристик програмного середовища мов програмування є можливість роботи з візуальними компонентами, яка дозволяє розробляти програми у візуальному режимі.

Використання консольного введення-виведення ускладнює процес засвоєння учнями основ роботи у середовищі програмування і значно сповільнює процес розробки програм. Це негативно впливає на рівень інтересу учнів до програмування. Навпаки, графічний інтерфейс сприяє активізації роботи учнів. Учні змінюють положення компонентів на формі і відразу бачать внесені зміни. Це сприяє підтриманню інтересу учнів до програмування на необхідному рівні, мотивує їх на подальшу роботу.

Ще однією особливістю Python є простота, швидкість і гнучкість у створенні додатків з графічним інтерфейсом користувача (GUI). Ця перевага пов'язано не тільки з великою кількістю підтримуваних графічних бібліотек: Tkinter, PyQt, PyGTK, wxPython, Pygames і ін. Основна причина полягає в інтерпретуючій природі платформи Python, так як через доступність Python-коду зовнішній вигляд графічного додатку завжди можна змінити або доповнити. А весь інтерфейс з Python-коду до фактичної реалізації GUI прихований всередині модулів бібліотеки Python.

Однак цим переваги розробки GUI-додатків саме на Python не вичерпуються, оскільки Python пропонує незалежність від платформи - графічний додаток, що розроблений на Python в одній ОС (наприклад, Linux) буде з великим ступенем ймовірності адекватно працювати в будь-якій іншій середовищі (Windows, MacOS, Solaris, FreeBSD, ...) або зажадає для цього незначних доопрацювань; GUI-додатки в основному є діалоговими, тобто призначеними для взаємодії з користувачем, при цьому швидкість роботи програми визначається діями користувача, і тут зникає один з основних формальних

недоліків Python - його повільність в порівнянні з C або C++; через простоту інтеграції Python з C/C++, візуальні компоненти проекту (GUI) можуть бути написані на Python з урахуванням швидкості розробки (frontend), а внутрішні процедури для обробки даних - на C/C++ (backend).

Tkinter (від англ. Tk interface) – це графічна бібліотека, що дозволяє створювати програми з віконним інтерфейсом. Tkinter – стандартний компонент Python, що базується на наборі графічних інструментів Tk, розроблених для візуалізації інтерфейсу користувача програм на мові Tcl. Tkinter, як і tcl/tk, є кросплатформною бібліотекою і може бути використана в більшості поширених операційних систем (Windows, Linux, Mac OS X і ін.). Вивчення даної графічної бібліотеки дозволить учням навчитись створювати елементи графічного інтерфейсу (текстові поля, кнопки, скролери, радіокнопки і т.д.) та основам подійно-орієнтованого програмування.

ВИСНОВКИ

Мова програмування Python може стати хорошою альтернативою при виборі першої мови програмування для учнів загальноосвітніх шкіл. Написання коду перших програм потребує мінімальних знань синтаксису даної мови програмування. Ці знання будуть поглиблюватись по мірі ускладнення навчальних завдань.

Ще однією безсумнівною перевагою Python є те, що це сучасний інструмент, який має широку сферу застосування і великий набір прикладних бібліотек. Python доступний на багатьох платформах, існують також online-інтерпретатори, що не потребують попереднього встановлення. Тобто використання Python для навчання учнів розв'язує не лише навчальні, а й професійні задачі, що в майбутньому постануть перед випускником. Нарешті, форматування коду як вимога синтаксису Python одразу привчає студентів структурувати код, що є важливою задачею саме на перших етапах навчання програмування.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Коцовський В. М. Крос-платформне програмування. Лекції для студентів ЗФН. URL: <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/21365>
- [2] Злобін Г. Порівняльний аналіз засобів кросплатформного програмування // Електроніка та інформаційні технології. – 2015. – Вип. 5. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Telt_2015_5_19
- [3] M. Lutz. Learning Python, Fifth Edition. – O'Reilly Media. – Sebastopol, 2013. URL: <https://bit.ly/2Qno5z9>
- [4] Програмування числових методів мовою Python: підруч. / А. В. Анісімов, А. Ю. Дорошенко, С. Д. Погорілий, Я. Ю. Дорогий; за ред. А. В. Анісімова. – К.: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2014. – 640 с.
- [5] Д. Р. Бріггс. PYTHON для дітей. Веселий вступ до програмування: Джейсон Р. Бріггс; перекл. з англ. Олександри Гординчук. – Львів: Видавництво Старого Лева, 2018. – 400 с.
- [6] Учебник "Основы программирования на Python" / Лаборатория юного линуксоида. 2011. URL: <https://bit.ly/2BnWfNA>

Проектні Технології в Навчальному Процесі

Марія Семаньків

Кафедра комп'ютерних наук та
інформаційних систем
ДВНЗ «Прикарпатський
національний університет імені
Василя Стефаника»
Івано-Франківськ, Україна
dlyamarii@gmail.com

Наталія Карпенко

Кафедра комп'ютерних наук та
інформаційних систем
ДВНЗ «Прикарпатський
національний університет імені
Василя Стефаника»
Івано-Франківськ, Україна

Богдан Білусяк

Манявський навчально-виховний
комплекс
Манява, Україна
Manyava_school@meta.ua

Project Technologies in the Learning Process

Maria Semankiv

Department of Computer Sciences
and Information Systems
Precarpathian National University
Ivano-Frankovsk, Ukraine
dlyamarii@gmail.com

Natalia Karpenko

Department of Computer Sciences
and Information Systems
Precarpathian National University
Ivano-Frankovsk, Ukraine

Bohdan Bilusak

Maniava School Maniava, Ukraine
Manyava_school@meta.ua

Анотація — показано актуальність використання проектних технологій, розкрито зміст проектних технологій, досліджено переваги та недоліки використання проектної технології в навчальному процесі, здійснена систематизація типів проектів.

Abstract — the actuality of the use of design technologies is shown, the content of the design technologies is revealed, the advantages and disadvantages of using the project technology in the educational process are investigated, the types of projects are systematized.

Ключові слова — метод проектів, компетентнісний підхід.

Keywords — project method, competency approach.

I. ВСТУП

Однією із найбільш продуктивних педагогічних технологій, яка суттєво збагачує навчально-виховний процес та змінює традиційний підхід до навчання та виховання учнів є проектна діяльність. В її основі лежить інтеграція та безпосереднє застосування набутих знань учнів під час практичної діяльності.

В основі технологій проектів лежать: здібності дитини, що закладені природою, і школа повинна створити умови для їх розкриття, адже знання мають слугувати пристосуванню учня до навколишнього життя і повинні мати практичне спрямування. Залучення школярів до соціальних відносин є одночасно і способом, і результатом виховання.

Проект — це система навчання, за якою учні набувають знань, умінь і навичок у процесі планування та виконання практичних завдань, що постійно ускладнюються. Під час роботи за проектом чільне місце посідає самостійність учнів та їхня активність, ініціативність, захопленість. Проекти можуть мати індивідуальний, груповий чи колективний характер. В її основу покладено ідею здійснення навчання на активній основі, через самостійну і практичну діяльність учнів з урахуванням їхніх особистих інтересів.

Виходячи із вище викладеного, слід зазначити, що для сучасної школи проектувальна діяльність є способом досягнення дидактичної мети, через детальну розробку проблеми (технологію), котра повинна завершитися цілком реальним, практичним результатом, оформленим тим чи іншим чином.

Особливістю проектної технології є діяльнісний підхід до освітньо-виховного процесу, що стало однією із причин зростання інтересу до цієї форми роботи з боку вітчизняної методичної школи. Проектні технології ґрунтуються на позиціях прогресивної педагогіки, що передбачає погляд на виховання як на постійну реконструкцію особистого досвіду учнів, а також відповідність змісту виховання інтересам та потребам учнів. Прихильники проектної педагогічної діяльності відстоюють принцип "навчання за допомогою діяльності, розглядаючи при цьому діяльність як різновид творчої роботи, де учень виступає її активним учасником. Тому в основі цього методу лежить не інформаційний підхід, зорієнтований на розвиток пам'яті учнів, а діяльнісний, спрямований на формування комплексу різноманітних вмінь та навичок, необхідних передусім для дослідницької діяльності [1].

Аналіз досліджень показав, що проекти можуть застосовуватись у навчально-виховному процесі при вивченні будь-якого предмету, курсу. Розвиваючий ефект проектної технології відчувається в активній допитливості, пізнавальному інтересі учнів, в оволодінні дослідницькими методами мислення; формуванні свідомого і творчого вибору оптимальних засобів перетворювальної діяльності; вмінні мислити системно і комплексно, самостійно виявляти потреби в інформаційному забезпеченні діяльності, безупинно опановувати нові знання й застосовувати їх як засіб перетворювальної діяльності.

Проектна діяльність учнів забезпечує пріоритет надпредметних соціально значимих знань і умінь, що найбільше відповідає парадигмі особистісно-орієнтованої освіти, тому що саме ці знання і вміння дозволяють молоді упродовж життя успішно реалізуватися у професійній діяльності.

II. ЗМІСТ ПРОЕКТНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

Головним елементом проектної технології є процес проектування учнівського пошуку - від моделювання тренувальних умінь до постановки навчальної проблеми та її дослідження, до конструювання й визначення оптимальних шляхів її розв'язання у вигляді проекту [2].

Технологія проектів передбачає постановку певної проблеми і наступне її розкриття, розв'язання, з обов'язковою наявністю ідеї та гіпотези розв'язування проблеми, чітким плануванням дій, розподілом (якщо розглядається групова робота) ролей, тобто наявністю завдань для кожного учасника за умов тісної взаємодії, відповідальності учасників проекту за свою частину роботи, регулярного обговорення проміжних кроків та результатів.

Залежно від ситуації добір тематики проектів може бути різним:

- в одних випадках ця тематика може формулюватися науковцями, які працюють у галузі освіти, в рамках затверджених навчальних програм;
- в других - ініціативно висуватися вчителями з врахуванням навчальної ситуації та стану викладання предмету, природних професійних інтересів, уподобань та здібностей учнів;
- в третіх - тематика проектів може пропонуватися й учнями, які природно орієнтуються на власні інтереси, не лише пізнавальні, а й творчі, прикладні.

До основних властивостей проекту, за якими вони можуть бути класифіковані на типи, відносять: масштаб, складність, якість та тривалість. В таблиці 1 наведено класифікацію проектів згідно певних критеріїв.

ТАБЛИЦЯ 1. ТАБЛИЦЯ 1. КЛАСИФІКАЦІЯ ПРОЕКТІВ

За домінантною в проекті	За предметно-змістовим напрямком	За кількістю учасників	За географією проекту	За терміном виконання
Дослідницькі	Монопроекти	Індивідуальні	Локальні (шкільні)	Короткострокові
Інформаційні	Міжпредметні	Групові	Регіональні	Середньострокові
Ігрові		Колективні	Національні	Довгострокові
Ознайомчо-орієнтовані			Міжнародні	
Практичні				
Творчі				

Слід наголосити, що метод проектів має ряд переваг, що визначають ефективність його використання в навчальному процесі:

- він дає можливість організувати навчальну діяльність, підтримуючи розумний баланс між теорією і практикою;
- успішно інтегрується в освітній процес;
- цей метод забезпечує не тільки успішне засвоєння навчального матеріалу, але й інтелектуальний і моральний розвиток дітей, їх самостійність, доброзичливість;
- проекти згуртовують дітей, розвивають комунікабельність, креативне мислення, бажання допомогти іншим, вміння працювати в групі і нести відповідальність за спільну роботу;
- діти набувають певних навичок самостійно конструювати свої знання і вдосконалюють вміння орієнтуватись в інформаційному просторі.

Разом з тим, впровадження проектних технологій в навчальний процес може зіткнутись з певними проблемами, а саме:

- використання проектних технологій в навчальному процесі потребує глибоких теоретичних і практичних знань, системного та креативного мислення від вчителя;
- учні можуть не зрозуміти мету, цілі і завдання навчального проекту, і як наслідок, не досягнути мети проекту, яка визначена викладачем;
- учні можуть бути не готовим до виконання навчального проекту за різними причинами:

недостатність теоретичних знань, складність проекту, не бажання працювати в команді та інше;

- недостатньо розвинута матеріально-технічна база навчального закладу (обмеженість доступу до Інтернету, обмежений бібліотечний фонд, відсутність засобів для презентації результатів проекту та інше) може ускладнити роботу дітей над проектом;
- відсутність взаємодії з колегами для розробки міжпредметних проектів;
- неможливість залучення відповідних комп'ютерних технологій;
- нерівномірне навантаження на учасників проекту на різних етапах його реалізації;
- складнощі при оцінюванні внеску кожного учасника проекту;
- неможливість залучити до роботи над проектом усіх учнів класу, гуртка.

Незважаючи на певні недоліки, впровадження проектних технологій в навчальний процес є перспективним напрямом для навчальних закладів.

III. ОСНОВНІ ЕТАПИ ОРГАНІЗАЦІЇ ПРОЕКТНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

Аналіз організації проектної діяльності з учнівською молоддю дозволяє виділити основні етапи проектної технології: початковий, основний, завершальний.

На рис.1 подана схема створення проекту.



Рис. 1. Схема створення проекту

На початковому, а іноді його називають пошуковому та аналітичному етапі важливо виробити в учнів мотивацію до дослідницької роботи, оскільки особистий інтерес учнів сприяє усвідомленому підходу до виконання проекту в цілому.

Етап підготовки до роботи над проектом передбачає:

- створення ініціативної групи - школярів, пошук чи вибір проблеми, низки питань, котрі потребують вирішення;
- визначення теми на предмет її необхідності, реальності здійснення, актуальності, суспільного значення;
- формулювання цілей та встановлення конкретних завдань;
- обговорення методів та засобів реалізації;
- збір необхідної початкової інформації;
- моделювання кінцевого результату;
- планування майбутньої діяльності;
- нормування робочих груп і визначення завдання для кожної;
- розробку критеріїв оцінювання проекту.

Принциповим є колективне обговорення учнями всіх рішень, що приймаються на основі узгодження їхніх інтересів, використовуючи різноманітні методи групової роботи (мозковий штурм, загальне коло, виявлення альтернатив, вибір оптимального варіанту тощо).

Основний етап або практичний передбачає:

- збір та аналіз інформації, отриманої на основі спостережень, особистого досвіду;
- пошук оптимального способу досягнення цілі проекту, побудова алгоритму діяльності, планування роботи;
- взаємодії з компетентними спеціалістами, пошук свідчень, що містяться у друкованих виданнях, архівах, Інтернеті тощо;

- виконання запланованих кроків: спостереження, робота з літературою, анкетування експеримент тощо.

Результати обговорюються школярами в групах, після чого виробляються ідеї, версії, варіанти вирішення проблеми. Висунуті гіпотези перевіряються, зібрані матеріали готуються до захисту. Успіх проекту значною мірою залежить від оформлення його результатів.

Заключний етап або контрольний передбачає:

- аналіз результатів, формулювання висновків, їх коригування;
- оцінка якості проекту: групове обговорення, "мозкова атака", "круглий стіл";
- консультації з експертами, самостійна робота учнів, консультації з керівником проекту;
- узагальнення та класифікація зібраних матеріалів;
- подання результатів (лабораторна робота, творчий звіт, виготовлення ілюстративного матеріалу: схеми, альбому, сценарію, альманаху, газети, відеоролику, створення сайту тощо);
- презентація, захист проекту.

Під час усного захисту, що по формі нагадує процедуру обговорення наукової роботи, автори представляють, обґрунтовують актуальність, значення, новизну, і логіку свого проекту, відповідають на запитання слухачів та зауваження опонентів.

Проте роботу над проектом не можна вважати завершеною без аналізу учнями ходу та результатів своєї діяльності, тобто проведення рефлексії.

IV. ЕТАПИ ОФОРМЛЕННЯ ПРОЕКТУ

З вище сказаного впливає структура оформлення проектів для подальшого їх впровадження в навчальний процес. Визначено наступні етапи оформлення документації по проектах:

I етап: Вибір напрямку і формування назви проекту: включає узагальнену назву проблеми, коло питань; визначення (виділення) загального напрямку або пріоритетних (окремих) напрямків, оформлених у підпроекти.

Визначають напрям і формують назву проекту всі члени колективу спільно, включаючи педагогів та учнів.

II етап: Написання проекту. Розділи проекту:

1. Актуальність, необхідність, значущість обраного напрямку (чому саме цей).
2. Мета і завдання проекту:
 - визначення тип проекту та його тривалість;
 - визначення технології та методик, що будуть застосовуватись;
 - етапи дослідження за проектом;
 - визначення очікуваних результатів;
 - планування "продукту" в результаті виконання програми (посібника, сценарію, технології, плану, нової програми).

3. Визначення етапів реалізації проекту:
 - зазначаються терміни початку і закінчення проекту;
 - закінчення проекту визначається етапністю реалізації проекту;
 - зазначаються часові інтервали кожного етапу: запису проекту, I етапу, II етапу тощо.
4. Механізм реалізації проекту. Пояснення — Як? Яким чином? За допомогою яких засобів буде реалізовано проект? Плани апробації конкретних справ, акцій, заходів згідно з визначеними етапами.
5. Обов'язки та відповідальність учасників реалізації проекту:
 - хто відповідає за проект?
 - хто і за що відповідає всередині проекту?
 - хто допомагає в реалізації проекту?
6. Очікувані результати:
 - які конкретні результати ви очікуєте одержати на кожному етапі і після завершення проекту?
7. Оцінка й самооцінка проекту:
 - коли та з якою періодичністю будуть оцінювати виконання проекту (один, два, три, чотири рази на рік). Хто візьме участь в; оцінюванні: самі учасники, експерти, управлінські структури. Форми контролю (самоконтролю) й оцінки (самооцінки). В якій формі буде подано інформацію про хід проекту (звіт, конкретні матеріали, сценарії, розробки, нові проекти тощо)?
8. Бюджет, ресурсне забезпечення (приблизний бюджет, урахуваючи всі види витрат, необхідних для успішної реалізації проекту).

Висновки

Проаналізувавши зміст проектної технології було зроблено висновок, що навчання за методом проектів допомагає задовольнити індивідуальні потреби та інтереси кожного учня. Проекти часто вимагають від учнів самостійного добору змісту, навчальної діяльності та форми подання результатів своєї роботи. Проекти також дозволяють учням досліджувати цікаві для них теми, опанувати нові навички. При організації проектної діяльності від учнів вимагається здатність самостійно приймати рішення, співпрацювати, брати на себе ініціативу, робити публічні презентації.

У ході дослідження з урахуванням вітчизняного і зарубіжного досвіду було виявлено й експериментально перевірено педагогічні умови, що впливають на ефективність використання методу проектів. Виконане дослідження підтвердило ефективність методу проектів. Мета якого полягає в тому, щоб створити належні умови, при яких учні: самостійно отримують відсутні у них знання з різних джерел, вчать користуватися цими набутими знаннями для вирішення пізнавальних і практичних завдань; набувають комунікативних вмінь, працюючи в різних групах; розвивають особистісні дослідницькі вміння (виявлення проблем, отримання інформації, спостереження, проведення експерименту, його аналізу, побудови гіпотез); розвивають критичне мислення.

Сучасний випускник школи не відповідатиме вимогам сьогоденного життя, якщо не готувати його до цього життя. Формуючи особистість здатну до самоосвіти, до самостійного вирішення особистих і глобальних проблем, здатного до творчості, саморозвитку і самореалізації школа створює платформу для успішного старту. Формування покоління молоді, що буде захищеним і мобільним на ринку праці, здатним робити особистісний, духовно-світоглядний вибір, матиме необхідні знання, навички і компетентності для інтеграції їх в суспільство на різних рівнях, здатних до навчання впродовж життя-це ключові моменти у процесі формування майбутнього випускника, мета усієї освіти. У досягненні цієї мети може стати в пригоді метод проектів.

Отже, метод проектів є визначальним складником компетентного навчання, методом, що допомагає вчителю у роботі з учнями, що орієнтує на самовираження, саморозвиток особистості, готової до суспільно корисної праці.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Башинська Т. Проектувальна діяльність— основа взаємодії вчителя та учнів. Початкова школа. 2003. №6. 58—59 с.
- [2] Курицина В.Н. Метод проектів: вчере, сьогодні, завтра. Образовательная технология как система, объединяющая теорию, практику и искусство. Воронеж: ВГПУ, 2000. 59—63 с.
- [3] Жуковский И. Проект — гарант совместных действий. Шлях освіти, 2003. №3. 60—64 с.
- [4] Осмоловская И. Школьные проекты: деятельность, направленная на обогащение знаний и духовного мира учащихся. Директор школы. Україна, 2003. №9-10. 30—34 с.
- [5] <http://tatadudnik.blogspot.com/2016/12/5.html>
- [6] Використання творчих проектів для учнів у формуванні ключових компетентностей <https://u.to/tT4iFA>
- [7] Метод проектів у сучасних умовах <http://osvita.ua/school/method/technol/2645/>

Інформаційний пошук ансамблем класифікаторів

Олександр Шумейко

Кафедра програмного забезпечення систем
Дніпровський державний технічний університет
Кам'янське, Україна
shumeiko_a@ukr.net

Геннадій Шевченко

Науковий центр
ТОВ Ноосфера
Дніпро, Україна
she-genn@yandex.ua

Information Search Using Ensemble of Classifiers

Інформаційний Пошук Ансамблем Класифікаторів

Oleksandr Shumeiko

dept. of Computer Science
Dniprovsk State Technical University
Kamianske, Ukraine
shumeiko_a@ukr.net

Gennadiy Shevchenko

Scientific Center
Noosphere Company
Dnipro, Ukraine
she-genn@yandex.ua

Анотація— Досліджено процес пошуку, вибору та виведення інформації (у тому числі документів, їх частин та / або даних) відповідно до інформаційного запиту з урахуванням інтересів користувача. Для вирішення цієї проблеми запропоновано використовувати ансамбль класифікаторів з можливістю подальшої корекції вагових коефіцієнтів.

Abstract— This paper studies the process of searching, selecting and deriving the information (including documents, their parts and/or data) from the arrays and records in any form in accordance with information demand, expressed in the form of information query taking in account clients' interests. In order to address this problem, we suggested using an ensemble of classifiers with the possibility of further correction of weighting coefficients.

Ключові слова— інформаційний пошук, ансамбль класифікаторів, адаптивний пошук, асоціативні правила.

Keywords— information search; ensemble of algorithms; search adaptability; association rules.

V. INTRODUCTION

Organizing the search for documents upon information query ranks high in Data Mining and is a key component of Text Mining. It is evident that, for this purpose, the global network has other more or less known methods, starting from the classic PageRank to Google RankBrain, Bing Custom Search ([1]-[3]) or Baden-Baden from Yandex. ([4]-[5]). Although, in case of organizing the search in array of local storage, the principles enshrined for the global network are not applicable, first of all, due to the structure of Internet documents and backlinks.

Most of document ranking algorithms are based on the idea of applying the frequency of using the key words in the current

document and in other documents of the corpus. Moreover, the applied parameters include:

- tagging the key words and their distance to the beginning of the document;
- length of the document;
- number of the word pairs, which are sequential in the query and similarly used in the text;
- number of the key words of the query, which are generally used in the text;
- the fact whether the entire query is used in the text, etc.

In order to address the problem of searching and ranking the documents in accordance with the query, the authors suggested using an ensemble of classifiers with adjustment of its learning model pursuant to the sphere of interests of the client who carries out the respective search.

VI. ENSEMBLE OF ALGORITHMS

The authors used four classifiers - TF/IDF, Okapi BM25, vector classifier (a cosine of the angle between vectors corresponding to documents is used as a convergence criterion) and the method developed by the authors based on entropy increment value [6].

TF/IDF algorithm is one of the most frequently used methods of search in local storages, where the criterion for the quality of document d relation to information query $S = \{s_i\}$ (s_i - word form of the query) is

$$score(S, d) = \sum_{s \in q} IDF(s) \times \frac{TF(d, s)}{|d|},$$

where $TF(d, s_i) = \frac{n_i}{\sum_k n_k}$, $IDF(s_i) = \log \frac{|D|}{|d \supset s_i|}$ and n_i is a frequency of word form occurrence in the respective document.

Okapi BM25 algorithm is a generalization of TF/IDF that has been suggested by Stephen Robertson [7] still in 1994. For this algorithm we have

$$TF(d, s_i) = \frac{n_i(k_1 + 1)}{n_i + k_1 \times \left(1 - b + b \times \frac{\sum_k n_k}{avDoc}\right)},$$

where, as was mentioned above, n_i is a frequency of word form occurrence s_i in the document d , $\sum_k n_k$ - total number of word forms in this document d and $avDoc$ - mean length of document in the corpus, k_1 and b - are free coefficients, which are most frequently selected in the following way $k_1 = 2, b = 0.75$.

Moreover,

$$IDF(s_i) = \log \frac{|D| - |d \supset s_i| + 0.5}{|d \supset s_i| + 0.5}$$

and, finally, quality function

$$score(S, d) = \sum_{s \in q} IDF(s) \times TF(d, s)$$

A few words about vector classifier. At the first step of the algorithm for every document d_v of the corpus $\{d\}$, a set of word forms and their counters (s_i^v, n_i^v) are built and single vector with the following coordinates is assigned to every document d_v : $\bar{n}_i^v = n_i^v / \sqrt{\sum_j (n_j^v)^2}$.

The vector related to the information query is built in the same way. Scalar product of single vector of information query will be a quality function (the closer the value is to 1, the more the document matches the information query).

The latter algorithm is based on analysis of the entropy increment value. We will briefly review the essence of this approach.

Let us assume that there is a corpus of documents, each of which is defined by frequency dictionary of word forms included therein $D_k = \{w_i^k : n_i^k\} (k = 1, \dots, N)$, and information query is defined as $S = \{s_i\}$. It is necessary to rank the corpus of documents $\{D_k\}_{k=1}^N$

in accordance with the information query S . The suggested ranking method is based on the idea of using a change of entropy value when merging the documents. It should be noted that such kind of constructions is used when addressing optimization problems of information theory, for instance, when building the decision trees C4.5 etc. (see [7]-[8]).

Claude Shannon suggested the following functional as a measure of uncertainty of random object (system) A with finite set of possible states A_1, A_2, \dots, A_n and respective probability p_1, p_2, \dots, p_n , $H(A) = H(p_1, p_2, \dots, p_n) = -\sum_{k=1}^n p_k \log p_k$,

which is called entropy. Logarithms are taken on an arbitrary basis, but if the unit of measurements of the degree of uncertainty is taken as the uncertainty mentioned in the study with two equally probable results (for instance, the element is available in a certain set or absent therein), then we should take the basis equal to 2.

Thus, $H(D_k) = -\sum_{i=1}^{N_k} \frac{n_i^k}{N_k} \log_2 \frac{n_i^k}{N_k}$, where N_k - total number of word forms in the document D_k , and $n_i^k = num(w_i^k)$ - number of occurrence of the word form w_i^k in the given current document ($num(s)$ - number of occurrence of the word s).

For binary case, if among n states of the system A there are m , which have some features of V , then the entropy in relation to feature V will be equal to

$$H(A, V) = -\frac{m}{n} \log_2 \frac{m}{n} - \frac{n-m}{n} \log_2 \frac{n-m}{n}.$$

If we use any attribute Q , which has q values, then it is necessary to define the increment of information, which enables measuring the expected level of entropy (difference between the information with A and the information required to identify the element with A after the moment, when the value of the attribute Q was identified, i.e. the increment of information owing to the attribute Q):

$$G(A, Q) = H(A) - \sum_{j=1}^q \frac{|A_j|}{|A|} H(A_j, V)$$

where A_j - is a set of states A , where the attribute Q takes j -th value, and $|X|$ - number of elements of the set X .

For our case, the entropy value of the document D_k in relation to the word s_i from information query S will be equal to

$$H(D_k, s_i) = -\frac{\text{num}(s_i)}{N_k} \log_2 \frac{\text{num}(s_i)}{N_k} - \frac{N_k - \text{num}(s_i)}{N_k} \log_2 \frac{N_k - \text{num}(s_i)}{N_k}.$$

Entropy increment value will be equal to

$$H(D_k, S) = H(D_k) - \sum \left\{ N_k^{-1} \text{num}(s_i) H(D_k, s_i) \mid s_i \in S \right\}$$

The more is the value of increment entropy, the more our document will differ from the information query.

On the other hand, the value of entropy depends on the value of system states (in our case – from the number of word forms, which describe the document), therefore, to carry out ranking we need to define not the absolute value of the change of entropy value, but the relative one, i.e.

$$\bar{H}(D_k, S) = H^{-1}(D_k) \left(H(D_k) - \sum \left\{ N_k^{-1} \text{num}(s_i) H(D_k, s_i) \mid s_i \in S \right\} \right)$$

which enables assessing decrease in the level of document entropy, if the information on the key words is known (constituents of the information search). The value $\bar{H}(D_k, S) = I$ points out that this document D_k has no connection with the information search, i.e. the information on $s_i \in S$ does not change the total amount of information concerning D_k . And the less is the value $\bar{H}(D_k, S)$, the less is the degree of uncertainty D_k in relation to S .

VII. USING THE POORLY STRUCTURED COLLECTION OF THE DOCUMENT

This method can be generalized using the notion of a poorly structured collection of documents, as a list of used literature.

Let $\{\Delta_v\}_{v=1}^m$ a poorly structured collection of documents relative to the document Δ_0 . Let Λ the total number of word forms of the set $\{\Delta_v\}_{v=0}^m$, and $n_i(\Delta_k) = \text{num}(w_i)$ the number of occurrences of the wordform w_i from the document Δ_0 in the document Δ_k if $n_i(\Delta_k) = \text{num}(w_i)$, else $n_i(\Delta_k) = I/\Lambda$. Thus, all wordforms from set $\{\Delta_v\}_{v=1}^m$ that are not in the document Δ_0 have the same weight, according to the size of the total set $\{\Delta_v\}_{v=1}^m$. The entropy gain will be equal

$$\text{Gain}(\Delta_k) = H(\Delta_k) - \sum \left\{ \frac{n_i(\Delta_k)}{N_k} H(\Delta_k, w_i) \mid s \in \Delta_k \right\}.$$

The greater the value of the increase in entropy, the more our document will be different from the original document.

The value of entropy depends on the number of states of the system (in our case, the number of wordforms that describe the document), so to assess the weight of the element of the

collection, it is not necessary to determine the absolute value of the change in the value of entropy, but relative, that is

$$G^0(\Delta_k) = \frac{\text{Gain}(\Delta_k)}{H(\Delta_k)} = \frac{1}{H(\Delta_k)} \left(H(\Delta_k) - \sum \left\{ \frac{n_i(\Delta_k)}{N_k} H(\Delta_k, w_i) \mid s \in \Delta_k \right\} \right),$$

which allows you to assess the reduction of the entropy of the document, if known information about the keywords. A large value $G^0(\Delta_k)$ indicates the fact that this paper w_i is weak in relation to Δ_0 , and the smaller the value $G^0(\Delta_k)$, the less the degree of uncertainty relative.

Thus, the weight of the document (in relation to word forms) can be calculated as follows

$$W(\Delta_k) = \frac{\sum \left\{ \frac{n_i(\Delta_k)}{N_k} H(\Delta_k, w_i) \mid w_i \in \Delta_k \right\}}{H(\Delta_k)}$$

and the weight of each word w_i of the document w_i relative to the document Δ_0 will be calculated according to the ratio

$$W(\Delta_k, w_i) = \begin{cases} W(\Delta_k), & w_i \notin \Delta_0, \\ I, & w_i \in \Delta_0. \end{cases}$$

that is, for the original wordforms of the document Δ_0 , the weight is equal to 1, otherwise, is equal to the weight of the document.

VIII. SEARCH FOR ASSOCIATION OF INFORMATION FEEDBACK

During the analysis of documents relatively to the information query, we standardize the ranking $R_i(d, S)$ ($i = 1, 2, 3, 4$), determined by every classifier, in $[0, 1]$, where 1 corresponds to maximum possible ranking and 0 – absolute mismatch. The result of classification is provided by the linear combination (the more is the value $\rho(d, S)$, the more the document matches the information query) :

$\rho(d, S) = \sum_{i=1}^4 \omega_i R_i(d, S)$, where ω_i is the weight of the respective method. At the first step, all values $\omega_i = 1$ ($i = 1, 2, 3, 4$). With every further use of the search, when selecting the documents that interested the user most of all, the weight of the classifier, providing more matching results, is increased.

Bellow we considered the problem of classifiers' learning.

The idea to learn the classifiers is based on the assumption that the sphere of the client's information interests consists of quite limited set, while every sphere of interests will have its own ensemble.

At the first step ("cold start"), all classifiers have the same weight and, according to their overall ranking, the client obtains the ranked list of corpus documents, which, in terms of classifiers, match the information query. In the obtained list, the client independently chose N_I documents, which interested him. Each of the documents is a set of word forms with its own counter (s_i^v, n_i^v) . Let us build an association rule for the obtained set. Let the unique word forms of the selected documents represent a finite set $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$, which can

be used to build a set of items (sets of items) $T \subseteq W$. Association rules $A \rightarrow T$ have the following form: if <condition> then <result>, where <condition> is not a logical expression, but a collection of objects from the set W that the objects of this set are associated with and included into <result> of the current rule.

We used the following criteria to assess efficiency and productivity of the rule:

Rule $A \rightarrow T$ has a support s , if it is fair for s percentage taken for an analysis of cases: $\text{support}(A \rightarrow T) = P(A \cup T)$. The confidence of the rule demonstrates a possibility of something that the concluding part inherits from the conditional part (i.e., $\exists A$ inherits T):

$$\text{confidence}(A \rightarrow T) = \frac{P(A \cup T)}{P(A)} = \frac{\text{sup port}(A \rightarrow T)}{\text{sup port}(A)}$$

The algorithms of searching for the association rules select the candidates, where the support and confidence is higher than the predefined margins. If the support is of quite high significance, then the algorithm will search for obvious rules. Other distinctive features are used to search for unobvious constructions.

The lift demonstrates an extent of the increased probability of T occurrence provided that A is available:

$$\text{lift}(A \rightarrow T) = \frac{\text{confidence}(A \rightarrow T)}{\text{sup port}(T)}$$

If the $\text{lift} > 1$, the availability of one elements contributes to the occurrence of the other one.

Conviction – a distinctive feature of an error of the association rule. The higher is the result than 1, the more confident is the rule:

$$\text{conviction}(A \rightarrow T) = \frac{1 - \text{sup port}(T)}{1 - \text{confidence}(A \rightarrow T)}$$

Let us take Apriori algorithm ([8]-[9]) as a basis for search for the rules.

Given: sets of elements with a desired minimum support.

Remark: if $\{A, B\}$ are frequent set of elements, then A and B is also a frequent set of elements. The reverse is not true.

Key idea:

To find *all* sets of $\exists k$ elements. An example ($n = 2$): $L_2 = \{\{A, B\}, \{A, D\}, \{C, D\}, \{B, D\}\}$

- Generation ($k + 1$) of the sets of elements by the way of combining the sets with k elements. $L_3 = \{\{A, B, C\}, \{A, C, D\}, \{A, B, D\}, \{B, C, D\}\}$.
- Verification of newly generated sets ($k + 1$) – of elements for minimum support.

- The sets, which contain infrequent sets with two elements, should be excluded from L_3 .
- To test the sets of elements left for minimum support, taking into account their occurrence in data.
- To increase k and continue increasing until more frequent sets of elements are generated.

An application of association rules enables, for every information query, to obtain a chain of the word forms linked to each other through associations. The classifier, which more adequately (provides higher ranking) selects the documents corresponding to the obtained chain of associations, has the higher weighting coefficient. Moreover, in case if the next information query corresponds to the given chain of associations, then, to enhance the quality of the information search for the given client, the information query is generated directly from the client's query and from the word forms of the respective chain. In this case, the association chain is rebuilt, taking into account the documents, selected by the client for such query.

In case, if the new query does not correspond to the existing chains, we consider it a “cold start” and create a new chain to be added to the list of the existing ones.

CONCLUSION

The results obtained enable to efficiently organize the text ranking of the sets of documents in accordance with the user's sphere of interests.

REFERENCES

- [1] Buttcher S. Information Retrieval Implementing and Evaluating Search Engines / S.Buttcher, C.L.Clarke, G.V.Cormack .— Cambridge, Massachusetts, London, England: The MIT Press, 2010 .— 624 p.
- [2] Crof W.B. Search Engines. Information Retrieval in Practice / W.B.Crof, D.Metzler, T.Strohman .— Pearson Education, Inc., 2015 .— 542 p.
- [3] Manning C.D. Introduction to Information Retrieval / C.D.Manning, P.Raghavan, H.Schütze .— Cambridge: Cambridge University Press, 2008 .— 505 p.
- [4] Basipov A.A. Semantic Search: problems and technology / Basipov A.A., Demich O.V. // Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo universiteta, Seria: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika, No. 1, pp. 104-111.
- [5] Gulin A. Text ranking algorithm of Yandex / Gulin A., Maslov M., Segalovich I. // ROMIP-2006 .— Moscow, 2006 .— pp.1-12.
- [6] Shumeiko O.O. Documents ranking upon information query / Shumeiko O.O., Shevchenko G.Ya. // System technologies.— 2017 .— No.2(109) .— pp.110-117.
- [7] Okapi at TREC-3 / [S.E.Robertson, S.Walker, S.Jones та ин.] // Proceedings of the Third Text REtrieval Conference (TREC 1994) .— Gaithersburg, USA, 1994 .— C.109-127.
- [8] Charu C. Aggarwal Data Mining. The Textbook. / C.ACharu; - Springer, 2015 .- 746 p.
- [9] The Top Ten Algorithms in DataMining; Vipin Kumar (Editor) .- Taylor & Francis Group, LLC 2009 .- 2006 p.

Про Одну Динамічну Модель Леонт'єва

Фахріддін Мірзоахмедов
кафедра математичного та
інформаційного моделювання
Фінансово-економічний інститут Таджикистану
Душанбе, Таджикистан
mirfakh@mail.ru

Людмила Сіренко
кафедра екології та технології
рослинних полімерів
НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»
Київ, Україна
lyud.sirenko@gmail.com

On a Dynamic Model of Leontiev

Fakhriddin Mirzoahmedov
Department of Mathematical and Information Modeling
Finance and Economics Institute of Tajikistan
Dushanbe, Tajikistan
mirfakh@mail.ru

Lyudmila Sirenko
Department of Ecology and Technology of Plant Polymers
NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
Kyiv, Ukraine
lyud.sirenko@gmail.com

Анотація—У статті розглянуто один з варіантів побудови систем лінійних диференціальних рівнянь першого порядку з постійними коефіцієнтами, який є базою динамічного моделювання міжгалузевого балансу Леонт'єва.

Abstract—The article discusses one of the options for constructing systems of linear differential equations of the first order with constant coefficients being a dynamic model of interindustry balance Leontief.

Ключові слова—статичні та динамічні моделі МОБ, матриці коефіцієнтів матеріальних витрат і капіталомісткості, диференціальне рівняння

Keywords—static and dynamic models of MOB, matrices of coefficients of material costs and capital intensity, differential equation

I. ВСТУП

Економічні зв'язки між чистими галузями, невиробничою сферою і зовнішнім світом при виробництві і розподілі продукції, робіт, послуг і їх інформаційне забезпечення представляються за допомогою таблиць міжгалузевого балансу (МГБ) [1]. Такі таблиці характеризують зв'язки між економічними об'єктами, що входять в економічну систему.

У сучасному економічному співтоваристві все більше уваги приділяється проблемам макроекономічного державного регулювання, тобто розробці ефективних методів впливу держави на функціонування національної економіки. Теоретична основа для вирішення цих та інших проблем є модель МГБ В. Леонт'єва [1].

Зазвичай МГБ (в англійських країнах має назву «interindustrian analysis», «input-output analysis» або «IO analysis») - це таблиці «витрати - випуск», що

характеризують зв'язки між економічними об'єктами (секторами або галузями), які входять в економічну систему. Матричні МГБ - це спосіб подання статистичної інформації про економіку країни, за допомогою яких вирішуються завдання аналізу, планування і прогнозування розвитку економічних систем.

Зазвичай моделі Леонт'єва поділяються на статичні і динамічні, для яких таблиці МГБ структурно відрізняються один від одного.

II. СТАТИЧНА МОДЕЛЬ МІЖГАЛУЗЕВОГО БАЛАНСУ ЛЕОНТ'ЄВА

Розглянемо один з різновидів структури статичної моделі МГБ, що містить інформаційну таблицю, пов'язану з показниками виробництва і розподілу продукції, робіт і послуг у вартісному вираженні за рік (табл. 1). Таблиця складається з 4-х взаємопов'язаних квадрантів.

У **Квадранті I** відображені дані про взаємні поставки продукції, робіт, послуг між галузями, цей квадрант визначено квадрантом проміжного споживання і характеризує проміжне споживання (витрати) або проміжний попит галузей при виробництві продукції, робіт, послуг, яким відповідають такі позначення: n -кількість взаємопов'язаних галузей (секторів); $i, j = 1, 2, \dots, n$ - відповідно індекси рядків і стовпців для галузей виробництва і споживання; x_{ij} - вартість (витрати) виробництва i -ї галузі на виробництво продукції j -ї галузі.

Квадрант II визначено квадрантом кінцевого споживання (використання) продукції на невиробничі споживання, який визначає добробут народу. У таблиці це позначено вектором кінцевого продукту (попиту)

$y=(y_i, i=1, 2, \dots, n_n)^T$, де y_i – обсяг кінцевої продукції виробленої i -ю галуззю, сума яких становить валовий внутрішній продукт (ВВП витр.). Динамічна модель МГБ - кінцевий продукт розбивається на споживання та інвестиції, а інвестиції враховуються у виробництві наступного року.

Невиробничі споживання включають: особисте споживання населення або домогосподарств (C_i); державні закупівлі товарів і послуг (G_i); валові капіталовкладення або

інвестиції (I_i); експорт (E_i) і імпорт (M_i) або чистий експорт $NX = E_i - M_i$, іноді його називають сальдо у зовнішній торгівлі в i -й галузі.

Тоді для i -ї галузі справедлива рівність:

$$y_i = C_i + G_i + I_i + NX, \quad i=1, 2, \dots, n.$$

TABLE I. СТРУКТУРА ВХІДНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ СТАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

Випуск Витрати		Проміжне споживання				Кінцеве споживання Y	Валове споживання X	
		Галузі споживання						
		I	...	j	...			n
Галузі виробництва	1	X ₁₁	...	X _{1j}	...	X _{1n}	Y ₁	X ₁
	2	X ₂₁	...	X _{2j}	...	X _{2n}	Y ₂	X ₂
	3	X ₃₁	...	X _{3j}	...	X _{3n}	Y ₃	X ₃
	КвADRANT I				КвADRANT II	
	i	X _{i1}	...	X _{ij}	...	X _{in}	Y _i	X _i
	n	X _{n1}	...	X _{nj}	...	X _{nn}	Y _n	X _n
Валова додана вартість		V ₁ ... V _j ... V _n				$\sum v_j = \sum y_j$		
Амортизація		A ₁ ... A _j ... A _n				КвADRANT IV		
Оплата праці		W ₁ ... W _j ... W _n						
Чистий дохід		КвADRANT III						
		M ₁ ... M _j ... M _n						
Валове споживання		X ₁ ... X _j ... X _n						

КвADRANT III відображає валову додану вартість. У ньому представлена додана вартість, приведена в галузях до витрат продукції інших галузей при виробництві продукції, робіт, послуг. У таблиці це позначено вектором доданої вартості $v=(v_j, j=1, 2, \dots, n)^T$, де v_j - додана вартість j -ї галузі, сума яких становить валовий внутрішній продукт (ВВП_{дох.}). Додана вартість включає: A_j - амортизацію основного капіталу j -ї галузі; W_j - оплату праці (заробітна плата найманих працівників) j -ї галузі; M_j - чистий дохід.

Тоді для j -ї галузі справедлива рівність:

$$v_j = A_j + W_j + M_j, \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

КвADRANT IV в даній версії статичного МГБ не заповнюється. З урахуванням введених позначень і згідно таблиці 1, виконуються наступні балансові співвідношення: валовий обсяг продукції будь-якої i -ї галузі дорівнює сумарному обсягу продукції, споживаної n галузями, і кінцевої продукції, тобто

$$x_i = \sum_{j=1}^n x_{ij} + y_i, \quad i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

Ця математична модель має вигляд системи n лінійних алгебраїчних рівнянь з $2n$ невідомими. Якщо ввести величини $a_{ij} = x_{ij}/x_j$, $x_j > 0$, $j = 1, 2, \dots, n$, то балансові співвідношення (1) запишуться у вигляді

$$x_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j + y_i, \quad i = 1, \dots, n, \quad (2)$$

де a_{ij} - коефіцієнт прямих виробничих витрат, тобто частка продукції i -ї галузі на виробництво одиниці (однієї у.о.) продукції j -ї галузі (оскільки протягом тривалого часу величини a_{ij} змінюються дуже слабо і можуть розглядатися як постійні числа);

Якщо ввести $X=(x_i, i=1, 2, \dots, n_n)^T$ - вектор валових випусків галузей (x_i - вартість валового продукту, виробленого i -ю галуззю протягом року),

$A = (a_{ij})$, $a_{ij} = x_{ij}/x_j$, $i, j = 1, 2, \dots, n$ - матриця коефіцієнтів прямих виробничих витрат; $B = (E - A)^{-1} = (b_{ij})$, $i, j = 1, 2, \dots, n$ - матриця коефіцієнтів повних матеріальних витрат - потреба в валовому випуску i -ї галузі для виробництва одиниці кінцевої продукції j -ї

галузі; E - одинична матриця відповідної розмірності, то співвідношення (2) можна записати в матричному вигляді

$$X = AX + Y, \text{ або } (E - A)X = Y \quad (3)$$

Рівняння (1)-(3) визначено як статична модель міжгалузевого балансу Леонт'єва. По відношенню до рівнянь (3) можуть бути поставлені три завдання при заданому:

- векторі X знайти Y ;
- векторі Y знайти X ;
- частині змінних X і Y знайти інші змінні.

Якщо $\det(E - A) \neq 0$, то з (3) випливає

$$X = (E - A)^{-1}Y, \quad (4)$$

де $B = (E - A)^{-1}$ - матриця повних витрат. Економічний сенс матриці повних витрат полягає в тому, що її стовпці є векторами валових випусків галузей, необхідних для виробництва одиниці кінцевої продукції відповідних галузей.

III. ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ МІЖГАЛУЗЕВОГО БАЛАНСУ ЛЕОНТ'ЄВА

Проаналізовано модель міжгалузевого балансу є статичною, оскільки в ній всі співвідношення віднесені до одного моменту часу. Інвестиції (капіталовкладення), представлені у другому квадранті, включені в кінцевий продукт Y . У цій моделі не здійснюється аналіз розподілу, використання та виробничої ефективності капітальних вкладень.

Якщо в МГБ здійснюється аналіз процесу виробництва протягом декількох років, причому результати першого року визначають умови виробництва у другому році і т.д., то таку систему визначають *динамічною*, а МГБ, що описує її розвиток, - *динамічним*. Особливістю динамічних МГБ є те, що в них зі складу кінцевого використання виключено капіталовкладення. Це означає, що капіталовкладення в динамічному МГБ є функцією випусків галузей в наступні роки. Динамічні МГБ точніше представляють розвиток економіки, ніж будь-які інші економіко-математичні методи. Проте, в даний час розроблено тільки теорію таких балансів, оскільки їх практична побудова є досить складною. Іншим типом МГБ є *статичні* баланси, в яких капіталовкладення включено до складу кінцевого використання. Таким чином, статичні МГБ складаються для одного року, а динамічні - за кілька років.

У порівнянні зі статичною моделлю Леонт'єва, яку можна використовувати для планування виробництва на одному плановому періоді в цілому (рік, п'ятирічка і т.д.), динамічна відстежує виробничий процес всередині планового періоду, тобто «Витрати і випуск», здійснюється в кожен період часу (від кварталу до кварталу, від року до року і т.д.). Логічним наслідком такої передумови є зростання виробничих можливостей у часі з наростаючими темпами, описуючи економіку, що «розширяється».

Динамічні моделі відображають процес розвитку економіки. У них виробничі капітальні вкладення виділяються зі складу кінцевої продукції, досліджується їх структура і вплив на зростання обсягу виробництва.

Схема динамічного міжгалузевого балансу представлена в таблиці II.

TABLE II. СТРУКТУРА ВХІДНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ ДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ

Галузі	Проміжні споживання (поточні витрати)						Валові інвестиції (зміна основних і оборотних коштів)						Кінцеве споживання Y	Валовий продукт X
	1	2	...	j	...	n	1	2	...	j	...	n		
1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1j}	...	x_{1n}	k_{11}	k_{12}	...	k_{1j}	...	k_{1n}	y_1	x_1
2	x_{21}	x_{22}	...	x_{2j}	...	x_{2n}	k_{21}	k_{22}	...	k_{2j}	...	k_{2n}	y_2	x_2
...
n	x_{n1}	x_{n2}	...	x_{nj}	...	x_{nn}	k_{n1}	k_{n2}	...	k_{nj}	...	k_{nn}	y_n	x_n

Таблиця II на відміну від таблиці I містить інформацію двох матриць, що відповідають першому і другому квадранту статичного МГБ. Матриця проміжного споживання з елементами x_{ij} збігається з відповідною матрицею статичного балансу. Елементи другої матриці показують, яка кількість продукції i -ї галузі направлена в поточному періоді в j -у галузь в якості виробничих інвестицій в основні та оборотні кошти.

У динамічній схемі кінцевий продукт y_i включає продукцію i -ї галузі, що йде в особисте і суспільне споживання, накопичення не виробничої сфери,

незавершене будівництво, на експорт. Всі показники наведено в вартісній формі.

За аналогією формули (1), згідно з таблицею, виконуються наступні балансові співвідношення:

$$x_i = \sum_{j=1}^n x_{ij} + \sum_{j=1}^n k_{ij} + y_i, \quad i = 1, \dots, n. \quad (5)$$

Як і в статичній моделі, $a_{ij} = x_{ij} / x_j, i, j = 1, 2, \dots, n$, міжгалузеві потоки інвестицій відносяться до періоду $(t-1, t)$. Динаміка задається додатковим співвідношенням

$$k_{ij} = \varphi_{ij} \Delta x_j, \Delta x_j = x_j(t) - x_j(t-1),$$

$$i, j = 1, \dots, n. \quad (6)$$

Економічний сенс коефіцієнтів $\varphi_{ij} = k_{ij} / \Delta x_j, i, j = 1, \dots, n$ такий, що вони показують скільки продукції i -ї галузі повинно бути вкладено в j -у галузь для збільшення випуску її продукції на одиницю в розглянутих одиницях виміру. Коефіцієнти φ_{ij} називаються коефіцієнтами інвестицій або коефіцієнтами приростної фондомісткості.

Систему рівнянь (5) з урахуванням (6) за аналогією (2) можна представити наступним чином:

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j(t) + \sum_{j=1}^n \varphi_{ij} (x_j(t) - x_j(t-1)) +$$

$$+ y_i(t), i = 1, \dots, n; t = 1, 2, \dots, T \quad (7)$$

Модель (7) називається дискретною динамічною моделлю міжгалузевого балансу Леонт'єва. Система рівнянь (7) являє собою систему лінійних різницьових рівнянь 1-го порядку.

Представимо (7) у матричному вигляді:

$$X(t) = AX(t) + \Phi(X(t) - X(t-1)) + Y(t), \quad (8)$$

де $A = (a_{ij}), \Phi = (\varphi_{ij}), ij = 1, \dots, n$ - відповідно матриці коефіцієнтів прямих матеріальних витрат і капіталоємності; $X(t), Y(t), t = 1, 2, \dots, T$ - вектори валових випусків і кінцевих продуктів відповідно.

З (8) слідує, що

$$(E - A - \Phi)X(t) = Y(t) - \Phi X(t-1),$$

звідки

$$X(t) = (E - A - \Phi)^{-1} (Y(t) - \Phi X(t-1)). \quad (9)$$

Модель (9) називається матричною формою дискретної динамічної моделі міжгалузевого балансу Леонт'єва.

Для дослідження даної моделі треба задати в початковий момент часу вектори $X(0)$ і $Y(0)$ для $t = 1, 2, \dots, T$. Рішенням моделі будуть значення векторів $X(t), K(t), t = 1, 2, \dots, T$. Умовою можливості розв'язання системи (7) щодо вектора $X(t)$ є вимога $\det(E - A - \Phi) \neq 0$.

У даній моделі передбачено, що приріст продукції в періоді $(t-1, t)$ обумовлений інвестиціями, зробленими в

тому ж періоді. Для коротких періодів це припущення нереальне, тому що існують відставання в часі (часові лаги) між вкладенням коштів у виробничі фонди і приростом випуску продукції. Моделі, що враховують лаги капітальних вкладень, утворюють особливу групу динамічних моделей МГБ.

Якщо дискретну динамічну модель (7) розглянути в разі безперервного часу, то рівняння переписуться у вигляді системи диференціальних рівнянь 1-го порядку з постійними коефіцієнтами такого вигляду:

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j(t) + \sum_{j=1}^n \varphi_{ij} \frac{dx_j(t)}{dt} +$$

$$+ y_i(t), i = 1, \dots, n; t = 1, 2, \dots, T. \quad (10)$$

Співвідношення (10) є системою n лінійних диференціальних рівнянь першого порядку з постійними коефіцієнтами і є динамічною моделлю міжгалузевого балансу Леонт'єва.

Для вирішення рівняння крім матриць коефіцієнтів поточних прямих матеріальних витрат $A = (a_{ij})$ і коефіцієнтів капітальних витрат $\Phi = (\varphi_{ij})$ необхідно знати рівні валового випуску в початковий момент часу $t=0$ ($x(0)$) і закон зміни величин кінцевого продукту $y(t)$ на відрізьку $[0, T]$.

Рішенням системи рівнянь (10) будуть значення вектор-функції $x(t)$ на відрізьку $[0, T]$ [3]. Умовою можливості розв'язання системи (10) є $\det \Phi \neq 0$.

Інші різновиди статичних і динамічних моделей МГБ будуть розглянуті в наступних публікаціях авторів.

ВИСНОВКИ

У динамічних моделях МГБ на відміну від статичних, де відсутні накопичення і інвестиції, кінцевий продукт розбивається на споживання та інвестиції, а інвестиції враховуються у виробництві на наступний рік.

На відміну від запропонованої динамічної моделі МГБ, можна розглядати і інші її модифікації з урахуванням:

- відходів виробництва і забруднення середовища;
- зміни технологій (матриці A);
- тіньової економіки;
- та ін.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] В.В. Леонт'єв, Дослідження структури американської економіки. Теоретичний і емпіричний аналіз за схемою витрати - випуск. - М., Госстатиздат, 1958, - 640 с.
- [2] А.Г. Гранберг, Динамічні моделі народного господарства. - М.: Економіка, 1985.
- [3] Ф. Мірзоахмедов, Макроекономічний аналіз національної економіки на базі міжгалузевого балансу Леонт'єва // Таджикистан і сучасний світ Центр стратегічних досліджень при Президентіві Республіки Таджикистан. - Душанбе, 2015, №5 (48). - С.107-127, ISSN 2075-9584.
- [4] А.Д. Мишкіс, Лінійні диференціальні рівняння з запізнілим аргументом: - М.: Наука, 1972. - 352 с.

СЕКЦІЯ 3.

Теорія інформації, кодування, перетворення форми, цифрової обробки та ущільнення інформації

SECTION 3.

Information theory, coding and information form transformation

Алгоритм Статистичного Кодування Даних Інформаційного Ресурсу з Використанням Концепції Внутрішньої Реструктуризації

Володимир Бараннік, Іван Тупиця, Валерій Бараннік, Сергій Шульгін
кафедра бойового застосування та експлуатації АСУ
Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба
Харків, Україна
vvbar.off@gmail.com, ivan20081982@gmail.com,

Algorithm of Statistical Coding of Data Information Resource Using the Concept of Internal Restructuring

Vladimir Barannik, Ivan Tupitsya, Valeriy Barannik, Sergii Shulgin
Combat use of ASC department
Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University
Ukraine, Kharkiv
vvbar.off@gmail.com, ivan20081982@gmail.com

Анотація—Проведено дослідження та аналіз алгоритму статистичного кодування даних інформаційного ресурсу з використанням концепції внутрішньої реструктуризації. У досліджуваному алгоритмі статистичного кодування реалізується принципово новий підхід до реструктуризації даних інформаційного ресурсу – внутрішня реструктуризація. Суть даної концепції до реструктуризації даних полягає у пошуку закономірностей у внутрішній структурі елементів кодованих даних з метою їх більш вигідного представлення. В якості внутрішньої структури елемента повідомлення виступає його двійкове подання. Інструментом для внутрішньої реструктуризації даних інформаційного ресурсу є кількісний ознака - ознака кількості серій одиниць. Проведений аналіз використання досліджуваного алгоритму щодо підвищення ефективності статистичного кодування даних з позиції скорочення довжини кодових конструкцій, які присвоюються елементам повідомлення.

Abstract—The research and analysis of the algorithm of statistical coding of information resource data using the concept of internal restructuring was conducted. In the research algorithm of statistical coding implemented a fundamentally new approach to the restructuring of data resource - internal restructuring. The essence of this concept to the restructuring of data is to find patterns in the internal structure of the elements of coded data in order to make them more profitable. As the internal structure of the message element serves its binary representation. The tool for internal restructuring of the data resource is a quantitative sign - a sign of the number of series of units. The analysis of the use of the investigated algorithm for increasing the

efficiency of statistical coding of data from the position of reducing the length of code structures, which are assigned to the elements of the message.

Ключові слова—реструктуризація даних; кластеризація; ознака кількості серій одиниць

Keywords— data restructuring; clustering; sign of the number of series of units

I. ВСТУП

На теперішній час у сучасних алгоритмах стиснення продовжують активно використовуватися статистичні методи кодування. Застосування статистичного підходу до кодування даних інформаційного ресурсу (ДІР) тісно пов'язане з поняттям «реструктуризація даних». Це пов'язано з тим, що на ефективність статистичного кодування з позиції скорочення довжини на подання інформації впливають такі чинники:

- характер закону розподілу ймовірностей появи елементів у повідомленні (рівномірний, нерівномірний) [1-3];
- стратегія позиціонування окремих кодових конструкцій у загальній кодовій послідовності [3-5].

Характер закону розподілу ймовірностей появи елементів у повідомленні має значущий вплив на довжину кодових конструкцій, які присвоюються елементам повідомлення в процесі статистичного кодування. Так при рівномірному законі розподілу ймовірностей елементам

повідомлення присвоюються коди однакової довжини, тобто кодова послідовність складається з однакових по довжині кодових конструкцій [5]. У свою чергу при нерівномірному законі розподілу ймовірностей елементам повідомлення присвоюються різні по довжині кодові конструкції (довжина кодової конструкції залежить від частоти появи елемента в повідомленні).

Стратегія позиціонування кодових конструкцій полягає в визначення позицій кодових конструкцій окремих елементів у загальній кодовій послідовності [6,7]. Так використання при статистичному кодуванні маркерних роздільників або властивості префіксності призводить до зростання довжини кодової послідовності [7-9].

Для вирішення вищезазначених проблем, пов'язаних зі скороченням довжини на подання інформації при використанні методів статистичного кодування, необхідно забезпечити виконання наступних умов:

- нерівномірний розподіл ймовірностей появи елементів у повідомленні;
- виключити вплив низькочастотних складових (елементів) повідомлення на формування кодограми для скорочення як довжини кодового слова, так і кодової послідовності в цілому.

Для виконання вищевказаних умов у сучасних алгоритмах стиснення активно використовується концепція зовнішньої реструктуризації даних [10-15]. Суть даної концепції полягає в трансформації (перетворенні) вихідних даних в більш зручну форму з метою підвищення ефективності представлення кодованих даних.

Зовнішня реструктуризація ДІР може проводитися як на етапі підготовки вихідних даних до кодування, так і на етапі кодування [15].

Аналіз останніх наукових публікацій свідчить про те, що використання методів зовнішньої реструктуризації ДІР має ряд суттєвих недоліків [10-16]. Тому актуальним постає питання пошуку нових підходів реструктуризації даних. У працях [17-19] розроблений принципово новий підхід до реструктуризації ДІР - внутрішня реструктуризація. Суть даного підходу полягає у виявленні закономірностей у внутрішній структурі кодованих даних. В якості внутрішньої структури елемента повідомлення виступає його двійкове подання [17]. Інструментом для внутрішньої реструктуризації ДІР є кількісний ознака - ознака кількості серій одиниць (КСО) [18, 19].

Метою статті є дослідження та аналіз алгоритму статистичного кодування ДІР з використанням концепції внутрішньої реструктуризації з метою підвищення ефективності статистичного кодування з позиції скорочення довжини кодових конструкцій, які присвоюються елементам повідомлення.

II. ОСНОВНА ЧАСТИНА

На рис.1 представлений алгоритм, який демонструє реалізацію статистичного кодування даних інформаційного ресурсу з використанням концепції внутрішньої реструктуризації.

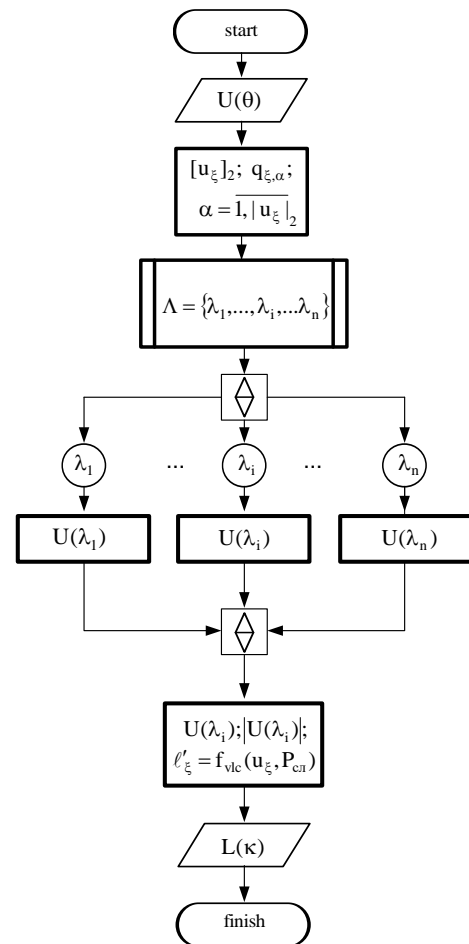


Рис. 1. Алгоритм статистичного кодування елементів повідомлення з використанням методу внутрішньої реструктуризації даних за кількісною ознакою

На початковому етапі елементи u_ξ повідомлення $U(\theta)$ представляються у двійковій формі $[u_\xi]_2$. Так елемент u_ξ повідомлення $U(\theta)$ складається з послідовності $[u_\xi]_2$ двійкових розрядів $q_{\xi, \alpha}$, $\alpha = \overline{1, |u_\xi|_2}$. Це задається наступним чином:

$$[u_\xi]_2 = \{q_{\xi, 1}; \dots; q_{\xi, \alpha}; \dots; q_{\xi, |u_\xi|_2}\}, \quad (1)$$

де $q_{\xi, \alpha}$ - α -й розряд елемента u_ξ .

$|u_\xi|_2$ - довжина елемента u_ξ , представленого в двійковій формі. $[u_\xi]_2$.

Наглядне представлення двійкової структури елемента u_ξ зображено на рис.2.

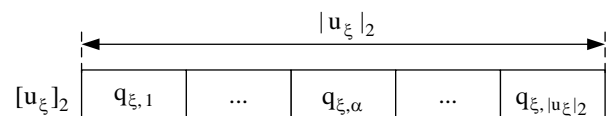


Рис. 2. Внутрішня структура елемента повідомлення

Далі визначається значення ознаки λ_i КСО для кожного елементу u_ξ повідомлення $U(\theta)$. Ознака λ_i КСО задається наступною системою виразів [19-21]:

$$\begin{cases} u_{\xi-1} \neq u_\xi \rightarrow \xi \leq \theta; \\ u_\xi \neq u_1 \rightarrow \xi > \theta. \end{cases} \quad (2)$$

де $u_{\xi-1}$ - $\xi-1$ -й елемент повідомлення $U(\theta)$.

θ - кількість елементів повідомлення $U(\theta)$.

Набір різних значень ознаки λ_i КСО описується наступним виразом:

$$\Lambda = \{\lambda_1, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_n\}, \quad (3)$$

де Λ - набір значень ознаки λ_i КСО;

λ_i, λ_n - значення i -ої та n -ої ознаки набору Λ .

Результатом застосування методу внутрішньої реструктуризації ДІР є кластеризація елементів u_ξ повідомлення $U(\theta)$ з однаковими значеннями ознаки λ_i КСО у множини $U(\lambda_i)$. Це задається наступним виразом:

$$U(\theta) \xrightarrow{f_{cl}} \{U(\lambda_1), \dots, U(\lambda_i), \dots, U(\lambda_n)\}, \quad (4)$$

де $f_{cl}(u_\xi, \lambda_i)$ - функція групування елементів u_ξ за значенням ознаки λ_i КСО;

$U(\lambda_i)$ - множина елементів з однаковими значеннями ознаки λ_i КСО, $i = \overline{1, n}$.

Таким чином, в результаті проведення кластеризації елементів u_ξ повідомлення $U(\theta)$ за ознакою λ_i КСО формуються множини $U(\lambda_i)$. Це задається наступним чином:

$$U(\lambda_i) = \{u_\xi | \lambda_i\}. \quad (5)$$

На наступному етапі відбувається статистичне кодування елементів u_ξ в межах сформованих множин $U(\lambda_i)$.

Статистичне кодування елементів u_ξ множини $U(\lambda_i)$, яка складається з κ - елементів (тобто $\xi = \overline{1, \kappa}$), задається наступним виразом:

$$U(\lambda_i) \xrightarrow{f_{vlc}} L(\kappa), \quad (6)$$

де $f_{vlc}(u_\xi, P_{cl})$ - функція формування статистичного коду ℓ'_ξ змінної довжини (variable length coding - VLC) для елементів u_ξ множини $U(\lambda_i)$.

Тут використовується службова інформація P_{cl} про розподіл значень ймовірностей появи елементів u_ξ у

множині $U(\lambda_i)$. З урахуванням цієї інформації на основі функції $f_{vlc}(u_\xi, P_{cl})$ формується код ℓ'_ξ , який описується наступною формулою:

$$\ell'_\xi = f_{vlc}(u_\xi, P_{cl}), \quad (7)$$

де ℓ'_ξ - код змінної довжини для елементів u_ξ множини $U(\lambda_i)$.

В результаті статистичного кодування елементів u_ξ множини $U(\lambda_i)$ утворюється послідовність $L(\kappa)$ кодів ℓ'_ξ , яка має наступний вигляд:

$$L(\kappa) = \{\ell'_1; \dots; \ell'_\xi; \dots; \ell'_\kappa\}, \quad (8)$$

де κ - кількість елементів у послідовності $L(\kappa)$ кодів ℓ'_ξ .

Код ℓ'_ξ , який присвоюється елементу u_ξ множини $U(\lambda_i)$, є кодом змінної довжини,

$$|\ell'_\xi|_2 = \text{VAR},$$

і складається з послідовності $[\ell'_\xi]_2$ двійкових розрядів $q_{\xi, \gamma}$, $\gamma = \overline{1, |\ell'_\xi|_2}$.

Структура $[\ell'_\xi]_2$ коду ℓ'_ξ , що присвоюється елементу u_ξ множини $U(\lambda_i)$ задається наступним виразом:

$$[\ell'_\xi]_2 = \{q_{\xi, 1}; \dots; q_{\xi, \gamma}; \dots; q_{\xi, |\ell'_\xi|_2}\}, \quad (9)$$

де $q_{\xi, \gamma}$ - γ -й розряд коду ℓ'_ξ .

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз використання в процесі статистичного кодування даних інформаційного ресурсу концепції внутрішньої реструктуризації кодованих даних. Досліджуваний алгоритм кодування даних дозволяє підвищити ефективність статистичного кодування даних з позиції скорочення довжини кодових конструкцій, які присвоюються елементам повідомлення. Це досягається за рахунок проведення кластеризації елементів повідомлення за ознакою кількості серій одиниць, що дозволяє знизити потужність кодованих даних. Використання концепції внутрішньої реструктуризації даних окрім скорочення кодових конструкцій, які присвоюються елементам повідомлення в процесі статистичного кодування, дозволяє:

- скоротити час, що витрачається на обробку даних в зв'язку з тим, що не потребує проведення перетворень над елементами повідомлення;
- підвищити безпеку інформаційного ресурсу за рахунок трансформації характеру закону розподілу ймовірностей появи елементів у повідомленні.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Salomon D. Data compression, image and sound: Trans. from English by. V.V. Chepyzhova / - M.: Technosphere, 2004. - 368 p.
- [2] Kudryashov B.D. Information theory. - St. Petersburg: Peter, 2009. - 320 p.
- [3] Gonzalez R. Digital Image Processing / R. Gonzalez, R. Woods. - M.: Technosphere, 2005. - 1073 p.
- [4] J. Miano. Formats and image compression algorithms in action [Text] K.: Triumph, 2013. — 336 p.
- [5] Pratt W. K., Chen W. H., Welch L. R. Slant transform image coding. Proc. Computer Processing in communications. New York: Polytechnic Press, 1969. pp. 63-84.
- [6] Miano J. Compressed image file formats: JPEG, PNG, GIF, XBM, BMP / by John Miano. 1999. 264 p.
- [7] Sindeev M., Konushin A., Rother C. Alpha-flow for video matting. Technical Report. 2012. P. 41–46.
- [8] Wallace G. K. The JPEG Still Picture Compression Standard Communication in ACM. 1991. V34. № 4. pp. 31-34.
- [9] S. Wang, X. Zhang, X. Liu, J. Zhang, S. Ma and W. Gao, "UtilityDriven Adaptive Preprocessing for Screen Content Video Compression," in IEEE Transactions on Multimedia, vol. 19, no. 3, pp. 660-667, March 2017.
- [10] W. J. Tsai and Y. C. Sun, "Error-resilient video coding using multiple reference frames," 2013 IEEE International Conference on Image Processing, Melbourne, VIC, 2013, pp. 1875-1879.
- [11] Barannik V., Alimpiev A., Bekirov A., Barannik D., Barannik N. Detections of sustainable areas for steganographic embedding // East-West Design & Test Symposium (EWDTS), (Novi Sad, Serbia, 29 sept. – 2 octob. 2017). Novi Sad, Serbia: 2017. – IEEE, 2017. pp. 555-558. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110028.
- [12] Y. Zhang, S. Negahdaripour and Q. Li, "Error-resilient coding for underwater video transmission," OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey, Monterey, CA, 2016, pp. 1-7.
- [13] D. Havrulov "The analysis of template method of video processing.," Proc. IEEE-2015 (AICT'2015), pp. 87 – 89, Oct – Nov , 2015
- [14] Vatolin D., Ratushnyak A., Smirnov M. and Yukin V., Methods of data compression. The device archiver, compression of images and videos. DIALOG MIFI, 2013, 384 p.
- [15] Wang, S., Kim, S. M., Yin, Z., & He, T. (2017). Encode when necessary: Correlated network coding under unreliable wireless links. ACM Transactions on Sensor Networks, 13(1). <https://doi.org/10.1145/3023953>
- [16] Lazarovych I., Melnychuk S., Kozlenko M. Optimization of entropy estimation computing algorithm for random signals in digital communication devices // Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 14th International Conference, 2018. – P. 1073-1078.
- [17] O. Stankiewicz, K. Wegner, D. Karwowski, J. Stankowski, K. Klimaszewski and T. Grajek, "Encoding mode selection in HEVC with the use of noise reduction," 2017 International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP), Poznan, 2017, pp. 1-6.
- [18] Barannik V., Bekirov A., Lekakh A. and Barannik D. A steganographic method based on the modification of regions of the image with different saturation Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science, (TCSET'2018): XIVth Intern conf., (Lviv-Slavske, Ukraine, febr. 23–25, 2018). Lviv-Slavske: 2018. pp. 542-545. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336260.
- [19] V. Barannik, I. Tupitsya, S. Shulgin, S. Sidchenko and V. Larin. The application for internal restructuring the data in the entropy coding process to enhance the information resource security // 2016 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Yerevan, Armenia, 2016, pp. 561-565. DOI:10.1109/EWDTS.2016.7807749
- [20] <http://sipi.usc.edu/database/database.php?volume=misc&image=12#top>
- [21] Бараннік В.В. Технологія кластеризації даних інформаційного ресурсу за кількісною ознакою ресурса / В.В. Бараннік, І.М. Тупиця, В.В. Бараннік, А.Д. Сорокун // Наукоємні технології № 4(40) – К., 2018. – С. 398-404. DOI: 10.18372/2310-5461.40.13264

Теорія та Концепція Цифрового Опрацювання Поліфункціональних Даних

Наталія Возна

Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Тернопільський національний економічний університет
Тернопіль, Україна
nvozna@ukr.net

Theory and Concept of Digital Processing of Multifunktional Data

Nataliia Vozna

Department of Specialized Computer Systems
Ternopil National Economic University
Ternopil, Ukraine
nvozna@ukr.net

Анотація — Викладена концепція теорії структуризації потоків даних дозволяє чітко визначити її задачі в інформаційних системах, комп'ютерних та комп'ютеризованих мережах. Проведено аналіз атрибутів та компонентів теорії структуризації у розрізі наукових галузей. Оскільки сьогодні практично всі напрямки розвитку сучасної науки тісно пов'язані з інформаційними технологіями, то узагальнення теорії та методології структуризації інформаційних потоків є важливою науковою проблемою. Досліджені атрибути та кванти структуризації поліфункціональних даних в унітарному теоретико-числовому базисі для бінарних зображень. Новизну складають розроблені принципи структуризації оптично представлених даних на основі одиничних U-кодів у системі ортогональних функцій унітарного теоретико-числового базису.

Abstract — The expounded conception of data flow structuring theory allows to define clearly the tasks of this theory in information systems and computer networks. The analysis of attributes and components of the theory of structuring in the context of scientific fields has been made. Since today almost all areas of modern science are closely related to information technology, the generalization of the theory and methodology of structuring the information flow is an important scientific problem. Studied attributes and multifunctional quantum structuring data in a unitary theoretical and numerical basis for binary images. Novelty up the principles structuring the data optically isolated from U-codes in the system of orthogonal functions unitary system.

Keywords — structuring, data flow, structured data, distributed computer systems, information processes.

Ключові слова — структуризація, потоки даних, структуризовані дані, розподілені комп'ютерні системи, інформаційні процеси.

I. ВСТУП

Поняття структуризації, в широкому аспекті, охоплює теорію систем та взаємодію їх компонентів, теорію інформації та архітектури комп'ютеризованих систем [1].

Фундаментальним прикладом структуризації інформаційних конгломератів є структура та інформаційна

організація ДНК, яка демонструє роль відбору та виживання в системі структурно стійкіших та інформаційно досконаліших форм живої матерії. Тому усвідомлення концепції структуризації процесів, інформаційних даних та узагальнення фундаментальних теоретичних основ є актуальною проблемою.

Швидкий розвиток сучасних інформаційних технологій, комп'ютерних мереж та комп'ютеризованих систем викреслює дослідження проблеми структуризації в даній галузі як найперспективнішою задачею, оскільки практично всі напрямки розвитку сучасної цивілізації тісно пов'язані з інформатизацією суспільства та відповідною структуризацією інформаційних потоків [2].

Щоб краще зрозуміти роль інформації та ефективно використовувати її у процесі функціонування систем, необхідно знати її структуризацію. Найвищим рівнем структуризації інформації є виділення її як системи для конкретного об'єкта і відповідних підсистем [3]. Проте будь-яку систему можна розчленовувати аж до виявлення неподільних одиниць.

II. ФУНКЦІЇ СТРУКТУРИЗАЦІЇ

Часто користуються поняттями логічних і фізичних структур. Поняття логічних структур особливо цінне при проектуванні та використанні складних автоматизованих систем, банків і баз даних.

Логічний аспект структури даних визначає загальні зв'язки між окремими елементами даних безвідносно до способу їх реєстрації та зберігання. До логічних структур (залежно від обраної структуризації) можна віднести поле, запис, файл; атрибут, групу, групове відношення, статтю, файл, базу даних і т. ін. У даному разі поняття «поле» і «атрибут» — найменші структурні одиниці, що не піддаються подальшому змістовному розчленуванню.

Фізичний аспект структури даних пов'язується зі способом реєстрації даних на носіїві чи способом запам'ятовування їх у пам'яті процесора. В умовах використання сучасних процесорів фізичними структурними одиницями є біт, байт, кілобайт, мегабайт,

гігабайт і т. ін; у паперових документах — позиція, рядок, графа тощо.

У випадках, коли можна візуально сприймати інформацію на носіях, користуються таким поняттям мінімальної її структурної одиниці як реквізит (атрибут). Реквізити можуть характеризувати якісну чи кількісну сторону інформаційної сукупності.

Повний набір показників, що характеризують певний об'єкт, називають позицією (наприклад, рядок класифікатора), а ті, що описують господарську операцію, — документом. Ряд однотипних документів із різним значенням створюють інформаційну сукупність - так званий масив (машинний аналог - файл).

За видом взаємозв'язку між окремими елементами структури дані бувають лінійні (однорівневі) та нелінійні (ієрархічні чи багаторівневі).

Лінійні структури можуть бути послідовні (з упорядкованими чи неупорядкованими елементами) та рядкові (з фізично розкиданими і логічно пов'язаними з допомогою ланок зв'язку елементами).

Нелінійні структури включають складні списки, дерева, мережі, таблиці і їх комбінації (гібридні).

Структури зі складними списками складаються з інших списків; деревоподібні передбачають ієрархічний зв'язок елементів; мережні мають довільний зв'язок між елементами, табличні структури мають вигляд 2Д, 3Д або МД-таблиць.

Можливість структуризації інформації і переходу від одних структур до інших (частіше від традиційних безмашинних до машинних і навпаки) забезпечує основу для ефективного аналізу, оцінювання та опрацювання інформації, її перегрупування. При цьому вдається уникнути дублювання й надмірності.

Викладення концепції вирішення проблеми структуризації інформаційних процесів та даних дозволяє підійти до узагальнення фундаментальної теорії структуризації та піти шляхом систематизації наукових дисциплін, які є атрибутами та компонентами теорії та методології структуризації. На рис.1 приведено приклад такої систематизації.

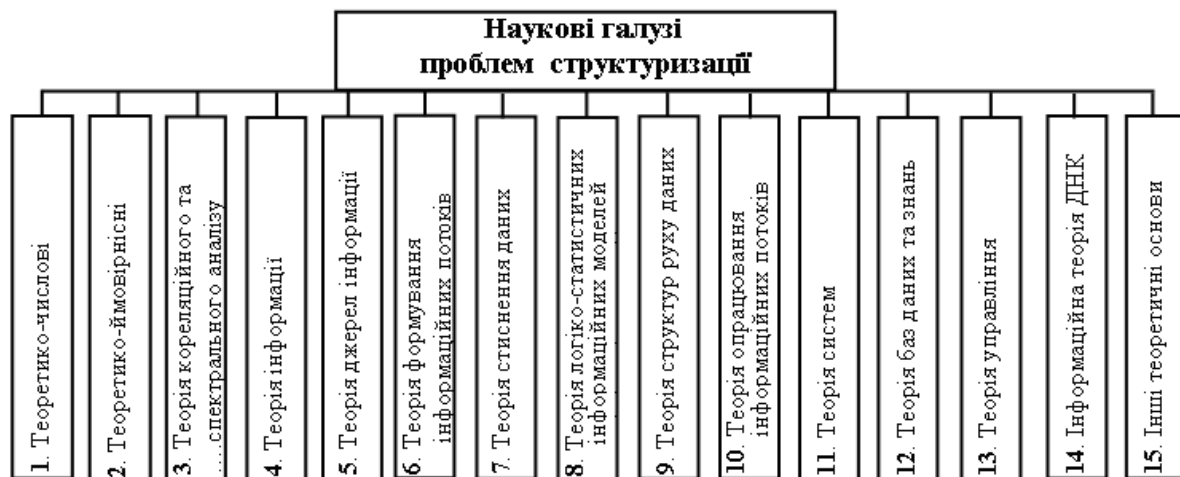


Рис.1. Класифікація атрибутів теорії структуризації.

III. ФОРМУВАННЯ ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНИХ ДАНИХ

Успішне вирішення проблеми структуризації даних у розподілених комп'ютерних системах концептуально пов'язано з доцільним застосуванням широкого класу фундаментальних теоретичних засад у галузі інформатики, кібернетики та системотехніки. При цьому необхідно сформулювати основні атрибути положення та інформаційні процедури узагальненої теорії структуризації даних.

Теоретичні та прикладні резерви такого узагальнення дозволяють суттєво вдосконалити математику формування, передавання та цифрового опрацювання даних та досягнути відповідного значного підвищення ефективності функціонування компонентів, алгоритмів та результативності використання опрацьованих даних у розподілених комп'ютерних системах..

Впорядкування, структуризація різних видів даних, побудова моделей складних комп'ютеризованих систем є актуальною задачею, яка направлена на вдосконалення теорії, методології, практики їх проектування та діагностики штатності функціонування в реальному

масштабі часу. В методологічному плані вирішення такої задачі потребує врахування проблемної орієнтованості, цілісності та складності, невизначеності, адаптивності, а також універсальності комп'ютеризованої системи. При цьому відповідно визначається ступінь цілеспрямованості та мета функціонування системи, можливості опису системи однією моделлю, оцінка ентропії, що відображає необхідну кількість керуючої інформації, можливості пристосування системи до впливу зовнішніх факторів, а також опис системи математичними моделями, що мають однакову структуру незалежно від класу об'єктів – джерел інформації [4].

Аналіз методів структуризації даних, обґрунтування перспективного напрямку розвитку теорії, методології та техніки їх структуризації в сучасних комп'ютеризованих системах є актуальною задачею сьогодні.

Узагальнена схема функцій концепції структуризації даних при виконанні функції формування, передавання, цифрового опрацювання, зберігання та використання структуризованих фреймів для управління об'єктами зображена на рис.2.

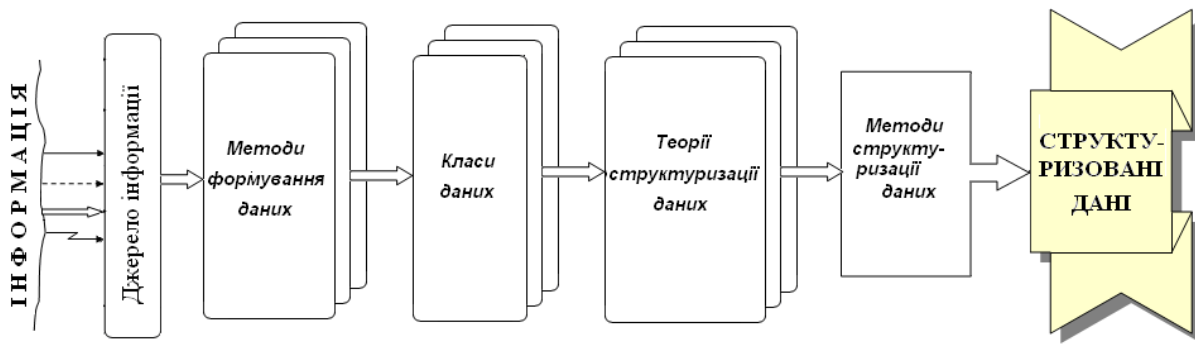


Рис.2. Узагальнена схема функцій концепції структуризації даних.

Приведена на рис.2 схема концепції продукційної взаємодії функцій структуризації даних показує шлях формування та математико-алгоритмічного опрацювання даних згідно їх проблемної орієнтації. Наприклад, розпізнавання образів, стиснення даних, захист від несанкціонованого доступу, результати розв'язаних задач та ін.

Прикладом успішного застосування основ теорії структуризації даних є кодування даних у різних теоретико-числових базисах (ТЧБ): Унітарному, Хаара, Радемахера, Крестенсона, Уолша та Галуа [2]. Кодування даних в унітарному ТЧБ є найбільш історичним. Унітарний ТЧБ використовується при високопаралельному опрацюванні зображень [3], цифровій голографії, томографії, при формуванні цифрових кодів у багатоканальних АЦП, в якості проміжних кодових систем при виконанні міжбазисних перетворень, в матричних суматорах та перемножувачах Хаара-Крестенсона та інш. Незважаючи на значну надлишковість представлення даних у цьому базисі, він має широке застосування в науці та техніці, у тому числі у розвитку теорії та методів структуризації даних. Тому задачу узагальнення теорії структуризації поліфункціональних даних (ПФД) доцільно розглянути на основі унітарного ТЧБ.

IV. АТРИБУТИ СТРУКТУРИЗАЦІЇ ПФД В УНІТАРНОМУ ТЧБ

В якості найменшого неділимого кванта структури графічно поданої відео інформації прийемо крапку чорного кольору або її зворотного білого зображення на чорному фоні (рис.3.6) [5].

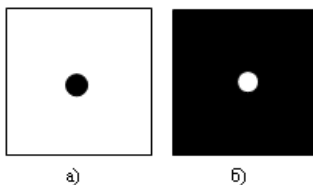


Рис.3 - Елементарна одиниця (квант) структури ПФД.

Присвоїмо даній одиниці елементарного кванту структури ПФД класу відео-даних числове значення $SO = 2^{\pm k}$ - у двійковій системі числення або $SO = 10^{\pm m}$ - у широковживаній десятковій системі числення.

Таким чином у залежності від вибраного заданого числового діапазону оцінки структурної складності поліфункціонального зображення (ПФЗ) маємо: $SO = 1$ при $k = 0, m = 0$.

У залежності від зображення крапки на відповідному фоні отримуємо структурну складність (СС) відповідно для:

- а) білий фон - $SO = 0.0$, де $Sx = 0$; (1)
- б) чорний фон - $SO = 1.1$, де $Sx = 1$.

Таким чином, згідно рис.3, біла крапка на чорному фоні - $SO_1 = (\dot{a})$; чорна крапка на білому фоні - $SO_0 = (\dot{a})$. При цьому вважаємо, що діаметр графічного прямого та інвертованого символу відповідає $d = 1$, тобто одному пікселю двовірної матриці дворівневого Хеммінгового простору.

Отже, оцінки СС таких зображень, без прив'язки до координат, не перевищує двох біт.

При $K \neq 0$ квант СД може бути табульований в областях $Sx < 1$ або $Sx > 1$.

Наприклад: при $K = 0.5; 0.25; 0.125; \dots$ така одиниця СД набуде відповідних значень $0.1; 0.01; 0.001; \dots$, при $K = 2; 4; 8; \dots - 10; 100; 1000; \dots$

Визначена одиниця кванту СС доцільна до застосування у сучасних комп'ютеризованих інформаційних системах. Відомий аналітичний зв'язок між двійковою і десятковою системами числення дає можливість відповідного представлення двійкових даних через десяткові числа.

Можливе практичне задання кванта СС при $K \neq 0$ у вигляді десяткових чисел відповідно [1, 5]:

- $Sx < 1$ $0.1; 0.01; 0.001; \dots$
- $Sx > 1$ $10; 100; 1000; \dots$

У той же час при необхідності оцінки СС напівтонових чорнобілих зображень оцінка кванта СД повинно відповідати визначенню (1).

Наприклад зображення $SO_{0.10101}$ і $SO_{0.10101}$ показані на рис.4, де сірий фон має бітову оцінку ступеня чорного чи білого 0.10101 у порівнянні з нулем та одиницею.

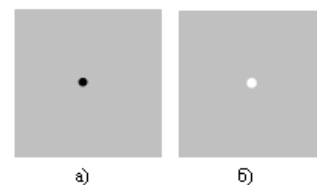


Рис.4 - Оцінка СД кванту SO на фоні півтонових фонів (а, б – сірий фон).

Оцінка СС чорної чи білої крапки на певному фоні дозволяє ввести числовий розрахунок СД для напівтонових структур відео даних.

Наприклад подання квантів СС на фоні деяких "сірих" фонів та застосування унітарного ТЧБ (U-ТЧБ) маємо: (рис.5)

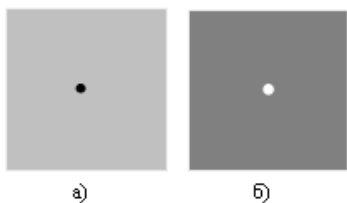


Рис.5 - Одиниця СС на сірому фоні.

Оцінка СС для розглянутого рисунку в U-ТЧБ наступна: SI_{0011} ; SO_{0011} при п'ятирівневому квантуванні

сірого фону та $SI_{0000...11111}$; $SO_{0000...1111111}$ при n -рівневому квантуванні сірого фону.

У сучасних відео системах таку одиницю називають пікселем. Упустивши розгляд кванту SO_x , який є інвертованим зображенням кванту СС SI_x , де x – код фону та прийнявши фон як $x = 0$ виконаємо систематизацію наступних елементарних структур СД.

Почнемо з поняття структури прямої лінійної послідовності рівномірно або довільно віддалених квантів СС (рис.6)

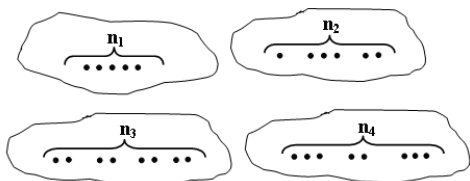


Рис.6 - Елементи СД побудовані з n -квантів SI_0 в U-ТЧБ.

З рис.6 видно, що незалежно від структури послідовності SI_0 в U-ТЧБ головним параметром числової оцінки СС є число (n) SI_0 .

Наступним атрибутом СД введемо напрям вектору лінійної послідовності SI_0 у декартових координатах (рис.7).

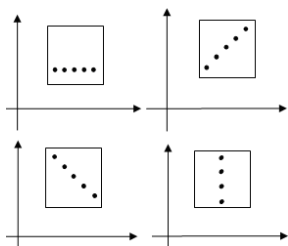


Рис.7 - Елемент СД згідно вектора напрямку n, SI_0, α . $\alpha \in 0 \div 360^\circ$.

Наступний елемент СД просторовий (рис.8).

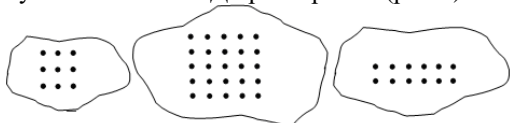


Рис.8 - Просторовий елемент СД $n \cdot SI_0 \times m \cdot SI_0$

Сукупність квантів СД лінійно поданих без розривів є елемент – лінія (рис.9) довжиною L .

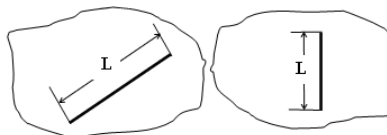


Рис.9 - Елемент СД – лінія $SI_0 - L, \alpha$.

Пересічення ліній розраховуємо як структурне адитивно-мультиплікативне об'єднання СС (рис.10).

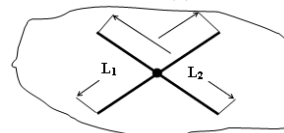


Рис.10 - Структурне об'єднання елементів СД.

Дане структурне об'єднання СД описується логічним рівнянням типу: $SS = L_1 \wedge L_2 \wedge SI_0$.

CONCLUSION

Створення фундаментальних основ теорії структуризації даних стає інструментом підвищення ефективності та розширення функцій сучасних інформаційних систем та успішного вирішення завдань переходу до інформаційного суспільства.

Викладені систематизовані елементи структуризованих графічних даних в унітарному ТЧБ дозволяють формалізувати багато явищ описів ПФД як СД. У той же час унітарність числових величин приводить до певних функціональних обмежень застосування U-базису в інформаційних системах та низьку ентропію такого класу, що потребує формалізованого застосування СД у інших ТЧБ. Оскільки в U-ТЧБ не фіксується структурна організація СС, а тільки їх число. Існує багато задач теорії ймовірностей, ентропійного аналізу, де U-ТЧБ може ефективно застосовуватись у прикладних інформаційних задачах.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Возна Н.Я. Структуризація поліфункціональних даних: теорія, методи та засоби / Н.Я.Возна // Монографія. – Тернопіль: ТНЕУ, 2018. – 378с.
- [2] J Сергієнко І. В. Інформатика в Україні: становлення, розвиток, проблеми. — К.: Наук. думка, 1999. — 354 с.
- [3] Ахо, А. Структури даних и алгоритмы. Пер. с англ. Учебное пособие / Альфред В. А. Ахо, Джон Э. Хопкрофт, Джеффри Д. Ульман. -М.: Вильямс, 2000. - 384 с.
- [4] Nykolaychuk Y.M. Theory information sources. – Ternpoil: LLC "Terno-graph", 2008. – 536 p.
- [5] Возна Н. Я. Структуризація поліфункціональних даних в унітарному теоретико-числовому базисі / Н.Я.Возна // Міжнародний науково-техн. журнал "Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології".- 2015.- №(29).- С. 35–44.

Методи та Засоби Трійкових Симетричних Перетворень для Цифрової Обробки Інформації

Артем Ізмайлов
кафедра комп'ютерних наук та інформаційних систем
Прикарпатський національний університет
Івано-Франківськ, Україна
aiartefact@gmail.com

Methods and Devices of Symmetric Ternary Transforms for Digital Information Processing

Artem Izmailov
dept. of Computer Science and Information Systems
Prekarpathian National University
Ivano-Frankivsk, Ukraine
aiartefact@gmail.com

Анотація—На основі трійкових симетричних функцій синтезовано відповідні дискретні ортогональне та вейвлет-перетворення. Для застосування синтезованих методів для цифрової обробки інформації запропоновано засоби відповідних перетворень. Доведено ефективність застосування запропонованих засобів для зменшення обсягу пам'яті для зберігання даних у системах цифрової обробки інформації у прикладних галузях.

Abstract—Orthogonal and wavelet transforms are basic methods for processing of the digital data. Properties of these methods depend on function systems they are based on. At the same time, existing transforms do not always satisfy rising demands for data processing quality. Therefore, synthesis of the new transforms is an actual problem of digital information processing. This paper deals with the discrete orthogonal and wavelet transforms synthesized on the basis of symmetric ternary functions. In order to apply their advantages in digital information processing, the respective devices were introduced. These devices were applied in systems for processing of the high correlated data (gas accounting and transmission control; control of the drilling process for oil and gas wells). Application of the introduced devices allowed to reduce the amount of memory required for data storage up to 20% depending on data type.

Ключові слова—цифрова обробка інформації; дискретне ортогональне перетворення; дискретне вейвлет-перетворення; трійкові симетричні функції

Keywords—digital information processing; discrete orthogonal transform; discrete wavelet transform; symmetric ternary functions

I. ВСТУП

Розвиток науки і техніки зумовив появу нових задач у різних галузях економіки, управління, виробництва та зв'язку. Для розв'язання цих задач застосовано технічні системи, які функціонують під управлінням комп'ютерних систем. Функціонування таких систем пов'язане з обробкою цифрових даних, яка забезпечена застосуванням методів та засобів цифрової обробки інформації (ЦОІ) [1–5].

Основними методами обробки цифрових даних є ортогональні та вейвлет-перетворення, в основі яких лежать системи функцій, якими визначено властивості відповідних перетворень [1–5]. У зв'язку з розширенням переліку прикладних галузей ЦОІ, існуючі перетворення не завжди задовольняють вимоги щодо якості результатів обробки даних [1–7]. Цим зумовлена актуальність синтезу нових перетворень та удосконалення існуючих.

Актуальним завданням ЦОІ є зменшення обсягу пам'яті для зберігання даних [1, 3]. Одним із підходів до розв'язання цього завдання є застосування ортогональних та вейвлет-перетворень [1–5]. При цьому підході зберігають не самі дані, а коефіцієнти перетворення, частина з яких рівна нулю або близька до нуля. Такі коефіцієнти відкидають, а при відновленні даних – заміняють нулями [1–5].

Аналіз останніх досліджень вказує на те, що трійкові симетричні функції (ТСФ) раніше не застосовувались у якості основи ортогональних та вейвлет-перетворень [2,

6, 7]. При цьому, доведено ефективність застосування трійкового симетричного кодування, породженого ТСФ, у системах ЦОІ, яке забезпечило приріст ефективності в межах 25÷30% за критерієм інформаційної потужності кодової матриці у порівнянні з відомими кодовими системами [8, 9]. Відповідно, застосування трійкового симетричного кодування у системах ЦОІ зменшує обсяг пам'яті для зберігання даних. Цим зумовлена актуальність аналізу ефективності застосування ТСФ у якості базису ортогональних та вейвлет-перетворень.

Метою дослідження є зменшення обсягу пам'яті для зберігання корельованих даних шляхом розробки методів та засобів цифрової обробки інформації на основі трійкових симетричних перетворень.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в успішному синтезі методів та засобів дискретних ортогонального та вейвлет-перетворень на основі системи ТСФ та їх застосуванні у системах ЦОІ корельованих даних, що дозволило зменшити обсяг пам'яті для зберігання даних у таких системах.

II. ТРІЙКОВЕ СИМЕТРИЧНЕ ОРТОГОНАЛЬНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ

В основі трійкових симетричних перетворень лежить система ТСФ. При цьому, у зв'язку з недоліками цієї системи [10, 11] застосовується система ортогоналізованих добутоків ТСФ. На основі функцій цієї системи безпосередньо синтезовано трійкове симетричне ортогональне перетворення (ТСОП), яке обчислюється у вигляді

$$Y = T_n X, \quad (1)$$

де Y – вектор коефіцієнтів перетворення, T_n – матриця перетворення розміру n , X – вектор вхідних даних.

Матриця T_n у виразі (1) є ортогональною, що забезпечено множенням матриці значень системи ортогоналізованих добутоків ТСФ на нормуючі множники, уведені у [11]. Матриця ТСОП розміру 9 T_9 має наступний вигляд

$$T_9 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -\sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & -\sqrt{2} & -\sqrt{2} & -\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ -3/2 & 0 & 3/2 & 0 & 0 & 0 & -3/2 & 0 & 3/2 \\ 3/2 & 0 & -3/2 & 0 & 0 & 0 & -3/2 & 0 & 3/2 \\ 0 & 0 & 0 & -3/\sqrt{2} & 0 & 3/\sqrt{2} & 0 & 0 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & -\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & -\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ -\sqrt{3}/2 & \sqrt{3} & -\sqrt{3}/2 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3} & \sqrt{3}/2 \\ 1/2 & -1 & 1/2 & -1 & 2 & -1 & 1/2 & -1 & 1/2 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

У зв'язку з ортогональністю матриць вигляду (2) обернене ТСОП обчислюється у вигляді

$$X = (T_n)^T Y, \quad (3)$$

де $(T_n)^T$ – транспонована матриця перетворення розміру n .

Матриці виду T_n допускають обчислення матриць старших порядків на основі молодших. На основі цієї властивості розроблено швидкий метод реалізації перетворень (1) та (3), який наведено у [11]. Зазначений швидкий метод ТСОП застосовано для створення засобу ТСОП, структурна схема якого наведена на рис. 1.

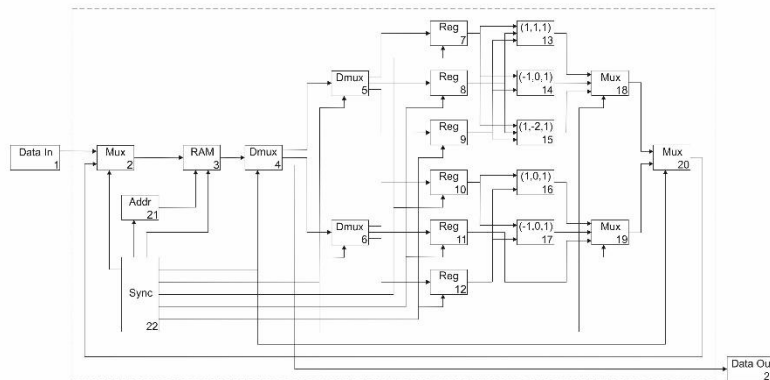


Рис. 1. Структурна схема засобу ТСОП

Засіб ТСОП (рис. 1) складається з інформаційного входу 1, мультиплексорів 2, 18-20, блоку пам'яті 3, демультіплексорів 4-6, регістрів пам'яті 7-12, операційного блоку $(x_0+x_1)+x_2$ 13, операційних блоків $(-x_0+x_1)$ 14, 17, операційного блоку $(x_0+x_1)-2x_2$ 15, операційного блоку (x_0+x_1) 16, генератора адрес 21, блоку синхронізації 22 та інформаційного виходу 23. Для спрощення процедури синтезу та моделювання роботи запропонованого засобу, його реалізовано засобами ПЛІС. Така реалізація передбачає, також, спрощення імплементації засобу ТСОП у системах ЦОІ.

III. ТРИЙКОВЕ СИМЕТРИЧНЕ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ

Властивості функцій системи ортогоналізованих добутків ТСФ вказують на те, що їх можна застосувати у якості вейвлет-функцій для синтезу відповідного дискретного трійкового симетричного вейвлет-перетворення (ТСВП) [10]. При цьому, у такому перетворенні, зважаючи на особливості побудови системи ТСФ, застосовано два материнські вейвлети та одну масштабну функцію [12]. Першим материнським вейвлетом визначено функцію, значення якої наведено у другому рядку матриці (2), другим – функцію у третьому рядку матриці (2), а у якості масштабної функції визначено одиничну функцію (перший рядок матриці (2)).

Дискретне ТСВП у обчислювальних засобах реалізовано у фільтровій формі із застосуванням операцій згортки та трійкової децимації (проріджування). Для позначення цієї операції та оберненої до неї уведено відповідні оператори

$$\downarrow_3 [X], \quad (4)$$

де X – дискретний вхідний набір даних довільної скінченної довжини,

$$\uparrow_3 [X]. \quad (5)$$

Оператор (4) з вхідного набору даних X залишає кожен третій елемент, відкидаючи решту, а оператор (5) – після кожного елемента вхідного набору даних X додає два нульових елементи. Із застосуванням операторів (4) та (5) пряме дискретне ТСВП у згортковій формі записано у вигляді

$$\begin{aligned} a_{j+1} &= \downarrow_3 [a_j * h^*], d1_{j+1} = \downarrow_3 [a_j * g1^*], \\ d2_{j+1} &= \downarrow_3 [a_j * g2^*], \end{aligned} \quad (6)$$

де a_j – послідовність апроксимуючих коефіцієнтів, одержаних на j -ій ітерації алгоритму ТСВП, $d1_j$ – послідовність деталізуючих коефіцієнтів, одержаних на j -ій ітерації алгоритму ТСВП, які відповідають першому материнському вейвлету, $d2_j$ – послідовність деталізуючих коефіцієнтів, одержаних на j -ій ітерації алгоритму ТСВП, які відповідають другому материнському вейвлету, $*$ – операція згортки, h^* , $g1^*$, $g2^*$ – дискретні фільтри

декомпозиції, які двоїсті до фільтрів відновлення, наведених у таблиці 1.

TABLE I. КОЕФІЦІЄНТИ ДИСКРЕТНИХ ФІЛЬТРІВ ВІДНОВЛЕННЯ ДЛЯ ТСВП

Позначення фільтру	Коефіцієнти фільтру	Функція, якій відповідає фільтр
$h[n]$	$\left\{ \frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}} \right\}$	Масштабна функція
$g1[n]$	$\left\{ -\frac{1}{\sqrt{2}}, 0, \frac{1}{\sqrt{2}} \right\}$	Перший материнський вейвлет
$g2[n]$	$\left\{ \frac{1}{\sqrt{6}}, -\sqrt{\frac{2}{3}}, \frac{1}{\sqrt{6}} \right\}$	Другий материнський вейвлет

У термінах операторів (4) та (5) обернене дискретне ТСВП у згортковій формі записано у вигляді

$$a_j = \uparrow_3 [a_{j+1}] * h + \uparrow_3 [d1_{j+1}] * g1 + \uparrow_3 [d2_{j+1}] * g2, \quad (7)$$

де $h, g1, g2$ – дискретні фільтри відновлення (табл. 1).

У загальному випадку, у виразах (6) та (7) індекс $j \in Z$, однак, у практиці ЦОІ приймають $j \in N_0$, причому, у якості послідовності апроксимуючих коефіцієнтів a_0 (початкове наближення) покладають послідовність значень вхідного набору даних X [2, 5, 6].

На основі виразів (6) та (7) реалізовано процедуру обчислення ТСВП у відповідному апаратно-програмному засобі. Апаратна складова запропонованого засобу реалізована за допомогою мікроконтролера, а програмна – у вигляді додатку для встановлення на робочу станцію, до якої підключено апаратну складову. Така організація запропонованого засобу ТСВП спрощує його інтеграцію у системи ЦОІ, зокрема аналіз та зберігання результатів перетворення.

IV. ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАСОБІВ ТРИЙКОВИХ СИМЕТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ

Дослідження ефективності застосування ТСОП для зменшення автокореляції вхідних даних з метою їх ущільнення вказали на максимальну перевагу цього перетворення за заданим критерієм у порівнянні з перетвореннями Волша-Адамара та Хаара (як найбільш близьких за властивостями та областю застосування) у випадку високих ($>0,7$) значень автокореляції. Звідси випливає, що одним із застосувань запропонованого засобу ТСОП є системи обліку та контролю параметрів передачі газу, оскільки, вони оперують даними з високим рівнем автокореляції. Зокрема, оцінено ефективність застосування запропонованого засобу у якості компонента пристроїв, які архівують значення отриманих показників [13]. Застосування засобу ТСОП дозволило знизити значення автокореляції архівованих даних і збільшити ступінь їх ущільнення. Результати оцінки приросту кількості даних для зберігання у пристроях обліку та контролю параметрів передачі газу наведено у таблиці 2 та обчислено за наступною формулою

$$\left(\frac{T}{S} - 1\right) \cdot 100\% . \quad (8)$$

де S – кількість записів у архіві без застосування ТСОП, T – кількість записів у архіві із застосуванням ТСОП.

TABLE II. ПРИРІСТ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗБЕРІГАННЯ ДАНИХ ПРИСТРОЯМИ ОБЛІКУ ТА КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ПЕРЕДАЧІ ГАЗУ

№	Шифр пристрою	Тип запису	S	T	Приріст ефективності зберігання даних, %
1	ОЕ-22ЛА	Добовий	64	77	20,3125
2		Добовий	126	153	21,4286
3	ТЕМР-ОЕ	Зміна стану лічильника	540	657	21,6667
4		Зміна у конфігурації лічильника	128	155	21,0938

Результати проведеного аналізу ефективності (табл. 2) застосування запропонованого засобу ТСОП у якості компонента пристроїв обліку та контролю параметрів передачі газу, вказали на підвищення ефективності зберігання даних в середньому на 20%.

Запропонований засіб ТСВП застосовано у якості компонента пристрою реєстрації інформації комплексу засобів наземного контролю і керування процесом буріння нафтових і газових свердловин СКУБ-М2 [14]. Цей пристрій забезпечує ведення архіву даних, які пов'язані з циклічними процесами у буровому обладнанні і допускають ущільнення шляхом відкидання близьких до нуля коефіцієнтів вейвлет-перетворення.

Для оцінювання ефективності запропонованого засобу здійснено порівняння значень критерію середньої абсолютної похибки у відсотках MAPE (mean absolute percentage error) відновлення даних (9) [3] за частиною коефіцієнтів перетворення, одержаних для ТСВП (ST), вейвлета Хаара (haar), вейвлета Добеші 4-го порядку (db4) та біортогонального вейвлета з параметрами 2.6 (bior2.6) при відновленні послідовностей значень технологічного параметра моменту механічного лівого (табл. 3)

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \frac{|X(i) - X_r(i)|}{X(i)} \cdot 100\% , \quad (9)$$

де N – кількість відліків у векторі вхідних даних X , $X(i)$ – вхідні дані, $X_r(i)$ – відновлені після ущільнення дані.

TABLE III. СЕРЕДНІ ЗНАЧЕННЯ MAPE ДЛЯ РІЗНИХ ВЕЙВЛЕТІВ ПРИ ВІДКИДАННІ 30% КОЕФІЦІЄНТІВ ПЕРЕТВОРЕННЯ

№	Вейвлет	Середнє значення MAPE, %
1	ST	3,2359
2	haar	4,0129
3	db4	3,4910
4	bior2.6	3,9712

З даних у таблиці 3 випливає, що застосування засобу ТСВП забезпечило наступний приріст ефективності за критерієм мінімальної похибки відновлення (9): у порівнянні з haar – 20%, db4 – 8%, bior2.6 – 18,5%.

ВИСНОВКИ

Застосування ТСОП та ТСВП забезпечило приріст ефективності ущільнення корельованих даних у системах ЦОІ на рівні 8÷20%. Одержані показники вказують на відповідне підвищення ефективності використання пам'яті у таких системах, що рівнозначно зменшенню обсягу пам'яті для зберігання даних при незмінному рівні функціональності. При цьому, однак, досягнутий результат забезпечений втратами частини інформації у межах допустимого значення похибки відновлення даних, яке для проаналізованих систем складає 5%. Подальші дослідження полягають у розширенні функціоналу запропонованих засобів та їх застосуванні у системах ЦОІ відмінних від проаналізованих.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Э. Айфичер, Б. Джервис. Цифровая обработка сигналов: практический подход, 2-е издание: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 992 с.
- [2] P.S. Addison, The Illustrated Wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance (Second Edition) / P.S. Addison, CRC Press, 2016, P. 446.
- [3] Д. Сэломон, Сжатие данных, изображений и звука / Д. Сэломон; пер. с англ. В.В. Чепыжова. – М.: Техносфера, 2004. – 368 с.
- [4] N. Ahmed, K.R. Rao, Orthogonal Transforms for Digital Signal Processing, Springer-Verlag, 1975.
- [5] И. Добеши, Десять лекций по вейвлетам: Пер. с англ. / И. Добеши. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 464 с.
- [6] A. Thompson, The Cascading Haar Wavelet Algorithm for Computing the Walsh–Hadamard Transform / A. Thompson // IEEE Signal Processing Letters. – July 2017. – Vol. 24, No. 7. – P. 1020-1023. doi: 10.1109/LSP.2017.2705247
- [7] S. Prasad, Information Fusion in the Redundant-Wavelet-Transform Domain for Noise-Robust Hyperspectral Classification / S. Prasad, W. Li, J.E. Fowler, L.M. Bruce // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – September 2012. – Vol. 50, No. 9. – P. 3474-3486. doi: 10.1109/TGRS.2012.2185053
- [8] A. Izmailov, "Effectiveness analysis of bases and function systems used in digital information processing," in Materiały 52 Konferencji Studenckich Kół Naukowych Pionu Hutniczego, Kraków, 2015.
- [9] B. Hayes, Computing science. Third base. A reprint from American Scientist, the magazine of Sigma Xi, the Scientific Research Society, vol. 89, Nr. 6. November–December 2001, pp. 490-494
- [10] A. Izmailov, L. Petryshyn, "Symmetric ternary functions and their application in orthogonal transforms," 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Kiev, 2017, P. 836-841. doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100364
- [11] А.В. Измайлов, Л.Б. Петришин, "Цифрова обробка інформації в розосереджених системах управління із застосуванням швидкого ортогонального перетворення на основі трійкових симетричних функцій," Системи обробки інформації, № 3 (154), сс. 79-89, 2018.
- [12] А.В. Измайлов, Л.Б. Петришин, "Дискретне трійкове симетричне вейвлет-перетворення та його застосування для цифрової обробки інформації у розподілених системах управління," в Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання: матеріали статей Міжнародної науково-практичної конференції, Івано-Франківськ, 2018. – сс. 152-155.
- [13] "ТОВ СЛОТ – Каталог продукції," ТОВ СЛОТ, 2018. [Online]. Available: <http://www.slot.if.ua/catalog/>. [Accessed 11 October 2018].
- [14] "Івано-Франківське СКБ ЗА. Каталог продукції. СКУБ-М2.," Івано-Франківське СКБ ЗА, 2018. [Online]. Available: http://skbza.if.ua/cat_5ua.htm. [Accessed 11 October 2018].

Рекурентний Логарифмічний Аналого-Цифровий Перетворювач

Зиновій Мичуда

кафедра комп'ютеризованих систем автоматики
Національний Університет «Львівська політехніка»
Львів, Україна
z.mychuda@ukr.net

Леся Мичуда

кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих
технологій
Національний університет «Львівська політехніка»
Львів, Україна
lesyamychuda@yahoo.com

Recurrent Logarithmic Analog-to-Digital Converter

Zynoviy Mychuda

dept. of Computer System of Automatics
National University Lviv Politechnik
Lviv, Ukraine
z.mychuda@ukr.net

Lesya Mychuda

dept. of Automation and Computer-Integrated Technologies
National University Lviv Politechnik
Lviv, Ukraine
lesyamychuda@yahoo.com

Анотація—У статті описано новий логарифмічний аналого-цифровий перетворювач, який працює за рекурентним принципом. Показано залежності параметрів від вибору основи логарифма. Точність перетворювача вища на 2 - 4 двійкові розряди порівняно з аналогами.

Abstract—In the article it is described new logarithmic analog-to-digital converter that works on recurrent principle. Dependences of parameters are shown on the choice of basis of logarithm. Accuracy of converter is higher on 2 - 4 binary digits comparatively with analogues.

Ключові слова—логарифмічний аналого-цифровий перетворювач; рекурентний принцип; основа; параметри; точність

Keywords—logarithmic analog-to-digital converter; recurrent principle; basis; parameters; accuracy

I. ВСТУП

Логарифмічні аналого-цифрові перетворювачі (ЛАЦП) не тільки здійснюють (як і лінійні АЦП) перетворення аналогових сигналів у цифру, але й забезпечують додаткові можливості: функціональне перетворення, широкий діапазон вхідних сигналів, лінеаризацію характеристик, стаке значення відносної похибки перетворення та можливість опрацювання сигналів у логарифмічній арифметиці. Останнє є чи не найважливішим, оскільки довготривалі операції лінійної арифметики множення та ділення зводяться в логарифмічній арифметиці до швидких операцій додавання та віднімання, причому швидшим буде і виконання піднесення до степеня чи добування кореня. Збільшення швидкодії особливо важливе для систем реального часу (аеро-космічні апарати, автоматичні

системи, роботи тощо), оскільки в них часові затримки недопустимі або мають бути зведені до мінімуму.

Логарифмічні аналого-цифрові перетворювачі, як і лінійні АЦП, поділяють на класи: послідовні, порозрядні та паралельні.

Послідовні ЛАЦП потребують лише одної зразкової величини [1], але мають найнижчу швидкодію.

Паралельні ЛАЦП мають найвищу швидкодію, але вимагають застосування найбільшої кількості зразкових величин, що практично обернено пропорційна до точності перетворення. Це значно збільшує апаратні витрати та вартість реалізації.

Порозрядні ЛАЦП [2, 3] є „серединкою” між послідовними та паралельними: вони мають достатню швидкодію та точність. У них кількість зразкових величин рівна кількості двійкових розрядів. Отже, із збільшенням точності порозрядних ЛАЦП відповідно зростає в них кількість зразкових величин, що, у свою чергу, збільшує складність конструкції та ціну перетворювачів.

У різних сферах застосування перетворювачів аналогових сигналів для спрощення побудови і програмування, а також для зменшення часу перетворення застосовують так звані рекурентні формули. Суть рекурентних алгоритмів зазвичай полягає у запам'ятовуванні останнього значення і використання саме його для обчислень. Зокрема, у [5] описано рекурентні алгоритми синтезу усереднюючих перетворювачів для систем об'єднаних електричних сигналізаторів наявності підземних електричних комунікацій. У [6] було виведено рекурентні формули, які дозволили спростити розрахунки

багатоступінчатих перехідних процесів в перетворювачах із сталою та змінною структурою та розробити методи визначення квазіусталеного режиму роботи. У роботі [8] аналого-цифровий перетворювач з нейронно кодованим зміщенням рівня працює за рекурентним алгоритмом.

Метою даної статті є дослідження способу побудови ЛАЦП за рекурентним принципом для досягнення підвищення точності при зменшеній кількості зразкових величин.

II. ОСНОВНА ЧАСТИНА

Функціональна схема (рис. 1) запропонованого логарифмічного аналогово-цифрового перетворювача містить ГТІ - генератор тактових імпульсів, Км - компаратор, ЕЗ1 і ЕЗ2 - елементи збігу 1 і 2, РПН - регістр послідовних наближень, Л - лічильник, БФПФ - блок формування показникової функції, ДОН - джерело опорної напруги, Т1 і Т2 - тригери 1 і 2, К0-К4 - п'ять аналогових ключів, С1 і С2 - конденсатори 1 і 2, ПН - повторювач напруги, АК - аналоговий комутатор, РМП - регульований масштабний підсилювач, ОВ - одинвібратор, ЛР - лічильник результату.

Перевагою запропонованого рекурентного логарифмічного аналогово-цифрового перетворювача є те, що бажана точність забезпечується меншою кількістю зразкових величин, тобто меншою кількістю входів регульованого масштабного підсилювача. Тим спричиняється також зменшення кількості вагових резисторів і зниження ціни перетворювача. Для забезпечення бажаної точності під час перетворення входи регульованого масштабного підсилювача переключуються циклічно.

Розглянемо роботу запропонованого рекурентного ЛАЦП.

Сигналом "Пуск" запускається одинвібратор ОВ, вихідний імпульс якого вмикає ключ К0, обнулює лічильники Л і ЛР, регістр РПН та тригер Т1 і установлює в "1" тригер Т2.

Вихідний код лічильника Л вмикає через аналоговий комутатор АК перший вхід РМП, якого коефіцієнти передачі по входах задаються згідно формули

$$K_i = \zeta \frac{N_z}{2^i},$$

де i - номер входу регульованого масштабного підсилювача РМП, причому $i=1,2,3\dots n$;

N_z - номінальне значення вихідного коду логарифмічного перетворювача;

ζ - основа логарифма; $\zeta = const$; доцільно вибирати $\zeta < 1$.

Значення основи логарифма визначається за виразом

$$\zeta = e^{N_z^{-1} \ln D^{-1}},$$

де $D = \frac{U_{we_{max}}}{U_{we_{min}}}$ - динамічний діапазон вхідних сигналів.

Через включений ключ К0 перший конденсатор С1 заряджається до рівня опорної напруги. Логічна "1" з інверсного виходу тригера Т1 вмикає ключі К2 і К3 в результаті чого напруга з першого конденсатора С1 передається через повторювач напруги ПН, аналоговий комутатор АК і перший вхід регульованого масштабного підсилювача РМП на другий конденсатор С2. Напруга (U_{wy_0}) на виході блоку формування показникової функції, який з'єднаний є через включений ключ К3 з другим конденсатором С2, установлюється рівною

$$U_1 = U_0 \zeta^{\frac{N_n}{2^i}}.$$

У загальному випадку напруга на виході блоку формування показникової функції порівнюється компаратором Км із вхідним сигналом U_{we} ; у тому випадку коли $U_{wy_0} > U_{we}$ на виході компаратора Км є рівень логічної "1", а коли $U_{wy_0} \leq U_{we}$ - на виході компаратора логічний "0".

Після закінчення імпульса одинвібратора ОВ починається перетворення по циклах, такт за тактом. Кожному k -циклу ($k=1,2,3\dots m$) відповідає n тактів. Кожному такту відповідає один імпульс генератора тактових імпульсів ГТІ. Під час перетворення елемент збігу ЕЗ2 постійно відкритий логічною "1" з прямого виходу тригера Т2.

1. Перший цикл перетворення.

Перший імпульс генератора тактових імпульсів (після закінчення імпульса одинвібратора) проходить через елемент збігу ЕЗ2 і вписує результат порівняння з виходу компаратора Км в регістр РПН та подається також на один із входів елемента збігу ЕЗ1, на другий вхід якого подається сигнал з виходу компаратора Км. Якщо на виході компаратора Км була логічна "1", то на виході елемента збігу ЕЗ1 також з'явиться логічна "1", яка перемикає тригер Е1, вихідні сигнали котрого перемикають пари ключів К1,К4 і К2,К3. У випадку логічного "0" на виході компаратора Км на виході елемента збігу ЕЗ1 також буде логічний "0", в результаті чого тригер Т1 не перемикається і пари ключів К1,К4 і К2,К3 залишаються в попередньому стані.

У час закінчення першого імпульса ГТІ спадаючим фронтом вихідного сигналу елемента збігу ЕЗ2 перемикається лічильник Л і вмикається другий вхід масштабного підсилювача РМП.

Після першого такту перетворення в регістрі РПН записаний результат першого порівняння сигналу з виходу блоку формування показникової функції і вхідного сигналу.

Коли результат порівняння в першому такті був логічною "1", то тригер Т1 перемикає пари ключів К1,К4 і К2,К3 (вимкнув ключі К2,К3 і увімкнув ключі К1,К4). В результаті того другий конденсатор С2 залишився з'єднаний із входом повторювача напруги ПН, а перший конденсатор С1 - з виходом регульованого масштабного підсилювача РМП (тобто з виходом блоку формування показникової функції).

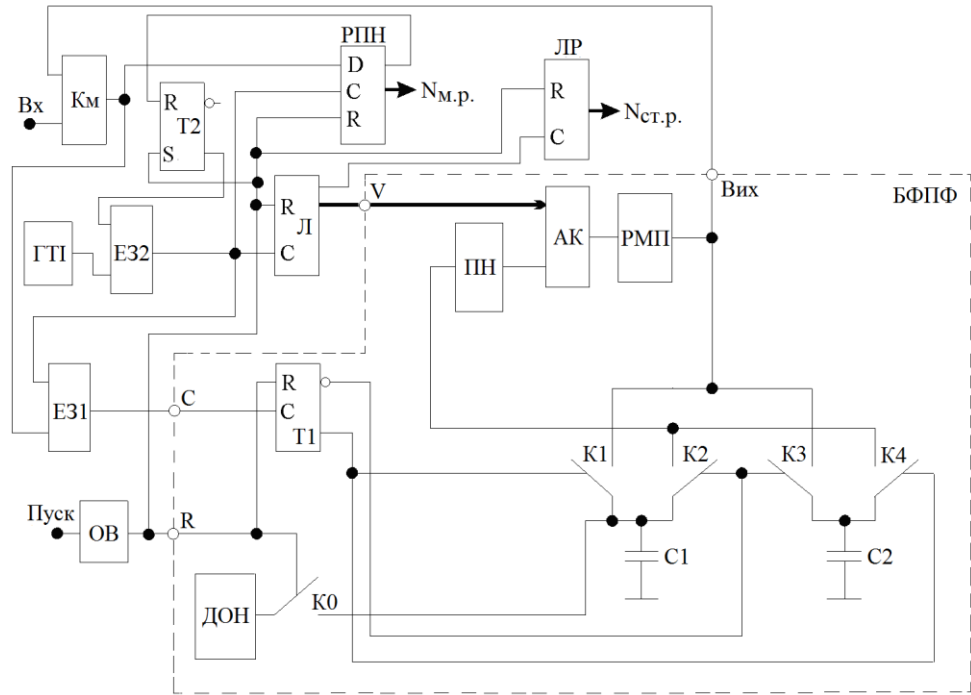


Рис. 1. Функціональна схема запропонованого рекурентного ЛАЦП

У даному випадку напруга на вході повторювача напруги ПН рівна напрузі на другому конденсаторі С2

$$U_1 = U_0 \zeta^{\frac{N_z}{2^1}}$$

а напруга на першому конденсаторі С1, з'єднаному через ключ К1 з виходом регульованого масштабного підсилювача РМП (тобто з виходом блоку формування показникової функції), установлюється рівною

$$U_2 = U_0 \zeta^{\frac{N_z}{2^1} \zeta^{\frac{N_z}{2^2}}}$$

У другому такті перетворення (другий імпульс ГТІ) вище описаний процес повторюється. Напруга U_2 порівнюється компаратором Км з вхідним сигналом U_{we} . Якщо результат порівняння в другому такті логічна "1", то вона буде записана в наступний біт регістру РПН та перемкнеться тригер Т1 і лічильник Л. В результаті чого до входу повторювача напруги ПН буде під'єднаний через ключ К2 перший конденсатор С1, на якому напруга буде рівною

$$U_2 = U_0 \zeta^{\frac{N_z}{2^1} \zeta^{\frac{N_z}{2^2}}}$$

а напруга на другому конденсаторі С2, підключеному через ключ К3 до виходу регульованого масштабного підсилювача РМП (тобто до виходу блоку формування показникової функції), установлюється рівною

$$U_3 = U_0 \zeta^{\frac{N_z}{2^1} \zeta^{\frac{N_z}{2^2} \zeta^{\frac{N_z}{2^3}}}}$$

Далі наступає третій такт і т.д.

В останньому n-такті першого циклу напруга на виході блоку формування показникової функції установлюється рівною

$$U_{n+1} = U_0 \zeta^{\frac{N_z}{2^1} \zeta^{\frac{N_z}{2^2} \zeta^{\frac{N_z}{2^3}} \dots \zeta^{\frac{N_z}{2^n}}}}$$

У час закінчення n-ного імпульса ГТІ спадаючим фронтом вихідного сигналу елемента збігу Е32 перемикається лічильник Л в нуль і вмикає перший вхід регульованого масштабного підсилювача РМП та імпульсом переповнення лічильника Л перемикається лічильник результату ЛР, реєструючи "1" цикл перетворення. У лічильнику ЛР реєструється кількість циклів перетворення.

2. Другий цикл перетворення.

Другий цикл перетворення починається n+1 імпульсом ГТІ і аналогічний першому циклу.

В останньому такті другого циклу напруга на виході блоку формування показникової функції установлюється рівною

$$U_{2n+1} = U_0 \zeta^{\frac{N_z}{2^1} \zeta^{\frac{N_z}{2^2} \zeta^{\frac{N_z}{2^3}} \dots \zeta^{\frac{N_z}{2^n} \zeta^{\frac{N_z}{2^{n+1}} \zeta^{\frac{N_z}{2^{n+2}} \zeta^{\frac{N_z}{2^{n+3}}}} \dots \zeta^{\frac{N_z}{2^{2n}}}}}}$$

Після закінчення останнього (2^n) імпульсу ГТІ на другому циклі спадним фронтом вихідного сигналу елемента збігу Е32 перемикається лічильник Л у нуль і вмикає перший вхід регульованого масштабного підсилювача РМП та імпульсом переповнення лічильника Л перемикається лічильник результату ЛР, реєструючи "2" цикли перетворення.

Робота на інших циклах перетворення відбувається аналогічно.

М. m -цикл перетворення.

В останньому такті m -циклу напруга на виході блоку формування показникової функції устанавлюється рівною

$$U_{mn+1} = U_0 \zeta^{\frac{N_z}{2^1}} \zeta^{\frac{N_z}{2^2}} \zeta^{\frac{N_z}{2^3}} \dots \zeta^{\frac{N_z}{2^n}} \zeta^{\frac{N_z}{2^{n+1}}} \zeta^{\frac{N_z}{2^{n+2}}} \zeta^{\frac{N_z}{2^{n+3}}} \dots \zeta^{\frac{N_z}{2^{2n}}} \dots \zeta^{\frac{N_z}{2^{(m-1)n+1}}} \zeta^{\frac{N_z}{2^{(m-1)n+2}}} \zeta^{\frac{N_z}{2^{(m-1)n+3}}} \dots \zeta^{\frac{N_z}{2^{mn}}}$$

Якщо на якомусь циклі перетворення, наприклад, на m -циклі в такті $(m-1)n+2$ результат порівняння компаратором Км був рівний нулю, то у відповідному розряді вихідного коду регістра РПН буде записано нуль, а у вихідній напрузі блоку формування показникової функції буде відсутня

складова напруги $\zeta^{\frac{N_z}{2^{(m-1)n+2}}}$, що відповідає тому розряду:

$$U_{mn+1} = U_0 \zeta^{\frac{N_z}{2^1}} \zeta^{\frac{N_z}{2^2}} \zeta^{\frac{N_z}{2^3}} \dots \zeta^{\frac{N_z}{2^n}} \zeta^{\frac{N_z}{2^{n+1}}} \zeta^{\frac{N_z}{2^{n+2}}} \zeta^{\frac{N_z}{2^{n+3}}} \dots \zeta^{\frac{N_z}{2^{2n}}} \dots \zeta^{\frac{N_z}{2^{(m-1)n+1}}} \zeta^{\frac{N_z}{2^{(m-1)n+3}}} \dots \zeta^{\frac{N_z}{2^{mn}}}$$

Останній $m \cdot n$ - імпульс ГТІ проходить через елемент збігу Е32 і вписує результат порівняння з виходу компаратора Км в регістр РПН. Таким чином у регістрі РПН виявляється записаним результат перетворення - двійкове число $N_{m.p.}$, яке рівне

$$N_{m.p.} = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n a_i \cdot \frac{N_z}{2^i}$$

де $a_i = 1$ коли результат порівняння компаратора на i - такті в k -циклі є рівний логічний „1”;

$a_i = 0$ коли результат порівняння компаратора на i - такті в k -циклі є рівний логічному „0”.

Перша поява логічної одиниці на виході компаратора записується у регістр РПН і є свідченням того, що цей цикл є останнім.

Після закінчення останнього $m \cdot n$ - імпульсу генератора тактових імпульсів на останньому m -циклі спадним фронтом вихідного сигналу елемента збігу Е32 перемикається лічильник Л у нуль і імпульсом переповнення лічильника Л перемикається лічильник результату ЛР реєструючи "m" циклів перетворення, а імпульс переносу регістра РПН перемикає тригер Т2 у логічний "0" на прямому виході, яким забороняється проходження імпульсів через елемент збігу Е32 і це є закінченням перетворення. Логічна "1" на інверсному виході тригера Т2 є сигналом "Дані готові".

Кількість циклів перетворення "m" у запропонованому рекурентному ЛАЦП залежить від того, яку точність ним хочемо забезпечити, і може бути визначена за формулою

$$m = \frac{N}{N_z},$$

де N – номінальне значення коду бажаної розрядності (r), $N = 2^r$.

Час перетворення запропонованого рекурентного ЛАЦП пропорційний добутку кількості циклів перетворення на кількість тактів у циклі

$$t_n = m \cdot n.$$

Так при 8-ми розрядному рекурентному ЛАЦП (рис. 1) отримаємо результат перетворення для точності 8 дв.р. за 1 цикл при часі перетворення 8Т, а для точності 10 дв.р. за 4 цикли при часі перетворення 32Т (тут Т – період повторення імпульсів ГТІ).

Висновки

Проведені нами дослідження показують:

1. Рекурентні ЛАЦП дають змогу отримати результат перетворення більшої від своєї розрядності точності на 2-4 двійкові розряди.

2. При збільшенні точності рекурентних ЛАЦП (відносно їх розрядності) зростає час перетворення, тому підвищення точності більш ніж на 2 – 4 двійкові розряди недоцільне.

Література References

- [1] J. Sit, R. Sarpeshkar, "A Micropower Logarithmic A/D with Offset and Temperature Compensation", IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 39, no. 2, pp.308-319, 2004.
- [2] F. Francesconi, F. Maloberti, "A low power logarithmic A/D converter", IEEE International Symposium on Circuits and Systems, ISCAS'96, vol.1, pp. 473-476, Maj, 1996.
- [3] A. Szcześniak, "Application of Proteus VSM software to simulate logarithmic analog-to digital converter with successive approximation", XVIII Міжнародна конференція з автоматичного управління Автоматика/Automatics – 2011: Матеріали конференції, Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011, стор. 396-397.
- [4] Драбич П. П. Застосування рекурентних алгоритмів для синтезу пристроїв пошуку підземних електрокомунікацій [Текст] / Драбич П. П., Драбич О. П., Яворський І. М. // Відбір і обробка інформації. – 2002. – № 16(92), с.69 – 72.
- [5] Ромашко В. Я. Аналіз режимів роботи перетворювачів електронної енергії методом функцій вільного режиму: Дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук за спеціальністю 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ, 2010. Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/806>.
- [6] Aigerim Tankimanova, Akshay Kumar Maan, Alex Pappachen James. (2017) Level-shifted neural encoded analog-to-digital converter [conference-paper]/ 24th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS): 5-8 December 2017, Batumi, Georgia. DOI: [10.1109/icecs.2017.8292026](https://doi.org/10.1109/icecs.2017.8292026).

Теоретичні, Функціональні та Прикладні Переваги Залишкових Класів при Опрацюванні Цифрової Інформації

Ярослав Николайчук
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Тернопільський національний економічний університет
Тернопіль, Україна
scs.kafedra@mail.com

Theoretical, Functional and Applied Advantages of the Residual Classes at Processing of Digital Information

Yaroslav Nykolaychuk
dept. of specialized computer systems
Ternopil National Economic University
Ternopil, Ukraine
scs.kafedra@mail.com

Анотація — Викладені математичні основи кодових систем теоретико-числових базисів (ТЧБ). Приведені приклади кодових матриць найбільш широко застосовуваних у теорії обчислень та комп'ютерних системах ТЧБ. Систематизовані теоретичні основи модифікацій системи залишкових класів базису Крестенсона. Приведені структурні рішення мікроелектронних компонентів супершвидкодійних спецпроцесорів, які реалізують базові алгоритми в залишкових класах на основі матрично-модульних операцій над кодами Хаара-Крестенсона.

Abstract — The mathematical bases of code systems of the theoretic-numerical bases (ТЧБ) are outlined. Examples of code matrices of TNB are given which are most widely used in the theory of computation and computer systems. The theoretical bases of modifications of the system of residual classes of the Krestenson basis are systematized. Structural solutions of microelectronic components of super fast-acting special processors that implement basic algorithms in residual classes based on matrix-modular operations over Haar-Krestenson codes are given.

Ключові слова — теоретико-числові базиси, позиційні та непозиційні системи числення, алгоритми в залишкових класах, мікроелектронна схемотехніка, компоненти спецпроцесорів базису Хаара-Крестенсона.

Keywords — theoretical numerical bases, positional and non-positional numerical systems, algorithms in the remaining classes, microelectronic circuitry, components of special processors based

on Haar-Krestenson.

I. ВСТУП

У сучасних телекомунікаційних та комп'ютеризованих системах динамічно збільшуються об'єми інформаційних потоків тому актуальність проблеми вдосконалення та оптимізації обчислень постійно зростає [1]. При цьому наявність наскрізних переносів при виконанні арифметичних операцій у позиційних системах числення, особливо це стосується двійкової арифметики ТЧБ Радемахера, суттєво знижує продуктивність процесорів, які реалізують складні алгоритми обчислень.

Успішний розвиток теорії розширених полів Галуа є фундаментальною математичною базою теорії залишкових класів базису Крестенсона та кодових систем Галуа [2]. Сучасні можливості мікросхемотехніки, опто- та нанотехнологій однозначно визначають перспективу розробки та реалізації високопродуктивних алгоритмів обчислень у залишкових класах. Особливу перспективу при цьому мають принципи матрично-модульної арифметики у мультибазисах ТЧБ Радемахера-Крестенсона та Хаара-Крестенсона.

II. ТЕОРЕТИКО-ЧИСЛОВІ БАЗИСИ, ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ІХ КОДОВІ МАТРИЦІ

Найбільш раннім освоєним людством в арифметиці цілих чисел є унітарний ТЧБ (табл. 1, M_{Uni}), який

характеризується простою арифметикою порівнянь і обчислень типу: $a > b, b < a, |a-b|$ та мікроелектронною реалізацією компонентів спецпроцесорів (рис. 1) [13].

TABLE I. КОДОВІ МАТРИЦІ ТЧБ

M_{Wal}	M_{LibC}	M_{Rad}	M_{Gr}	M_{Uolsh}
$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 1 \end{bmatrix}$	
M_{Wal}	M_{LibC}	M_{Rad}	M_{Gr}	M_{Uolsh}
$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} P_1 & P_2 & \dots & P_n \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & \dots & 1 \\ 2 & 2 & \dots & 2 \\ 3 & 3 & \dots & 3 \\ 4 & 4 & \dots & 4 \\ 5 & 5 & \dots & 5 \\ 6 & 6 & \dots & 6 \\ a_1 & a_2 & \dots & a_n \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$

Рис. 1. Приклад реалізація кодової системи та компонентів спецпроцесорів унітарного

Особливо проста реалізація операцій порівняння чисел в унітарному ТЧБ забезпечила широке застосування унітарної арифметики при побудові кореляційних спецпроцесорів, квадраторів та перемножувачів. У той же час, значний об'єм кодової матриці унітарного ТЧБ $V=N^2$ (табл. 2), де N - діапазон кодіваних чисел, n - число активних елементів, не дозволяє у принципі ефективно застосувати унітарну арифметику при реалізації алгоритмів опрацювання чисел із розрядністю ($n > 2^{32}$).

TABLE II. ХАРАКТЕРИСТИКИ КОДОВИХ МАТРИЦЬ ТЧБ

Базис	Коди	n	V
Унітарний	Унітарні	$n = N^2/2$	$V = N^2$
Хаара	Розрядно-позиційні	$n = N$	$V = N^2$
Крейга	Лібова-Крейга	$n = 2N$	$V = N^2/2$
Радемахера	Двійкові	$n = N \log_2 N/2$	$V = N \log_2 N$
Грея	Грея	$n = N \log_2 N/2$	$V = N \log_2 N$
Уолша	Уолша	$n = N \log_2 N/2$	$V = N \log_2 N$
Крестенсона	Залишкових класів	$n = \prod_{i=1}^m P_i / 2$	$V = N \sum_{i=1}^m \log_2(P_i)$
Галуа	М-последовності	$n = (2^N - 1)/2$	$V = N - 1$
Галуа	Галуа	$n = 2^N/2$	$V = N$

Кодова матриця ТЧБ Хаара (табл. 1, M_{Har}) має менше число активних елементів (n) у порівнянні з унітарним базисом ($N^2/2$), але однакокий об'єм кодової матриці ($V=N^2$), що не дозволяє самостійно застосовувати його арифметику при опрацюванні багаторозрядних чисел. У той же час, коди базису Хаара є виключно незамінними при реалізації міжбазисних перетворень, шифраторів/дешифраторів, схемотехніки доступу до 2D і 3D-пам'яті. Особливі переваги застосування базису Хаара у супершвидкодійних процесорах досягається шляхом реалізації матрично-модульних операцій у залишках. Наприклад, у структурі АЦП паралельного типу [3], вхідний потенціал U_x на виходах компараторів представляється у паралельному коді унітарного ТЧБ (U),

далі у паралельному прямому коді Хаара (H), після чого на виході дешифратора перетворюється у паралельний двійковий код ТЧБ Радемахера (R) та Хаара-Крестенсона (HC) згідно графа міжбазисних перетворень (рис. 2)

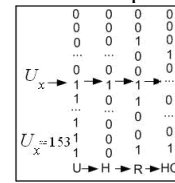


Рис. 2. Граф міжбазисних перетворень кодів АЦП паралельного типу

Кодові системи ТЧБ Лібова-Крейга (M_{LibC}), Уолша (M_{Wal}) та Грея (M_{Gr}) отримали значно менше застосування при реалізації алгоритмів обчислень, оскільки не породжують систем числень з достатньо простою арифметикою, хоча мають широкі застосування при кодуванні даних, розпізнаванні образів та інше. Найбільш широке застосування у сучасній комп'ютерній техніці та цифровій обробці даних отримала кодова система ТЧБ Радемахера. При названих у вступі недоліках її арифметики, кодова система Радемахера характеризується високим рівнем компактності кодової матриці (табл. 2, M_{Rad}) та мінімальними значеннями залишків у кожному розряді двійкових чисел $a_i \in \{0,1\}$.

Кодові системи ТЧБ Галуа (табл.1, M_{Gmb} , M_{Gal}) представлені рекурентними послідовностями максимальної довжини (M-сигнали) та кодами поля Галуа [1]. Даний базис породжує систему числення Галуа і є математичною основою вертикальної інформаційної технології із широким класом прикладних застосувань в інформатиці [4].

Розглянемо приклад оцінки алгоритмічної та обчислювальної складності визначення квадрата модульної різниці між двома n -розрядними двійковими числами $|a-b|$ у базисі Радемахера. Така операція широко застосовується при реалізації алгоритмів розпізнавання образів у Хемінговому просторі згідно лінійної Евклідової метрики, кореляційному та спектральному аналізу, томографії, голографії та інших.

Нехай маємо два числа a і b представлені n -розрядними двійковими числами ТЧБ Радемахера. Реалізація алгоритму $(a-b)^2$ у даному базисі виконується наступним чином:

- 1) двійкові коди чисел a і b , шляхом заміни нулів на одиниці а одиниць на нулі і додавання до найменших розрядів "+1", перетворюють у доповнюючі коди з фіксованою комою $[a]_0, [b]_0$;
- 2) виконують додавання отриманих пар прямих та доповнюючі кодів: $S_i = a + [b]_0; S_j = b + [a]_0$;
- 3) на основі аналізу переносів у старший розряд отриманих сум S_i та S_j визначають, яка з них представляється прямим двійковим кодом $|a-b|$;

4) підносять до квадрату отриману модульну різницю $|a-b|$, що реалізується структурою перемножувача Брауна (рис. 3).

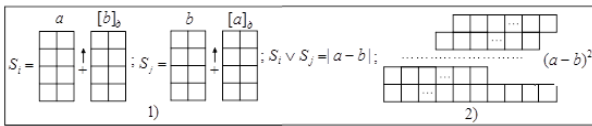


Рис. 3. Граф алгоритму визначення квадрату модульної різниці між двійковими числами у базисі Радемахера

Таким чином при реалізації цього алгоритму у базисі Радемахера над $n = 1024$ -розрядними двійковими числами необхідно виконати наступне число мікрооперацій: $4 \times (8192 \div 13312) + 3 = (32771 \div 53251)$ мікротактів, де “3” – затримка сигналів на 3-мікротакти у мультиплексорі, на виході якого формується код S_i або S_j . Наведений числовий приклад демонструє нижню границю затримок сигналів у багаторозрядних процесорах, які реалізують двійкову арифметику базису Радемахера. Тим більше, що апаратна реалізація перемножувачів Брауна для розрядності процесорів ≥ 2048 є достатньо складна та промислово неефективна.

III. МОДИФІКАЦІЯ ПЕРЕТВОРЕНЬ ЗАЛИШКОВИХ КЛАСІВ БАЗИСУ КРЕСТЕНСОНА

Теорія залишкових класів, яка найбільш повно розроблена для цілочисельного представлення чисел у залишках системи взаємнопростих модулів базується на наступних аналітичних перетвореннях (табл. 3).

TABLE III. МОДИФІКОВАНІ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ТА ПЕРЕТВОРЕННЯ СИСТЕМ ЗАЛИШКОВИХ КЛАСІВ

№ стп.	Пряме перетворення форми СЗК	Зворотне перетворення форми СЗК
1	Цілочисельна форма СЗК $N_k = (b_1 b_2 \dots b_i \dots b_k)_{(p_1 p_2 \dots p_k)}$ $N_k = b_i \pmod{p_i}$ $N_k = a_i p_i + b_i$ $P = \prod_{i=1}^k p_i, 0 \leq b_i < p_i$	$b_i = \text{res} N_k \pmod{p_i}$ $N_k = \text{res} \sum_{i=1}^k b_i \cdot B_i \pmod{P}$ $B_i = \frac{P}{p_i} \cdot m_i \equiv 1 \pmod{p_i}$
2	Нормалізована форма СЗК $\frac{N_k}{P} = \text{res} \sum_{i=1}^k \frac{b_i \cdot B_i}{P} \pmod{P}$ $[N_k]_0 = \text{res} \sum_{i=1}^k b_i \cdot \frac{B_i}{P} \pmod{1}$ $0 \leq [N_k]_0 \leq P-1, \frac{B_i}{P} = \frac{1}{p_i}$ $\delta_p \leq \frac{1}{P} \cdot \frac{1}{p_i} = 0. \dots \dots \dots$	$[N_k]_0 = \text{res} \sum_{i=1}^k b_i \cdot \frac{m_i}{p_i} \pmod{1}$ $[N_k]_0 = \text{res} \sum_{i=1}^k [b_i]_0 \cdot m_i \pmod{1}$ $[b_i]_0 = \frac{b_i}{p_i}, 0 \leq [b_i]_0 \leq 1$ $N_k = \text{int}[N_k]_0 \cdot P$
3	Досконала форма СЗК $[N_k]_0 = \text{res} \sum_{i=1}^k [b_i]_0 \pmod{1}$	$b_i = \text{int} \text{res}[N_k]_0 \pmod{1} \cdot p_i$
4	Розмежована форма СЗК $N_k = N_{1k} + N_{2k} + \dots + N_{ik} + \dots + N_{rk}$ $N_k = \text{res} \sum_{i=1}^k \text{res}(b_{i1} + b_{i2} + \dots + b_{i+1} + \dots + b_{ik}) \pmod{p_i} \cdot B_i \pmod{P}$	$N_k = \dots$ $\begin{cases} \hat{q}_1 = (b_{11} + b_{12} + \dots + b_{1+1} + \dots + b_{1k}) \pmod{p_1} \\ \hat{q}_2 = (b_{21} + b_{22} + \dots + b_{2+1} + \dots + b_{2k}) \pmod{p_2} \\ \dots \\ \hat{q}_i = (b_{i1} + b_{i2} + \dots + b_{i+1} + \dots + b_{ik}) \pmod{p_i} \\ \dots \\ \hat{q}_r = (b_{r1} + b_{r2} + \dots + b_{r+1} + \dots + b_{rk}) \pmod{p_r} \end{cases}$

В табл. 3: N_k – число у позиційній системі числення (у базисі Радемахера); $(b_1 b_2 \dots b_i \dots b_k)$ – представлення числа у залишках; $(p_1 p_2 \dots p_i \dots p_k)$ – набір взаємно простих модулів залишкових класів; b_i – найменший невід’ємний залишок; P – діапазон кодування чисел у залишках; a_i – ранг; K – число модулів залишкових класів; B_i – базисні числа системи залишків; res – символ операції знаходження найменшого невід’ємного залишку; int – символ операції виділення цілої частини; mod – символ операції по модулю; m_i – обернений коефіцієнт системи залишків; δ_p – дробова

частина в нормалізованій формі залишків; $[N_k]_0, [b_i]_0$ – відповідно число та залишок в нормалізованій формі базису Радемахера.

Пряме перетворення цілочисельної форми залишкових класів може бути виконане згідно наступних алгоритмів на основі: коду унітарного ТЧБ N_u ; двійкового коду ТЧБ Радемахера N_R ; модульного коду ТЧБ Хаара N_H ;

$$N_K = \begin{cases} N_U = \text{res} b_R \pmod{P_R}; \\ N_R = \text{res} b_R \pmod{P_R}; \\ N_H = \text{res} b_H \pmod{P_H}. \end{cases} \quad (1)$$

де U, R, H - ознаки відповідних ТЧБ.

Дослідження алгоритмів (1) та їх мікроелектронної схемотехнічної реалізації показує, що представлення N_k в унітарному ТЧБ забезпечує глибоке розпаралелення обчислення залишків b_R . У той же час є принципові обмеження, щодо практичної реалізації цього алгоритму при значеннях N_k , які перевищують $(2^{32} \div 2^{40})$.

Представлення N_R у базисі Радемахера потребує виконання $\log_2 n$ операцій зсуву в регістрі по 2 мікротакти (де n -розрядність двійкового коду N_R) та вибірки з пам’яті коду b_R . (4 мікротакти). Тобто складає не більше bn мікротактів. Представлення N_R , з отриманням залишків у базисі Хаара згідно апаратної реалізації дозволяє формувати коди b_H , паралельно для всіх модулів за 2 мікротакти при достатньо великій апаратній складності спецпроцесорів такого міжбазисного перетворення. На практиці можуть бути реалізовані гібридні алгоритми міжбазисного перетворення $R \rightarrow C$ на основі програмно-реконфігурованих спецпроцесорів з високою швидкістю та зменшеною апаратною складністю.

Значні упрощення алгоритмів обчислення у залишках досягаються у кодах модифікованих систем залишкових класів наступних типів (табл. 3) [4]: нормалізованої, досконалої та розмежованої. У нормалізованій формі залишкових класів в алгоритмах прямого та зворотного перетворень (табл. 1) вилучається операція по модулю P_i замінюється умовною операцією по модулю “1”, що реалізується відкиданням цілої частини отриманого результату $[N]_0$, представленого у нормалізованій формі чисел базису Радемахера. Крім того, залишки $[b_i]_0$ також представляються у нормалізованій формі двійкових чисел з фіксованою комою. Ускладнення алгоритмів опрацювання даних у такій формі залишкових класів обумовлено наявністю операції множення на обернений елемент m_i . Спрощення перетворень у нормалізованій формі залишків досягається шляхом вилучення даної операції множення та представленням скоректованих кодів залишків згідно виразів прямого та зворотного перетворень:

$$[\hat{b}_i]_0 = \text{res}[b_i]_0 m_i \pmod{p_i}; \quad (2)$$

$$[N_k]_0 = \text{res} \sum_{i=1}^k [\hat{b}_i]_0 \pmod{1}; N_k = \text{int}[N_k]_0 P \quad (3)$$

Досконала форма залишкових класів визначається набором взаємнопростих модулів P_i , для яких всі обернені елементи m_i рівні “1”. Тобто: $m_1 = m_2 = \dots = m_i = \dots = m_k = 1$.

Таким чином досконала форма залишкових класів забезпечує найпростіші алгоритми обчислень у залишках, в яких пряме перетворення містить тільки операцію додавання нормалізованих залишків $[\hat{b}_i]$ (табл. 3). Розроблені алгоритми аналітичного пошуку набору модулів досконалої форми залишкових класів дозволяють максимально спростити алгоритми опрацювання чисел у досконалій формі залишкових класів.

Розмежована форма залишкових класів базується на операції розмежування багаторозрядного двійкового числа базису Радемахера на r -розрядні фрагменти, коди яких представляються окремим кодом залишкових класів (табл. 2). При цьому упрощуються операції прямого та зворотнього перетворень між базисами Радемахера та Крестенсона при особливо великій розрядності опрацьовуваних чисел (2048 і більше біт). Відповідно знижується швидкодія перетворень, оскільки зростає часова складність виконання міжбазисних та арифметичних операцій у залишках $2n/r$ разів.

IV. СХЕМОТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ БАЗОВИХ КОМПОНЕНТІВ ВИСОКОПРОДУКТИВНИХ СПЕЦПРОЦЕСОРІВ МОДУЛЬНО-МАТРИЧНИХ ОБЧИСЛЕНЬ У ЗАЛИШКОВИХ КЛАСАХ ТЧБ ХААРА-КРЕСТЕНСОНА

На рис. 3 приведена структура швидкодіючого паралельного АЦП з вихідними кодами у базисі Хаара-Крестенсона, який формує вихідні коди незалежно від розрядності за 4-мікротакти.

На рис. 4 показана структура пірамідального n -розрядного суматора та його компоненти з затримкою сигналів на n -мікротактів.

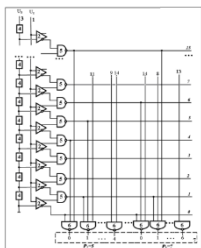


Рис. 4. АЦП з вихідним кодом базису Хаара-Крестенсона

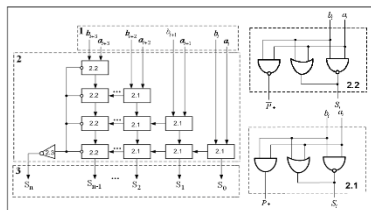


Рис. 5. Структура багаторозрядного пірамідального суматора та його компоненти.

На рис. 5 показана структура квадратора у залишках базису Хаара-Крестенсона.

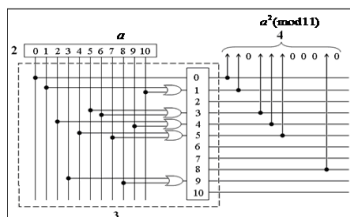


Рис. 6. Структура квадратора у ТЧБ Хаара-Крестенсона (затримка сигналів 1-мікротакт).

На рис. 6 показана структура матрично-модульного суматора-перемножувача у кодовій системі базису Хаара-Крестенсона [30].

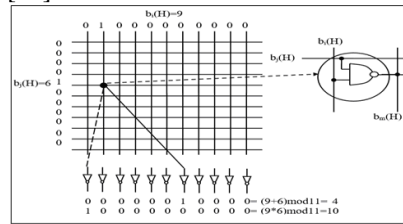


Рис. 7. Структура матрично-модульного суматора-перемножувача (затримка сигналів 2-мікротакти).

Структури високопродуктивних спецпроцесорів кореляційного та спектрального опрацювання сигналів на основі модульної арифметики залишкових класів приведені у [13,30-32]

ВИСНОВОК

Викладені теоретичні засади алгоритмів обчислень у залишкових класах та структури мікроелектронних реалізацій компонентів високопродуктивних спецпроцесорів базису Хаара-Крестенсона демонструють визначену перспективу ефективного застосування матрично-модульної арифметики для оптимізації обчислень та складних алгоритмів опрацювання цифрових даних. Підвищення на багато порядків швидкодії реалізації операцій додавання, віднімання, модульного віднімання, піднесення до квадрату, множення, накопичення сум тощо, підтверджує актуальність та перспективність математичних, алгоритмічних та схемотехнічних досліджень у галузі теорії та оптимізації обчислень.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Valeriy Zadiraka, Yaroslav Nikolaychuk. Methods of Effective Protection of Information Flows. / Methods of Effective Protection of Information Flows / edited by Valeriy Zadiraka, Yaroslav Nikolaichuk.- Ternopil: Terno-graf, 308 p., 2014.
- [2] Николайчук Я.М. Коды поля Гаула: теория та застосування.- Монографія: / Тернопіль: ТзОВ «Терно-граф», 576 с., 2012.
- [3] Круликівський Б.Б., Николайчук Я.М., Грига В.М., Піх В.Я. Пат.116176 Україна МПК Н03М 1/38 (2006.01) "Аналого-цифровий перетворювач" № а 2016 12016 заявл.28.11.2016; опубл.12.02.2018, Бюл. №3/2018.
- [4] Спеціалізовані комп'ютерні технології в інформатиці/ за загальною ред. Я.М. Николайчука. – Тернопіль: «Бескиди», 913 с. 2017.

Оцінка Кольоророзрізнення за Поліхроматичними Таблицями що Створювані Програмним Методом

Олена Ошаровська
кафедра телебачення та радіомовлення
Одеська національна академія зв'язку
Одеса, Україна
osharovskaya@gmail.com

Володимир Пилявський
Науково-дослідний центр телекомунікаційних систем та мереж зв'язку
Одеська національна академія зв'язку
Одеса, Україна
v. pilyavskiy@ukr.net

Estimation of Color Difference in Polychromatic Tables Created by Program Method

Olena Osharovska
Department of Television and Sound Broadcasting
Odessa National Academy of Telecommunications
Odessa, Ukraine
osharovskaya@gmail.com

Volodymyr Pyliavskiy
Research center of telecommunication systems and communication networks
Odessa National Academy of Telecommunications
Odessa, Ukraine Ukraine
v. pilyavskiy@ukr.net

Анотація—В роботі розглянуті питання оцінки розрізнення кольорів при різних умовах освітленості при створенні і відтворенні відеоматеріалів. Запропоновано використовувати поліхроматичні таблиці для суб'єктивного оцінювання кольоро розрізнення при різних значеннях навколишнього фону. Теоретичні дослідження показали, що різниця між кольорами стає помітною, якщо відстань між цими кольорами перевищує п'ять порогів. Пропонується враховувати спільний вплив оточення і яскравості адаптації. У статті запропоновано алгоритм створення поліхроматичний таблиць за прикладом таблиць для визначення колірної сліпоти. Відмінною особливістю таблиць є попереднє створення бази випадкових адрес і бази випадкових координат квітів. За обраною адресою створюється окружність, що заповнюється кольором. Такими колами заповнюється контейнер, розташований на деякій тлі, який можна змінювати.

Abstract—This paper deals with the question of assessing the differentiation of colors under different lighting conditions when creating and reproducing video materials. It is proposed to use polychromatic tables for the subjective assessment of color distinction at different values of the surrounding background. Theoretical studies have shown that the difference between the colors becomes noticeable if the distance between these colors exceeds five thresholds. It is proposed to take into account the joint influence of the environment and the brightness of the adaptation. The article proposes an algorithm for creating polychromatic tables following the example of tables for determining color blindness. A distinctive feature of the tables is the preliminary creation of a base of random addresses and a base of random color

coordinates. At the selected address creates a circle filled with color. Such circles fill the container, which is located on a background that can be changed.

Ключові слова—кольорово розрізнення; поліхроматична таблиця; суб'єктивне оцінювання; колірний простір

Keywords—color recognition polychromatic table subjective evaluation color space

I. INTRODUCTION

Color perception is the result of exposure of light to all three types of cones. Radiation of any wavelength excites all retinal cones, but to varying degrees. With the same irritation of all three groups of cones, a feeling of white color appears. There are congenital and acquired disorders of color vision [1]. Reproducing devices use the color space of the primary colors of red, green and blue RGB. These primary colors and white are set to match in the system proposed by the IEC-31 International Advisory Committee on Illumination XYZ. CIECAM02 is a color appearance model that was designed to better simulate typical human color vision. The goal of such models is to define color space such that linearly changing color specifications like chroma or hue also produces linear changes in human perception of chroma or hue. To achieve this, CIECAM02 defines color by simulating responses of human long, medium, and short cone cells with CIECAT02 [3] and translates those responses into familiar color terms (e.g., hue). CIECAM02-UCS is a manipulation of CIECAM02 that makes the original

space perceptually uniform [4]. To calculate perceptual/color distance, you can use *color.de (color)*, which calculates an adjusted Euclidean distance between the two colors. This distance is commonly referred to as ΔE or DE [5]. Because CIECAM02-UCS is a transform of CIECAM02, lightness (J) is not equivalent between the two spaces.

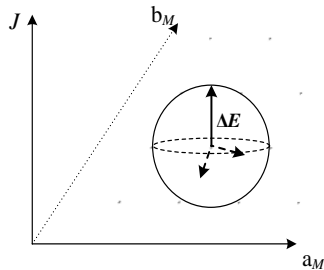


Рис. 1. Example of perceptual/color distance ΔE or DE,

The two major parts of the model are its chromatic adaptation transform, CIECAT02, and its equations for calculating mathematical correlates for the six technically defined dimensions of color appearance: brightness (luminance), lightness, colorfulness, chroma, saturation, and hue.

As the color space used in this document the CAM02-USC space of coordinates J', a'_M, b'_M proposed by Luo et al. [2] transformation of color appearance model CIECAM02 [1], which can be considered now the most perfect color appearance model [3] in which color differences are correlated well with the distances between color points.

For each of the points with CAM02-USC space J', a'_M, b'_M coordinates carry out the transition to CIECAM02 coordinates J, a_M, b_M and then to the CIE-31 luminance and chrominance coordinates Y, x, y , and then check belonging the point (x, y) to color gamut transmitted and reproduced by television system area for luminance value Y with use of method presented in [4] and exclude color points not belonging to color gamut.

II. THE COMBINED EFFECT OF THE ENVIRONMENT AND BRIGHTNESS ADAPTATION

A change in environmental conditions significantly affects color perception, as can be seen from the dependence of the projection of the chromaticity diagram on the plane of coordinates, and this effect is most pronounced at large levels of relative brightness of the stimulus, and there is a change in both the sensation of chromaticity and the perceived color tone.

A more complete quantitative assessment of possible changes in color perception with a change in the brightness of the adaptation and environment can be given by estimating the change in chromaticity coordinates in the CAM02-USC space as

the distance between points on the coordinate plane for various combinations of the adaptation brightness and environment for the compared incentives. Examples of quantitative assessment of the values of parameters a'_M, b'_M, J' and distances ΔE are given in table 1.

TABLE I. PARAMETERS OF THE DISTANCE BETWEEN THE POSITION OF THE POINTS OF THE COLORS OF THE CHROMATICITY DIAGRAM

Shooting conditions L_{A1} and observations L_{A2}	λ, nm		
	380	515	700
$L_{11}=200 \text{ kd/m}^2$ – the average $L_{21}=20 \text{ kd/m}^2$ – dull	12,39	8,51	9,55
$L_{11}=200 \text{ kd/m}^2$ – the average $L_{21}=20 \text{ kd/m}^2$ – dull	18,16	13,07	13,89
$L_{11}=200 \text{ kd/m}^2$ – the average $L_{21}=20 \text{ kd/m}^2$ – dull	9,34	9,15	9,12

In [3], the relationship between the value characterizing for video applications the discrepancy between the colors of the transmitted scene and its image in accordance with Table 1 is given; the distortions can reach levels from subtle to unacceptable.

Comparison of estimates with the data in Table 1 suggests that under conditions of independently varying image surroundings and adaptive brightness when shooting on the transmitting side and playing on the receiving side can lead to color distortions from imperceptible or barely noticeable to the level of unacceptable reduction in image quality. The ratio of the distance and the level of image deterioration is given in Table II

TABLE II. THE RATIO OF THE DISTANCE AND THE LEVEL OF IMAGE DETERIORATION

$\Delta E, \text{un. IIC}$	Image Quality Assessment
3	Visually indistinguishable
5	Acceptable difference
10	Poorly
15	Is unacceptable

An assessment of color perception properties is given here for monochromatic colors in the form of an estimate of the change in the position of the points of a line of spectral and purple colors with a change in the stimulus brightness and adaptation brightness in the color space of the CIECAM02 color perception model.

Fig. 2 shows the location of the chromaticity points in the color space plane that form Color grid of the CIECAM02 coordinates.

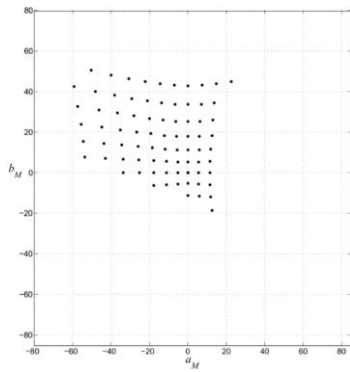


Fig. 2. Example of Color grid of the CIECAM02 coordinates,

The location of the chromaticity points in the RGB color space is shown in Fig. 3.

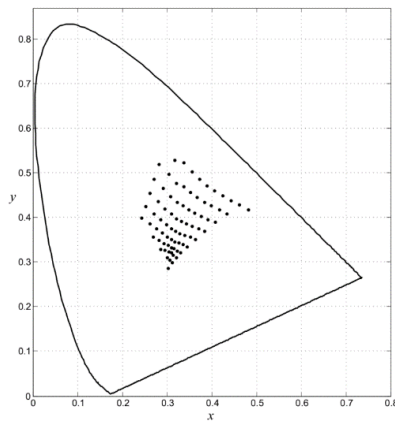


Fig. 3. Example of Color grid of the x, y coordinates,

From the last figure it is clear that the greatest distortions occur in the area of blue colors, the dots approach and become indistinguishable.

III. POLYCHROMATIC TABLES

Three types of methods are used to assess the function and defects of a person's color vision: spectral, electrophysiological, and pigment tables. Allocate quantitative and qualitative tests for research; quantitative tests are sensitive and specific. Anomaloscopes are devices whose operation is based on the principle of achieving subjectively perceived equality of colors by means of dosed-up color mixtures. Under these conditions, the patient observes radiation in the form of light fluxes, and their physical characteristics because of visual equality are the subject of measurement. In this case, they calculate in advance which colors will be indistinguishable for a person with one or another combination of types of cones. A certain combination of hue and brightness of the stimulus in the preparation of equality allows us to reveal one or another variant of color perception disturbances. To investigate violations of color distinction is possible with the help of multicolor tests, pigment tables, created on the principle of polychromaticity. These include, for example, the polychromatic tables of Stilling, Ishihir, Shaaf, Fletcher-Gamblin, Rabkin, and others. The tables are constructed according to a similar principle; each includes figures, numbers or letters made up of elements (circles) of one

tone, but of different brightness and saturation, arranged on the background of a similar combination of circles of a different color. The figures made up of a circle mosaic of the same tone, but of different brightness, are distinguishable by trichromats, but indistinguishable by protanopes or deuteranopes.

Programming such tables encounters a number of difficulties. In computer geometry, quite a lot of attention is paid to the dense packing of "parquet" or "mosaic" of a certain surface. Parquet (or mosaic) - an infinite family of polygons, covering the plane without gaps and double coatings. Sometimes parquet is called a plane covering regular polygons, in which two polygons have either a common side, or a common vertex, or have no common points at all; but we will consider both regular and irregular polygons. However, optimization of filling functions is reduced to dense filling with the minimum number of polygons. In our case, the surface should be filled with pigments, which are "balls" of different diameter and with different color fill.

We have developed an algorithm for the formation of tables with the required properties based on the creation of several sets of random arrays. First of all, an array of addresses of the centers of the circles is created. Depending on the processor's bitness, we translate addresses into the required format. From the address array, only those that are inside the pre-rendered window are selected, which is achieved by placing the balls in a container of a large circle. The rectangle, in which the container is in, is filled with a background that meets the concepts of dim, medium or bright. The second step consists of a random selection of the radius of the balls. This approach allows you to create pigments equivalent to those developed by oculists. Due to the large number of operations with random numbers, this stage is performed previously and these arrays can be used many times.

After the container is filled with multi-colored balls, transparent container is attached to the container without contour. In this new shape, a new filling is made with balls, but from a different area of the color chart.

The colors of the balls should differ according to the color discrimination thresholds. To achieve the solution of such a problem in the lightness space, the coordinates are distributed according to the normal law (1).

$$f(\Delta E) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Delta E - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

where σ is the variance of the coordinates, and μ is an offset to the desired color space region.

Since the color change is set in the same color space, and displays playback is in full-color format, it is necessary to recalculate the coordinates in the RGB color space.

The algorithm for the formation of polychromatic tables is shown in Fig. 4.

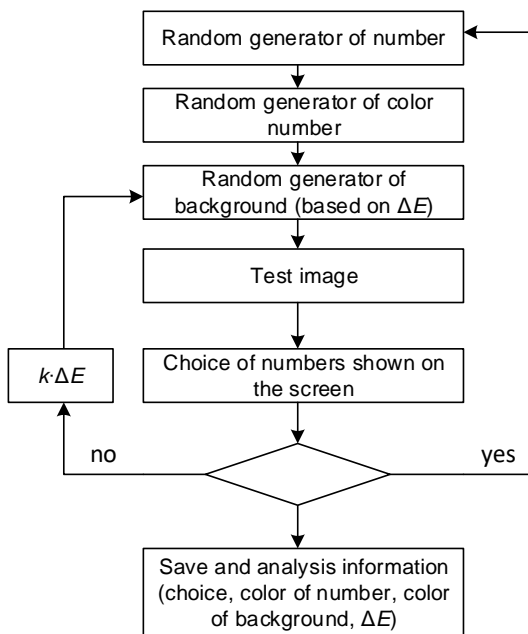


Fig. 4. The algorithm for the formation of polychromatic table

The color gamut of pigments that fill the container and pigments that fill the figure of the figure, in the process of testing consistently converge.

The brightness of the ambient background will also change, which makes it possible to construct color discrimination dependencies under different observation conditions. Examples of formed polychromatic tables made up of similar pigments are shown in fig. 5 and 6.

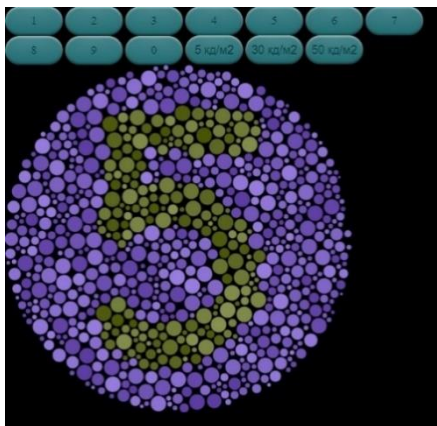


Fig. 5. The example of polychromatic table

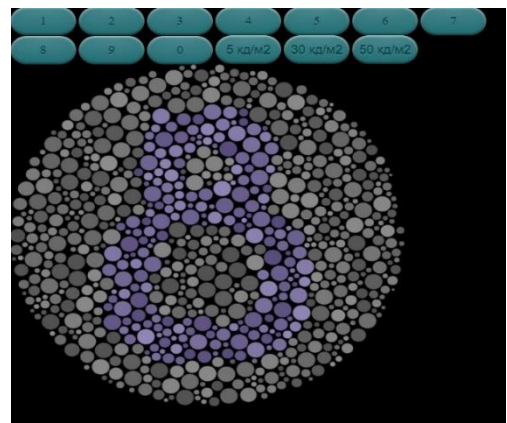


Fig. 6. The example of the polychromatic table

As a result of testing on the proposed program-hardware complex "Balls" you can get conclusions about the human color vision. If all the answers on the distinction of numbers are wrong, then we can conclude that there is complete color blindness. Partial color blindness can occur if there are false answers for specific color combinations.

The paper gives a relationship between the value characterizing for video applications the discrepancy between the colors of the transmitted scene and its image, and the distortions can reach levels from barely noticeable to unacceptable. Comparison of the estimates with the data of Figures 4, 5 suggests that under conditions of independently varying image surroundings and adaptation brightness when shooting on the transmitting side and playing on the receiving side can lead to color distortions from imperceptible or barely noticeable to the level of unacceptable reduction in image quality.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] M. Ronnier Luo, Guihua Cui, Changjun Li Uniform Colour Spaces based on CIECAM02 Colour Appearance Model – Colour Research and Application, Volume 31, Issue 4, May 2005.
- [2] CIE 159:2004 Technical Report. A Colour Appearance Model for Colour Management Systems: CIECAM02.
- [3] Maureen Stone, Danielle Szafir, Vidya Setlur “An Engineering Model for Color Difference as a Fuction of Size.” 22nd IS&T Color and Imaging Conference (Boston, November 3-7, 2014).
- [4] Mark D. Fairchild Color Appearance Models – Second Edition, Wiley-IS&T series in imaging science and technologies, 2005.
- [5] Ukraine. The method of determination boundaries in uniform color space of color gamut transmitted and reproduced by TV and other imaging systems. – November. – 2013.
- [6] Ukraine. Characteristics of color appearance of TV images: adaptivity of color perception to viewing conditions. Document 6C/73. October 2012.
- [7] O. V. Gofaizen, V. V. Pilyavskiy “Color gamut transmitted by digital television systems” Digital Technologies. 2012. No. 11.

Теорія Ентропійного Аналізу та її Застосування у Вирішенні Прикладних Обчислювальних Задач

Андрій Сегін
кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Університет ТНЕУ
Тернопіль, Україна
andriy.segin.name@mail.com

Entropy Analysis Theory and its Application in the Solution of Applied Calculation Tasks

Andriy Segin
dept. of Specialized Computer Systems
TNEU University
Ternopil, Ukraine
andriy.segin.name@mail.com

Анотація — В роботі досліджено ентропійні характеристики восьми розрядного АЦП, на основі чого запропоновано нову архітектуру АЦП з ентропійно-маніпульованими сигналами на виході.

Abstract — In this paper, the entropy characteristics of the eight-bit ADC are investigated, based on which a new architecture of the ADC with entropy-manipulated output signals is proposed.

Ключові слова — ентропія, аналого-цифровий перетворювач.

Keywords — entropy, analog-to-digital converter.

I. ВСТУП

Телекомунікаційні системи та теорія сигналів останнім часом інтенсивно розвиваються завдяки стрімкому розвитку цифрової техніки. При цьому для аналізу сигналів і каналів зв'язку часто користуються ентропійними оцінками, вперше яку було введено К. Шеноном [1] і отримала подальший розвиток в роботах Боюна, Лонге, Николайчука та інших авторів [2 – 3].

Приведені в цих роботах оцінки ентропії знайшли своє застосування у конкретних умовах і мають певні переваги та недоліки, які добре описані в літературних джерелах.

Проте теорія інформації щодо ентропії може бути розвинута і знайти свої нові застосування в телекомунікаційних системах, цифровій техніці та інших сферах.

II. ЕНТРОПІЙНА ХАРАКТЕРИСТИКА ШЕНОНА ВОСЬМИРОЗРЯДНОГО АЦП

В роботі досліджено оцінку ентропії за Шеноном для дискретних джерел інформації, яка має відомий вираз:

$$H = -p_i \log_2 p_i, \quad (1)$$

де $p_i \frac{n_i}{N}$ – імовірність появи i -ї події,

N – загальна кількість експериментів.

Вираз (1) може бути переписаний в іншому вигляді, який є більш зручний для подальшого дослідження:

$$H = -\frac{n_i}{N} \log_2 \frac{n_i}{N} = \frac{n_i}{N} (\log_2 N - \log_2 n_i). \quad (2)$$

Досліджено характеристику ентропії за Шеноном, яка обчислена для кожного каналу восьмирозрядного АЦП, при умові, що проведено $N = 256$ випробувань і всі випробування є статистично незалежними. Тоді для кожного i -го вихідного каналу кількість попадань n_i становить від 1 до N . Отримана характеристика ентропії представлена на рисунку 1, а її цифрові значення в таблиці 1.

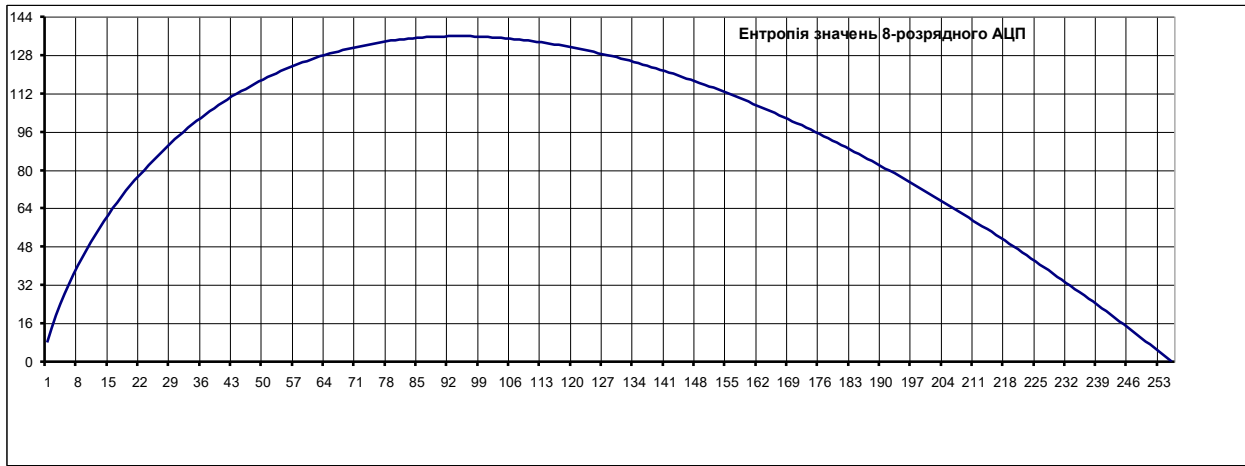


Рис. 1. – Графік ентропії при різних значеннях появи i -ї події для $n_i = \overline{I, N}$.

TABLE III. ЗНАЧЕННЯ ЕНТРОПІЇ ДЛЯ ВСІХ $n_i = \overline{I, N}$

n_i	Ентропія H в десятичній системі	Ентропія H в двійковій системі
1	8,00	1000,00000000000000000000
2	14	1110,00000000000000000000
3	19,2451125	10011,00110000000000000000
4	24	11000,00000000000000000000
5	28,39035953	11100,01100000000000000000
6	32,490225	100000,01100000000000000000
7	36,34851555	100100,01000000000000000000
8	40	101000,00000000000000000000
9	43,47067499	101011,01100000000000000000
10	46,78071905	101110,11000000000000000000
11	49,94625219	110001,11100000000000000000
12	52,98044999	110100,11100000000000000000
13	55,89428366	110111,11100000000000000000
14	58,69703109	111010,10100000000000000000
15	61,39664107	111101,01100000000000000000
16	64	1000000,00000000000000000000
17	66,5131317	1000010,10000000000000000000
18	68,94134997	1000100,11000000000000000000
19	71,28937724	1000111,01000000000000000000
20	73,5614381	1001001,10000000000000000000
21	75,76133412	1001011,11000000000000000000
22	77,89250439	1001101,11000000000000000000
23	79,95807501	1001111,11000000000000000000
24	81,96089998	1010001,11000000000000000000
25	83,90359526	1010011,11000000000000000000
26	85,78856733	1010101,11000000000000000000
27	87,61803744	1010111,10000000000000000000
28	89,39406218	1011001,01000000000000000000

29	91,11855114	1011011,00000000000000000000
30	92,79328213	1011100,11000000000000000000
31	94,41991438	1011110,01000000000000000000
32	96	1100000,00000000000000000000
33	97,53499406	1100001,10000000000000000000
34	99,0262634	1100011,00000000000000000000
35	100,4750944	1100100,01000000000000000000
36	101,8826999	1100101,11000000000000000000
37	103,2502255	1100111,01000000000000000000
38	104,5787545	1101000,10000000000000000000
39	105,8693135	1101001,11000000000000000000
40	107,1228762	1101011,00000000000000000000
41	108,3403678	1101100,01000000000000000000
42	109,5226682	1101101,10000000000000000000
43	110,6706155	1101110,10000000000000000000
44	111,7850088	1101111,11000000000000000000
45	112,8666107	1110000,11000000000000000000
46	113,91615	1110001,11000000000000000000
47	114,934324	1110010,11000000000000000000
48	115,9218	1110011,11000000000000000000
49	116,8792176	1110100,11000000000000000000
50	117,8071905	1110101,11000000000000000000
51	118,7063076	1110110,10000000000000000000
52	119,5771347	1110111,10000000000000000000
53	120,4202159	1111000,01000000000000000000
54	121,2360749	1111001,00000000000000000000
55	122,0252158	1111010,00000000000000000000
56	122,7881244	1111010,11000000000000000000
57	123,5252692	1111011,10000000000000000000
58	124,2371023	1111100,00000000000000000000
59	124,9240601	1111100,11000000000000000000
60	125,5865643	1111101,10000000000000000000

61	126,2250224	1111110,00000000000000000000
62	126,8398288	1111110,11000000000000000000
63	127,4313648	1111111,01000000000000000000
64	128	1000000,00000000000000000000
65	128,5460922	1000000,10000000000000000000
66	129,0699881	1000001,00000000000000000000
67	129,5720242	1000001,10000000000000000000
68	130,0525268	1000010,00000000000000000000
69	130,5118125	1000010,10000000000000000000
70	130,9501888	1000010,10000000000000000000
71	131,3679545	1000011,00000000000000000000
72	131,7653999	1000011,10000000000000000000
73	132,1428072	1000100,00000000000000000000
74	132,5004509	1000100,10000000000000000000
75	132,8385982	1000100,10000000000000000000
76	133,157509	1000101,00000000000000000000
77	133,4574364	1000101,00000000000000000000
78	133,7386269	1000101,10000000000000000000
79	134,0013209	1000110,00000000000000000000
80	134,2457524	1000110,00000000000000000000
81	134,4721498	1000110,00000000000000000000
82	134,6807356	1000110,10000000000000000000
83	134,8717272	1000110,10000000000000000000
84	135,0453365	1000111,00000000000000000000
85	135,2017704	1000111,00000000000000000000
86	135,3412311	1000111,00000000000000000000
87	135,4639159	1000111,00000000000000000000
88	135,5700176	1000111,10000000000000000000
89	135,6597246	1000111,10000000000000000000
90	135,7332213	1000111,10000000000000000000
91	135,7906877	1000111,10000000000000000000
92	135,8323	1000111,10000000000000000000
93	135,8582306	1000111,10000000000000000000
94	135,8686479	1000111,10000000000000000000
95	135,8637172	1000111,10000000000000000000
96	135,8435999	1000111,10000000000000000000
97	135,8084543	1000111,10000000000000000000
98	135,7584353	1000111,10000000000000000000
99	135,6936946	1000111,10000000000000000000
100	135,614381	1000111,10000000000000000000
101	135,5206402	1000111,10000000000000000000
102	135,4126151	1000111,00000000000000000000
103	135,2904457	1000111,00000000000000000000
104	135,1542693	1000111,00000000000000000000
105	135,0042206	1000111,00000000000000000000
106	134,8404318	1000110,10000000000000000000

107	134,6630325	1000110,10000000000000000000
108	134,4721498	1000110,00000000000000000000
109	134,2679086	1000110,00000000000000000000
110	134,0504315	1000110,00000000000000000000
111	133,8198388	1000101,10000000000000000000
112	133,5762487	1000101,10000000000000000000
113	133,3197772	1000101,00000000000000000000
114	133,0505384	1000101,00000000000000000000
115	132,7686441	1000100,10000000000000000000
116	132,4742046	1000100,00000000000000000000
117	132,1673278	1000100,00000000000000000000
118	131,8481202	1000011,10000000000000000000
119	131,5166862	1000011,10000000000000000000
120	131,1731285	1000011,00000000000000000000
121	130,8175483	1000010,10000000000000000000
122	130,4500448	1000010,00000000000000000000
123	130,0707158	1000010,00000000000000000000
124	129,6796575	1000001,10000000000000000000
125	129,2769644	1000001,00000000000000000000
126	128,8627296	1000000,10000000000000000000
127	128,4370448	1000000,00000000000000000000
128	128	1000000,00000000000000000000
129	127,5516841	1111111,10000000000000000000
130	127,0921843	1111111,00000000000000000000

240	22,34625705	10110,01010000000000000000
241	20,99366997	10100,11110000000000000000
242	19,63509658	10011,10100000000000000000
243	18,27056162	10010,01000000000000000000
244	16,90008963	10000,11100000000000000000
245	15,52370494	1111,10000000000000000000
246	14,14143169	1110,00100000000000000000
247	12,7532938	1100,11000000000000000000
248	11,35931502	1011,01011000000000000000
249	9,959518915	1001,11110000000000000000
250	8,553928834	1000,10001000000000000000
251	7,142567958	111,00100100000000000000
252	5,725459278	101,10111000000000000000
253	4,302625602	100,01001100000000000000
254	2,87408956	10,11011100000000000000
255	1,439873601	1,01110000000000000000

Як видно з представленої на рис. 1 характеристики вона має асиметричну форму з максимумом у точці $n_i = 94$. При цьому, значення ентропії мають попарно однакові значення для всіх точок за виключенням максимуму. Так, наприклад, для $n_i = 64$ і $n_i = 128$, які в таблиці виділені

сірим кольором, значення ентропії мають однакове значення $H = 128 \text{ bit}$ в десятковому представленні.

Ці властивості можна використати для побудови АЦП з ентропійно-маніпульованими сигналами в базисі Хаара [4], структурна схема якого представлена на рисунку 2.

III. АРХІТЕКТУРА ТА ПРИНЦИП ФУНКЦІОНУВАННЯ АЦП ВИХІДНИМИ ЕНТРОПІЙНО-МАНІПУЛЬОВАНИМИ СИГНАЛАМИ В БАЗИСІ ХААРА

В основу роботи пристрою покладено представлення вихідних кодів АЦП паралельного типу в інверсному паралельному коді теоретико-числового базису Хаара, що дозволило паралельно накопичувати цифрові коди ймовірностей p_i , які відповідають пороговим значенням компараторів у відповідних лічильниках пристрою

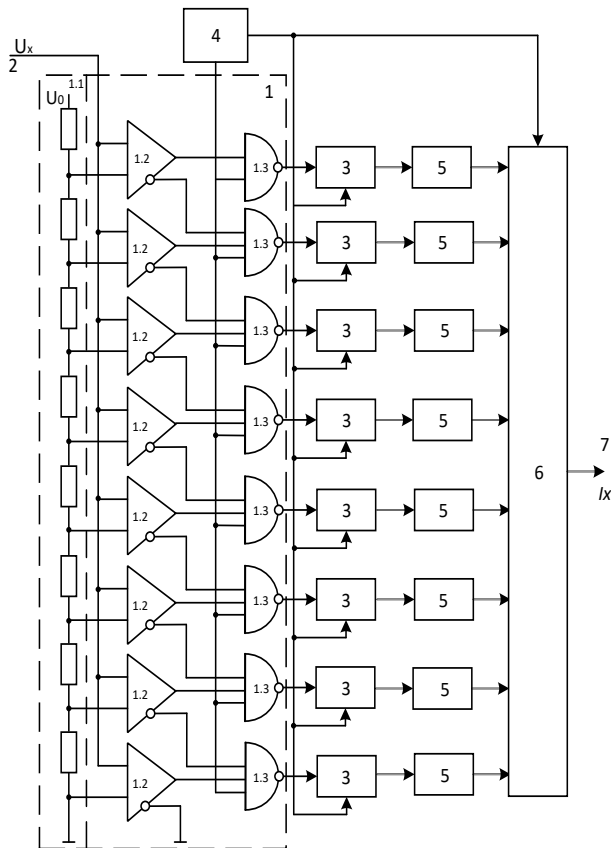


Рис. 2. Структурна схема АЦП ентропійно маніпульованих сигналів в інверсному паралельному коді теоретико-числового базису Хаара. 1 – АЦП; 2 – інформаційний вхід пристрою, 1.1 – група вірцевих резисторів, 1.2 – компаратори з парафазними виходами (прямим та інверсним), 1.3 – логічні елементи І-НЕ, 3 – лічильники, 4 – синхронізатор; 5 – шифратори, 6 – пірамідальний суматор, 7 – вихід пристрою.

На рис. 2 показано структурну схему пристрою, який містить: 1 – АЦП; 2 – інформаційний вхід пристрою, 1.1 – група вірцевих резисторів, 1.2 – компаратори з парафазними виходами (прямим та інверсним), 1.3 – логічні елементи І-НЕ, 3 – лічильники, 4 – синхронізатор; 5 – шифратори, 6 – пірамідальний суматор, 7 – вихід пристрою.

Пристрій працює наступним чином. На початку кожного циклу визначення ентропії сигналом другого виходу синхронізатора 4 всі лічильники 3 скидаються у нульовий стан, а сигнали першого виходу синхронізатора 4 на інтервалі вибірки об'єму випадкових подій N тактують роботу логічних елементів І-НЕ 1.3.

На інтервалі циклу роботи пристрою у кожному лічильнику 3 накопичується відповідна кількість імпульсів n_i , коди яких подаються на входи відповідних шифраторів 5, на виходах яких таблично формуються коди добутків $\frac{n_i}{N} \cdot \log_2 \left(\frac{n_i}{N} \right)$, які поступають на відповідні входи багаторозрядного пірамідального суматора 6, з виходу 7 якого на початку кожного циклу роботи пристрою сигналом другого виходу синхронізатора 4 зчитуються коди визначеної ентропії.

Таким чином на виході пристрою утворюється сигнал в базисі Хаара, що відповідає ентропії кожного рівня.

Такий пристрій може використовуватися для шифрованих каналів зв'язку та передачі даних із захистом від завад. Також його можна застосувати для визначення ентропійних характеристик джерела інформації.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. — М.: ил, 1963. — 830 с.
- [2] Колмогоров А.Н. Теория передачи информации: Сес. АН СССР по науч. пробл. автоматизации пр-ва. Пленар. заседания. — М.: Изд-во АН СССР, 1957. — 15с.
- [3] Николайчук, Я. М. Теоретичні основи формування ентропійних моделей на базі кореляційних функцій / Я. М. Николайчук, І. О.Сабаш, А. І. Сегін // Інформаційні технології і системи : наук.-техн. журнал. — Львів, 2002. — Т. 5, № 1-2 — С. 13-21.
- [4] Патент України на корисну модель UA 121046 МПК (2 017.01) С06P 17/00 Пристрій для визначення ентропії / А. Р. Воронич, Л.М. Николайчук, Н.Я. Возна, Т.І. Пастух. № u 2017 05669; заявл. 08.06.2017; опубл. 27.11.2017, Бюл. № 22

Ітеративне Декодування Циклічних Кодів

Василь Семеренко
кафедра обчислювальної техніки,
Вінницький національний технічний університет
Вінниця, Україна
vpsemerenko@ukr.net

Iterative Decoding of Cyclic Codes

Vasyl Semerenko
Department of Computer Technique
Vinnytsia National Technical University
Vinnytsia, Ukraine,
vpsemerenko@ukr.net

Анотація—Проаналізовані особливості ітеративного декодування циклічних кодів на основі жорстких рішень. Розглянуті математичні основи циклічних перестановок з використанням лінійних автоматів в двійкових полях Галуа.

Abstract—The regularities of iterative decoding of cyclic codes based on hard decision is analyzed. The mathematical foundation of cyclic permutation using the linear automaton in binary Galois fields is considered.

Ключові слова—циклічні коди; ітеративне декодування; перестановки; лінійні автомати

Keywords—cyclic codes; iterative decoding; permutation; linear automaton

I. ВСТУП

За останні десятиріччя з'явилися нові типи зв'язку, зокрема, безпроводний і мобільний зв'язок. Широке розповсюдження отримав багатоканальний зв'язок, завадостійкі коди знайшли свої застосування в інших сферах, наприклад, в системах зберігання даних.

Практичні потреби сприяли розробці нових теоретичних моделей каналів та нових завадостійких кодів. Як відомо, К. Шеннон не дав конструктивного методу побудови найкращих завадостійких кодів, а лише сформулював критерії оптимального передавання даних у вигляді своїх теорем [1].

У зв'язку з цим виникає необхідність подальшої розробки теорії завадостійкого кодування, обґрунтування оптимальності завадостійких кодів та їх властивостей.

II. ЖОРСТКЕ ТА М'ЯКЕ ДЕКОДУВАННЯ

Для лінійних блокових завадостійких кодів, як і для згорткових кодів, існують два основних типи декодування [2]:

- на основі жорстких рішень (hard decision),
- на основі м'яких рішень (soft decision).

Декодер з жорстким рішенням працює в Хемінговому

просторі, який може відповідати як двійковому, так і недвійковому векторному просторі. В двійковому адресному просторі використовуються лише символи з поля Галуа $GF(2)$, а в недвійковому адресному просторі – символи з поля Галуа $GF(2^m)$.

Основною метрикою Хемінгового простору є мінімальна кодова відстань d_{min} , яка визначається як мінімум Хемінгових відстаней по всім можливим парам кодових слів

$$d_{min} = \min\{d_H(Z_i, Z_j) \mid Z_i \neq Z_j\},$$

де d_H - число розрядів, за якими кодові слова Z_i і Z_j відрізняються.

Жорсткий декодер отримує з виходу демодулятора лише послідовність символів поля Галуа і його задача полягає у формуванні такого кодового слова Z_h , яке знаходиться на мінімальній Хемінговій відстані від слова Z , надісланого від кодера. Найкращою математичною моделлю каналу, в якому працює жорсткий декодер, є двійково-симетричний канал. Основні переваги жорсткого декодування – висока швидкість та відносно проста апаратна реалізація, однак складність обчислень починає швидко зростати при збільшенні кратності помилок, які треба виправити.

Декодер з м'яким рішенням працює в Евклідовому просторі і формує таке кодове слово Z_s , яке мінімізує квадрат Евклідової відстані між ним та переданим словом Z :

$$D^2 = (Z, Z_s) = \sum_{i=0}^{n-1} (z_i, z_i^s)^2, \quad z_i \in Z, z_i^s \in Z_s.$$

Найбільш придатною математичною моделлю каналу при м'якому декодуванні є канал з адитивним білим гаусовим шумом (АБГШ). В такому каналі демодулятор надає декодеру додаткову інформацію про вплив шуму на ступінь спотворення окремих розрядів слова Z . Завдяки цьому можна отримати додатковий вигравш по кодуванні

(близько 2 дБ) [3], але м'яке декодування більш трудомістке в порівнянні з жорстким з таких причин:

- необхідність роботи з дійсними числами, що значно ускладнює програмно-апаратну реалізацію,
- необхідність обчислення апостеріорних характеристик розрядів кодових слів.

Для оцінки якості декодування можна використовувати спеціальні границі, які задаються як в аналітичному, так і в графічному виглядах.

Перший тип границь – асимптотичні – показують співвідношення між коректувальною здатністю коду (його мінімальною кодовою відстанню) та параметрами коду (його довжиною та швидкістю). Границі Хемінга та Плоткіна дають верхню межу, а Варшимова-Гілберта – нижню межу для кодової відстані “найкращого” коду. Асимптотичні границі орієнтовані на кодування-декодування на основі жорстких рішень [4].

Найвідомішою границею для кодових характеристик є границя Шеннона, яка базується на відомій теоремі Шеннона для каналів з шумами: за будь-якої продуктивності джерела повідомлень, меншої за перепускную здатність каналу, є такий спосіб завадостійкого кодування, який при необмеженому збільшенні довжини коду дає змогу забезпечити передавання всієї інформації з як завгодно малою ймовірністю помилки [1]. Границя Шеннона орієнтована на кодування-декодування на основі м'яких рішень.

На практиці аналіз оптимальності завадостійких кодів здійснюється за допомогою графіків BER (*bit error rate*), які показують залежність середньої ймовірності помилкового розряду від співвідношення E_b/N_o для цих кодів (E_b – енергія біта, N_o – спектральна густина потужності шуму). Чим ближчою є відстань на графіку BER від кодової кривої до границі Шеннона, тим кращим буде код. Чи можна вважати такий критерій оптимальності адекватним у всіх випадках?

Ім'я видатного американського математика К. Шеннона назавжди пов'язано з теорією інформації. Однак, необхідно уточнити, що К. Шеннон є родоначальником лише однієї вітки теорії інформації – ймовірнісної. Розробка всієї теорії інформації – заслуга багатьох вчених (Р. Хартлі, А. Колмогорова та інших) [4].

Цілком логічним стала розробка К. Шенноном теорії завадостійкого кодування також з позицій статистичного аналізу інформаційних повідомлень. Так історично склалось, що головна увага завжди приділялась і продовжує приділятися лише шеннонівському, ймовірнісному, погляду на теорію завадостійкого кодування. Тобто, для оцінювання кодів пропонуються ймовірнісні критерії, в той час, коли переважна кількість кодів були створені з позицій комбінаторного методу вимірювання інформації і методи кодування і декодування для них здійснювались на основі жорстких, тобто точних рішень.

Варто відзначити, що в 60-і та 70-і роки для окремих класів кодів були розроблені м'які методи декодування як

доповнення до жорстких методів. Єдину достатньо відому спробу створити повністю ймовірнісний завадостійкий код здійснив Р. Галагер на початку 60-х років [5], однак складність операцій кодування і декодування цього коду не дозволили його реалізувати на практиці.

III. КОДИ З ІТЕРАТИВНИМ ДЕКОДУВАННЯМ

Прошло майже три десятиріччя, перш ніж вдалось повністю реалізувати коди Галагера, відомі нині під назвою “код з малою густиною перевірок на парність” (*low-density parity-check (LDPC) codes*).

Розглянемо ці коди детальніше. LDPC коди є найбільш повним втіленням на практиці теореми Шеннона про передачу інформації по каналу зв'язку із завадами. При безконечно великій довжині кодового слова (що еквівалентно безконечно великому інтервалу часу декодування) можна виправити практично всі помилки. Якби одночасно вимагалось виправити всі помилки протягом одного умовного такту часу, тоді знадобився б декодер безконечної складності. Такий завадостійкий код неможливо було б реалізувати на практиці.

Частково обійти проблему складності вдалось в LDPC-кодах завдяки багатотактному (ітеративному) способу декодування: складність декодування зменшується до прийнятних значень за рахунок збільшення тактів (ітерацій) декодування [6]. Аналогічним способом розв'язується і проблема коректувальної здатності: за рахунок збільшення ітерацій декодування збільшується і кількість помилок, що виявляються та виправляються.

Однак, в LDPC-кодах ще залишається багато проблем, яких неможливо позбутись повністю, оскільки вони вже зачіпають саму сутність цих кодів: необхідність дуже великої довжини кодів, значна затримка результатів декодування, наявність порогу декодування, складність обчислень. Все це є наслідком того, що LDPC-коди базуються на основі м'яких рішень. Аналогічні проблеми існують і в турбо-кодах, оскільки в них також використовується ітеративне декодування на основі м'яких рішень. Але всі зазначені проблеми не заважають вважати LDPC-коди та турбо-коди найкращими кодами, оскільки вони майже впритул наблизились до границі Шеннона. Варто зауважити, що ці коди можуть бути кращими лише серед ймовірнісних кодів.

Адже існує великий клас завадостійких кодів, які використовують при кодуванні і декодуванні жорсткі рішення. Це є всім відомі циклічні коди: Ріда-Соломона, БЧХ, Файра, CRC. Так, вони далекі від границі Шеннона, але широка сфера їх застосування красномовно свідчить про високі характеристики цих кодів. Звичайно, за 70 років, що минули від часу появи циклічних кодів, теж накопичилось чимало проблем. Наприклад, метод Берлекемпа-Мессі [4], який колись вважався зразком використання математичних методів в кодуванні, нині вже майже не використовується із-за його складності. На практиці частіше використовуються різноманітні неалгебраїчні методи: мажоритарні, багатопорогові [7], норменні [8]. Ці методи також мають суттєві недоліки.

Перспективним напрямком може стати поєднання

ітеративного декодування з жорсткими рішеннями.

IV. МАТЕМАТИЧНІ ОСНОВИ ІТЕРАТИВНОГО ДЕКОДУВАННЯ НА ОСНОВІ ЖОРСТКИХ РІШЕНЬ

Ітеративне декодування на основі жорстких рішень має базуватись на використанні цілочисельної математики. Таким математичним апаратом можуть бути обчислення в полях Галуа.

Ітеративний принцип обчислень передбачає розбиття всієї задачі на велику кількість якомога простих процедур, які повторюються. Цій вимозі найкраще відповідають неалгебраїчні методи декодування.

Неалгебраїчне декодування на основі циклічних перестановок розрядів кодового слова типу

$$i \rightarrow (i + \nu) \bmod n, \quad GF(2), \nu = 2, 3, 4, \dots \quad (1)$$

запропонував ще сам автор циклічних кодів [3].

На перший погляд може здатись дивним той факт, що багато різних методів не знаходили свого застосування у циклічних кодах. Пояснення може бути простим: всі дослідники намагались зробити свої розробки універсальними і придатними для всіх лінійних кодів, куди входять, окрім циклічних, багато інших підкласів кодів (навіть LDPC-коди). Звідси і переважний вибір перевіряльної матриці H або породжувальної матриці G як основної математичної моделі коду [7].

Тому доцільним є вибір такого математичного представлення, яке є придатним і зручним лише для одного підкласу кодів – циклічних кодів. Як математичну модель циклічних кодів будемо використати автоматну модель, яка базується на теорії лінійних послідовнісних схем (ЛПС) [9]. ЛПС – це скінчений автомат в двійкових полях Галуа, який описується функцією переходів

$$S(t+1) = A \times S(t) + B \times U(t), \quad GF(2) \quad (2)$$

і функцією виходів

$$Y(t) = C \times S(t) + D \times U(t), \quad GF(2),$$

де A, B, C, D – характеристичні матриці ЛПС; $S(t)$ – слово стану; $U(t)$ – вхідне слово; $Y(t)$ – вихідне слово.

Розглянемо математичні основи перестановочного декодування циклічних кодів також з автоматних позицій [10]. Формування перестановок можна інтерпретувати як результат роботи деякого генератора перестановок і представити його функціонування скінченим автоматом Мура Λ з скінченою множиною станів S , скінченою множиною виходів Y , функцією переходів

$$S(t+1) = P \times S(t), \quad GF(n)$$

і функцією виходів

$$Y(t) = S(t), \quad GF(n),$$

де P – оператор перестановок.

На входи автомата Λ поступають лише нулі, а виходами автомата є його стан. На такті t стан

$$S(t) = \{s(1), s(2), s(3), \dots, s(n)\}$$

представляє собою значення позицій всіх n розрядів кодового слова Z (n, k)-коду. Наступний стан $S(t+1)$ відрізняється від попереднього стану $S(t)$ тим, що всі позиції розрядів кодового слова циклічно зміщуються на однакову цілочисельну константу ν згідно (1). Елементами множини $S(t)$ є також цілі числа від 1 до n , що є наслідком вибору жорстких рішень.

Спочатку перший стан $S(1)$ автомата Λ збігається з початковим значенням кодового слова Z . Далі генератор перестановок формує наступні стани автомата Λ і кожну таку процедуру будемо називати ітерацією. Через деяке визначене число ітерацій генератор знову переходить в початковий стан (Рис.1).

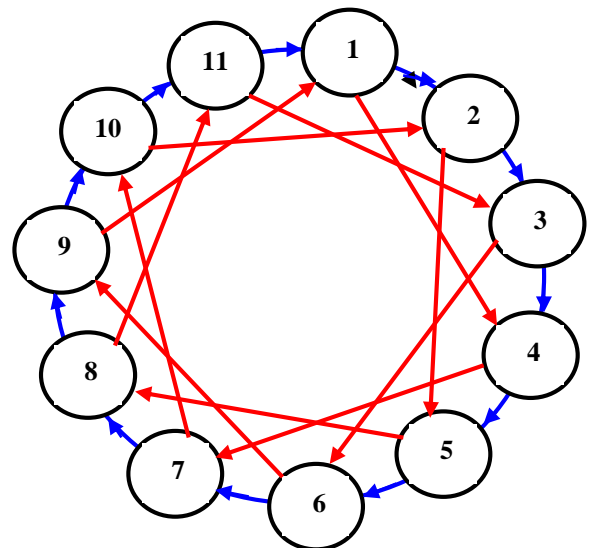


Рис.1 Циклічні перестановки при $n=11$ і $\nu=3$.

До генератора перестановок пред'являються такі вимоги:

- число ітерацій має бути максимальним ($n-1$);
- всі розряди кодового слова повинні пройти через максимальну ($n-1$) кількість нових позицій.

Структура послідовності перестановок залежить від співвідношення параметрів n та ν . Можна відмітити такі основні закономірності.

1. Якщо n – просте число, тоді число ітерацій буде максимальною, тобто $(n-1)$. При наявності спільного кратного m параметрів n та ν формується m ітерацій тривалістю $L = \frac{n}{m}$ тактів.
2. Друга вимога до генератора перестановок може бути виконана лише при відсутності якірних та маятникових розрядів.

Під якірними (маятниковими) розрядами кодового слова будемо розуміти такі розряди, які постійно

знаходяться в одній позиції (періодично міняються місцями з іншими розрядами). Такий ефект, коли при ітеративному декодуванні частина помилок не піддається корекції, називають порогом корекції. Якщо для LDPC-кодів та турбо-кодів поріг корекції (“error floor”) присутній завжди, то при перестановочному декодуванні його легко можна обійти. Наприклад, розряд m буде якірним, якщо буде виконуватись умова

$$(m+1) \bmod n = (\nu m + 1) \bmod n.$$

Якірні і маятникові розряди будуть відсутні, якщо довжина коду n є простим числом.

V. ІТЕРАТИВНЕ ДЕКОДУВАННЯ ЦИКЛІЧНИХ КОДІВ НА ОСНОВІ ЖОРСТКИХ РІШЕНЬ

Процес декодування циклічного (n, k) -коду на основі автоматних моделей складається з двох етапів. На першому етапі обчислюється синдром, тобто стан $S(n)$, в який перейде ЛПС після подачі на її вхід кодового слова Z по рекурсивній формулі, що впливає з (2):

$$S(j+1) = A \times S(j) + B \times z_j, \quad GF(2), \quad z_j \in Z, \quad j = 1 \div n$$

Нульове значення синдрому буде свідчити про відсутність помилок в кодовому слові. Помилці кратності τ в кодовому слові $Z_{err}^{(\tau)}$, буде відповідати ненульовий синдром помилки $S_{err}^{(\tau)}()$.

Введемо поняття перевіряльного вікна як неперервної циклічної послідовності r ($r = n - k$) розрядів кодового слова (рис. 2). Позначимо перевіряльне вікно як $X^{(i)}$, якщо його крайній правий розряд є i -м розрядом кодового слова Z . Якщо таке вікно міститиме всі τ помилкових розрядів, тоді позначимо його як $X_{err}^{(i)}$. В цьому випадку синдром помилки $S_{err}^{(\tau)}()$ точно відповідатиме конфігурації помилки і для її виправлення та отримання вікна $X^{(i)}$ без помилок, достатньо виконати порозрядну операцію

$$X^{(i)} = X_{err}^{(i)} + S_{err}^{(\tau)}(n+i), \quad GF(2).$$

Набагато частіше трапляються ситуації, коли помилки розросероджені по всій довжині кодового слова. І тут на допомогу приходять перестановочне декодування. В результаті перестановок розрядів кодового слова $Z_{err}^{(\tau)}$, на одній із ітерацій всі помилкові розряди попадають в r -розрядне перевіряльне вікно і виправляються. Звичайно, при умові, якщо кількість помилок не перевищуватиме коректувальну здатність вибраного (n, k) -коду.

Виправляти помилки за традиційними межами коректувальної здатності циклічних кодів можна за допомогою узагальненого алгоритму ітеративного декодування циклічних кодів [11]. Такий алгоритм базується на спільному використанні двох циклічних кодів Хемінга з різними породжувальними поліномами степені 16, 32 або 64. Перший код призначений для пошуку можливих конфігурацій помилок в слові $Z_{err}^{(\tau)}$, а другий

код – для підтвердження коректності можливої помилки. З позицій CRC контролю перший код виступає як циклічний завадостійкий код, а другий код – як контрольна сума [12].

ВИСНОВКИ

Основною тенденцією сучасного розвитку в завадостійкому кодуванні є використання принципів ітеративності та каскадування. Ітеративні та каскадні коди дозволили працювати з великими довжинами кодів, впровадити паралельну обробку даних, а також вирішити інші проблеми, що були не під силу традиційним кодам. Однак, при цьому склалась хибна думка, що реалізація ітеративності та каскадування можлива лише на основі м'яких рішень. В [10,11], а також в представленій роботі обґрунтована можливість створення ітеративних та об'єднаних циклічних кодів на основі жорстких рішень. Такий підхід дозволяє розв'язати ряд нових задач: суттєво спростити програмно-апаратну реалізацію кодерів і декодерів, зменшити затримку при декодуванні, підвищити коректувальну здатність та швидкість кодів, обійти проблему порогу декодування. Не протиставляючи жорсткі та м'які рішення, варто підкреслити, що обидва типи обробки даних мають свої сфери, де їх застосування є оптимальним.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] К. Шеннон, Работы по теории информации и кибернетике. М.: Изд-во иностр. лит., 1963, с. 829.
- [2] Р. Морелос-Сарагоса, Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. М.: Техносфера, 2006, с. 320.
- [3] Дж. Кларк мл. и Дж. Кейн, Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи. М.: Радио и связь, 1987, с. 392.
- [4] А. Н. Колмогоров, Теория информации и теория алгоритмов. М.: Наука, 1987, с. 304.
- [5] Р. Галлагер, Коды с малой плотностью проверок на четность. М.: Мир, 1966, с. 144.
- [6] J. Li, S. Lin, K. Abdel-Ghaffar, W.E. Ryan and Jr. D.J. Costello, LDPC Code Designs, Constructions, and Unification Cambridge University Press. Online publication date: December 2016.
- [7] В. В. Золотарев, Ю. Б. Зубарев и Г. В. Овечкин, Многопороговые декодеры и оптимизационная теория кодирования. М.: Горячая линия – Телеком, 2012, с. 239.
- [8] В.К. Конопелько и В.А. Липницкий, Теория норм синдромов и перестановочное декодирование помехоустойчивых кодов. Минск, Едиториал УРСС, 2012, с. 176.
- [9] А. Гилл, Линейные последовательностные машины. М.: Наука, 1974, с. 288.
- [10] V. P. Semerenko, “On the error-correcting capabilities of iterative error correction codes,” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 1, issue 4 (97), 2019, pp. 31–39.
- [11] V. P. Semerenko, “Iterative hard-decision decoding of combined cyclic codes,” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 1, issue 9 (91), 2018, pp. 61–72.
- [12] В. П. Семеренко, “Теория и практика CRC кодов: новые результаты на основе автоматных моделей,” *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, т.4, № 9 (76), 2015, с. 38–48.

Boolean Algebra of the Sense as Model to Knowledge Extraction From Textual Information

Oleg. V. Bisikalo, Ilona V. Bohach, Anna I. Lisovenko

Department of Automation and Intelligence Information Technologies,
Vinnitsa National Technical University,
Vinnitsa, Ukraine

obisikalo@gmail.com, ilona.bogach@gmail.com, lisovenkoannaig@gmail.com

Булева Алгебра Сенсу як Модель Вилучення Знань з Текстової Інформації

О.В. Бісікало, І.В. Богач, А.І. Лісовенко

Кафедра інтелектуальних інформаційних технологій,
Вінницький національний технічний університет,
Вінниця, Україна

obisikalo@gmail.com, ilona.bogach@gmail.com, lisovenkoannaig@gmail.com

Abstract An approach to the definition of new «Boolean algebra of the sense» as model to knowledge extraction from textual information is proposed in the paper. The two-base algebraic system is denoted as the Boolean algebra of the sense (BAS). With the BAS the following set-theoretic determinations for the phenomenological concepts of the NLC figurative processing are defined: syntagma, text, attention focus, such types of memory as associative memory, random access memory, memory cache. Eight operations, three predicates and nine relationships of the BAS are formalized based on the power set graphical interpretation in the paper. With help of proposed concepts of the BAS are determined significant states of the Boolean power set for the model of extracting knowledge from the text and the main constituents of the basis of the algebraic system in the form of a relational data model are represented.

Анотація У статті запропоновано підхід до застосування нової «Булевої алгебри сенсу» як моделі вилучення знань з текстової інформації. Двохосновна алгебраїчна система визначена як булева алгебра сенсу (БАС). На основі БАС отримано теоретико-множинні визначення для таких феноменологічних понять образного аналізу природно-мовних конструкцій: синтагма, текст, фокус уваги, а також такі типи пам'яті як асоціативна, оперативна та надоперативна. У статті формалізовано вісім операторів, три предикати та дев'ять відношень БАС на основі графічної інтерпретації множини-ступеня множини образів. За допомогою запропонованих концептів БАС визначено значимі стани графу булеану для моделі вилучення знань з тексту та представлено головні складові основ алгебраїчної системи у вигляді реляційної бази даних.

Keywords: *sense; Boolean algebra; phenomenological concepts; text; natural-language constructions; operation; predicate; relationship.*

Ключові слова: *сенс; булева алгебра; феноменологічні поняття; текст; природно-мовні конструкції; операція; предикат; відношення.*

I. INTRODUCTION

Processes of knowledge extraction from textual information are very relevant now because people add more and more information in the open accessed Internet resources every year. The complexity of the problem of the text

information semantic processing, which arises under the influence of the need of taking into account many phenomenological factors [1], can be somewhat reduced at the expense of choosing the most simple modeling methods [2]. Modeling such notions as semantic space [3] and associative pairs [4] seems to be the most promising in this way. For the first time, in the paper [5] there was justified the application of a well-known from the set theory concept of a power set which was used for the formal interpretation of the cognitive space of linguistic images (LI) associative pairs. Thus, a special class of graphs is introduced, in which there is taken into consideration the specifics of the semantic combination of word forms as LI verbal signs on the basis of statistical analysis of their relationships in the natural-language constructions (NLC).

Modeling of the phenomenological components of NLC and their interaction is important in view of solving the actual problem of knowledge extraction from textual information, which can be considered as AI-complete. Some important aspects of algebraic modeling of semantic associations were elaborated in the papers [6-11]. However, the formal ways of transition from algebraic models of processing semantic information to the technologies of knowledge extraction from text were not defined.

The aims of the research are:

- to denote the formal set-theoretic determinations of key phenomenological concepts for the figurative processing of NLC as syntagma, text, attention focus, and some types of memory;
- to determine significant states of the Boolean power set for the model of extracting knowledge from the text with help of proposed concepts of the BAS;
- to represent the main constituents of the basis of the algebraic system in the form of a relational data model.

II. BAS DEFINITION

The model to knowledge extraction from textual information will be introduced with the help of a two-base algebraic structure [5]. In order to make that, there will be

applied the interpretation of the space of associative pairs in the form of a power set graph and with the concept of the "sense pyramid" taken into account. The two-base algebraic structure will be further considered as the Boolean algebra of the sense (BAS):

$$BAS = \langle B; \Omega_b \rangle, \quad (1)$$

$$\text{where } B = \{Word, Number\} \text{ – bases,} \quad (2)$$

$$\text{and } \Omega_b = \{OP, RE, IF\} \text{ – system signature.} \quad (3)$$

Within the first of the bases of "Word" it is necessary to distinguish the following types of symbolic sequences (words):

$$Word = \{Image-Word, Link-Type, Re-Word\}, \quad (4)$$

The words, which represent the language images, will be classified according to their roles in a syntagma [12]:
Object-Quality: *Object*; *Notion*; *Method*;
Method-Quality

$$Image-Word = \left\{ \begin{array}{l} Object-Quality, Object, Notion, \\ Method, Method-Quality \end{array} \right\}. \quad (5)$$

The words "Link-Type" denote the role of the LI in a sentence that corresponds to a syntagma because of a set of syntagmatic relationships types,

$$Link-Type = \{r1, r2, r3, r4, r5, r6, r7\}, \quad (6)$$

where *r1* is a definition, *r2* – predicate, *r3* – subject, *r4* – adverbial modifier of place, *r5* – adverbial modifier of time, *r6* – adverbial modifier, *r7* – object. Further verbal details of the main types of syntagmatic relationships can be made in the form of subsets of the corresponding interrogative pronouns (Pronoun).

The words from the set Re-Word will denote the attributes of the relationships that have to be introduced into the system memory block.

As the other base (*Number*), the numbers of the following types will be considered:

$$Number = \{Bi, Logic, Integer, Time\}, \quad (7)$$

where *Bi* is a n-dimensional binary code of the power set lattices; *Logic* – logic value 0 (False) та 1 (True):

$$Logic = \{0, 1\}; \quad (8)$$

Integer – integer non-negative numbers:

$$Integer = \{x | x \in Z^+\}; \quad (9)$$

Time – real non-negative numbers:

$$Time = \{x | x \in R^+\}, \quad (10)$$

For the n-dimensional binary code, the code with *i* ones will be marked through the *Bi* code, and, respectively, *n-i* zeros in all other digit positions. It goes without saying that all the vertices with the *Bi* code belong to the *i*-th layer of the power set graph.

$$Bi = \{Bi_i, i = \overline{1, n}\}. \quad (11)$$

Consequently, the two-base algebraic structure BAS allows to use the interpretation of the space of ordered pairs of images in the form of the power set graph, and to consider all the significant concepts of the figurative thinking model as the bases.

The proposed formalism provides with an opportunity to obtain theoretical multiplane determinations of the components of the figurative thinking conceptual model, despite their complex phenomenological character. Let's put such a formal hierarchy of basic concepts into an algebraic model of figurative thinking [8]:

Syntagma is a set of binary codes Syntagma that corresponds to those vertices of the "sense pyramid" graph, which serves as a figurative representation of events and a formal analogue of a simple declarative sentence (humor anchors can be considered a subset of syntagma sets)

$$Syntagma = \{x | x \in Bi_i, i = \overline{3, n}\}; \quad (12)$$

Text is a set of binary codes *Text* which corresponds to the power set vertices and represents the combination of some sequence of *m* syntagmas in such a connected subset, where each syntagma has at least one common image with other

$$Text = \{x | (x \in Bi_i, i = \overline{3, n}), (Bi - Sy_j \cap x \neq \emptyset)\}, \quad (13)$$

where *Bi - Sy_j* ∈ *Syntagma* – *j*-th syntagma from those united in a text;

Associative memory is a set of binary codes *Assoc-memory* of all the vertices from the second layer of the power set

$$Assoc-memory = \{x | x \in Bi_2\}; \quad (14)$$

Memory cache is a set of binary codes *Super-memory* which consists of *n* vertices from the first layer of the power set, each of which can be activated at any time as a result of modeling the process of perception of the corresponding image by sensory organs

$$Super-memory = \{x | x \in Bi_1\}; \quad (15)$$

Attention focus points at one of the power set vertices with a binary code *Focus* from the set of images *Super-memory* in each of the discrete time cycles

$$Focus := x \in Super-memory; \quad (16)$$

Random Access Memory is a set of binary codes *Oper – memory* which consists of the vertices from the 5th to the 9th layer of the power set, each of which represents a group of active images at the given point of time

$$Oper - memory = \{x \mid (x \in Bi_i, i = \overline{5,9})\} \quad (17)$$

The task of research has been realized by terms (1)-(17).

For a better understanding of the essence of the BAS formal expressions, the following symbols are introduced:

$$\begin{aligned} Bi - I &\in Super - memory, \\ Bi - Tw &\in Assoc - memory, \\ Bi - OM &\in Oper - memory. \end{aligned} \quad (18)$$

Then, for each of the discrete time cycles, one can associate an image that is in focus with other memory images in such a ratio

$$Bi - OM \cap Focus \neq \emptyset. \quad (19)$$

Thus, within the boundary of the algebraic BAS system, we get the formal theorem-plural definitions for the phenomenological concepts of the textual information knowledge extracting model, such as syntagma, text, focus of attention, as well as types of memory (long-term memory, associative, operational and over-operational memory).

III. OPERATIONS, PREDICATES AND RELATIONSHIPS OF THE BAS

The functional component of the proposed model is represented in the signature of an algebraic system consisting of OP operations, RE relationships, and IF predicates [13,14]. The basic operations of the BAS will include:

$$OP = \left\{ \begin{aligned} &Add - Image, Add - Twice, Evaluate - Level, Find - Image, \\ &Level - Up, Level - Down, Change - Image, Sense - Pramid \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

where *Add-Image (Bi-I)* - adding a new image - the first layer of the Boolean adds another node "the extreme right side" the code (Bi-I) for which is generated by adding the left zero to the code of the previous node; then before the codes instances of all of the previous n-1 first layer nodes and before all other entries in the memory of the infological system of the Boolean nodes a zero is added to the right side;

Add-Twice (Bi-I₁, Bi-I₂, Bi-Tw) - adding a new pair - another node is added to the second Boolean layer, the Bi-Tw code for which is constructed by

$$Bi - I_1 \cup Bi - I_2 \xrightarrow{Add - Twice} Bi - Tw; \quad (21)$$

Evaluate-Level (Bi, x) - node level determination - counting the number of units in the Bi code of the node;

Find-Image (B-I_i, Bi-I_j) - elemental search for an associated image - is the *Bi-I_j* code of the image with most total modulus of the communication power (*Se_{ij}* weights) with the image processing the *Bi-I_i* code ;;

Level-Up (Bi-OM, Bi-I) - go 1 level up - the *Bi-I* code image is added to the Bi-OM operational memory node

$$Bi - OM \cup Bi - I \xrightarrow{Level - Up} Bi - OM; \quad (22)$$

Level-Down (Bi-OM, Bi-I) - go 1 level down - the *Bi-I* code image is subtracted from the Bi-OM operational memory node

$$Bi - OM \cup (-Bi - I) \xrightarrow{Level - Down} Bi - OM; \quad (23)$$

Change-Image (Bi-OM, Bi-I₁, Bi-I₂) - Navigation between the nodes of the same layer of the boeetan is a composition of the two previous operations

$$(Bi - OM \cap (-Bi - I_1)) \cup Bi - I_2 \xrightarrow{Change - Image} Bi - OM; \quad (24)$$

Sense-Pyramid - the operation of restoring the "pyramid of meaning", namely

$$Sence - Pyramid = \left\{ \begin{aligned} &Pyramid - Up, \\ &Pyramid - Images, Pyramide - Twice \end{aligned} \right\}, \quad (25)$$

where *Pyramid-Up (Bi-Sy)* - restoring the intermediate nodes of the pyramid -with the help of known node codes of the second layer we alternately determine the Bi-Sy codes of the next layer on the basis of the successive use of the association operation \cup based on the principle of "everyone to everyone", as a result of this the received code of the next layer node differs from the previous code only by one unit in one of the digits; the recursive use of the Pyramid-Up operation allows syntagms with *i* images to reach the vertex of the pyramid (the first layer node);

Pyramid-Images (Bi-Sy) - determination of the pyramid basis - according to the known code of the pyramid vertex (the code of syntagma Bi-Sy) the nodes of its first layer (images that are part of syntagma) are determined; the loop is organized by the length of the code of the vertex - if there is a unit, then another sub-element of the first layer is added to the list of units in this category and zeros are added to all others - the loop can be limited by the amount of *x* units in the vertex code;

Pyramid-Twice (Event-Id) - determination of the sets of pairs for the pyramid - On the basis of the additional Construct and Event relationships, Event-Id events define the nodes of the second layer of the "pyramid of meaning", and it is possible to limit the search for the code of associative pairs in the set of combinations of those images, found by the result of the operation *Pyramid-Images (Bi-Sy)*.

Thus, with the help of algebraic operations of the BAS, all the basic possibilities of navigation between the nodes of the Boolean are realized and three functions, which reveal the concept of the "pyramid of meaning", are formally given.

Using the predicates, which is an integral part of the algebraic system, we will determine the meaningful for the conceptual model of the imaginative thinking of the state of the Boolean. We will define the basic composition of the predicates of the BAS as:

$$IF = \{If - Image, If - A - Twice, If - Event\}, \quad (26)$$

where $If - Image(Bi - I)$ – checks the existence of the image with the $Bi - I$ code

$$\exists Bi - I / Bi - I \in Bi_1 \rightarrow If - Image; \quad (27)$$

$If - A - Twice(Bi - Tw)$ – checks the existence of an associative pair with the $Bi - Tw$ code

$$\exists Bi - Tw / Bi - Tw \in Assoc - memory \rightarrow If - A - Twice; \quad (28)$$

$If - Event(Bi - Sy)$ – checks the existence of Syntagma $Bi - Sy$ code

$$\exists Bi - Sy / Bi - Sy \in Syntagma \rightarrow If - Event. \quad (29)$$

The relations of the algebraic system, which allow us to consider the components of the BAS in terms of the relational model of data, will be considered [12]:

$$RE = \left\{ \begin{array}{l} Image, Assoc - Twice, Construct, Event, \\ Interrogative - Pronoun, Link, Text, Words, Role \end{array} \right\}, \quad (30)$$

where $Image$ – matches the code from the set of $Bi - I$ to the words from the subsets that make up the $Image - Word$ set

$$Image \subset Bi - I \times Object - Quality \times Object \times Notion \times Method \times Method - Quality; \quad (31)$$

$Assoc - Twice$ – associative pair of images – binds the codes of the main $Bi - I1$ and subordinate $Bi - I2$ images with the $Twice - Id$ pair and the values of the direct $Force +$ forces and the reverse $Force -$ connection between them

$$Assoc - Twice \subset Bi - I_2 \times Twice - Id \times Force^+ \times Force^-; \quad (32)$$

using the $Assoc - Twice$ ratio, we can match each image sorted by the power of sub-lists communication of images associated with it (hash table), which formally provides the key role of associative memory in image analysis and synthesis;

$Construct$ – syntagmatic component – binds the Construct-Id component code to the Pronoun-Id prepositional code, the $Twice - Id$ pair code, the $Word - Id1$ master word and the $Word - Id2$ subordinate word, with the help of event-id event code and the role code of the subordinate word in this $Role - Id$ pair

$$Construct \subset Construct - Id \times Pronoun - Id \times Twice - Id \times Word - Id_1 \times Word - Id_2 \times Event - Id \times Role - Id; \quad (33)$$

When creating a new tuple in relation to $Construct$, in parallel to the corresponding tuple of the $Assoc - Twice$ ratio we add 1 to the value in the $Force +$ attribute or to the value in the $Force -$ attribute, depending on the order (direct or in

reverse) this associative connection was realized in – thus, with the help of the relationships, the accumulation of statistics is provided to reflect the use of all communications in the text;

$Event$ – binds the $Event - Id$ event code to the $Bi - Sy$ syntagma code, the code of the corresponding $Text - Id$ text, and, in fact, the sentence text $Sentence$

$$Event \subset Event - Id \times Bi - Sy \times Text - Id \times Sentence; \quad (34)$$

$Interrogative - Pronoun$ – connects the code of the $Pronoun - Id$ with the link code $Link - Id$, to which this pronoun belongs, and to the word $Pronoun$, which, in fact, is a verbal sign of the pronoun

$$\begin{array}{l} Interrogative - Pronoun \subset Pronoun - Id \times \\ Link - Id \times Pronoun; \end{array} \quad (35)$$

$Link$ – associative link – associate link code $Link - Id$ with the word $Link - Type$ that denotes this type of connection, and its verbal description $Specification$

$$Link \subset Link - Id \times Link - Type \times Specification; \quad (36)$$

$Text$ – binds the unique $Text - Id$ with the $Bi - Te$ binary code, titled $Title$, $Author$, and creation time $Time$

$$\begin{array}{l} Text - RE \subset Text - Id \times Bi - Te \times \\ Title \times Author \times Time; \end{array} \quad (37)$$

$Words$ – verbal signs of images - connects a unique $Word - Id$ to a verbal sign of $Word$ and to the respective code image $Bi - I$

$$Words \subset Word - Id \times Word \times Bi - I; \quad (38)$$

$Role$ – the role of the image in the event - binds the unique $Role - Id$ to the $Role - Type$ layer, which indicates the role of the image in the event

$$Role \subset Role - Id \times Role - Type. \quad (39)$$

The attribute names used and described above for relationships (31) - (39) will be defined in this way through the basics of the BAS:

$$Re - Word = \left\{ \begin{array}{l} Sentence, Pronoun, Specification, \\ Title, Author, Word, Role - Type \end{array} \right\}, \quad (40)$$

$$\begin{array}{l} Twice - Id, Force^+, Force^-, Construct - Id \in Integer, \\ Pronoun - Id, Word - Id, Event - Id \in Integer, \\ Link - Id, Text - Id, Role - Id \in Integer. \end{array} \quad (41)$$

Above considered model of extracting knowledge from the text is shown in Figure 1 in the form of a database schema, and the names of the n-dimensional fields with the codes of the Boolean nodes for the $Image$, $Assoc - Twice$, $Words$, $Event$, and $Text$ relationships begin with the $bi -$ prefix. It should be

noted that Image and Assoc-Twice have the independent value in the proposed relational model, since they together form an associative network of images for some subject area and bear the main content load. The rest of all relations either have an auxiliary value or actually simulate a chain of events (long-term memory) [12].

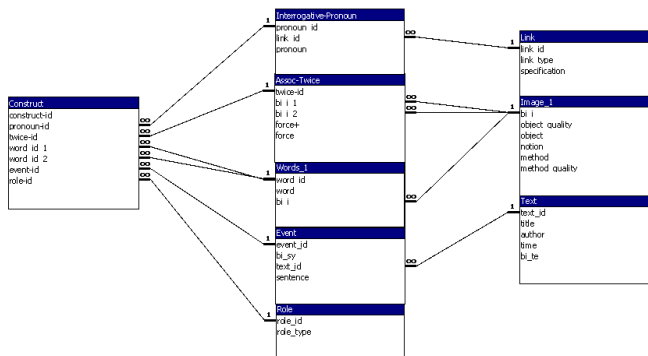


FIG. 1. The relationships within a model for extracting knowledge from text in the form of a database.

Consequently, with the help of 3 predicates of the BAS, we determined significant states of the Boolean for the model of extracting knowledge from the text, and the introduction of the 9 relations allowed to present the constituents of the basis of the algebraic system in the form of a relational data model.

CONCLUSION

Within for proposed algebraic structure BAS there were denoted such for-mal set-theoretic determinations for the following phenomenological concepts of the NLC figurative processing of the model: syntagma, text, attention focus, and such types of memory as associative memory, random access memory, and memory cache as well.

All the basic possibilities of navigation between the nodes of the Boolean with the help of eight algebraic operations of the BAS are realized, three functions, which reveal the concept of the "pyramid of meaning", are formally given. With the help of three predicates of the BAS, we determined significant states of the Boolean for the model of extracting knowledge from the text, and the introduction of the nine relations allowed presenting the constituents of the basis of the algebraic system in the form of relational data model.

So the formal ways of transition from algebraic models of processing semantic information to the new technologies of knowledge extraction from text are defined.

REFERENCES

- [1] K. Lund, C. Burgess, C. Audet, "Dissociating semantic and associative word relationships using high-dimensional semantic space," *The 18th Cognitive Science – COGSCI*, in *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, vol.27, issue 5, Washington, USA, 1996, pp. 603-608.
- [2] M. Sahlgren, "The Word-Space Model: Using Distributional Analysis to Represent Syntagmatic and Paradigmatic Relations between Words in High-dimensional Vector Spaces," *PhD Dissertation*, Stockholm University, Sweden, 2006.
- [3] I. de las Penas Cabrera, "A note on the envelopes of an associative pair" *Communication in Algebra*, val. 32, Philadelphia, USA, 2004, pp. 4133–4140.
- [4] R. Brown, Ph. Higgins, R. Sivera, "Nonabelian Algebraic Topology: Filtered Spaces, Crossed Complexes, Cubical Homotopy Groupoids," *EMS Tracts in Mathematics*, vol. 15, 2011, DOI:10.4171/083.

- [5] O. Bisikalo, Y. Ivanov, N. Karevina, "Encoding of Natural Language Information on the Basis of the Power Set," *Proceedings of the 2018 IEEE, 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, Lviv, Ukraine, 2018, pp. 17-20, DOI:10.1109/STC-CSIT.2018.8526732.
- [6] M.J. Zaki, "Scalable algorithms for association mining" *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 12, issue 3, Los Alamitos, USA, 38 p., May/June, 2000.
- [7] J. Griggs, Ch.E. Killian, C.D Savage, "Venn Diagrams and Symmetric Chain Decompositions in the Boolean Latticem" *The electronic journal of combinatorics*, vol. 11, issue 1, # R2, 2004.
- [8] O.V. Bisikalo, S. Cięszczyk, G. Yussupova, "Solving problems on base of concepts formalization of language image and figurative meaning of the natural-language constructs" *Proc. SPIE 9816, Optical Fibers and Their Applications*, 2015, 98161U, Dec 2018, DOI:10.1117/12.2229046.
- [9] J. Bohland, A. Minai, "Efficient associative memory using small-world architecture" *Neurocomputing*, vol. 38–40, 2001, pp. 489-496, Available: [https://doi.org/10.1016/S0925-2312\(01\)00378-2](https://doi.org/10.1016/S0925-2312(01)00378-2).
- [10] V. Gladun, N. Vashchenko, "Analitical Processes in Pyramidal Network" *Information Theories and Application*, Sofia: FO-COMMERCE, 2001, Available: <http://www.aduis.com.ua/English/public.HTM#V.Gladun.%20N.Vas hchenko>.
- [11] J. Herzog, T. Hibi, "Distributive Lattices Bipartite Graphs and Alexander Duality" *J Algebr Comb* vol. 22, 2005: 289. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10801-005-4528-1>.
- [12] O. Bisikalo, A. Lisovenko, O. Jahumovuch, S. Trachenko, M. Pradiivlianni "System of Computational Linguistic on Base of the Figurative Text Comprehension" *Proceedings of the 2016 IEEE First International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP)*, Lviv, Ukraine, August 23–27, 2016, House of Lviv Polytechnic National University, pp. 69–74, 2016.
- [13] Yao, Y.Y. "Constructive and algebraic methods of the theory of rough sets" *Information Sciences*, Vol. 109, No. 1-4, pp. 21-47, 1998.
- [14] Michele Benzi "Preconditioning Techniques for Large Linear Systems: A Survey" *Journal of Computational Physics*, ISSN: 0021-9991, Vol: 182, Issue: 2, Page: 418-477.

Метод та Нумеровані Карти Процесу Адитивного Аналого-Цифрового Перетворення

Любомир Петришин
кафедра управління
Університет AGH
Краків, Польща
l.b.petryshyn@gmail.com

Михайло Петришин
кафедра комп'ютерних наук та інформаційних систем
Прикарпатський національний університет
імені Василя Стефаника
Івано-Франківськ, Україна
m.l.petryshyn@gmail.com

Methods and Numeral Maps of Additive Analog to Digital Conversion Process

Lubomyr Petryshyn
dept. of Computer Science
AGH University
Krakow, Poland
l.b.petryshyn@mail.com

Mykhailo Petryshyn
dept. of Computer Science and Information Technologies
Vasyl Stefanyk Precarpathian National University
Ivano-Frankivsk, Ukraine
m.l.petryshyn@gmail.com

Анотація— В роботі розроблено методи адитивного порозрядного аналого-цифрового перетворення з порівнянням входження в межі суміжних квантів. Побудовано нумеровані карти проходження діапазону за методом перетворення, яка відображає згідно з ітераціями зони завершеного перетворення, зони очікування, різницю на кожному кроці та вихідні коди перетворення. Дані нумеровані карти доводять адекватність побудованих методів.

Abstract— In work the methods of additive bitwise balancing analog-digital conversion are developed. Constructed the numeral maps of passing the conversion range, which displays in accordance with the iteration of the final transform zone, the wait zone, the difference at each step, and the output conversion codes. These numeral maps prove the adequacy of the constructed methods.

Ключові слова— математичні моделі; нумеровані карти; аналого-цифрове перетворення; адитивні методи перетворення; перетворення форми інформації.

Keywords— mathematical models, numeral maps, analog-digital conversion, additive methods conversion, transformation of information forms.

I. ВСТУП

Сучасні глобальні комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні системи базуються на розосереджених мережах джерел інформації, формування потоків даних в яких і надійність обміну інформації є ключовим фактором стійкості об'єктів управління [1, 2]. За результатами аналізу актуального стану застосування компонентів аналого-цифрового перетворення в системах управління можна визначити, що в більшості випадків повідомлення

формується в двійкових кодах [3], а обмін даними в інформаційних системах здійснюється за стандартами мережних протоколів. Однак двійкове кодування характеризується рядом недоліків, які обумовлюють обмежене їх застосування, а використання мережних протоколів викликає значне навантаження на канали зв'язку в розосереджених комп'ютерних системах управління [4].

Метою роботи є підвищення швидкодії аналого-цифрових перетворювачів порозрядного врівноваження шляхом розробки нових методів і моделей перетворення на основі позиційних систем числення.

Перспектива застосування результатів здійснених досліджень полягає в розробці ефективних методів перетворення інформації і кодування цифрових повідомлень, впровадження яких дозволяє розширити функціональні можливості, підвищити швидкість і надійність, спростити архітектуру, енергоспоживання і зменшити засоби виробництва і експлуатації компонентів АЦ перетворення інформації в складі систем управління.

II. МОДЕЛІ АДИТИВНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ

Запропоновано таку модель адитивного перетворення, в якій для подання числових еквівалентів використано алфавіт $A=\{0; 1\}$.

Модель 1.1. Адитивне двійкове врівноваження в порядку від старшого значення розрядів мір $w_{n-1}=2^{n-1}$ до молодших значень розрядів мір $w_1=2^1$ в діапазоні перетворення $[0; 2^n)$ (із контролем входження в межі суміжних квантів $-1 \leq \Delta_y < 0$ та $0 \leq \Delta_y < 1$).

Початковим значенням міри є $w_{n-1} = 2^3 = 8$, значення суми $S_0 = 0$, значення вихідного коду перетворення $a_{n-1} = 1$; $a_{n-2} = \dots = a_1 = 0$, $a_0 = 0$, z - числовий еквівалент величини перетворення U_{trans} , ціле число, приведене до числової шкали діапазону перетворення $[0, N_{max})$. Номер кроку перетворення позначено y . Тоді, кожна з y -х ітерацій перетворення передбачає визначення різниці: $\Delta_y = z - S_y$ та значення коефіцієнта a_{n-y} в кодї перетворення $[a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_{n-(y-1)}, a_{n-y}, \dots, a_i, \dots, a_1, a_0]$ на y -й ітерації за умови збереження значень коефіцієнтів $a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_{n-(y-1)}$, з попередніх $y - 1$ ітерацій перетворення

$$a_{n-y} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } \Delta_y < -1 \\ 1, & \text{якщо } \Delta_y \geq -1 \end{cases}$$

або ж коду перетворення числового значення z із декрементуванням на y -му ітераційному кроку отриманого значення коду перетворення $[a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_{n-y}, \dots, a_1, a_0]$:

$$z = [a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_{n-y}, \dots, a_1, a_0] - 1, \quad \text{якщо } -1 \leq \Delta_y < 0.$$

Слід звернути увагу, що на y -му ітераційному кроку значення a_{n-y} повинно бути рівне 1 при $\Delta_y \geq -1$, оскільки в околі $-1 \leq \Delta_y < 0$ на y -й ітерації необхідно декрементувати значення суми $(S_y - 1)$, або ж в двійковому кодї значення коду перетворення $[a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_{n-y}, \dots, a_1, a_0] - 1$, якщо ж a_{n-y} повернути значення 0, то втрачається інформація про позицію і здійснити декрементування та обчислити значення суми $(S_y - 1)$ виявиться неможливим.

Якщо $-1 \leq \Delta_y < 0$ чи $0 \leq \Delta_y < 1$, то значення z попадає в діапазони квантів перетворення, суміжних значенню точки порівняння S_y :

$$z \in \begin{cases} [S_y - 1; S_y), & \text{якщо } -1 \leq \Delta_y < 0 \\ [S_y; S_y + 1), & \text{якщо } 0 \leq \Delta_y < 1 \end{cases} \quad (1)$$

внаслідок чого визначається їх код перетворення $[a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_{n-y}, \dots, a_1, a_0]$, а процес перетворення завершується. Інакше ітераційно визначається наступне значення суми S_{y+1} :

$$S_{y+1} = \begin{cases} S_y + w_{n-y}, & \text{якщо } \Delta_y \geq 1 \\ S_y - w_{n-y+1} + w_{n-i}, & \text{якщо } \Delta_y < -1 \end{cases}$$

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15
 xxxxxx|xxxxx|xxxxx|xxxxx|xxxxx|xxxxx|xxxxx|xxxxx|xxxxx|xxxxx|xxxxx|xxxxx|xxxxx|xxxxx|xxxxx|xxxxx|

де в діапазонах $[0 \div 1)$, $[1 \div 2)$, $[2 \div 3)$, $[3 \div 4)$, $[4 \div 5)$, $[7 \div 8)$, $[8 \div 9)$, $[11 \div 12)$, $[12 \div 13)$ перетворення завершено, а діапазони $[5 \div 6)$, $[6 \div 7)$, $[9 \div 10)$, $[10 \div 11)$, $[13 \div 14)$, $[14 \div 15)$ очікують перетворення.

Перебіг процесу перетворення здійснюється згідно наступної схеми:

Ітер.	Міра	Різниця	Сума	точка порівняння	Вихідний код перетворення								
		y	w_{y-1}	Δ_y	$S_0(0) = 0$								
0	0	$\Delta_0 = z - S_0(0)$, якщо $0 \leq \Delta_0 < 1$, то $z \in [0; 1)$, кінець	S_0	0	$a_3 = 0; a_2 = 0; a_1 = 0; a_0 = 0; 0000$ $a_3 = 0; a_2 = 0; a_1 = 0; a_0 = 0; 0000$								
	0	якщо $\Delta_0 \geq 1$, то $S_1(8) = S_0(0) + w_{n-1}(8)$, перехід до ітерації 1	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	1000
		xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx xxxxx											
1	$+w_{n-1}(8)$	$\Delta_1 = z - S_1(8)$, якщо $\Delta_1 < -1$,	$S_1 = 8$										$a_3 = 1; a_2 = 0; a_1 = 0; a_0 = 0; 1000$ то $S_2(4) = S_1(8) - w_{n-1}(8) + w_{n-2}(4)$, до ітерації 2.м, 0100

виконується наступна ітерація перетворення до виконання умови (\square) попадання значення z в суміжні діапазони $-1 \leq \Delta_y < 0$ чи $0 \leq \Delta_y < 1$ та завершення процесу перетворення.

Таким чином,

- якщо $-1 \leq \Delta_y < 0$, то цифровий код сформованої суми $(S_y - 1)$ є вихідним двійковим кодом $[a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_{n-y}, \dots, a_1, a_0] - 1$ перетворення значення z ;
- якщо $0 \leq \Delta_y < 1$, то цифровий код сформованої суми S_y є вихідним двійковим кодом $[a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_{n-y}, \dots, a_1, a_0]$ перетворення значення z .

Узагальнено y -й ітераційний цикл порівняння можна представити так:

$$y \text{ +/- } w_{n-y-1}, \quad \Delta_y = z - S_y, \quad S_y = \sum_{i=n-1}^{n-y} a_i 2^i$$

$$\text{якщо } \Delta_y < -1, \quad \text{то } S_{y+1} = S_y - w_{n-y+1} + w_{n-y}, \quad a_{n-y} = 0;$$

$$\text{якщо } -1 \leq \Delta_y < 0, \quad \text{то } z \in [S_y - 1; S_y), \text{ кінець}, \quad a_{n-y} = 1;$$

$$z = [a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_{n-y}, \dots, a_1, a_0] - 1;$$

$$\text{якщо } 0 \leq \Delta_y < 1, \quad \text{то } z \in [S_y; S_y + 1), \text{ кінець}, \quad a_{n-y} = 1;$$

$$z = [a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_{n-y}, \dots, a_1, a_0];$$

$$\text{якщо } \Delta_y \geq 1, \quad \text{то } S_{y+1} = S_y + w_{n-y}, \quad a_{n-y} = 1.$$

Приклад 2.1.а. Перетворення згідно методу двійкового адитивного врівноваження в порядку від старшого значення мір $w_{n-1} = 2^3 = 8$ до молодших значень мір $w_1 = 2^1 = 2$ в діапазоні перетворення $[0 \div 2^4 - 1) = [0 \div 15)$. Виконується двоквантве суміжне +/-, від і до +/- w_0 перетворення.

Застосовано двійковий базис мір $w_3 = 8, w_2 = 4, w_1 = 2, w_0 = 1$.

Встановлено початкові значення: $S_0 = 0; a_3 = 1, a_2 = 0, a_1 = 0, a_0 = 0$.

Нумерована карта проходження діапазону перетворення, де xxxx- перетворення завершено, _____ зона очікування перетворення, може бути представлена в наступному вигляді (для прикладу ітерація 3.м):

		якщо $-1 \leq \Delta_1 < 0$,	то $z \in [7; 8)$, кінець	$a_3 = 0; a_2 = 1; a_1 = 1; a_0 = 1; 0111$
		якщо $0 \leq \Delta_1 < 1$,	то $z \in [8; 9)$, кінець	$a_3 = 1; a_2 = 0; a_1 = 0; a_0 = 0; 1000$
		якщо $\Delta_1 \geq 1$,	то $S_2(12) = S_1(8) + w_{n-2}(4)$, до 2.b	$a_3 = 1; a_2 = 1; a_1 = 0; a_0 = 0; 1100$
	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14			
	xxxxx			
2.m	$-w_{n-1}(8) + w_{n-2}(4)$,	$\Delta_2 = z - S_2(4)$,	$S_2 = 4$	$a_3 = 0; a_2 = 1; a_1 = 0; a_0 = 0; 0100$
		якщо $\Delta_2 < -1$,	то $S_3(2) = S_2(4) - w_{n-2}(4) + w_{n-3}(2)$,	до ітерації 3.m, 0010
		якщо $-1 \leq \Delta_2 < 0$,	то $z \in [3; 4)$, кінець	$a_3 = 0; a_2 = 0; a_1 = 1; a_0 = 1; 0011$
		якщо $0 \leq \Delta_2 < 1$,	то $z \in [4; 5)$, кінець	$a_3 = 0; a_2 = 1; a_1 = 0; a_0 = 0; 0100$
		якщо $\Delta_2 \geq 1$,	то $S_3(6) = S_2(4) + w_{n-3}(2)$,	до ітерації 3.b 0110
	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14			
	xxxxx			
2.b	$+w_{n-2}(4)$,	$\Delta_2 = z - S_2(12)$,	$S_2 = 12$	$a_3 = 1; a_2 = 1; a_1 = 0; a_0 = 0; 1100$
		якщо $\Delta_2 < -1$,	то $S_3(10) = S_2(12) - w_{n-2}(4) + w_{n-3}(2)$,	до ітерації 3.m, 0010
		якщо $-1 \leq \Delta_2 < 0$,	то $z \in [11; 12)$, кінець	$a_3 = 1; a_2 = 0; a_1 = 1; a_0 = 1; 1011$
		якщо $0 \leq \Delta_2 < 1$,	то $z \in [12; 13)$, кінець	$a_3 = 1; a_2 = 1; a_1 = 0; a_0 = 0; 1100$
		якщо $\Delta_2 \geq 1$,	то $S_3(14) = S_2(12) + w_{n-3}(2)$,	до ітерації 3.b 1110
	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14			
	xxxxx			
3.m	$-w_{n-3}(4) + w_{n-3}(2)$,	$\Delta_3 = z - S_3(2)$,	$S_3 = 2$	$a_3 = 0; a_2 = 0; a_1 = 1; a_0 = 0; 0010$
		якщо $\Delta_3 < -1$,	то $z \in [0; 1)$ визначено в 0 ітерації	0000
		якщо $-1 \leq \Delta_3 < 0$,	то $z \in [1; 2)$, кінець	$a_3 = 0; a_2 = 0; a_1 = 0; a_0 = 1; 0001$
		якщо $0 \leq \Delta_3 < 1$,	то $z \in [2; 3)$, кінець	$a_3 = 0; a_2 = 0; a_1 = 1; a_0 = 0; 0010$
		якщо $\Delta_3 \geq 1$,	то $z \in [3; 4)$ визначено в 2.m ітерації	0011
	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14			
	xxxxx			
3.b	$+w_{n-3}(2)$,	$\Delta_3 = z - S_3(6)$,	$S_3 = 6$	$a_3 = 0; a_2 = 1; a_1 = 1; a_0 = 0; 0110$
		якщо $\Delta_3 < -1$,	то $z \in [4; 5)$ визначено в 2.m ітерації	0100
		якщо $-1 \leq \Delta_3 < 0$,	то $z \in [5; 6)$, кінець	$a_3 = 0; a_2 = 1; a_1 = 0; a_0 = 1; 0101$
		якщо $0 \leq \Delta_3 < 1$,	то $z \in [6; 7)$, кінець	$a_3 = 0; a_2 = 1; a_1 = 1; a_0 = 0; 0110$
		якщо $\Delta_3 \geq 1$,	то $z \in [7; 8)$ визначено в 1 ітерації	0111
	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14			
	xxxxx			
3.m	$-w_{n-4}(4) + w_{n-3}(2)$,	$\Delta_3 = z - S_3(10)$,	$S_3 = 10$	$a_3 = 1; a_2 = 0; a_1 = 1; a_0 = 0; 1010$
		якщо $\Delta_3 < -1$,	то $z \in [8; 9)$ визначено в 1 ітерації	1000
		якщо $-1 \leq \Delta_3 < 0$,	то $z \in [9; 10)$, кінець	$a_3 = 1; a_2 = 0; a_1 = 0; a_0 = 1; 1001$
		якщо $0 \leq \Delta_3 < 1$,	то $z \in [10; 11)$, кінець	$a_3 = 1; a_2 = 0; a_1 = 1; a_0 = 0; 1010$
		якщо $\Delta_3 \geq 1$,	то $z \in [11; 12)$ визначено в 2.b ітерації	1011
	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14			
	xxxxx			
3.b	$+w_{n-3}(2)$,	$\Delta_3 = z - S_3(14)$,	$S_3 = 14$	$a_3 = 1; a_2 = 1; a_1 = 1; a_0 = 0; 1110$
		якщо $\Delta_3 < -1$,	то $z \in [12; 13)$ визначено в 2.b ітерації	1100
		якщо $-1 \leq \Delta_3 < 0$,	то $z \in [13; 14)$, кінець	$a_3 = 1; a_2 = 1; a_1 = 0; a_0 = 1; 1101$
		якщо $0 \leq \Delta_3 < 1$,	то $z \in [14; 15)$, кінець	$a_3 = 1; a_2 = 1; a_1 = 1; a_0 = 0; 1110$
		якщо $\Delta_3 \geq 1$,	то $z \in [15; 16)$, кінець	$a_3 = 1; a_2 = 1; a_1 = 1; a_0 = 1; 1111$
	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15			
	xxxxx			

Приклад 2.1.6. Перетворення згідно методу двійкового адитивного врівноваження в порядку від старшого значення мір $w_{n-1}=2^3=8$ до молодших значень мір $w_1=2^1=2$ в діапазоні перетворення $[0 \div 2^4 - 1] = [0 \div 15]$ та спрощеною моделлю процесу перетворення із вилученням кроків, визначених на попередніх ітераціях.

Зі складу операцій додавання та віднімання еталонних мір w_i слід зауважити, що операції маніпулювання з мірами молодшого розряду $w_0 = 2^0 = 1$ є надлишковими, оскільки на кожному із ітераційних кроків здійснюється порівняння

входження значення z в діапазоні $-1 \leq \Delta_y < 0$ та $0 \leq \Delta_y < 1$, тому максимальна кількість операцій врівноваження завжди буде меншою на одиницю порівняно із кількістю операцій порівняння, рівною n для класичного методу порозрядного врівноваження. Розташування діапазонів квантів перетворення із кроком через один на кінці процесу перетворення має регулярний характер, тому відпадає необхідність виконання операцій порівняння із мірою $w_0 = 2^0 = 1$.

Ітер. Міра Різниця Умова Сума точка
y w_{y-1} Δ_y

Вихідний код перетворення
 $S_0(0) = 0$

0	0	$\Delta_0 = z - S_0(0)$, якщо якщо	$S_0 = 0$ $0 \leq \Delta_0 < 1$, то $z \in [0; 1)$, кінець $\Delta_0 \geq 1$, то $S_1(8) = S_0(0) + w_{n-1}(8)$, перехід до ітерації 1	$a_3 = 0; a_2 = 0; a_1 = 0; a_0 = 0; 0000$ $a_3 = 0; a_2 = 0; a_1 = 0; a_0 = 0; 0000$
1	$+w_{n-1}(8)$, $\Delta_1 = z - S_1(8)$, якщо $\Delta_1 < -1$, якщо $-1 \leq \Delta_1 < 0$, якщо $0 \leq \Delta_1 < 1$, якщо $\Delta_1 \geq 1$,	$S_1 = 8$ то $S_2(4) = S_1(8) - w_{n-1}(8) + w_{n-2}(4)$, до ітерації 2.m, то $z \in [7; 8)$, кінець то $z \in [8; 9)$, кінець то $S_2(12) = S_1(8) + w_{n-2}(4)$, до 2.b	$a_3 = 1; a_2 = 0; a_1 = 0; a_0 = 0; 1000$ $a_3 = 0; a_2 = 1; a_1 = 1; a_0 = 1; 0111$ $a_3 = 1; a_2 = 0; a_1 = 0; a_0 = 0; 1000$ $a_3 = 1; a_2 = 1; a_1 = 0; a_0 = 0; 1100$	
2.m	$-w_{n-1}(8) + w_{n-2}(4)$, $\Delta_2 = z - S_2(4)$, якщо $\Delta_2 < -1$, якщо $-1 \leq \Delta_2 < 0$, якщо $0 \leq \Delta_2 < 1$, якщо $\Delta_2 \geq 1$,	$S_2 = 4$ то $S_3(2) = S_2(4) - w_{n-2}(4) + w_{n-3}(2)$, до ітерації 3.m, то $z \in [3; 4)$, кінець то $z \in [4; 5)$, кінець то $S_3(6) = S_2(4) + w_{n-3}(2)$, до ітерації 3.b	$a_3 = 0; a_2 = 1; a_1 = 0; a_0 = 0; 0100$ $a_3 = 0; a_2 = 0; a_1 = 1; a_0 = 1; 0011$ $a_3 = 0; a_2 = 1; a_1 = 0; a_0 = 0; 0100$ $a_3 = 0; a_2 = 1; a_1 = 0; a_0 = 0; 0110$	
3.m	$-w_{n-2}(4) + w_{n-3}(2)$, $\Delta_3 = z - S_3(2)$, якщо $-1 \leq \Delta_3 < 0$, якщо $0 \leq \Delta_3 < 1$,	$S_3 = 2$ то $z \in [1; 2)$, кінець то $z \in [2; 3)$, кінець	$a_3 = 0; a_2 = 0; a_1 = 1; a_0 = 0; 0010$ $a_3 = 0; a_2 = 0; a_1 = 0; a_0 = 1; 0001$ $a_3 = 0; a_2 = 0; a_1 = 1; a_0 = 0; 0010$	
3.b	$+w_{n-3}(2)$, $\Delta_3 = z - S_3(6)$, якщо $-1 \leq \Delta_3 < 0$, якщо $0 \leq \Delta_3 < 1$,	$S_3 = 6$ то $z \in [5; 6)$, кінець то $z \in [6; 7)$, кінець	$a_3 = 0; a_2 = 1; a_1 = 1; a_0 = 0; 0110$ $a_3 = 0; a_2 = 1; a_1 = 0; a_0 = 1; 0101$ $a_3 = 0; a_2 = 1; a_1 = 1; a_0 = 0; 0110$	
2.b	$+w_{n-2}(4)$, $\Delta_2 = z - S_2(12)$, якщо $\Delta_2 < -1$, якщо $-1 \leq \Delta_2 < 0$, якщо $0 \leq \Delta_2 < 1$, якщо $\Delta_2 \geq 1$,	$S_2 = 12$ то $S_3(10) = S_2(12) - w_{n-2}(4) + w_{n-3}(2)$, до ітерації 3.m, то $z \in [11; 12)$, кінець то $z \in [12; 13)$, кінець то $S_3(14) = S_2(12) + w_{n-3}(2)$, до ітерації 3.b	$a_3 = 1; a_2 = 1; a_1 = 0; a_0 = 0; 1100$ $a_3 = 0; a_2 = 0; a_1 = 1; a_0 = 1; 1011$ $a_3 = 1; a_2 = 1; a_1 = 0; a_0 = 0; 1100$ $a_3 = 1; a_2 = 1; a_1 = 0; a_0 = 0; 1110$	
3.m	$-w_{n-2}(4) + w_{n-3}(2)$, $\Delta_3 = z - S_3(10)$, якщо $-1 \leq \Delta_3 < 0$, якщо $0 \leq \Delta_3 < 1$,	$S_3 = 10$ то $z \in [9; 10)$, кінець то $z \in [10; 11)$, кінець	$a_3 = 1; a_2 = 0; a_1 = 1; a_0 = 0; 1010$ $a_3 = 1; a_2 = 0; a_1 = 0; a_0 = 1; 1001$ $a_3 = 1; a_2 = 0; a_1 = 1; a_0 = 0; 1010$	
3.b	$+w_{n-3}(2)$, $\Delta_3 = z - S_3(14)$, якщо $-1 \leq \Delta_3 < 0$, якщо $0 \leq \Delta_3 < 1$, якщо $\Delta_3 \geq 1$,	$S_3 = 14$ то $z \in [13; 14)$, кінець то $z \in [14; 15)$, кінець то $z \in [15; 16)$, кінець	$a_3 = 1; a_2 = 1; a_1 = 1; a_0 = 0; 1110$ $a_3 = 1; a_2 = 1; a_1 = 0; a_0 = 1; 1101$ $a_3 = 1; a_2 = 1; a_1 = 1; a_0 = 0; 1110$ $a_3 = 1; a_2 = 1; a_1 = 1; a_0 = 1; 1111$	

За результатами моделювання для наведеного прикладу в діапазоні $[0 \div 2^4)$ можна підсумувати, що для отримання коду в форматі чотирьох двійкових розрядів потрібно три ітераційні кроки перетворення при кількості елементів базису, що дорівнює чотири ($2^0, 2^1, 2^2, 2^3$). В узагальненому випадку кількість кроків перетворення, що становить $n-1$ згідно запропонованої моделі, є на одиницю меншою від кількості розрядів n цифрового представлення коду перетворення z .

Як було визначено постановкою задачі дослідження [5] системах керування розподіл значень параметрів перетворення джерел інформації має характер, подібний до нормального, що зумовлює необхідність більш швидкого перетворення значень у межах визначеного вузького діапазону, у порівнянні з класичним методом порозрядного врівноваження та, за необхідності, повільнішого перетворення значень поза межами цього діапазону. При цьому кількість операцій F , необхідних для АЦ перетворення в повному діапазоні збільшується до 2 разів ($F < 2n$). Це призводить до підвищення швидкодії АЦ перетворення внаслідок зменшення кількості операцій F у визначеному діапазоні зміни значень параметру перетворення ($F < n$), що дозволяє вирішити поставлене завдання дослідження. Для цього запропоновано здійснювати перетворення зі змінним порядком формування суми еталонних мір від молодших значень до старших згідно наступної моделі.

ВИСНОВКИ

Розроблено модель та нумеровану карту процесу адитивного перетворення, які, на відміну від відомих методів порозрядного врівноваження, передбачають додаткове порівняння різниці значення перетворення і сформованої суми еталонних значень врівноваження із значенням молодшого розряду. Такий спосіб перетворення забезпечує зменшення часу, формування сигналу завершення і як наслідок, прискорення процесу перетворення.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Л.Б. Петришин, "Моделювання субтрактивно-адитивного способу перетворення форми інформації." Математичний вісник НТШ; ISSN 1812-6774. — 2012 т. 9 с. 246–268
- [2] А.В.Ізмайлов, Л.Б. Петришин, "Зменшення похибок ПФІ внаслідок застосування" Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації, Вінниця. 2016.
- [3] А.И. Кондалев, "Вопросы проектирования преобразователей формы информации" Киев.: Наукова думка, 1977.
А.П. Стахов "Введение в алгоритмическую теорию измерения" Москва: Сов. радио, 1977

СЕКЦІЯ 4.

Глибинний аналіз та організація даних, технології великих даних, системи штучного інтелекту, «розумні» аплікації

SECTION 4.

Deep analysis and data organization, big data technologies, artificial intelligence systems, smart applications

Методологічна База Ефективного Застосування Мультиагентних Схем у Процесі Кодування Відеоданих з Забезпеченням Показників Цілісності Інформації та Зменшенням Обчислювального Навантаження

Володимир Бараннік

кафедра бойового застосування та експлуатації АСУ
ХНУПС імені Івана Кожедуба
Харків, Україна
vvbar.off@gmail.com

Антон Сорокун

кафедра телекомунікаційних систем
Національного авіаційного університету
Київ, Україна
anton.sorokun@gmail.com

Оксана Стеценко

кафедра інформаційно-мережної інженерії
Харківський національний університет радіоелектроніки
Харків, Україна
Barannik_V_V@ukr.net

Вікторія Хіменко

кафедра інформаційно-мережної інженерії
Харківський національний університет радіоелектроніки
Харків, Україна
vika.iv55@gmail.com

Анотація — Розглядаються умови ефективної передачі відеоданих у мережі з забезпеченням вимог щодо цілісності та сумарної затримки передавання. Розкривається сутність підходу до обробки відеотрафіку на рівні кінцевих вузлів, що передбачає використання мультиагентної схеми кодування відеопотоку у базисі технологій сімейства MPEG та вимоги до агентів, що у комплексі забезпечують виконання кодування відеоінформації, а саме – забезпечують узгодження бітової швидкості відеоданих та параметрів мережі.

Ключові слова — відеопоток; пропускна здатність; бітова швидкість; цілісність інформації; мультиагентна схема; модель обробки зображення

I. ВСТУП

Одним з найважливіших завдань, які виникають у процесі передавання даних мультимедіа, зокрема, відео, є необхідність забезпечення виконання усіх процесів обробки у реальному масштабі часу. Останнім часом актуальність даної проблематики зростає, причинами чому є наступне:

- зростання загальносвітових обсягів мультимедійних даних, що передаються у одиницю часу;
- передавання відео у мережі потребує великих обсягів даних;
- відеотрафік є найбільш чутливим до затримок та втрати пакетів з-поміж усіх інших типів даних [17].

У таких умовах значно утруднюється забезпечення процесу передавання відеоінформації з гарантованими

показниками цілісності та достовірності [1]. Зараз дана проблематика вирішується у двох напрямках, перший з яких орієнтований на забезпечення раціонального використання мережевих ресурсів, та містить у собі ряд механізмів, які у загальному вигляді вирішують такі питання, як:

- пошук ефективних алгоритмів маршрутизації, орієнтованих на роботу зі складним трафіком. Такі алгоритми базуються встановленні пріоритетів для різних видів трафіку, управління чергами на рівні мережевих вузлів і т. ін.;
- організація резервування логічних каналів або фізичних каналів з подальшим використанням їх ємностей під час обробки мережевих колізій.

У той же час, ефективність таких дій є обмеженою, оскільки результат їх застосування проявляється лише відносно перерозподілу загальної маси трафіку [2, 14].

У рамках другого підходу виконується зменшення об'єму даних, що надходять у мережу на рівні кінцевих вузлів. Тобто, загальний обсяг трафіку мережі таким чином зменшується. Це досягається застосуванням технологій кодування відеоданих. Такий підхід дає змогу не лише зменшити об'єм даних, які необхідно передати, та, відповідно, бітову швидкість відеопотоку, але також забезпечити відносно прийнятну якість відеоданих на прийомній стороні. Проте, даному підходу властивий ряд недоліків, серед яких наступні: нестабільність пропускну здатності мережі як наслідок впливу сторонніх завад, випадковий характер зміни рівня завантаженості мережі;

зміна бітової швидкості відео потоку у ході передачі у наслідок динаміки особливостей змісту кадрів, що оброблюються.

Отже, необхідно організувати зміну бітової швидкості I відеопотоку відповідно до змін пропускної здатності P мережі.

II. ЗАГАЛЬНІ УМОВИ ЕФЕКТИВНОЇ ПЕРЕДАЧІ ВІДЕОДАНИХ

У загальному випадку, умови ефективної передачі відеоданих можуть бути представлені у наступному вигляді:

$$\begin{cases} I \leq P; \\ S \rightarrow \min; \\ t \leq t_{st}, \end{cases} \quad (1)$$

де S - помилка, що вноситься у ході обробки;

t - загальний час обробки, що є сумою часу, що займає власне процес кодування та часу передачі пакету отримувачеві;

t_{st} - порогове значення затримки передавання, що визначається базовим стандартом, за яким працює мережа [7].

Важливою вимогою до методу, який реалізує функції контролю бітової швидкості у відповідності до умов (1) є зберігання стабільності роботи в умовах необхідності обробки великих обсягів даних. Тоді вимоги (1) буде уточнено, а саме:

$$\begin{cases} I \leq P; \\ S \rightarrow \min; \\ t(V) \leq t_{st}, \end{cases} \quad (2)$$

де V - об'єм даних, який необхідно обробити на кінцевому вузлі за час t .

III. СУТНІСТЬ МУЛЬТИАГЕНТНОГО ПІДХОДУ

Розглянемо загальний алгоритм MPEG з позицій етапності операцій обробки даних [10, 16].

Умовно загальний алгоритм може бути поділено на 2 частини, а саме: внутрішньокадрова обробка за алгоритмом JPEG; формування відеопотоку, як масиву окремих кадрів, з виокремленням у ньому базових та зв'язаних кадрів.

Алгоритм JPEG, як перша частина кодування, що виконується на рівні окремих кадрів, містить у собі такі етапи: розбиття кадру на окремі блоки 8×8 ; зміна колірної моделі з RGB на яскравісно-хроматичну (YUV, YCrCb та ін.); вибір формату колірної субдискретизації (за умовчанням використовується 4:4:4); ортогональне перетворення фрагменту кадру з переведенням з просторової у спектральну площину; квантування; кодування за ймовірно-статистичним, структурно-комбінаторним, фрактальним або іншим алгоритмом [9, 12].

У такому разі функцію кожного з етапів може бути реалізовано з використанням окремого агента [18]. Під агентом далі будемо розуміти окремий алгоритм, як структурну частину загальної технології обробки. Агент здійснює обробку даних, що надходять з попереднього етапу загального алгоритму кодування (попереднього агента) та виконує відповідні перетворення даних, куруючись інформацією відносно: поточних вимог згідно умов (2) до кадру, що оброблюється; належності поточного кадру до одного або кількох типів за відповідними метриками; наявних значень бітової швидкості I та помилки S , внесеної на попередніх етапах обробки.

У загальному випадку, схематичне зображення агента буде таким, як зображено рис. 1.

Розглянемо детально структурні модулі агента.

Зокрема, множина $\{\theta\}$ технологій обробки, за умови, що даний агент може виконувати перетворення не у одному окремому базисі, дозволяє здійснювати вибір тієї чи іншої технології для застосування. При цьому, беруться до уваги вимоги умов (2) щодо загальної обробки, та статистична інформація, що зібрана шляхом роботи у режимі навчання для різних типів кадрів.

Це може бути, наприклад, вибір певного типу ортогонального перетворення (дискретно-косинусне, Волша, вейвлетне та ін.) [7, 8, 20].

У свою чергу, множина $\{\phi\}$ параметрів обробки дозволяє корегувати роботу задіяних агентом технологій шляхом застосування відповідних опцій.

Наприклад, у випадку квантування фрагменту кадру параметри обробки можуть формувати коефіцієнти матриці квантування, або задавати вибір моделі кольорової субдискретизації на відповідному етапі [15].

При цьому, модуль пам'яті є ключовим елементом мультиагентної системи [5]. Його функції полягають у виборі певних алгоритмів та їх налаштувань відповідно до вимог (2) та параметрів відеоданих, що надходять на обробку. З огляду на те, що базовим алгоритмом обробки кадрів є JPEG, кодування у мультиагентній схемі доцільно виконувати на рівні окремих фрагментів F кадру (блоків 8×8 пікселів).

Тоді роботу агента можна описати як сукупність таких етапів:

1. Режим навчання. При цьому мається на увазі, що обробка ніяких даних не проводилася раніше взагалі. У даному режимі виконується кодування кадрів для збору статистичних залежностей між, з однієї сторони, умовами (2), як цільовою функцією та технологією обробки з відповідними параметрами, а з іншої сторони, окремим фрагментом кадру за сукупністю показників: насиченість N фрагменту; дані щодо структурних особливостей S фрагменту; інформації відносно особливостей текстурної та контурної інформації K фрагменту; належність фрагменту до кадру одного з типів Q (фото, комп'ютерна графіка, їхня комбінація).

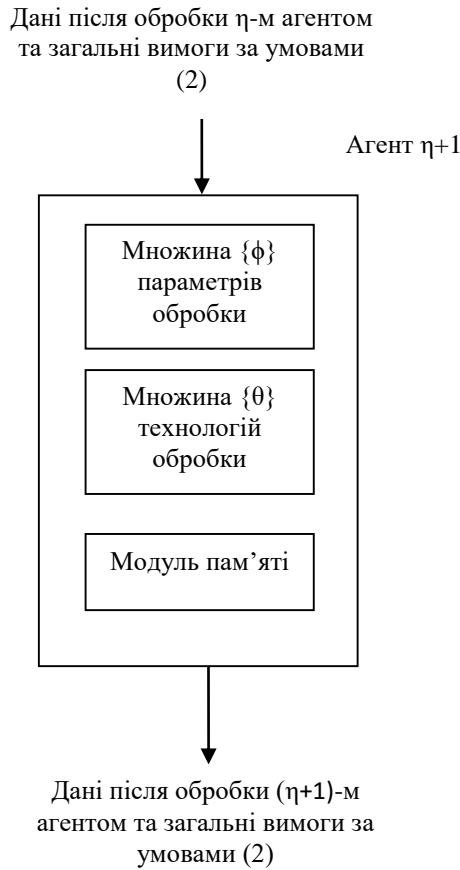


Рис. 2. Схематичне зображення агента.

Після того, як встановлено деякі статистичні залежності, кожен фрагмент F розглядається як сукупність відповідних параметрів, а саме:

$$F = \{N; C; K; Q\} \quad (3)$$

У результаті, усі статистичні залежності, що пов'язують між собою фрагменти F та параметри і технології обробки, що потенційно можуть забезпечити виконання умов (2) фіксуються з записом у модуль пам'яті [19].

2. Робочий режим. Агент функціонує у даному режимі увесь час, поки зібрані статистичні дані на етапі навчання здатні забезпечити виконання умов (2).

3. Режим уточнення залежностей. У випадку, коли агент або їх сукупність не можуть забезпечити виконання умов (2), тобто, встановлені раніше залежності приводять до того, що між потрібними значеннями сукупності цільових функцій (2) та їх наявними значеннями існує розбіжність, тобто:

$$I > I_{need} \vee S > S_{need} \vee t(V) > t_{st} \quad (4)$$

Тоді відбувається корекція одного або ряду параметрів, означених виразом (3), без повного перепису.

Іншими словами, агент a являє собою сукупність множин технологій, їх параметрів та статистичних даних $\{\theta\}$, що містяться у модулі пам'яті, тобто:

$$a = \{\{\theta\}; \{\phi\}; \{\theta\}\} \quad (5)$$

У свою чергу, сукупність виявлених на етапі навчання статистичних залежностей усіх агентів, що формують базис обробки, являє собою модель обробки M , інакше кажучи:

$$M = \bigcup_{i=1}^w \theta_i \quad (6)$$

де w – кількість агентів, задіяних у схемі обробки.

Тоді загальний алгоритм обробки відеопотоку на базі мультиагентної схеми для технології MPEG можемо подати у наступному вигляді:

$$I(S, t(V)) = \psi_{cod}(A; \{\theta\}), \quad (7)$$

де A – сукупність агентів, що еквівалентно виразу:

$$A = \{a\} = \{A_{col}; A_{sub}; A_{ort}; A_q; A_{enc}; A_{sf}\}, \quad (8)$$

де A_{col} – агент кольорового перетворення; A_{sub} – агент вибору колірної субдискретизації; A_{ort} – агент ортогонального перетворення; A_q – агент квантування; A_{enc} – агент формування кодового представлення фрагменту кадру; A_{sf} – агент, що відповідає за особливості формування відеопотоку, як сукупності окремих кадрів.

IV. ДОПОВНЕННЯ БАЗОВОГО ФУНКЦІОНАЛУ ОБРОБКИ АЛГОРИТМУ MPEG

Якщо відійти від чіткої ідеології MPEG зі збереженням загальних принципів, додатково має сенс застосувати агентів таких типів: агент сегментації A_s кадру. Даний агент здійснює вибір розміру окремих сегментів; агент A_{ch} зміни базових параметрів відеопотоку. Сюди відносяться такі параметри, як частота слідування базового кадру, частота кадрів. Даний агент за потреби може здійснювати пропуск кадру або кадрів, коли забезпечити передачу відео згідно вимог (2) у поточних умовах неможливо.

Окрім цього, пропонується замість агенту A_q квантування задіяти механізм, здатний виконувати функції, аналогічні квантуванню, тобто, зменшувати кількість даних для опису фрагменту кадру.

Пропонується для відповідного процесу зменшення кількості даних для опису фрагменту кадру задіювати один з механізмів, таких, як квантування, або технологія, аналогічна методу ЕВСОТ технології JPEG2000 [11, 13].

У цьому випадку, вираз (8) буде мати такий вигляд:

$$A = \{a\} = \{A_{col}; A_{sub}; A_{ort}; A_{vs}; A_{enc}; A_{sf}; A_s; A_{ch}\}, \quad (9)$$

де A_{col} – агент кольорового перетворення; A_{sub} – агент вибору колірної субдискретизації; A_{ort} – агент ортогонального перетворення; A_{vs} – агент зменшення даних на представлення фрагменту кадру; A_{enc} – агент формування кодового представлення фрагменту кадру; A_{sf} – агент, що відповідає за особливості формування відеопотоку, як сукупності окремих кадрів; A_s – агент сегментації кадру; A_{ch} – агент зміни базових параметрів відеопотоку.

По викладеному матеріалу можна зробити такі висновки: запропоновано методологічну базу ефективної інтеграції мультиагентного підходу у технологію кодування відеопотоку за загальною схемою MPEG; запропонований підхід дає потенційну можливість скорочення кількості математичних операцій та загального зменшення обчислювального навантаження на кінцеві вузли мережі. Це обумовлено тим, що загальний процес кодування відеоданих розбивається на ряд під процесів меншої обчислювальної складності; застосування мультиагентної схеми поряд зі зменшенням обчислювального навантаження здатне знизити загальний час кодування відеоданих в умовах забезпечення процесу обробки відеопотоку відповідно до вимог (2).

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [5] Баранник В.В. Кодирование трансформированных изображений в инфокоммуникационных системах / В.В. Баранник, В.П. Поляков – Х.: ХУПС, 2010. – 234 с.
- [6] Alain-Jйfme Fougires. A Modelling Approach Based on Fuzzy Agents // International Journal of Computer Science Issues, November, 2012.
- [7] Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 864с.
- [8] Wooldridge, M. Introduction to MultiAgent Systems / M. Wooldridge - England: JOHN WILEY & SONS, LTD, 2002
- [9] Бугакова Т. Ю. Моделирование изменения пространственно-временного состояния инженерных сооружений и природных объектов по геодезическим данным // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 1 (29). – С. 34–42.
- [10] Vladimir Barannik, Yuriy Ryabukha, Albert Lekakh, Viktoria Himenko, Oksana Stetsenko “The Justification of the Direction for Increasing the Availability of the Video Information in Objective Control Systems”.4th International Scientific Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T 2017) October 10-13, 2017. Kharkiv, Ukraine. p 539-542. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2017.8246457.
- [11] D.S. Havrylov, O.H. Oksijuk, P.M Gourzhiy, B.A Demidov “Method of video security information resource based on the multi-selective processing in telecommunication systems”, Science and Technology of the Air Force of Ukraine, vol. 26, no. 1, pp.46 - 48, 2017.
- [12] J. Miano. Formats and image compression algorithms in action [Text] K.: Triumph, 2013. — 336 p
- [13] Ponomarenko N., Lukin V., Egiazarian K., Astola J., Partition Schemes in DCT Based Image Compression, // Technical Report 3-2002, ISBN 952-15-0811-6.
- [14] Tampere University of Technology, Finland, 2002. – 100 p. Фисенко В. Т. Компьютерная обработка и распознавание изображений: учебн. пособие / В. Т. Фисенко, Т. Ю. Фисенко. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. – 192 с.
- [15] Barannik V., Barannik D., Bekirov A., Lekakh A. A steganographic method based on the modification of regions of the image with different saturation // Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 14th International Conference, 2018. – P. 542-545. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336260.
- [16] Barannik V., Alimpiev A., Bekirov A., Barannik D., Barannik N. Detections of sustainable areas for steganographic embedding // East-West Design & Test Symposium (EWDTS). – IEEE, 2017. P. 555-558. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110028.
- [17] Vladimir Barannik, Andrii Krasnorutsky, Vladimir Larin, Anna Hahanova, Sergii Shulgin Model of syntactic representation of aerophoto images segments. Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science, (TCSET*2018): XVIth Intern conf., (Lviv-Slavske, Ukraine, February 23–25, 2018). Lviv-Slavske: 2018. P. 974 – 977. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336356.
- [18] Barannik V.V., Ryabukha Yu.N., Baranmk D.V. Methodological basis for constructing a method for compressing of transformants bit representation, based on non-equilibrium positional encoding. 2nd IEEE International Conference on Advanced Information and Communication Technologies, AICT 2017, Proceedings, Lviv, 2017, pp. 188 - 192. DOI: 10.1109/AICT.2017.8020096+/-
- [19] Gonzalez R. Digital image processing. 4th edition.[Text] / R.Gonzalez, R. Woods. – K. : Tekhnosfera, 2018.–1104 p.
- [20] S. Wang, X. Zhang, X. Liu, J. Zhang, S. Ma and W. Gao, "Utility-Driven Adaptive Preprocessing for Screen Content Video Compression," in IEEE Transactions on Multimedia, vol. 19, no. 3, pp. 660-667, March 2017.
- [21] Pratt W. K., Chen W. H., Welch L. R. Slant transform image coding. Proc. Computer Processing in communications. New York: Polytechnic Press, 1969. P. 63 84.
- [22] Andreev V.V., Minakov I.A., Pshenichnikov V.V., Simonova E.V., Skobelev P.O. Osnovy postroeniya multiagentnykh sistem [The Basics of Creating Multiagent Systems]. The Povolzhskaya State Academy of Telecommunication and Informatics Publ., 2007, 151 p.
- [23] Безгубова Ю.О. Мультиагентное управление распределенными информационными потоками // Образовательные ресурсы и технологии. 2015. № 1(9). С. 113-119.
- [24] Ансон Л., Барнсли М. Фрактальное сжатие изображений // Мир ПК.– 1992. – №4. – С. 23-27.

Моделювання Частотних Властивостей Операційних Підсилювачів в Пристроях Аналого- Цифрової Обробки Сигналів

Степан Новосядлий, Володимир Мандзюк, Володимир Грига, Володимир Луковкін
кафедра комп'ютерної інженерії та електроніки
Прикарпатський національний університет ім. В. Стефаника
Івано-Франківськ, Україна
v.dr_2000@ukr.net

Simulation of Frequency of Operational Amplifiers in Analog-Digital Signal Processing Devices

Stepan Novosiadly, Volodymyr Mandzuk, Volodymyr Gryga, Volodymyr Gryga
Department of computer engineering and electronics
Vasyl Stefanyk Precarpathian National University
Ivano-Frankivsk, Ukraine
v.dr_2000@ukr.net

Анотація— Представлено математичні моделі частотних властивостей операційних підсилювачів сформованих субмікронною суміщеною арсенід-галієвою і кремнієвою технологіями, що суттєво збільшує динамічний діапазон за напругою, частотою і температурою в пристроях аналого-цифрової обробки сигналів. В роботі описано три області застосування операційних підсилювачів. Перша, за рахунок модернізованого диференціального каскаду, що забезпечує симетричність його характеристик та високу швидкість за рахунок використанню біполярних або польових транзисторів Шотткі. Другий клас задач відноситься до розроблених активних RC-фільтрів, де активним елементом виступає безкорпусний операційний підсилювач сформований субмікронною арсенід-галієвою і кремнієвою технологіями та RC-ланки, які формуються оригінальною танталовою технологією. Проведено моделювання активних RC-фільтрів на основі гіраторів виконаних на операційних підсилювачах. Використання гіратора повністю усуває використання індуктивних елементів. Третій вид задач представляє моделювання компараторів сформованих на безкорпусних операційних підсилювачах, що дозволяє їх ефективно використовувати в мікроконверторах аналого-цифрових та цифро-аналогових перетворювачів при цифровій обробці сигналів.

Abstract— The mathematical models of frequency properties of operational amplifiers (OAs), formed by submicron combined gallium arsenide and silicon technologies, are presented. This approach considerably increases the dynamic range at voltage, frequency and temperature in analog-digital signal processing devices. The paper describes three areas of application of OAs. In the first area, a modernized differential cascade based on bipolar or Schottky field transistors is used, which ensures the symmetry

of its characteristics and high speed. The second class of tasks relates to the development of active RC-filters, in which unpacked OA is the active element, formed by submicron gallium arsenide and silicon technologies, and RC-links formed by the original tantalum technology. The simulation of active RC-filters based on gyrators performed on OAs is realised. The use of a gyrator eliminates completely the use of inductive elements. The third type of task represents the simulation of comparators formed on unpacked OAs, which allows their effective use in microcontrollers of analog-to-digital and digital-to-analog converters at digital processing of signals.

Ключові слова— операційний підсилювач; RC-фільтр; компаратор; аналого-цифровий перетворювач; танталова, субмікронна технологія

Keywords—operational amplifier; RC-filtr; comparator; analog-to-digital converter, tantalum submicron technology

I. ВСТУП

Сьогодні інформаційні технології, які стали основою великих систем, дуже суттєво змінили концепції їх побудови і обумовили нові структурно-схемотехнічні та технологічні засоби їх практичної реалізації, а саме:

1. До числа таких нових концепцій необхідно віднести високу інтелектуалізацію підсистем, яка досягається використанням аналого-цифрових апаратно-програмних комплексів, основою яких є аналогові та цифро-аналогові ВІС/НВІС.

2. Фундаментом розвитку елементної бази мікросхеми техніки в найближчі роки стане суб- і наномікронна, як основа розвитку обчислювальної техніки і інформаційних технологій, де особливу роль відіграє суміщення кремнієвої і арсенід галієвої технологій для підвищення динамічного і частотного діапазону та швидкодії сучасних інформаційно-телекомунікаційних систем.

В даних напрямках проведено комплекс дослідження в моделюванні частотних властивостей диференціальних і операційних підсилювачів в пристроях аналого-цифрової обробки сигналів:

1. В модуляторах/демодуляторах на основі інтегральних перемножувачів схемотехнічно і топологічно сформованих на диференціальних каскадах ОП;

2. В прецезійних фільтрових схемах, реалізованих інтегрально на основі танталової технології та активних безкорпусних операційних підсилювачів.

3. В інтегральних компараторах для мікроконверторів АЦП.

II. СПОСІБ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗАДАЧІ 1

Перша задача вирішена шляхом схемотехнічного, топологічного та технологічного варіанту прецезійного диференціального каскаду операційних підсилювачів на двозатворних польових або біполярних транзисторів Шоттки з нульовою напругою зміщення, що забезпечила високу симетричність схеми перемножувача, значного збільшення динамічного діапазону як за напругою, так і частотою (до 5ГГц) та температурного діапазону (-65÷+250°C) шляхом формування інтегральних структур суміщеною епітаксійною арсенід-галієвою технологією на монокремнієвих підкладках. Саме таке схемотехнічне рішення дозволило на основі модернізованого таким чином диференціального каскаду (ДК) побудувати оригінальний перемножувач, який став основою для проектування НВЧ модуляторів/демодуляторів, маніпуляторів/деманіпуляторів, синтезаторів та подільників частоти у інтегральному виконанні, що дозволило їх стикувати в різних мікропроцесорних та мікроконтролерних схемах.

Схемотехнічну реалізацію такого диференціального каскаду на двозатворних польових чи біполярних транзисторах Шоттки подано на рис. 1.

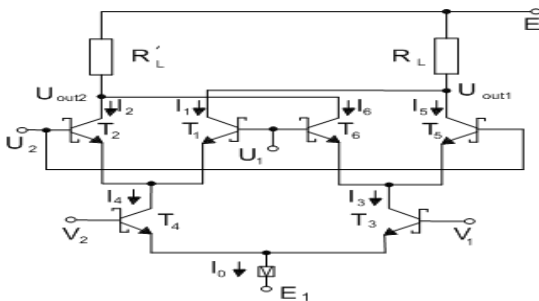


Рис. 1. Структура електричної схеми перемножувача на диференціальному каскаді біполярних транзисторів Шоттки.

Тоді математична модель перемножувача на диференціальному каскаді буде представлена наступним виразом:

$$\Delta U_{out} = \frac{I_0 R_L}{2 \phi_t^2} (U_2 - U_1)(V_2 - V_1) = k U V = W \quad (1)$$

де I_0 - величина струму ДС, R_L - опір навантаження, ϕ_t - температурний коефіцієнт.

Структура такого перемножувача подана на рис. 2

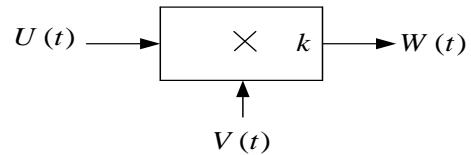


Рис. 2. Структура перемножувача.

Якщо $U(t) = U_m \cos \omega t$ - сигнал несучої частоти, а $V(t) = V_m(\varphi + \cos \Omega t)$ при $m \leq 1$ сигнал повідомлення, то на виході перемножувача на базі диференціального каскаду буде визначатись спектр трьох сигналів:

$$W(t) = k U_m V_m \cos \omega t + m k \frac{U_m V_m}{2} \cos(\omega + \Omega)t + m k \frac{U_m V_m}{2} \cos(\omega - \Omega)t, \quad (2)$$

що представляє амплітудний модулятор.

А якщо сигнал $V(t)$ пропустити через амплітудний обмежувач, тобто $V(t) = V_0 \cos \omega t$, а сигнал з виходу перемножувача $W(t)$ пропустити через ФНЧ, що затримує другу гармоніку то на виході отримаємо:

$$U_{out} = U_{out}(t) = \frac{U_m(t) V_m}{2} k k_f \quad (3)$$

і отримаємо НЧ-сигнал, що є пропорційний повідомленню $U_m(t)$ - це і є амплітудний детектор.

Як бачимо, на основі інтегрального диференціального каскаду, що формується на основі суміщеної арсенід-галієвої технології та кремнієвої формуються не тільки модулятори/демодулятори аналогового повідомлення, але і маніпулятори/де маніпулятори цифрового повідомлення, а також синтезатори та подільники частот.

III. СПОСІБ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗАДАЧІ 2

Другий тип задачі нами вирішувався шляхом розробки активних RC-фільтрів на базі танталової технології та активних елементів без корпусних ОП або схеми Дарлінгтона, дослідження їх частотних властивостей на основі доктрин Баттерворта, Чебишева, Бесселя (ДКР "Круг"). При цьому для формування активних елементів використовувалась як кремнієва так і суміщена арсенід-галієва технології. Моделювання частотних властивостей активних RC-фільтрів виконувалося програмним інструментом Matlab з використанням пакетів: SP – Signal Processing, Comm – Communications, FD – Filter Design. Це дозволило реалізувати не тільки аналогові (ФВЧ, ФНЧ) але

і цифрові фільтри для наземних і бортових радіолокаційних систем.

В рамках даної ДКР нами досліджувалися вузькосмугові активні фільтри на основі гіраторів, що схемотехнічно представляють собою зустрічно-паралельне включення двох ОП – інвертуючого $-A$ і неінвертуючого $+A$, схема якого подано на рис. 3.

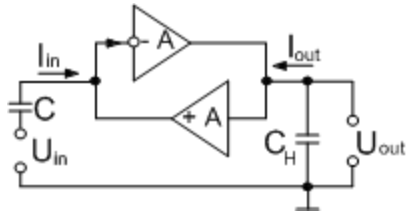


Рис. 3. Електрична схема вузькосмугового активного фільтра на основі гіратора.

Розглянемо схемотехніку та технологію формування таких фільтрів. Гіраторні підсилювачі повинні мати входні та вихідні опори: $R_{in} \rightarrow \infty, R_{out} \rightarrow 0$. Рівняння передачі гіратора на основі ОП визначається співвідношеннями: $U_{in} = -I_{out} R_g, I_{in} = -U_{out} / R_g$, де R_g - опір гіратора як перетворювача на ОП, що в кінцевому рахунку виражає його підсилювальні властивості

Із цих рівнянь ми можемо визначити опір гіратора: $Z_{in} = U_{in} / I_{in} = I_{out} R_g^2 / U_{out}$, де $I_{out} / U_{out} = 1 / Z_{load}$, то входний опір гіратора буде визначатися співвідношенням: $Z_{in} = R_g^2 / Z_{load}$, де Z_{load} - опір навантаження на виході гіратора. Якщо у випадку навантаження гіратора на ємність C_{load} , то його входний опір вже буде мати індукований характер, тобто: $Z_{in} = R_g^2 / Z_c = j \omega C_{load} R_g^2 = j \omega L_{eq}$, де $L_{eq} = C_{load} R_g^2$.

Тому, якщо на вході і виході гіратора схематично є вбудовані конденсатори C і C_i , то в результаті ми отримуємо активний фільтр, який є еквівалентний послідовному LC-контуру. Така схема вже є менш чутливою до термодинамічних змін параметрів ОП та RC-компонентів танталової технології і її еквівалентна схема як фільтра подана на рис. 4, де $I_{in} = j \omega C R_1 R_3 R_4 / R_2 = j \omega L_{eq}, L_{eq} = C R_1 R_3 R_4 / R_2$.

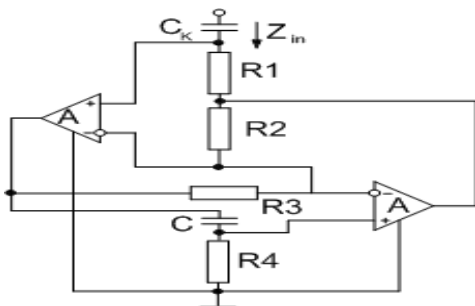


Рис. 4. Удосконалена електрична схема вузькосмугового гіраторного фільтра на основі двох ОП.

А така прецизійна індуктивність забезпечується розробленою нами танталовою технологією в рамках ДКР “Круг” і піднімає температурний діапазон фільтрів до $(-65 \div +250^\circ C)$, якщо операційні підсилювачі формуються суміщеною арсенід-галієвою та кремнієвою технологіями.

Для реалізації прецизійного гіратора необов’язково використовувати два ОП, існує можливість реалізувати гіратор на одному ОП (рис. 5).

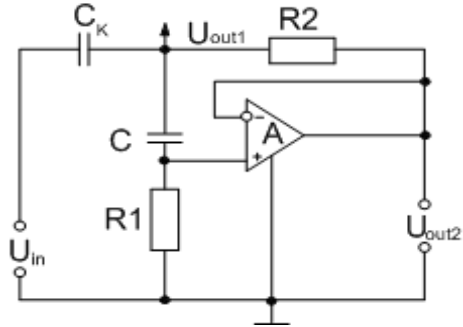


Рис. 5. Електрична схема гіраторного фільтра на основі одного ОП.

Тут вже для цієї схеми, що охоплена помірним оберненим зв’язком, бо безкорпусний ОП використовується в повторювача з коефіцієнтом $k=1$, то еквівалентна індуктивність визначається наступним співвідношенням $L_{eq} = R_1 R_2 C$. Якщо $R_1 = (100-200)R_2$, а входний опір ОП ($R_{in} > R_2$), то добротність фільтра буде визначатися виразом $Q_{eq} = 0,5(R_1 / R_2)^{1/2}$. Це дозволяє формувати за рахунок вищезазначених технологій дуже стабільні вузькосмугові фільтри для бортових РЛС, зокрема вузькосмуговий фільтр.

IV. СПОСІБ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗАДАЧІ 3

А тепер розглянемо третій варіант моделювання частотних властивостей ОП, але вже на компараторах напруги, які є основною складовою пристроїв АЦП-ЦАП цифрової обробки сигналів. Сучасні інтегральні компаратори напруги - це порівняльні пристрої в системах цифрової обробки сигналів, які призначені для порівняння двох напруг, які поступають на його входи. При цьому в залежності від знаку різниці напруг на входах ІКН на виході встановлюється потенціал, що відповідає або логічній “1” або логічному “0”. Саме для суміщення ІКН з цифровими ІС/ВІС вказані абсолютні значення вихідних потенціалів повинні бути рівними потенціалам, що відповідають логічним рівням ІС/ВІС.

Структурна схема ІКН співпадає із схемою ІОП і містить на вході диференціальний каскад, який виконує функцію порівняння. Для підвищення чутливості ІКН за входним ДК, як правило розміщується проміжний підсилювач з високим коефіцієнтом підсилення, що забезпечує формування перепадів напруги великої амплітуди при невеликій різниці входних напруг. Особлива відмінність ІКН від ІОП полягає в схемотехніці вихідних каскадів. В ІКН вихідний каскад працює в ключовому

режимі, формуючи потенціальні рівні, які відповідають логічному "0" і логічний "1".

Сучасні ІКН відносяться до класу аналогово-цифрових елементів (пристроїв) і бувають таких типів: універсальні, прецизійні на швидкодіючих ІС, які використовують в системах ЦОС.

Точність порівняння вхідних напруг визначається такими параметрами ІКН:

- вхідною напругою зсуву $U_{in\ bias}$, як аналог $U_{in\ offset}$ для ІОП;

- вхідним струмом зміщення $I_{in\ offset}$;

- вхідним струмом зсуву $I_{in\ bias}$, що визначає асиметрію каскаду;

- коефіцієнтом впливу нестабільності джерела живлення k_{inst} .

В роботі досліджувалося моделювання частотних властивостей інтегральних компараторів напруги серії 521СА4, які відносяться до класу прецизійних, швидкодіючих пристроїв, які реалізовані на основі суміщеної технології епішарів GaAs на монокремнієвих підкладках. Така технологія забезпечує:

- високу точність порівняння < 10 мкВ;
- малу споживану потужність < 1 Вт;
- високу швидкодію $t_g < 30$ нс;
- великий частотний діапазон > 50 ГГц.

Такі параметри досягаються використанням елементної бази: біполярних транзисторів Шоттки і польових транзисторів Шоттки на входах ДК (двозатворні транзистори). Його схематехніка подана на рис. 6.

На данному рисунку зображено високошвидкісний інтегральний компаратор напруги 521СА4, який містить такі виходи: 1 – аналоговий вхід 1; 2- аналоговий вхід 2; 3 – напруга живлення ($-U_1$); 4 – логічний вхід 2 (строб 2); 5- логічний вихід 2; 6 - загальний; 7 – логічний вихід 1 (строб 1); 8 – логічний вхід 1 (строб 1); 9 – напруга живлення (U_2); 10 – напруга живлення (U_3).

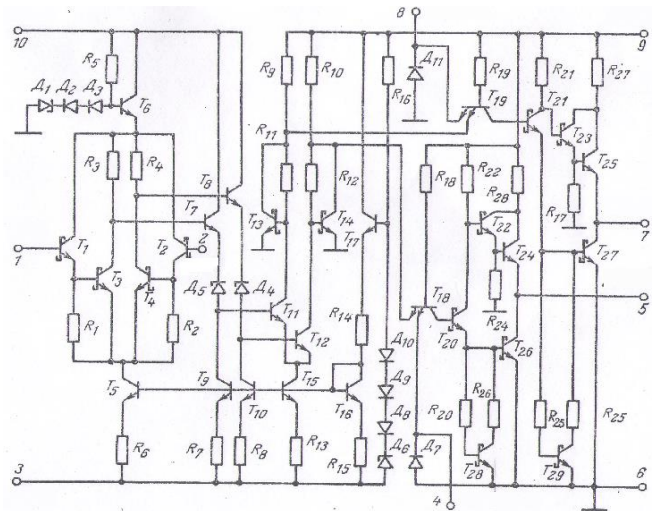


Рис. 6. Інтегральний компаратор напруги 521СА4.

Такі ІКН забезпечують формування оригінальних модуляторів/маніпуляторів на перемножувачах АЦП-ЦАП.

ВИСНОВКИ

1. Розроблена оригінальна технологія формування прецизійних швидкісних диференціальних ОП та компараторів з використанням субмікронної суміщеної арсенід-галієвої технології.

2. Проведено моделювання частотних властивостей ОП, які показали їх високу прецизійність, швидкодію і завадозахищеність.

3. Розроблені оригінальні схеми гіраторів на безкорпусних ОП, які виключають застосування індуктивних елементів.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Новосядлий С.П. Суб- і наномікронна технологія структур ВІС. Івано-Франківськ: Місто НВ, 2010, 455 с.
- [2] Colinge, J.-P., Colinge, C. A. (2007). Physics of Semiconductor Devices. Springer Science & Business Media, 436 p.
- [3] Наумов А.В. Огляд світового ринку арсеніда галія. Технологія і конструювання в електронній апаратурі, 6, 2005, С. 53–57.
- [4] Brock, D.K., Track, E.K., Rowell, J.M. (2010). Superconductor ICs: the 100-GHz second generation. IEEE Spectrum, 12, P. 40-46.

Особливості Синтезу Узагальнених Ознак при Побудові Систем Розпізнавання за Методом Логічного Дерева

Повхан Ігор Федорович
кафедра програмного забезпечення систем
ДВНЗ “Ужгородський національний університет”
Ужгород, Україна
igor.povkhan@uzhnu.edu.ua

Features of Synthesis of Generalized Features in the Construction of Recognition Systems by the Method of the Logical Tree

Igor Povhan
department of software systems
UzhNU University
Uzhgorod, Ukraine
igor.povkhan@uzhnu.edu.ua

Анотація Дана робота піднімає питання пов'язані з логічними деревами класифікації, які використовуються в задачах розпізнавання дискретних об'єктів, а саме генерацію вершин (узагальнених ознак) логічних дерев на основі апроксимації навчаючої вибірки. Результати даного дослідження дозволяють забезпечити ефективний механізм остаточної мінімізації результуючих схем розпізнавання дискретних об'єктів. Так-як логічне дерево представляє собою певне правило класифікації, то знаходження його мінімальної форми дозволяє забезпечити економію пам'яті, процесорного часу, значно підвищити швидкість розпізнавання об'єктів та ефективність системи класифікації в цілому. Зауважимо, що робота актуальна для всіх методів розпізнавання образів в яких отримана функція класифікації може бути представлена у вигляді логічного дерева.

Abstract - This work raises questions related to the logical classification trees that are used in the problems of recognition of discrete objects, namely the generation of vertices (generalized features) of logical trees based on the approximation of the sample. The results of this study provide an effective mechanism for the final minimization of the resulting recognition schemes of discrete objects. Since the logical tree is a certain classification rule, finding its minimum form allows to save memory, CPU time, significantly increase the speed of object recognition and the efficiency of the classification system as a whole. Note that the work is relevant for all methods of pattern recognition in which the resulting classification function can be represented as a logical tree.

Ключові слова - задачі розпізнавання образів; логічне дерево; граф-схемні моделі.

Keywords - pattern recognition problems, logical tree, graph-scheme models.

I. ВСТУП

Дана робота продовжує цикл робіт [1,2,3,4] в яких піднімаються принципові питання пов'язані з логічними деревами класифікації (в даному випадку під логічними деревами будемо розуміти деяке граф-схемне представлення результуючої схеми розпізнавання образів), як питання мінімізації логічних дерев, дослідження стійкості щодо перестановки ярусів, оцінки складності найбільшого дерева, загальний алгоритм побудови самого складного логічного дерева. Тут досліджується особливість генерації узагальнених ознак (вершин) схем класифікації, які конструюються в процесі навчання системи розпізнавання (логічне дерево класифікації фактично представляє собою згенеровану функцію розпізнавання) у вигляді граф-схемних моделей.

Так в роботах [5,6] було показано, що побудовану схему розпізнавання (у вигляді логічного дерева класифікації) можна записати або в ДНФ, або в КНФ формі. Так дерево розпізнавання, яке являє собою певне правило класифікації, можна представити за допомогою відповідної логічної функції $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Також відомо, що

результуюче правило класифікації, яке побудоване довільним методом або алгоритмом на основі логічного дерева, має деревоподібну логічну структуру. Воно складається з вершин (ознак), які групуються по ярусам і які отримані на певному кроці (етапі) побудови дерева розпізнавання.

На відміну від існуючих методів, головною особливістю систем розпізнавання (які базуються на основі логічних дерев) є те, що важливість окремих ознак (групи ознак) визначається відносно функції, яка задає розбиття об'єктів на класи. Причому слід пам'ятати, числова величина вказаної важливості характеризує собою помилку розподілу об'єктів на класи (це стосується наприклад методу розгалуженого вибору ознак).

Нехай на першому кроці побудови дерева розпізнавання використовується довільний алгоритм розпізнавання, в результаті застосування якого отримуємо деяку формулу (узагальнену ознаку). Дана формула реалізує визначений рівень розпізнавання. Вона приймає декілька значень в залежності від значень ознак. Дані значення характеризують собою шляхи (класи), причому є шляхи, по яких формула "працює добре", а є і такі, по яких – "погано" і покращення рівня розпізнавання далі немає. Зрозуміло, що саме на цих значеннях ознак (шляхах) необхідно взяти інший алгоритм, який створить іншу формулу (узагальнену ознаку) і т.д. Отже в методах та алгоритмах логічного дерева необхідно до тих пір повторювати такий вибір алгоритмів, доки ми не отримуємо необхідний рівень якості розпізнавання.

II. ОЦІНКА ШВИКОДІЇ ТА ВИКОРИСТАННЯ АПАРАТНИХ РЕСУРСІВ ПРИ ГЕНЕРАЦІЇ РЕЗУЛЬТУЮЧОГО ДЕРЕВА КЛАСИФІКАЦІЇ

Проаналізуємо такі важливі характеристики методів логічного дерева, як швидкодія та використання пам'яті ЕОМ. Швидкодія довільної системи розпізнавання залежить, взагалі, від кількості кроків, через які проходить та або інша інформація при розпізнаванні, а також від часу, який витрачається на кожний з кроків. Тому швидкодія загального методу дерева досить велика: кількість кроків в методі дерева – це кількість ярусів певного дерева розпізнавання (загальна схема розпізнавання – є деяким деревом), а час, який витрачається на кожний з кроків, є відносно невеликим, так як на кожному етапі побудови ознак (вершин дерева) проходить розрахунок важливості ознак (ефективності алгоритмів розпізнавання) за простими формулами. Таким чином, швидкодію метода логічного дерева можна спрощено визначити наступним чином:

$$T = \sum_{i=1}^m t_i \quad (1)$$

Зауважимо, що тут t_i – час розрахунку певної ознаки в i -ій вершині найдовшого шляху в даному дереві розпізнавання, а m – кількість вершин на даному шляху. Зауважимо, що час T не потрібно плутати з часом, який витрачається на створення схеми розпізнавання (зрозуміло, що в значній мірі він залежить від алгоритму формування ознак).

Використання необхідної пам'яті методом логічного дерева визначається, взагалі, кількістю вершин результуючого дерева розпізнавання, а також складністю ознак, які стоять у вершинах дерева. Якщо позначити кількість вершин дерева розпізнавання через m , а кількість інформації, яка витрачається на кожну i – ову ознаку через S_i , то загальна витрачена пам'ять M , яка необхідна для реалізації методу дерева, може бути оцінена наступною формулою:

$$M = \sum_{i=1}^m S_i \quad (2)$$

Тут слід зауважити, що для деякого повного дерева розпізнавання характерний невеликий час розрахунку ознак для певного шляху, однак воно може мати досить великий об'єм (тобто кількість вершин). Отже можна зробити висновок, що на витрати пам'яті будуть безпосередньо впливати два фактори – складність дерева розпізнавання (його об'єм), та складність (інформаційна ємність) ознак, які стоять у відповідних вершинах дерева розпізнавання.

Як вже було зауважено раніше, запобігти вказаний недолік, хоча б частково, можна, якщо на кожному кроці побудови дерева розпізнавання вибирати непогані (найбільш інформативні) ознаки, що приведе до спрощення результуючого правила класифікації. Вибір інформативних ознак можна здійснити за формулою $W(P_i)$ [7], яка оцінює ефективність довільної ознаки P_i , тобто на кожному кроці побудови дерева буде виконаний певний контроль при розстановці ознак.

Використання такої оцінки важливості ознаки або групи ознак дозволяє побудувати просте (економічне) та ефективне правило класифікації. Значно складніше складається процес генерації $f_r(w)$, коли система оперує вже досить складними узагальненими ознаками, або в найскладнішому випадку – алгоритмами. Проблема економічності (раціонального використання) пам'яті відходить на другий план, а проблема швидкодії тісно пов'язана з проблемою оцінки ефективності (важливості) того чи іншого алгоритму розпізнавання відносно навчальної вибірки.

Зауважимо, що по своїй ідейній основі метод дерева споріднений з методом розгалуженого вибору ознак (класичний метод розгалуженого вибору ознак не передбачає використання окремих узагальнених ознак - алгоритмів) та в значній мірі близький до методу "Коллективного розпізнавання", або колективів правил розпізнавання, які були запропоновані Расстрігіним Л.А. І найскладніша проблема, з якою зіштовхнувся цей метод, була знову ж проблема оцінки ефективності того чи іншого правила розпізнавання стосовно даної задачі, та на основі цього – побудови правила прийняття рішення. Було запропоновано багато алгоритмів генерації загального правила прийняття рішення в цьому методі, які в значній мірі дозволили подолати цю проблему.

Особливість метода логічного дерева, як вже було сказано, полягає в тому, що для того, щоб побудувати економічну загальну схему розпізнавання, необхідно використовувати лише “найкращі” ознаки. Схема побудови дерева розпізнавання, при якій необхідно розраховувати $W(P_i)$ на кожному кроці синтезу дерева, потребує певних витрат обчислювальних ресурсів ЕОМ та часу. Виходом з даної ситуації могла б служити модифікація алгоритму з одноразовим розрахунком важливості ознак на початку процесу побудови дерева. Це в значній мірі дозволить зберегти ресурси ЕОМ, але, з іншого боку, призведе до певного ускладнення результуючої схеми розпізнавання, яку можна потім оптимізувати. Такий алгоритм одноразової оцінки важливості ознак є оптимальним вибором за критерієм *час/складність схеми розпізнавання*, якщо в якості ознак використовуються окремі алгоритми розпізнавання та ресурси комп'ютера обмежені. В такому випадку на першому етапі побудови схеми розпізнавання оцінюється ефективність алгоритмів розпізнавання, якими оперує загальний метод дерева, за двома критеріями: ефективність розпізнавання відносно фіксованої навчальної вибірки та складність побудованої узагальненої ознаки.

Для оцінки ефективності розпізнавання довільним алгоритмом початкової вибірки можна використовувати

$$\rho = \frac{K}{m} \cdot 100\%,$$

де K – кількість успішно класифікованих об'єктів даним алгоритмом, а m – загальна кількість об'єктів вибірки. Але так як оцінка ефективності алгоритмів проводиться на одній постійній навчальній вибірці, то для оцінки можна просто оперувати кількістю відмов класифікації та неправильно класифікованими об'єктами. Під складністю побудованої узагальненої ознаки певним алгоритмом розуміється, по-перше, інформаційна ємність побудованого правила класифікації даним алгоритмом (відсоток “охоплення” вибірки цим алгоритмом), по-друге, затрати ресурсів ЕОМ, пов'язані з побудовою (ціною узагальненої ознаки) правила класифікації та його зберіганням.

Зважаючи на великі ресурсні витрати на оцінку ефективності алгоритмів розпізнавання (причому, можлива ситуація, коли метод дерева оперує десятками зовсім різних за принципом автономних алгоритмів розпізнавання), та особливості методу дерева, доречно робити повну їх оцінку лише на першому кроці побудови дерева розпізнавання для вибору його початкової вершини.

III. ЗАГАЛЬНА СХЕМА ГЕНЕРАЦІ ДЕРЕВА КЛАСИФІКАЦІЇ

Проілюструємо все вищесказане та особливості побудови схеми розпізнавання методом логічного дерева, коли в якості ознак використовуються окремі алгоритми розпізнавання на простому тестовому прикладі.

Припустимо, що метод дерева використовує в якості ознак (узагальнених ознак) один з чотирьох простих геометричних алгоритмів розпізнавання (алгоритм гіперкуля, алгоритм гіперплощин, алгоритм гіпереліпсів, алгоритм гіперпаралелепіпедів), принцип роботи яких полягає в апроксимації початкової вибірки відповідними

геометричними фігурами. Результатом роботи кожного з вказаних алгоритмів є одна або декілька узагальнених ознак (відповідних геометричних фігур), які і описують певну частину вибірки. Причому можливі випадки, коли алгоритм не може побудувати узагальнену ознаку (у зв'язку зі складним розташуванням класів у n -вимірному просторі), або побудовані ознаки неповністю апроксимують початкову вибірку (об'єкти, які не підпадають під цю апроксимовану область, називають відмовами класифікації).

Нехай єдиною інформацією про характер розбиття множини M на класи H_i є початкова вибірка (табл. 1), з якої видно, що ми маємо справу з об'єктами W_i , що описуються трьома ознаками та згруповані за чотирма класами.

ТАБЛИЦЯ 1. Дані початкової навчальної вибірки

№	Ознаки P_1	Ознаки P_2	Ознаки P_3	Значення $f_i(w)$ Клас
1	123	23	342	1
2	234	23	4	1
3	34	45	432	4
4	34	43	34	2
5	34	34	34	1
6	43	567	734	3
7	2345	6	7	2
8	3445	56	7	4
9	12	546	778	3
10	34	657	89	3
11	124	24	343	1
12	35	35	36	1
13	235	24	6	1
14	125	26	345	1
15	39	660	93	3
16	41	662	98	3
17	128	30	350	1

Спочатку оцінимо ефективність кожного з алгоритмів розпізнавання, на основі яких і буде побудована загальна система розпізнавання, стосовно навчальної вибірки (табл. 2).

ТАБЛИЦЯ 2. Ефективність алгоритмів апроксимації відносно початкової навчальної вибірки

	Алгоритм гіперкуля	Алгоритм гіпереліпсів	Алгоритм гіперпаралелепіпедів	Алгоритм гіперплощин
Клас 1	0/2	0/3	0/3	6/1
Клас 2	0/2	2/0	2/0	2/0
Клас 3	0/1	0/2	0/2	0/1
Клас 4	0/2	2/0	2/0	2/0

В комірках даної таблиці представлена ефективність кожного з алгоритмів відносно класів навчальної вибірки. Перше число відповідає за кількість об'єктів, яким відмовлено у класифікації відповідним алгоритмом, а друге – за кількість узагальнених ознак (вершин дерева), якими апроксимований відповідний клас навчальної вибірки. В залежності від початкового вибору алгоритму в якості вершини дерева розпізнавання процес побудови результуючого правила класифікації може завершитися з різною кількістю кроків. Дві можливі синтезовані схеми

розпізнавання (у вигляді дерева) представлені на рис. 1 та рис 2.

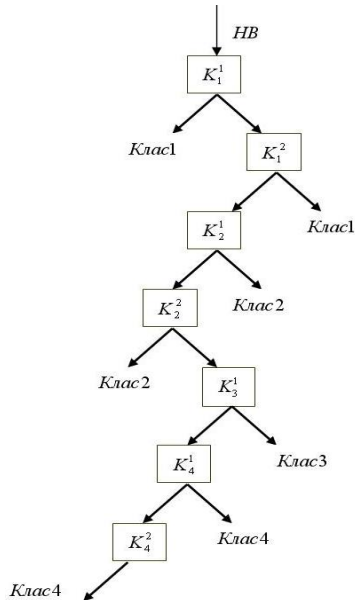


Рис. 1. Результуюча схема розпізнавання (Варіант I)

Так на рис. 1 зображена схема процесу розпізнавання, якщо в якості критерію оцінки ефективності алгоритмів розпізнавання взята кількість відмов класифікації. В ній K_i^j - певна узагальнена ознака, побудована відповідним алгоритмом на j -ому кроці генерації схеми розпізнавання для i -ого класу початкової вибірки.

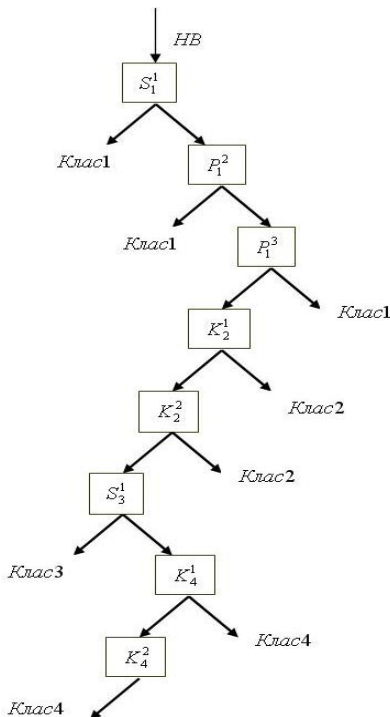


Рис. 2. Результуюча схема розпізнавання (Варіант II)

Звернемо увагу, що, наприклад, для апроксимації Класу 4 алгоритм гіперкуль буде дві узагальнені ознаки K_4^1, K_4^2 відповідно за два кроки, а загальна схема розпізнавання буде складатися із сімох етапів.

IV. ВИСНОВКИ

З Табл. 1 можна бачити, що ефективність всіх алгоритмів, за виключенням алгоритму гіперплощин відносно, Класу 1 становить 100%, тому до нього можна застосувати довільний алгоритм (зрозуміло, за виключенням алгоритму гіперплощин), але було вибрано саме алгоритм гіперкуль тому, що він побудував найменшу кількість узагальнених ознак (гіперкуль, які описують Клас 1 вибірки). На всіх наступних етапах побудови схеми розпізнавання знову ж вибирається даний алгоритм, який виявився найбільш ефективним та економним відносно всіх інших класів навчальної вибірки. Його особливістю є велика універсальність в плані можливості побудови узагальної ознаки, навіть в тих випадках, коли інші геометричні алгоритми цього зробити не можуть і дають повну відмову класифікації для об'єктів навчальної вибірки. Крім того кожна з узагальнених ознак, синтезованим ним, представляє собою координати центру гіперкулі та її радіус і потребує мінімальної об'єм пам'яті для свого зберігання. Отже всі вершини (узагальнені ознаки) K_i^j даної схеми розпізнавання рис. 1 побудовані алгоритмом гіперкуль.

На відміну від попередньої схеми, схема розпізнавання рис. 2 побудована алгоритмами, ефективність яких оцінювалася відносно кількості узагальнених ознак, якими вони описують навчальну вибірку. Так для апроксимації Класу 1 було застосовано два алгоритми: спочатку алгоритм гіперплощин "побудував" ознаку S_1^1 , яка лише частково його описувала, а потім алгоритм гіперпаралелепіпедів – ознаки P_1^2 та P_1^3 , які остаточно і завершили розпізнавання даного класу. На наступних етапах розпізнавання знову ж застосований алгоритм гіперкуль (ознаки $K_2^1, K_2^2, K_4^1, K_4^2$) та алгоритм гіперплощин (ознака S_3^1). Звернемо увагу, що для побудови даної схеми застосовані три різні алгоритми розпізнавання, які безпосередньо не впливають на роботу один одного. Тобто на їх місці могли знаходитися зовсім різні за принципом та ідеологією алгоритми, з яких можна сконструювати схему розпізнавання довільної складності та ефективності. Важливим є лише ефективність кожного з них на фіксованій виборці та інформаційна ємність узагальнених ознак, генерованих ними, тобто метод дерева оперує лише вже готовими (побудованими) ознаками, і його може зовсім не цікавити, яким алгоритмом чи способом вони отримані.

Порівнявши ці дві схеми розпізнавання, можна побачити, що друга схема програє першій у складності (кількості вершин - етапів). Зрозуміло, що схема рис. 1. буде найефективнішою та найбільш економічною схемою розпізнавання для даної тестової задачі, тому що містить найменшу кількість кроків і займає найменше пам'яті ЕОМ.

Дані системи розпізнавання, сконструйовані на основі методу дерева, можна представити як певні алгоритмічні схеми (оператори), які побудовані деяким алгоритмом мінімізації або максимізації відповідного функціонала (який характеризує важливість ознаки, групи ознак або ефективність алгоритму розпізнавання), однозначно пов'язаного з помилками класифікації.

Зауважимо, що метод дерева на основі вхідних даних (даних навчальної вибірки) та асортименту алгоритмів формування узагальнених ознак, які зберігаються в його бібліотеці, конструює (генерує) оптимальну за витратами пам'яті (складності) та ефективності розпізнавання системи розпізнавання певну схему – набір числових параметрів для елементарних ознак K_i , які найкращим чином апроксимують навчальну вибірку. Так в нашому випадку, аргументи сконструйованої схеми розпізнавання – ознаки класів (гіперкулі, гіпереліпси та інші) або між-класові ознаки (гіперплощини). Параметри вказаних ознак та загальна структура системи розпізнавання (схеми) зберігаються в пам'яті ЕОМ.

Кожна із сконструйованих схем рис. 1. та рис 2. буде являти собою загальну систему розпізнавання, яку можна застосовувати для практичної роботи (обробки великих масивів експериментальних даних у вигляді навчальної вибірки). Зауважимо також, що отримана схема буде являти собою в певній мірі новий алгоритм розпізнавання (зрозуміло, що синтезований з відомих алгоритмів та методів). Крім того для роботи даних системи розпізнавання немає необхідності зберігати в пам'яті ЕОМ об'єкти вибірки, по яких вона була сконструйована, тобто великі інформаційні масиви. Останнє, в свою чергу, веде до того, що процес побудови системи розпізнавання на основі методу дерева в значній мірі схожий з процесом стиснення (маються на увазі методи стиснення інформації із втратами) або кодуванням інформації.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Повхан І.Ф. Проблема оцінки складності логічних дерев розпізнавання та загальний метод їх оптимізації / Ф.Г. Ващук, Ю.А. Василенко, І.Ф. Повхан // Науково технічний журнал "European Journal of Enterprise Technologies". – 2011. – 6/4(54). – С. 24-28.
- [2] Повхан І.Ф. Загальна оцінка мінімізації деревоподібних логічних структур / Ф.Г. Ващук, Ю.А. Василенко, І.Ф. Повхан // Науково технічний журнал "European Journal of Enterprise Technologies". – 2012. – 1/4(55). – С. 29-33.
- [3] Повхан І.Ф. Мінімізація логічних деревоподібних структур в задачах розпізнавання образів / І.Ф. Повхан, Ю.А. Василенко, Е.Ю. Василенко, М.Й. Ковач, О.Д. Нікарович // Науково технічний журнал "European Journal of Enterprise Technologies". – 2004. – 3[9]. – С. 12-16.
- [4] Повхан І.Ф. Концептуальна основа систем розпізнавання образів на основі метода розгалуженого вибору ознак / Повхан І.Ф., Василенко Ю.А., Василенко Е.Ю. // Науково технічний журнал "European Journal of Enterprise Technologies". – 2004. – №7[1]. – С. 13-15.
- [5] Povhan I. Designing of recognition system of discrete objects / Povhan I.F. // 2016 IEEE First International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP), Lviv, Ukraine, pp. 226-231, 2016.
- [6] Povhan I. General scheme for constructing the most complex logical tree of classification in pattern recognition discrete objects / Povhan I.F. // Збірник наукових праць "Електроніка та інформаційні технології", Львів. – 2019. – Випуск 11. – С. 112-117.

- [7] Повхан І.Ф. Проблема функціональної оцінки навчальної вибірки в задачах розпізнавання дискретних об'єктів / І.Ф. Повхан // Вчені записки Таврійського національного університету. Серія: технічні науки. – 2018. – Том 29(68) №6 2018. – С.217-222.

Застосування ABC-Аналізу для Відсікання Неінформативних Наборів при Паралельному Пошуку Асоціацій

Ольга Половинка

кафедра прикладної математики та інформатики
Донецький національний технічний університет
Покровськ, Україна
olga.polovinka1@gmail.com

Ольга Дмитрієва

кафедра прикладної математики та інформатики
Донецький національний технічний університет
Покровськ, Україна
dmitrieva.donntu@gmail.com

Using ABC Analysis to Cut off Non-Informative Sets when Searching for Associations

Olga Polovinka

Department of Applied Mathematics and Informatics
Donetsk National Technical University
Pokrovsk, Ukraine
olga.polovinka1@gmail.com

Olga Dmytriyeva

Department of Applied Mathematics and Informatics
Donetsk National Technical University
Pokrovsk, Ukraine
dmitrieva.donntu@gmail.com

Анотація — У статті запропонована паралельна модифікація алгоритму пошуку асоціацій для вирішення задачі формування списку супутніх товарів для аптечної мережі. Наведено алгоритм одноразового сканування бази для формування наборів з двох елементів. Розглянуто використання ABC-аналізу для відсікання неспроможних наборів. Доведена ефективність запропонованих змін.

Abstract — In the article a parallel modification of the association search algorithm to solve the problem of forming a list of related products for the pharmacy chain is proposed. The main shortcomings of the classical algorithm Apriori in work with a large number of possible sets are revealed. To reduce the processing time, a parallel implementation of the search for associations based on a hierarchical decomposition technique is proposed. Which consists in splitting the data into smaller subsets, between which relationships are established and necessary calculations are performed. Evaluation of the quality of the algorithm occurs in terms of speed. In work proposed to use a one-time base scan to form two-element sets for the implementation of a parallel algorithm. A fragment of the one-time base scan algorithm is given. According to the results of experimental studies, it was found that in working with a large number of possible sets, the use of a support indicator for cutting off rare sets is permissible, but rather inconvenient. Therefore, the sets that do not meet the specified characteristics, it is proposed to cut off using ABC analysis. Which consists in sorting the data according to the frequency of occurrence and the separation of data according to

given characteristics. The proposed modification of the Apriori algorithm allows to search for associative sets of any size using a one-time base scan. That can significantly reduce the time of the algorithm compared with the initial multiple base scan. The practical application of the development is the acceleration of the formation of the list of best-selling goods and the list of related products. This will increase sales and expand the boundaries of the analysis.

Ключові слова — пошук асоціацій; паралельна реалізація; ABC-аналіз.

Keywords — association search; parallel implementation; ABC analysis.

I. ВСТУП

Одним з класичних алгоритмів навчання правилам асоціацій в інтелектуальному аналізі даних є Apriori [1, 2]. Алгоритм призначен для роботи з базами даних, що включають операції з обміну та доповнення інформації. В результаті цих операцій в систему вносяться зміни, а сам процес носить назву транзакції. Сенс алгоритму полягає в добуванні корисної інформації з великих обсягів даних. Прикладами даних, для яких зручно використання алгоритму, є, наприклад, набори медикаментів, замовлених в аптеці; перелік товарів, переглянутих клієнтами; відомості про частоту відвідувань веб-сайту, тощо.

Незважаючи на поширеність, алгоритм Аргіогі не вільний від недоліків. Основним недоліком є багаторазове сканування базового набору. При великих масивах даних це призводить до значних витрат часу. У той саме час, зменшення розміру обсягу вхідних даних не завжди припустимо [3].

Методом поліпшення алгоритму є використання паралельних моделей. Єдиної універсальної та ефективною версії паралельної реалізації алгоритму Аргіогі не існує. Це пояснюється прив'язкою алгоритму до середовища функціонування, формуванням його структури в залежності від предметної області і програмної реалізації, необхідністю урахуванням особливостей побудови бази даних і повноти початкових наборів.

II. МЕТОДИКА ПОБУДОВИ ОСНОВНОГО АЛГОРИТМУ

Для побудови паралельного алгоритму інтелектуального аналізу даних автори [4] пропонують використати ієрархічну декомпозиційну методику, що полягає в розбитті даних на більш дрібні підмножини, між якими встановлюються взаємозв'язки і проводяться необхідні обчислення. Оцінка якості алгоритму відбувається за показником швидкодії.

Оскільки головним недоліком алгоритму є багаторазове сканування базового набору, що значно збільшує час його виконання, при реалізації паралельного алгоритму в роботі пропонується внести наступні зміни в функціонування алгоритму:

- виконати формування наборів з одного та двох елементів одноразовим скануванням бази,
- реалізувати відсікання рідкісних наборів окремою процедурою, що виконується за принципом АВС-аналізу.

Зазвичай при пошуку частих наборів даних використовується декілька показників, серед них показник підтримки, який визначається відсотком транзакцій даних, що мають відношення до задачі, для яких шаблон є істинним. Використовується для відсікання неспроможних наборів. А також показник впевненості, який визначається мірою впевненості або достовірності, пов'язаною з кожною виявленою моделлю.

Зміна способу відсікання рідкісних наборів пов'язана з тим, що при спробі розрахувати підтримку на базі значного обсягу транзакцій з великою кількістю можливих одноелементних наборів даний параметр занадто малий.

На рис. 1-2 наведено схеми лінійної і паралельної реалізації алгоритму інтелектуального аналізу даних.

Процес побудови паралельного алгоритму при використанні ієрархічної декомпозиційної методики відбувається за додатково обробленими даними. При цьому кожен блок є базою даних окремої аптеки. При лінійній реалізації алгоритму бази обробляються по черзі. Під час паралельної реалізації для кожної бази виконується окремий виклик програми-обробника, після чого

результати об'єднуються і виводяться в результуючий файл (рис.2)

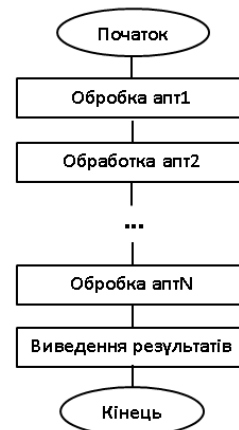


Рис. 1. Схема лінійної реалізації алгоритму

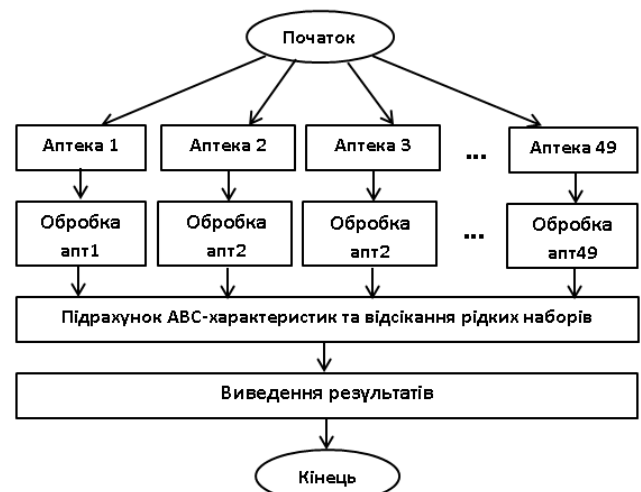


Рис. 2. Схема паралельної реалізації алгоритму

Для формування двоелементного набору за класичним алгоритмом Аргіогі виконується дворазове сканування бази. При першому проході відбувався пошук одноелементних наборів і відсікання тих, які не задовольняють заданим умовам. При повторному скануванні даних формувалися двоелементні набори. При цьому загальний час обробки збільшувався приблизно в два рази навіть при паралельному виконанні. При пошуку більш об'ємних наборів час реалізації збільшувався ще більше.

Тому вирішено змінити алгоритм блоку обробки даних таким чином, щоб формування наборів з двох елементів відбувалося за допомогою одноразового сканування бази. При цьому відсікання рідких наборів відбувається на наступному кроці. Фрагмент алгоритму одноразового сканування бази для формування наборів з двох елементів наведено на рис. 3.

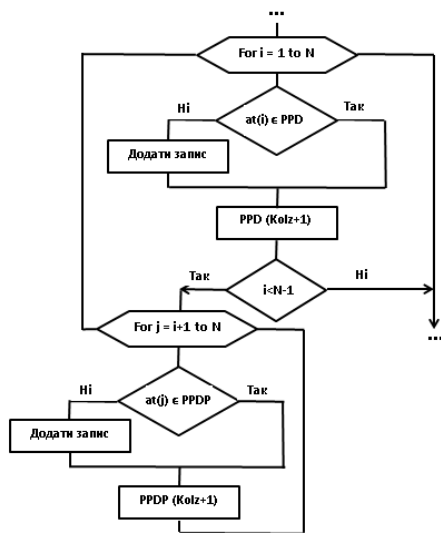


Рис.3 Фрагмент алгоритму обробки транзакцій

Результатом роботи алгоритму є сформовані таблиці частих наборів з одного та двох елементів.

III. ЗАСТОСУВАННЯ АВС-АНАЛІЗУ

Як було відзначено в попередньому розділі, при спробі розрахувати показник підтримки в заданих умовах, результати виходять неінформативними. У табл. 1 наведено розрахунок показника підтримки для декількох одноелементних наборів.

Розрахунок відбувається за наступною формулою:

$$\text{sup}(X) = \frac{\sum x(i)}{T}, \quad (1)$$

де $x(i)$ - кількість входжень товару в транзакції; T - загальна кількість транзакцій.

TABLE I. РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКА ПІДТРИМКИ ДЛЯ ОДНОЕЛЕМЕНТНИХ НАБОРІВ

Найменування	Кількість входжень	Показник підтримки, %
АнтиФлу Кидс пор. пакет N 5 (P)	683	0,029
Спринцовка Б-9 (тверд. наконеч.) (P)	127	0,005
Урсосан капс. 250мг N 100 (P)#	1780	0,076
Трентал таб.п/о 100мг N 60 R	327	0,014
Деприм таб. 60мг N30 (P)	142	0,006
Пульмикорт сусп.д/инг 0.5мг/мл 2мл N 20	3577	0,152
Спирт етиловий конц. 95% 100мл (P)#	138083	5,869
Гематоген турбо Лунтик с инулин. с 3х ле	1272	0,054
Релиф супп. N 12 (P)	1015	0,043
К-та аскорбин. с сах. N 10 крутка (P)	2181	0,093
В/м Dr.Wasser Ессендуки-новая 2 1.5л газ	1033	0,044
Доктор Мом паст.(апельсин) N 20 (P)	1243	0,053

Варто відзначити, що «Спирт етиловий конц. 95% 100мл (P) #» є одним з найбільш продаваних товарів і становить близько 3% від загального обсягу продажів мережі. При цьому його підтримка, тобто ймовірність появи в чеку, становить всього 6%. Це відбувається через величезну кількість товарів і транзакцій, а, отже, і можливих варіантів.

У випадку з двоелементними наборами показник підтримки буде мати ще менше значення.

За результатами експериментальних досліджень виявлено, що використання показника підтримки для відсікання неспроможних наборів припустимо, але досить незручно. Оскільки для отримання більш-менш реальної картини цей показник не повинен перевищувати рівень 0,009%.

Результати експерименту, в якому мінімальна підтримка встановлена на рівні 1%, наведено у табл.2. З 16 984 одноелементних наборів залишилося всього 6 значущих шаблонів, що є неприпустимим.

TABLE II. КІЛЬКІСТЬ ВХОДЖЕНЬ ОДНОЕЛЕМЕНТНИХ НАБОРІВ ПРИ МІНІМАЛЬНОМУ ЗНАЧЕННІ ПОКАЗНИКА ПІДТРИМКИ

Найменування	Кількість входжень	Показник підтримки, %
Спирт етиловий конц. 95% 100мл (P)#	138083	5,87
Шприц BD Diskardit (2x) 5мл игла 0.7x40	30959	1,32
Омепразол капс. 20мг N30 (P)	30421	1,29
Шприц SF 3-х комп. 5мл 22G (0.7x40) (P)	29012	1,23
Шприц BD Diskardit (2x) 2мл игла 0.6x30	25500	1,08
Кетанов 10мг N 100 (P)#	24872	1,06

Тому набори, які не відповідають заданим характеристикам, запропоновано відсікати за допомогою АВС-аналізу. Він дозволяє класифікувати ресурси або продукцію фірми за ступенем їх важливості, а також застосовується для визначення груп найбільш продаваних товарів. Аналіз відноситься до методів раціоналізації і може застосовуватися в сфері діяльності будь-якого підприємства [5].

Метод полягає в сортуванні даних по частоті входження, поділі даних за заданими характеристиками і, відповідно до них, присвоєння товарам однієї з груп: А, В, С, D і так далі.

У першому експерименті мінімальний відсоток входження було встановлено на рівні 50%. Тобто сумарна частота наборів, що потрапляють в групу А, повинна була становити не менше 50% від загальної кількості входжень.

Для наборів з одного елемента це значення виявилось прийнятним. З 16 984 можливих наборів отримано 498 значущих. По суті, це такі товари мережі аптек, що купують найчастіше.

Для наборів з двох елементів мінімальний відсоток входження обирається іншим. Це пов'язано з тим, що за результатами експериментів, при рівні 50% в результатуючу таблицю потрапляють всі набори товарів, які зустрічаються в транзакціях більше 2 разів. Тому мінімальним відсотком входження прийнято 20%.

В цьому випадку, в підсумкову таблицю виводяться 10 702 (з 1 048 576) наборів з двох елементів, що часто зустрічаються. Отримана таблиця і буде сформованим списком супутніх товарів. Та може бути використана для збільшення обсягу продаж мережі аптек.

IV. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПАРАЛЕЛЬНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ

Для оцінки ефективності застосування ієрархічної декомпозиційної методики і внесених в алгоритм змін

проведено ряд експериментів з використанням різної кількості оброблюваних транзакцій. Мінімальний обсяг вибірки становить 13 243 транзакції (база однієї аптеки) максимальний - 2 352 897 транзакцій (обробляються бази всіх аптек мережі). Кожна транзакція формується шляхом перетворення товарного чека в пари типу «ключ», «значення», де ключ це номер чека, а значення - специфікація документа.

Дані було розпаралелено по базах аптек. При обробці першої бази значної різниці при виконанні лінійного і паралельного алгоритму не спостерігалось. Однак, вже на другому кроці (обробка 87 124 транзакцій) спостерігалася економія часу обробки в 5 секунд. При паралельній обробці всієї бази даних результат був отриманий у 3,7 разів швидше.

На рис. 5. наведено залежності часу виконання лінійного і паралельного алгоритмів від кількості транзакцій.

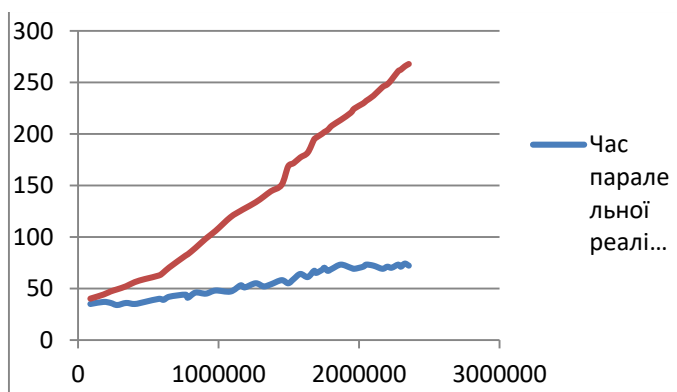


Рис. 4. Залежності часу виконання лінійного і паралельного алгоритмів від кількості транзакцій

Одноразове сканування бази, використане в модифікованому алгоритмі для пошуку частих двоелементних наборів даних дозволило зменшити час виконання алгоритму майже вдвічі. Таким чином, загальні модифікації, внесені до класичного алгоритму пошуку асоціативних правил для вирішення задачі формування списку супутніх товарів, дозволили отримати зменшення часу роботи алгоритму приблизно в 6 разів.

ВИСНОВКИ

Науковою новизною даного дослідження є застосування ABC-аналізу для відсікання неінформативних наборів на попередніх етапах пошуку асоціацій.

Крім того, описано застосування ієрархічної декомпозиційної методики для побудови паралельного варіанту алгоритму Apriori, а також застосування ABC-аналізу для відсікання неспроможних наборів.

Запропонована модифікація алгоритму Apriori, яка полягає в одноразовому скануванні бази для пошуку наборів будь-якої розмірності. Це дозволило значно скоротити час виконання алгоритму в порівнянні з початковим багаторазовим скануванням бази.

Наочне уявлення поліпшень, отриманих при застосуванні паралельної реалізації, відображує на графіках. При застосуванні на 2 352 897 транзакцій швидкість обробки збільшилася в 6 разів.

Практичним застосуванням розробки є прискорення формування списків товарів, що продаються найчастіше та супутніх їм товарів. Це дозволить підвищити показники продажів та розширити межі проведення аналізу.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Srinivas Doddi, Achla Marathe, S.S. Ravi, David C. Torney, "Discovery of Association Rules in Medical Data," in *Med Inform Internet Med.*, pp. 25-33, 2001.
- [2] Ahmad Y., Fatemeh G.G., Sima A., Somayeh H., Farshad M., "Identifying Association Rules among Drugs in Prescription of a Single Drugstore Using Apriori Method," in *Intelligent Information Management*, vol 7, no 5, pp. 253-259, September 2015.
- [3] Кириченко Д.О., Артемов М.А., "Оптимизация входных данных в задаче поиска шаблонов и ассоциативных правил," *Вестник ВГУ, Серия: Системный анализ и информационные технологии*, vol 14, pp. 63-70, 2014.
- [4] L. Yao and Z. Ge, "Distributed parallel deep learning of Hierarchical Extreme Learning Machine for multimode quality prediction with big process data," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 81, pp. 450-465, May 2019, in press.
- [5] A. Ultsch and J. Löttsch. (2015). "Computed ABC Analysis for Rational Selection of Most Informative Variables in Multivariate Data" [Online]. Available: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0129767>.

СЕКЦІЯ 5.

***Захист інформації в інформаційно-телекомунікаційних
системах***

SECTION 5.

***Information protection in information
and telecommunication system***

Обґрунтування Захищеності Інформації від Витоку Технічними Каналами для Сучасних Інформаційно-Телекомунікаційних Систем

Сергій Іванченко
Науково-дослідний центр
Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації
КПІ ім. Ігоря Сікорського
Київ, Україна
soivanch@ukr.net

Олег Рушчак
Спеціальна кафедра №4
Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації
КПІ ім. Ігоря Сікорського
Київ, Україна
oruschak@gmail.com

Олександр Пучков
Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації
КПІ
ім. Ігоря Сікорського
Київ, Україна
ganaga@ukr.net

Анатолій Голішевський
2 науково-дослідний центр
Державний науково-дослідний інститут спеціального зв'язку та захисту інформації України
Київ, Україна
380937029549@ukr.net

Justification of the Protection of Information From Leakage by Technical Channels for Modern Information and Telecommunication Systems

Serhii Ivanchenko
special department №1
Institute for Special Communications and Information
Protection KPI them Igor Sikorsky
Kyiv, Ukraine
soivanch@ukr.net

Oleh Ryshchak
special department №4
Institute for Special Communications and Information
Protection KPI them Igor Sikorsky
Kyiv, Ukraine
oruschak@gmail.com

Oleksandr Puchkov
Institute for Special Communications and Information
Protection
KPI them Igor Sikorsky
Kyiv, Ukraine
ganaga@ukr.net

Anatolii Holishevskiy
2 research centers, 2 research departments
State Research Institute of Special Communications and
Information Protection of Ukraine
Kyiv, Ukraine
380937029549@ukr.net

Анотація—Здійснено обґрунтування захищеності інформації від витоку технічними каналами та її кількісних показників для сучасних інформаційно-телекомунікаційних систем. Показано зв'язок поміж цими показниками, який дозволяє аналіз ризику безпеки відносно енергетичних умов

при перехопленні. Зазначені показники можуть бути використаними в якості нормативних для використання на практиці та гарантування захищеності інформації від витоку технічними каналами.

Abstract— The substantiation of the protection of information from leakage by technical channels and its quantitative indicators for modern information and telecommunication systems is grounded. The relationship between these indicators is shown, which allows for the analysis of the safety risk in relation to the energy conditions during interception. These indicators can be used as normative for use in practice and guaranteeing the protection of information from leakage through technical channels.

Ключові—інформаційна безпека; технічний захист інформації; виток інформації; технічний канал виток

Keywords—informational security; technical protection of information; information leakage; technical channel of leakage

I. ВСТУП

Як відомо, інформаційні ресурси, що передбачають використання кіберпростору в Україні, поділяють на відкриту та інформацію з обмеженим доступом, яка в свою чергу розрізняється на таємну, службову та конфіденційну інформації. Це розрізнення здійснюється в залежності від важливості та належності відомостей. Тому актуальність її забезпечення повністю визначається власником інформації, його інтересами, та прийнятих до уваги загроз [1 - 3].

Інформаційно-телекомунікаційні системи (ІТС), що забезпечують функціонування сучасного кіберпростору, є переважно електронними. Під час роботи вони супроводжуються рядом власних побічних ефектів, які є шкідливими з точки зору безпеки. Цими ефектами є побічні випромінювання електромагнітних полів, що описують інформаційні сигнали. Це наведення зазначених полів на сторонні провідники та технічні засоби, які мають гальванічний зв'язок з навколишнім світом. Це просочування інформаційних сигналів у виді електричних струмів в ланцюги заземлення та електроживлення, тощо [4, 5].

Утворені в такий спосіб небезпечні сигнали поширюються за межі контрольованості об'єкту на відносно невеликій відстані. За допомогою сучасних засобів спектрального аналізу та контрольовано-вимірювальної техніки інформаційні сигнали можуть ідентифікуватись на відстанях від сучасних засобів від одиниць до сотень метрів.

Поряд із зазначеною інформацією особливої уваги зазнають персональні дані [6]. Цьому сприяє ряд факторів. По-перше, це високий рівень розвитку комерційної діяльності людства та збагачення приватного сектору, де "інформація коштує грошей". По-друге, це ствердження правового поля людини та гарантування її прав, що передбачає і гарантування конфіденційності персональних даних. По-третє, це зростання потенційних можливостей перехоплення інформації, що зумовлено сучасним станом розвитку науки і техніки світу та ускладнює захист. Тощо.

Таким чином, вказані ефекти сприяють утворенню технічних каналів виток інформації, які є небажаними та представляють собою загрозу інформаційній безпеці. Тому завданням щодо забезпечення та обґрунтування захищеності інформації відносно цих загроз є актуальним та вимагає

відповідних наукових вирішень для всіх її ступенів та різновидів обмеження доступу.

II. ОСНОВНА ЧАСТИНА

Як і для багатьох інших загроз, забезпечення інформації від виток має розглядати два шляхи вирішень:

- 1) повне ліквідування передумов виток;
- 2) достатньо-часткове знешкодження технічних каналів.

Ліквідування передумов виток на об'єктах пов'язане із забезпеченням повної відсутності небезпечних сигналів в місцях можливого перехоплення. Як правило, це досягається створенням досить великих контрольованих зон, де їх границі мають сягати за сотні метрів та кілометри. При цьому має бути забезпеченим повне розсіяння сигналів побічних випромінювань. Це відсутність буд-яких гальванічних з'єднань відвідних ланцюгів з навколишнім світом. Це автономне електроживлення технічних засобів та систем обробки та передачі інформації, тощо. Разом з цим це й повна гарантія безпеки щодо виток інформації технічними каналами.

Вочевидь, що такий підхід є цілком придатним для реалізації на практиці. Однак, він має складність, особливо при розташуванні об'єктів в густо населених пунктах. Це, насамперед, пов'язано із необхідністю займання (арендування) досить великих територій та значних витрат на забезпечення життєдіяльності. Це суттєві обмеження у роботі персоналу, наприклад, заборона користування на робочому місці міським та мобільним зв'язком, Інтернетом, інші питання побутового характеру, тощо. Все це створює незручності, а часто і неможливості щодо застосування зазначеного підходу.

Знешкодження технічних каналів виток використовує частковість ліквідування ефектів, що їх утворюють. Ця частковість має забезпечувати достатність захисту з точки зору вимог безпеки. Адже виявлення ознак носія небезпечного сигналу ще не є фактом несанкціонованого перехоплення відомостей. Частковість же перехоплення та частковість отриманих з перехопленого сигналу відомостей не мають прямо пропорційної залежності. Це пов'язано з нерівномірністю розподілів інформативності за часовими та частотними елементами сигналу; це смислові зв'язки між ними, які утворюють змінність статистики при перехопленні. Врахування зазначеного в порівнянні з підходом повного ліквідування передумов виток може надати можливість суттєвого зменшення складності захисту та фінансових витрат.

Згідно з міжнародними стандартами щодо менеджменту інформаційної безпеки, а саме серії ISO/IEC 27000, імплементація яких здійснюється на сьогодні в Україні, центральним поняттям є ризик безпеки [7]. Ризик – це потенційна можливість небезпеки, що приводить до збитків. Він є поєднанням імовірності реалізації загрози та наслідків від неї. А тому цей показник в технологічній частині реалізації загрози може розглядатись як імовірність того, що частина відомостей все таки витікатиме технічними каналами. Якщо існує така допустима частина

цих відомостей, при витоку якої безпека не порушиться, або порушиться не суттєво, то її можна взяти як норму безпеки та поставити їй у відповідність гранично допустиму імовірність ризику p_r .

Ця гранично допустима імовірність є відправною точкою для розрахунку всіх інших технологічних нормативних показників, які характеризують ефект протистояння загрози. Наслідки ж від реалізації загрози є питанням вибору шкали збитків та ціни поділок. Зазначені імовірність та наслідки мають бути визначеними за участю власника інформації та носити декларативний чи нормативний характер.

Так, наприклад, для обґрунтування захищеності мовних джерел інформації в нормованому ризику можна у відповідність поставити гранично допустиму розбірливість. За розбірливістю знайти відповідні енергетичні умови в точці можливого перехоплення, що забезпечуватимуть заданий ризик. Для зображень, як не менш важливого виду інформації поряд з мовною, аналогічним чином можна знайти гранично допустимі відношення сигнал/завада через нормування їх розпізнання.

Зазначені підходи мають сенс для практичного використання, оскільки для обох джерел кінцевим приймачем є людина. При цьому використаний суб'єктивізм в оцінюванні захищеності джерел витоку повністю компенсуватиметься вадами цього суб'єктивізму при перехопленні. Слід зазначити, що ці підходи мають ефективне застосування для старого парку техніки, які не використовували аналого-цифрових перетворень.

Однак, сучасні ІТС зазнали досить високого рівня розвитку та на сьогоднішній день без винятку є цифровими та автоматизованими. Під час роботи вони самостійно керують внутрішніми процесами з мінімізацією участі оператора. Без участі оператора сучасні ІТС автоматизовано здійснюють часове об'єднання та роз'єднання інформаційних потоків. В разі збоїв та інших причин вони самостійно керують повторами сеансів обробки та передачі, коригують якість каналів, вносячи в послідовності даних різного характеру надлишковості, тощо.

Очевидно, що для сьогоднішніх ІТС знаходження потрібних відношень сигнал/завада за заданими розбірливістю та розпізнанням є складним, а то і неможливим. Тому для забезпечення інформації від витоку технічними каналами в сучасних ІТС запропоновано обґрунтування нових підходів, які базуватимуться на теоретичному обґрунтуванні захищеності та братимуть початок від заданого ризику безпеки. Вони повинні мати практичну реалізованість та забезпечувати захищеність із заданою гарантією достовірності безпеки.

Нехай задано гранично допустиму імовірність ризику $p_{r, \text{гр.доп.}}$. Це є імовірність, яка по суті виражає потрібний рівень захисту інформації в середньому. Її обирає та визначає власник інформації в залежності від ступеня та виду обмеження доступу. Заданій величині $p_{r, \text{гр.доп.}}$ можна поставити у відповідність гранично допустиму пропускну спроможність технічного каналу витоку – $C_{\text{гр.доп.}}$, яка повністю визначається максимумом кількості інформації, що може пройти через цей канал.

Пропускна спроможність каналу залежить від помилок перехоплення, що утворюють завади при поширенні у фізичному середовищі носія небезпечного сигналу [8]. Для дискретного симетричного каналу без пам'яті цей показник при розрахунку на один розряд двійкових повідомлень виражається співвідношенням:

$$C = 1 + p \log_2 p + (1 - p) \log_2 (1 - p), \quad (1)$$

де p – імовірність помилки в каналі.

Для обґрунтування потрібних енергетичних умов в точці можливого перехоплення з метою убезпечення інформації від витоку представимо технічний канал у виді дискретно-неперервного каналу (див. рис.1). Це обґрунтування необхідне для встановлення зв'язку гранично допустимих пропускну спроможності та відношення сигнал/завада – h . Використання для технічних каналів витоку ланцюгу ієрархічно взаємозв'язаних показників

$$h \rightarrow p \rightarrow C \rightarrow p_r \quad (2)$$

дозволить розрахувати їх гранично допустимі значення:

$$p_{r, \text{гр.доп.}} \rightarrow C_{\text{гр.доп.}} \rightarrow p_{\text{гр.доп.}} \rightarrow h_{\text{гр.доп.}} \quad (3)$$

Відношення сигнал/завада, яке не перевищує $h_{\text{гр.доп.}}$, має

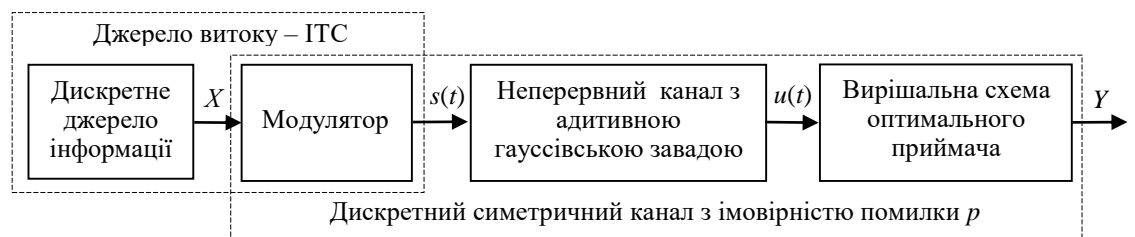


Рис. 1. Дискретно-неперервний канал як технічний канал витоку інформації від сучасних ІТС при перехопленні даних з використанням оптимальним приймача

достовірно забезпечувати виконання умови не перевищення імовірності ризику за $p_{r, \text{гр.доп.}}$.

Нехай задано технічний канал витоку інформації, що утворений від ІТС побічними фізичними ефектами, як дискретно-неперервний канал (див. рис.1). ІТС можна представити як сукупність джерела дискретних даних X , яке виробляє знаки $x \in \{0, 1\}$, та модулятора, який цим знакам ставить у відповідність деякі реалізації $s_0(t)$ та $s_1(t)$ тривалістю T та потужностями:

$$P_0 = \frac{1}{T} \int_0^T s_0^2(t) dt \quad \text{та} \quad P_1 = \frac{1}{T} \int_0^T s_1^2(t) dt \quad (4)$$

Ці реалізації є формою представлення даних в ІТС та, відповідно, мають різнитись між собою так, щоб по ним можна було ідентифікувати логічні “0” або “1”. Наприклад, USB-порт для представлення “0” та “1” використовує імпульси номіналом в 5 вольт. Можуть використовуватись і інші способи представлення даних.

Вище зазначені реалізації $s_r(t)$, $r = 0, 1$, поширюються неперервним каналом, де на них впливає адитивна гауссівська завада $n(t)$:

$$u(t) = s_r(t) + n(t). \quad (5)$$

На рис.1 неперервний канал є результатом творіння побічних ефектів, що сприяють витоку інформації з ІТС, та представляє собою опис фізичного середовища, де відбуваються ці ефекти.

На основі аналізу перехопленої $u(t)$ вирішальна схема приймає рішення $y \in \{0, 1\}$ щодо того який знак x був на виході джерела. Якщо $y = x$, то рішення вірне, якщо $y \neq x$, то помилкове.

Слід зазначити, що імовірність p у співвідношенні (1) визначається не тільки завадами в каналі як було вказано. Вона залежить і від ефективності використаних засобів перехоплення. Проте чим користуватиметься злоумисник, як правило, є невідомим. Адаже зазвичай перехоплення здійснюється приховано. Тому обґрунтування зв'язку імовірності помилки з відношенням сигнал/завада має бути виконаним як для найгіршого випадку з точки зору убезпечення інформації. Тобто це передбачає, що перехоплення здійснюється найкращим чином з використанням оптимального прийому.

Побудова оптимального приймача ґрунтується на використанні критерію Котельникова – максимуму апостеріорної імовірності для пар даних x_r на вході каналу та y_l , $l = 0, 1$, на його виході (див. рис.2):

$$p(x_r / y_l) \rightarrow \max_{r=l} \quad (6)$$

Вибір цього критерію здійснено тому, що він відповідає максимуму взаємної інформації I_{rl} , між x_r та y_l , якщо рішення вірне $l = r$, та, якщо рішення хибне $l \neq r$, – мінімуму інформації. В цьому нескладно впевнитись, проаналізувавши визначальне співвідношення для I_{rl} :

$$I_{rl} \uparrow = \log_2 \frac{p(x_r / y_l) \uparrow}{p(x_r)} \quad (7)$$

Вирішальна схема на рис. 2 побудована з використанням таких обмежень:

3) дискретне жерело інформації є джерелом без пам'яті;

4) неперервні процеси в каналі розглядаються як стаціонарні та ергодичні, що є цілком допустимим для великих потоків даних;

5) реалізації $s_r(t)$ в каналі на рис.1 не потерпають згасання, оскільки для реальних каналів це може бути скоригованим розрахунковим шляхом;

б) в якості завади використано адитивний білий шум зі спектральною щільністю N_0 . Його використання зумовлено тим, що для білого шуму існує можливість аналітичного доведення захищеності інформації. Крім того розподіл ймовірностей реальних шумових процесів в асимптотиці спрямований до нормального розподілу, яким

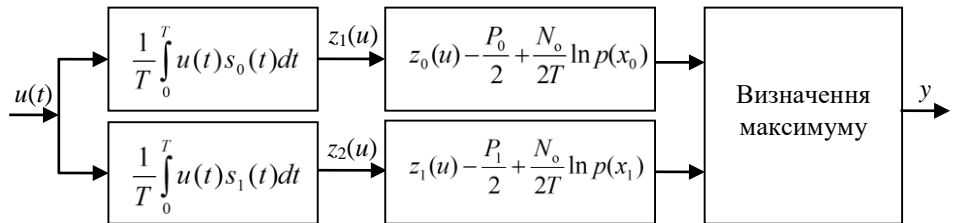


Рис.2. Вирішальна схема оптимального приймача при перехопленні дискретних даних через неперервне середовище

володіє білий шум.

Відмінністю ж вирішальної схеми, що запропонована для каналів витоку на рис. 2, по відношенню до аналогічних схем в каналах зв'язку є використання бернулліївського розподілу джерела замість рівноймовірного. Це дозволяє при забезпечення захищеності врахувати можливий дисбаланс знаків в послідовності даних та більш точно розрахувати імовірність помилкового прийому при перехопленні.

Якщо технічний каналу витоку між входом X та виходом Y апроксимувати дискретним симетричним каналом без пам'яті, та імовірність помилки p може бути знайденою як помилкове перехоплення в середньому по всім знакам x_r :

$$p = p(x_0)p(y_1 / x_0) + p(x_1)p(y_0 / x_1). \quad (8)$$

Слід зазначити, що неперервні канали з адитивною завадою не завжди утворюють дискретний симетричний (адитивний) канал. Принаймні за умови $p(x_0) \neq p(x_1)$ він не є симетричним. Однак, утворення помилки є випадковим процесом, а тому має характеризуватись імовірністю помилки в середньому [8].

Для співвідношення (8) імовірності помилкових перехоплень знаходяться за формулами:

$$p(y_1 / x_0) = F\left(-\frac{1}{2} \sqrt{\frac{P_\Delta T}{N_0}} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{N_0}{P_\Delta T}} \ln \frac{p(x_1)}{p(x_0)}\right) \quad (9)$$

та

$$p(y_0/x_1) = F \left(-\frac{1}{2} \sqrt{\frac{P_\Delta T}{N_0}} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{N_0}{P_\Delta T}} \ln \frac{p(x_1)}{p(x_0)} \right), \quad (10)$$

де P_Δ – потужність різницевого сигналу:

$$P_\Delta = \frac{1}{T} \int_0^T s_\Delta^2(t) dt, \quad (11)$$

$s_\Delta(t)$ – різницевий сигнал:

$$s_\Delta(t) = s_1(t) - s_0(t), \quad (12)$$

$F(x)$ – інтеграл Лапласа. Знаходиться з довідника:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left\{-\frac{\eta^2}{2}\right\} d\eta. \quad (13)$$

У формулі (9) та (10) складова $\frac{1}{2} \sqrt{\frac{P_\Delta T}{N_0}} = h$ є відношенням сигнал/завада, яке визначає енергетичні умови в точці можливого перехоплення інформації.

Для кожного h за співвідношеннями (9) та (10) можна обрахувати імовірності помилкових перехоплень та, підставивши отримані значення у формулу (7), знайти імовірність помилки в технічному каналі витоку p . Імовірність p за співвідношенням (1) повністю визначає пропускну спроможність каналу C та, відповідно, імовірність ризику безпеки p_r , що відповідає формулі (2).

Вказані формули дозволяють встановлення і зворотного зв'язку цих показників, як це показано формулою (3). За заданою гранично допустимою імовірністю p_r гр.доп. це надає можливість визначати їх гранично допустимі значення та обґрунтовувати захищеність інформації в ІТС від витоку технічними каналами через кількісні показники.

III. ВИСНОВКИ

Таким чином, здійснено обґрунтування захищеності інформації від витоку технічними каналами, що можуть утворюватись від сучасних ІТС. Захищеність базується на використанні імовірності ризику, який є центральним поняттям щодо сучасних міжнародних стандартів з управління інформаційною безпекою. При обґрунтуванні використано ієрархічний ланцюг кількісних показників захищеності інформації від витоку, що характеризують процес реалізації загрози та дозволяє аналіз ризику безпеки.

Показано аналітичні зв'язки поміж цими показниками, які за заданою гранично допустимою імовірністю ризику надають можливість знаходження їх гранично допустимих значень. Кінцевим із зазначених показників є відношення сигнал/завада, який визначає енергетичні умови на фізичному рівні при перехопленні. На відміну від існуючих підходів знайдене в такий спосіб відношення сигнал/завада не є кінцевою нормою захищеності. Воно має гнучкий характер та враховує особливості роботи сучасних ІТС.

Суттєвою особливістю використаного підходу є те, що захищеність може коригуватись не тільки за рахунок енергетичних показників, а й за допомогою імовірності

помилки в технічному каналі. Адже існують методи випадкового кодування, які за рахунок реалізованих в ІТС кодових перетворень, можуть підвищувати цю імовірність та захищеність в цілому. Це, в свою чергу, дозволяє економити шумових завад та послаблює вимоги з захищеності. Окремим питанням, що дозволяє коригування захищеності на цьому рівні є надлишковість джерел витоку – даних, що мають обіг в ІТС.

Запропонований підхід з обґрунтування захищеності для сучасних ІТС надає можливість захисту інформації від витоку технічними каналами з доведеною гарантією достовірності. Застосовані кількісні показники та їх ієрархічність дозволяють практичне використання цих показників в якості нормативних та гарантувати захищеність інформації та її безпеку в цілому.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Закон України «Про інформацію» (1992р.)
- [2] Закон України «Про державну таємницю» (1994р.)
- [3] Закон України «Про внесення змін до Закону України «Про інформацію» (2011р.)
- [4] Ленков С.В. Методы и средства защиты информации. Том I. Несанкционированное получение информации / С.В. Ленков, Д.А. Перегудов, В.А. Хорошко – К.:Арий, 2008. – 464 с.
- [5] Kuhn G. Compromising emanations: eavesdropping risks of computer displays. This technical report is based on a dissertation submitted June 2002 by the author for the degree of Doctor of Philosophy to the University of Cambridge, Wolfson College. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cl.cam.ac.uk/techreports>.
- [6] Закон України «Про захист персональних даних» (2010р.)
- [7] Information technology. Security techniques. Information security management systems. Requirements [ISO/IEC 27001:2013].
- [8] Іванченко С.О. Обґрунтування ризику безпеки інформації щодо її захищеності від витоку технічними каналами / Сергій Олександрович Іванченко // Науково-технічний збірник "Правове, нормативне та метрологічне забезпечення систем захисту інформації в Україні". – Київ, НТУУ "КПІ" НДЦ "Тезис", 2016. – № 1 (31) – С. 9 – 13.

Аналіз Методів Моделювання Кібернетичних Атак

Надія Казакова, Юрій Щербина, Олексій Фразе-Фразенко
кафедра автоматизованих систем та кібербезпеки
Одеська державна академія технічного регулювання і якості
Одеса, Україна
kaz2003@ukr.net

Analysis of Methods for Modeling Cybernetic Attacks

Nadiia Kazakova, Yurii Shcherbyna, Oleksii Frazе-Frazenko
dept. of automated systems and cybersecurity
Odesa State Academy of Technical Regulation and Quality
Odesa, Ukraine
kaz2003@ukr.net

Анотація—Для попередження кібератак у сучасному інформаційному просторі, необхідно мати повну інформацію про наявність у системі захисту ймовірних вузьких місць, які можуть стати потенційними джерелами загроз цілісності системі захисту, а також розуміти формальні моделі організації таких атак у конкретному середовищі експлуатації інформаційних систем. І самі моделі, і визначення переліку уразливостей, на використання яких вони орієнтовані, ґрунтуються на постійному моніторингу можливих джерел загроз та наявності ресурсів для їх, а також аналізу системи захисту на наявність у ній слабких місць. У статті проведено аналіз існуючих моделей реалізації мережних атак, на підставі якого показано перспективи використання моделей, що володіють певним набором властивостей: дозволяють оцінити ймовірність скоєння нападу з боку можливих джерел загроз, визначити стратегію розпізнавання атаки на початку спроби її реалізації порушником безпеки, мають можливості зручного формального опису з метою подальшого використання в процедурах автоматизації управління захистом. На підставі аналізу визначено найбільш адекватні моделі для автоматизації дій системи захисту.

Abstract—To prevent cyber attacks in modern information space it is necessary to have full information about the presence of a possible protection system bottlenecks that could become potential sources of threats to the integrity of the protection system and understand the formal model of such attacks in the particular environment of information systems operation. Both the models themselves and the definition of the list of vulnerabilities for which they are oriented are based on the continuous monitoring of possible sources of threats and the availability of resources for them, as well as the analysis of the system of protection for the presence of weaknesses in it. The article analyzes the existing models of network attacks implementation, under which showed prospects of models that have a certain set of properties, to assess the likelihood of

committing an attack from possible sources of threats, determine a strategy recognizing attacks in early attempts to implement offender safety, have the ability comfortable a formal description for the purpose of further use in protection management automation procedures. Based on the analysis, the most adequate models for automation of the security system's operation are identified.

Ключові слова—кіберпростір; кібербезпека; кібератака; інформаційний ресурс; інформаційна загроза; моніторинг, автоматизація; великі дані.

Keywords - cyberspace; cyber security; cyberattack; information resource; information threat; monitoring, automation; big data.

I. ВСТУП

В сучасному інформаційному просторі кібератаки складають одну з головних загроз безпеці. Витрати на попередження та ліквідацію наслідків здійснення кібератак як у державному, так і у корпоративному секторі мають стійку тенденцію на збільшення. Так, за прогнозами аналітичної компанії IDC світові витрати на апаратне та програмне забезпечення, а також послуги, пов'язані з безпекою зростатимуть на 9,2% на рік [1]. Підставою для ускладнення ситуації є інтенсивне впровадження інтелектуальних технологій у процеси автоматизації документообігу та технологічного управління, що надає зловмисникам можливість здійснення кібератак на критичні об'єкти державного і корпоративного сектору, які раніше були недоступні для впливу з кіберпростору. Наявність у програмному забезпеченні, побудованому для роботи із великими даними, вразливих з точки зору інформаційної безпеки елементів, приводить до зростання кількості троянських програм, що використовують для здійснення атак на інформаційні ресурси автоматизованих систем.

Кіберпростір – це складне і динамічне середовище, у якому велика кількість суб’єктів має можливість діяти один проти одного через комп’ютерні мережі без дотримання будь-яких узагальнених правил взаємодії. Враховуючи сучасний стан відкритого мережного інформаційного середовища, як державні так і приватні установи незалежно від країни розташування з кожним роком збільшують витрати на забезпечення захищеності інформаційних ресурсів, що зберігаються і обробляються в автоматизованих системах. Виникнення самого поняття кіберпростору пояснюється тим, що сучасні інформаційні процеси передбачають використання так званих “великих даних”. Складність сучасних інформаційних процесів, що відбуваються в кібернетичному просторі, дає можливість реалізації кожної загрози різнотипними способами.

II. ОСНОВНА ЧАСТИНА

У минулий період для вторгнення в системи супротивника зловмисники використовували вірусний код, що самостійно розповсюджувався і втілював у програмне забезпечення атакованих систем скриті функції, які дозволяли отримувати несанкціонований доступ до об’єкту безпеки. Сьогодні актуальним став новий вид комп’ютерних атак, відомий під назвою постійної наполегливої загрози “Advanced Persistent Threat” (APT). Сутність якої полягає в тому, що атака на інформаційний ресурс передбачає декілька варіантів, в залежності від розвитку процесу вторгнення. Протидія таким атакам вимагає виявлення вторгнення на самих ранніх етапах і постійного структурованого інтелектуального і автоматизованого аналізу інформаційних процесів, що відбуваються як у середовищі самих автоматизованих систем так і зв’язують їх із суміжними суб’єктами. Можна стверджувати, що на даний момент актуальною є задача створення насамперед обґрунтованої наукової термінології для формального визначення загроз, джерел їх походження та інструментарію формального опису можливих сценаріїв здійснення атак на інформаційні ресурси.

З метою виявлення уразливості мережного доступу до інформаційних ресурсів та ймовірних сценаріїв поведінки зловмисників під час реалізації загроз, треба мати чітке розуміння архітектури моделей атак, які використовуються у кібернетичному просторі. Результатом дослідження способів реалізації загроз, що використовуються у кіберпросторі, мають бути признаки, за якими система захисту повинна своєчасно розпізнавати та прогнозувати варіанти розвитку дій з боку порушників безпеки і своєчасно їх унеможливити. Для побудови моделей інформаційних загроз, сьогодні використовують семантичні технології та онтології. Це відносно нова логіка, основана на технологіях, призначених для роботи з великими неструктурованими масивами даних, основною перевагою якої є можливість виконувати формальний опис процедур машинного навчання, пошуку та виявлення. Перевага зазначеного вище підходу полягає також у тому, що він дозволяє реалізувати гнучкі технології, які дозволяють здійснювати структурування великої кількості різноманітних неструктурованих даних, необхідних аналітикам з питань кібербезпеки.

Сьогодні поняття кіберзахисту включає сукупність організаційних, правових, інженерно-технічних заходів, а також заходів криптографічного та технічного захисту інформації, спрямованих на запобігання кіберінцидентам, виявлення та захист від кібератак, ліквідацію їх наслідків, відновлення сталості і надійності функціонування комунікаційних, технологічних систем [2]. Поряд із цим на підставі [2, 3], поняття кібербезпеки визначається як стан захищеності кіберпростору в цілому або окремих об’єктів її інфраструктури від ризику стороннього кібервпливу, за якого забезпечується їх сталий розвиток, а також своєчасне виявлення, запобігання й нейтралізація реальних і потенційних викликів, кібернетичних втручань і загроз особистим, корпоративним і/або національним інтересам. Передбачається, що джерелами загроз є суб’єкти інформаційних процесів, які мають намір отримати несанкціонований доступ до захищених інформаційних ресурсів, і ресурси для здійснення атак них. Через ймовірність і величину потенційних втрат від реалізації загроз оцінюються ризики безпеки.

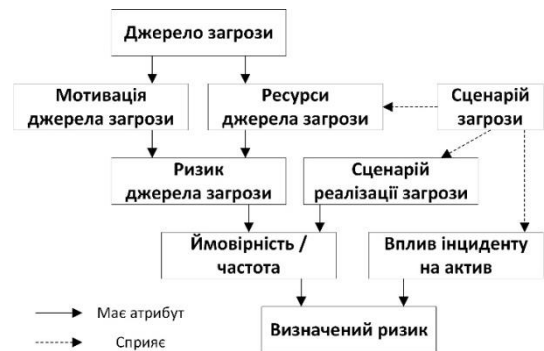


Рис. 1. Модель загрози

Ризики кіберпростору обумовлені наявністю загроз. Концепція конкретної загрози не є однозначною, у тому сенсі, що ціль джерела загрози може бути досягнена різними способами. Одним із розповсюджених варіантів моделі конкретної загрози [4], є наведений на рис. 1. Він показує, що ризик визначається атрибутами самого джерела загрози та можливих сценаріїв її реалізації.

Модель джерела загрози може бути представлена як реальний суб’єкт, у якого є відповідна мотивація та необхідні ресурси для реалізації загрози. Сукупний потенціал мотивації, ресурсів та ймовірності вдалої реалізації атаки визначають величину можливих втрат, або ризик, який визначається найслабшим показником системи захисту. Чим більше мотивація і ресурси джерела загрози, тим більше ризик вдалої реалізації атаки на інформаційний ресурс. Сценарій реалізації загрози можна визначити як послідовність етапів атаки на інформаційний ресурс. Виконання такого сценарію може бути призупинено втіленими механізмами захисту. Якщо такої зупинки не відбувається, це свідчить про наявність неприпустимих уразливостей у механізмах захисту. Чим більш серйозні вразливості, тим більші ризики від реалізації загроз. Моделі оцінки ризику, наведені у ISO, ISO/IEC 27005:2011 [5], основані на викладеній його інтерпретації. На сьогодні найбільш відомими є наступні моделі атак:

- модель на основі деревовидного графу (Attack Graph or Tree);
- модель векторної атаки (Vector Attack model) [8];
- модель поверхневої атаки (Surface Attack model) [9];
- модель ромбовидної атаки (Diamond model) [10];
- модель OWASP-загрози (OWASP's threat model) [11];
- модель послідовних вторгнень (Kill Chain model) [12].

Найбільший інтерес для фахівців з кіберзахисту представляє ромбовидна модель [10], що складається із чотирьох основних компонентів і відрізняється своєю простотою, модель послідовних вторгнень (знищень) [12], що досить давно використовується Міністерством Оборони США, і модель на основі деревовидного графу [6]. Популярність серед фахівців моделі на основі деревовидного графу пояснюється її найбільшою придатністю для формального традиційного математичного опису комп'ютерних систем і алгоритмів. Інші види моделей використовуються лише в окремих випадках. Моделювання кібератак потрібне для виконання прогнозу щодо зовнішнього нападу на інформаційні системи. Через це метою досліджень є розуміння механізмів можливих способів реалізації загроз, а не порівняння їх характеристик. Для формального опису вторгнень у кібернетичному середовищі використовують ромбовидну атаку [10] (рис. 2), у відповідності до якої зловмисник атакує інформаційний ресурс керуючись своїми мотивами, а не планом вторгнення.



Рис. 2. Модель ромбовидної атаки

Модель ромбовидної атаки пов'язана із деякими мета-характеристиками, такими як часова мітка, фази, результат, напрямки, методологія та ресурси. У часових мітках відмічається виконання окремих етапів атаки. Ця модель описує лише основні складові частини процесу реалізації атаки на інформаційний ресурс і є відправною точкою для створення більш детального опису як дій з боку джерела загрози, так і з боку суб'єктів, що реалізують захист. Найбільш перспективною сьогодні є модель послідовних вторгнень (знищень) [12], яка протягом тривалого часу використовувалась не тільки для захисту кібернетичного простору, а і в інших галузях. Найбільший вклад в її розвиток внесло Міністерство Оборони США. Ця модель передбачає, що порушник крок за кроком виконує спроби подолання системи захисту, намагаючись подолати механізми захисту через уразливості там, де він їх знаходить, тобто ланцюжок кроків у напрямі цілі атаки формується в залежності від результатів використання уразливостей на шляху до цілі атаки.

Основною проблемою протидії кібератакам є те, що їх виявлення здебільшого відбувається вже за результатами атаки, тому задача захисту полягає в можливості заздалегідь передбачати ймовірні дії порушника і визначати їх на початку вторгнення. Тобто система захисту має працювати на випередження. Для цього вона має бути інтелектуальною і враховувати всі можливі удосконалення процесів нападу.

Основним елементом моделі послідовних вторгнень є індикатор, під яким розуміється будь-яка інформація, що об'єктивно описує етап вторгнення. Розділяють наступні індикатори:

- атомарні – ті, що не можна розділити на менші частини (IP-адреси, поштові адреси та ін.);
- обчислювальні – ті, що отримують шляхом оброблення інших даних (наприклад, ХЕШ-функції);
- поведінкові – індикатори, що уявляють комбінацію атомарних і обчислювальних індикаторів;

Послідовність вторгнень – це систематичний процес, метою якого є просування крок за кроком до наміченої цілі атаки. Супротивник намагається знайти інформаційний об'єкт, оцінити його і реалізувати мету атаки. Зазвичай, послідовність вторгнення включає:

- розвідку – дослідження, ідентифікація, та вибір цілей вторгнення;
- озброєння – втілення троянської програми в тіло корисної програми;
- доставка – передача зараженої програми у цільове середовище;
- експлуатація – виклик функції операційної системи, що виконує вірусний код;
- утворення “чорного входу” у систему;
- установка таємного каналу віддаленого доступу для контролю над хостом;
- зловмисні дії по відношенню до об'єкту атаки.

Завдання захисту полягає у тому, щоб обірвати ланцюжок цих кроків якомога раніше. Аналітики мають визначати і удосконалювати аналітичним шляхом індикатори, використовуючи нову інформацію про дії зловмисників під час реалізації кожного кроку поточних атак. Цикл удосконалення таких індикаторів має бути поточним і входити до складу життєвого циклу системи захисту. Важливо, щоб оновлення додаткової інформації про атаки відбувалось постійно, а індикатори оновлювались своєчасно. Реалізація такого способу моделювання можливих атак на інформаційні ресурси вимагає використання сучасних інтелектуальних засобів автоматизації процесів, що забезпечують захист. Щоб така стратегія давала очікуваний результат, система захисту повинна випереджати дії зловмисників, а для цього має відбуватись постійний моніторинг кібернетичного простору відносно обраних індикаторів.

Незважаючи на тип обраної моделі атак, автоматизація процесів протидії нападу на інформаційну систему з боку зовнішнього кібернетичного середовища передбачає створення досить складного програмного коду. Ця робота зазвичай розпочинається із розроблення великої кількості формальних алгоритмів, що потребує використання досить сталого математичного апарату. Саме через це, ще на початку розвитку мережного середовища, коли атаки на інформацію були досить простими, для визначення їх архітектури використовували графові моделі [6].

Графи атак являють собою концептуальні діаграми і використовуються для аналізу можливих шляхів реалізації загрози у кібернетичному просторі. Як правило – це багаторівневі деревовидні структури, що мають дочірні елементи з одним коренем. У разі опису сучасної атаки вони мають тисячі вузлів і шляхів подолання механізмів захисту. Тому генерація графів для атак у складних мережах є дуже складною в обчислювальному сенсі. Сьогодні існує безліч інструментів і методик для графічного моделювання процесів. Вони дозволяють будувати графи атак таким чином, щоб було насамперед зрозуміло, “чому відбувається атака?”, а не “як вона відбувається?”. Головна ідея такого графу полягає у тому, щоб показати шлях від джерела атаки до інформаційного об’єкту, що є ціллю атаки через уразливі місця у системі захисту.

Деревовидні моделі атак утворюють основу для розуміння процесів захисту і надають формальну методологію підтримки безпечного стану інформаційних об’єктів. За їх допомогою, враховуючи актуальні дані про поточний стан безпеки можна обирати оптимальний план захисту від зовнішніх мережних загроз.

Основною перевагою графової моделі атаки є те, що вони дозволяють ідентифікувати будь-які потенційні мережні атаки та визначити слабкі місця і способи протидії. Однак слід зауважити, що генерація графа у сучасному кібернетичному середовищі – це дуже не проста задача, зважаючи на її великий обсяг, і тому ідентифікація загроз дуже ускладнюється.

ВИСНОВКИ

Моделі атак описують їх структуру як послідовність фаз і дають можливість їх всебічного осмислення. Однак, слід зазначити, що для успіху атаки виконання всіх фаз не є обов’язковим, через те, що деякі з них виконуються рекурсивно.

Сьогодні основною можна вважати атаку послідовних знищень (Kill Chain), яка передбачає виконання послідовності дій, направлених на пошук оптимального шляху до цілі крізь вразливі місця у системі захисту і заволодіння об’єктом атаки. Основною “зброєю” при цьому є втілення хибного програмного коду у програмне забезпечення системи захисту. Тому боротьба із загрозами має передбачати не тільки контроль процесів обміну даними, а й наявності несанкціонованих модифікацій у програмному забезпеченні. При створенні систем захисту необхідно пам’ятати, що сучасні атаки у кіберпросторі плануються для одноразового використання, їх сценарій

створюється для конкретної системи, а термін реалізації обмежений. Загальним залишається тільки покроковий принцип побудови. Створення такої моделі є результатом роботи фахівців-аналітиків, із врахуванням множини факторів до якої повинні бути враховані мотивації і можливості джерела загрози, інженерні та організаційні особливості систем захисту тощо. Для автоматизації дій системи захисту на її основі, найбільше підходить графова модель [6], описана Брюсом Шнаером. Техніка графів дозволяє досить просто проаналізувати всі можливі варіанти дій направлених на розрив послідовності вторгнень порушників безпеки і, таким чином, оптимізувати стратегію захисту

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Worldwide Spending on Security Solutions Forecast to Reach \$103.1 Billion in 2019, According to a New IDC Spending Guide [Електронний ресурс] / Портал: www.idc.com. – Режим доступу \www/ URL: https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS44935119&utm_source=ixbtcom. – Заголовок з екрану, доступ вільний, 20.03.2019.
- [2] Про основні засади забезпечення кібербезпеки України : Закон України від 05 жовтня 2017 року (Відомості Верховної Ради, 2017, № 45, ст.403), [Електронний ресурс] / Портал: rada.gov.ua. – Режим доступу \www/ URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2163-19>. – Заголовок з екрану, доступ вільний, 05.03.2019.
- [3] Бурячок, В. Л. Інформаційна та кібербезпека: соціотехнічний аспект: підручник / [В. Л. Бурячок, В. Б. Толубко, В. О. Хорошко, С. В. Толопа]; за заг. ред. д-ра техн. наук, професора В. Б. Толубка. — К.: ДУТ, 2015.— 288 с.
- [4] 11th International Conference on Semantic Technologies in Intelligence, Defense, and Security (STIDS 2016), Fairfax VA, USA, November 2016. This research was supported by the research projects TOCSA, ACT and Oslo Analytics funded by the Research Council of Norway.
- [5] ISO, ISO/IEC 27005:2011 – Information technology – Security Techniques – Information security risk management (second edition). ISO/IEC, 2011.
- [6] C. Phillips and L. P. Swiler, “A graph-based system for network-vulnerability analysis,” in Proceedings of the 1998 Workshop on New Security Paradigms, ser. NSPW ’98. New York, NY, USA: ACM, 1998, pp. 71–79. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/310889.310919>
- [7] B. Schneier, “Attack trees,” Dr. Dobbs journal, vol. 24, no. 12, pp. 21–29, 1999.: <http://www.schneier.com/paper-attacktrees-ddj-ft.html#rf1>.
- [8] M. Mulazzani, S. Schrittwieser, M. Leithner, M. Huber, and E. R. Weippl, “Dark clouds on the horizon: Using cloud storage as attack vector and online slack space.” in USENIX Security Symposium. San Francisco, CA, USA, 2011, pp. 65–76.
- [9] P. K. Manadhata and J. M. Wing, “An attack surface metric,” Software Engineering, IEEE Transactions on, vol. 37, no. 3, pp. 371–386, 2011.
- [10] S. Caltagirone, A. Pendergast, and C. Betz, “The diamond model of intrusion analysis,” DTIC Document, Tech. Rep., 2013.
- [11] X. Lin, P. Zavorsky, R. Ruhl, and D. Lindskog, “Threat modeling for csrf attacks,” 2013 IEEE 16th International Conference on Computational Science and Engineering, vol. 3, pp. 486–491, 2009
E. M. Hutchins, M. J. Cloppert, and R. M. Amin, “Intelligence-driven computer network defense informed by analysis of adversary campaigns and intrusion kill chains,” Leading Issues in Information Warfare & Security Research, vol. 1, p. 80, 2011..

Формування Множин Функції Раундового Перетворення для Блокових Шифрів з Псевдонедетермінованою Послідовністю Криптопримітивів

Аліна Остапенко-Боженова
кафедра захисту інформації
ВНТУ
Вінниця, Україна
ostapenko-bozhenova_a_v@vntu.edu.ua

Валентина Каплун
кафедра захисту інформації
ВНТУ
Вінниця, Україна
Chair.information.protection.vntu@gmail.com

Construction of Round Functions Sets for Pseudo Non-Determined Block Ciphers

Alina Ostapenko-Bozhenova
dept. of chair Information Protection
Vinnitsa National Technical University,
Vinnitsa, Ukraine
ostapenko-bozhenova_a_v@vntu.edu.ua

Valentyna Kaplun
dept. of chair Information Protection
Vinnitsa National Technical University,
Vinnitsa, Ukraine
Chair.information.protection.vntu@gmail.com

Анотація—Робота присвячена розробці етапу формування множини алгоритмів шифрування для раунду перетворення блокових шифрів, що використовують псевдонедетерміновану послідовність криптопримітивів. Основна увага зосереджена на побудові структур алгоритмів, наповнення їх базовими операціями та тестуванню результатів за допомогою розробленого програмного застосунку.

Abstract—This work is devoted to the creation the set of encryption algorithms for the round of pseudo non-determined block ciphers. The main focus is on building structures of algorithms, the filling them with basic operations and testing the results using the developed software application.

Ключові слова—криптографія; блокові шифри;

Keywords— cryptography; block ciphers;

I. ВСТУП

Вимоги до побудови алгоритмів шифрування впливають із поняття стійкості шифру, яке забезпечується

за К. Шенноном принципами розсіювання та перемішування даних [1].

При розробці симетричних блокових шифрів (СБШ), для досягнення, заданого сучасними світовими стандартами, рівня криптостійкості реалізується один з підходів [7-9]:

- використання складних математичних рішень для побудови перетворень, що в свою чергу можуть збільшувати вимогу шифру до ресурсів комп'ютерної системи та зменшувати швидкість шифрування;
- використання простих операцій, що швидко виконуються на сучасній елементній базі призводить до необхідності збільшення кількості ітерацій в СБШ, а отже і до втрати швидкості шифрування.

У запропонованій ідеї створення блокових шифрів з недетермінованою послідовністю криптопримітивів ПНБШ [2] вибір функції раундового перетворення відбувається

шляхом визначення її номеру (ознака Q_{vp}) серед бази алгоритмів шифрування (відповідно до кількості підблоків Q_{pb}).

Побудова криптографічного перетворення ПНБШ [3,4] формує необхідність розробки множин функцій раундового перетворення для відповідної кількості підблоків. Тому постає задача сформулювати для кожного значення ознаки кількості підблоків Q_{pb} : 2, 3, 4, 5, на основі множини базових операцій, набір із 256 алгоритмів шифрування.

II. ПОБУДОВА АЛГОРИТМІВ ШИФРУВАННЯ РАУНДОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ

Алгоритми шифрування будуються на основі множини базових операцій **B**, що запропонована у роботі [2].

Для досягнення збільшення швидкості шифрування, із збереженням властивості розсіювання, пропонується використати у кожному алгоритмі послідовне виконання двох шарів операцій. Заключним є шар перестановки *PR*, обов'язковий для кожного сформованого алгоритму.

На рис.1 представлена загальна схема побудови алгоритмів шифрування для функцій раундового перетворення ПНБШ.

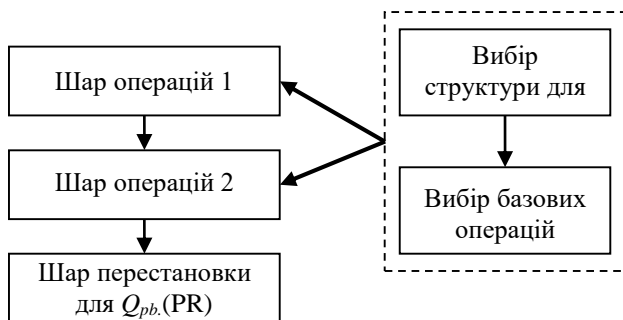


Рис. 1. Схема побудови алгоритму шифрування ПНБШ.

Процес формування шару операцій алгоритмів шифрування складається із двох фаз:

- фази вибору структури шару (*Str*);
- фази наповнення структури шару базовими операціями.

Фаза вибору структури шару операцій передбачає формування усіх можливих комбінацій з визначених видів операцій для відповідної кількості підблоків (гілок перетворення).

Для множини базових операцій ПНБШ запропоновано використання двох видів операцій: двооперандні (виконуються між двома гілками) та однооперандні (виконуються над одною гілкою) [2].

Тому, задача вибору структури шару полягає у виборі комбінації одно- та двооперандних операцій для відповідного значення ознаки, що визначає кількість гілок перетворення. Для цього конкретне значення ознаки кількості підблоків Q_{pb} представимо як N , тоді:

$$D = \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor, D = 0 \div \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor,$$

$$O = N - 2 \cdot D,$$

де D - двооперандні операції; O - однооперандні операції.

Отже, структура операційного шару визначається шляхом обрахунку кількості двооперандних операцій, як цілої частини від значення кількості гілок та однооперандних операцій, що виконуються паралельно.

Розглянемо на прикладі для значення $N = 2$:

$$N = 2 \Rightarrow D = [0,1],$$

$$D = 0, O = 2 \Rightarrow Str_1 : O \parallel O;$$

$$D = 1, O = 0 \Rightarrow Str_2 : D - .$$

Тобто, для блоку, що складається із двох підблоків можливі два варіанти структур: дві однооперандні операції (*Str1*) або одна двооперандна (*Str2*).

Аналогічно для блоку з трьома підблоками:

$$N = 3 \Rightarrow D = [0,1],$$

$$D = 0, O = 3 \Rightarrow Str_1 : O \parallel O \parallel O;$$

$$D = 1, O = 1 \Rightarrow Str_2 : D \parallel O - .$$

Для блоку, що складається із 4-х підблоків можна описати три загальні структури (можливі значення $D = [0,1,2]$): $4O$ – паралельне виконання чотирьох однооперандних операцій, $2D$ – паралельне виконання двох двооперандних операцій та $D \parallel 2O$ – виконання однієї двооперандної операції та двох однооперандних. Аналогічно для блоку із 5-ти підблоків існують три загальні структури:

$$5O; D \parallel 3O; 2D \parallel O.$$

Необхідно також зазначити, що структури з двооперандними операціями для 3, 4 та 5 підблоків описані у загальному вигляді. Враховуючи всі можливі комбінації входження гілок перетворення до двооперандної операції, можна отримати розширення кількості структур таких блоків. Для їх зображення використаємо мнемонічний опис запропонований у роботі [2], де $D_{a,b}$ – виконання двооперандної операції над гілками a та b .

Наприклад, *Str2* для 3-х гілок $D \parallel O$ матиме такі варіанти представлення:

$$D \parallel O : D_{1,2} \parallel O_3; D_{1,3} \parallel O_2; D_{2,3} \parallel O_1.$$

Структура $2D$ для 4-х гілок:

$$D \parallel D : D_{1,2} \parallel D_{3,4}; D_{1,3} \parallel D_{2,4}; D_{2,3} \parallel D_{1,4}.$$

Таким чином отримуємо набір структур для кожного значення ознаки кількості підблоків з врахуванням різних комбінацій входження гілок перетворення до операцій.

Визначення структур перетворення відбувається шляхом вибору двох структур операційних шарів та структури шару перестановки. Запропонований варіант їх мнемонічного опису дозволяє створити механізм для формування великої кількості варіантів побудови алгоритмів шифрування для раунду перетворення.

TABLE I. СТРУКТУРИ ПЕРЕТВОРЕНЬ У ВІДПОВІДНОСТІ ДО КІЛЬКОСТІ ПІДБЛОКІВ

<i>N</i>	<i>Str</i>	<i>O</i>	<i>D</i>	<i>D//O</i>
2	2	2O	<i>D</i>	-
3	4	3O	-	<i>D//O</i> :
4	9	4O	2 <i>D</i> : <i>D</i> _{1,2} // <i>D</i> _{3,4} ; <i>D</i> _{1,3} // <i>D</i> _{2,4} ; <i>D</i> _{2,3} // <i>D</i> _{1,4} .	<i>D//2O</i> : <i>D</i> _{1,2} // <i>O</i> ₃ // <i>O</i> ₄ ; <i>D</i> _{1,3} // <i>O</i> ₂ // <i>O</i> ₄ ; <i>D</i> _{2,3} // <i>O</i> ₁ // <i>O</i> ₄ ; <i>D</i> _{1,4} // <i>O</i> ₂ // <i>O</i> ₃ ; <i>D</i> _{3,4} // <i>O</i> ₁ // <i>O</i> ₂
5	23	5O	2 <i>D//O</i> : <i>D</i> _{1,2} // <i>D</i> _{3,4} // <i>O</i> ₅ ; <i>D</i> _{1,2} // <i>D</i> _{3,5} // <i>O</i> ₄ ; <i>D</i> _{1,2} // <i>D</i> _{4,5} // <i>O</i> ₃ ; <i>D</i> _{1,3} // <i>D</i> _{2,4} // <i>O</i> ₅ ; <i>D</i> _{1,3} // <i>D</i> _{2,5} // <i>O</i> ₄ ; <i>D</i> _{1,3} // <i>D</i> _{4,5} // <i>O</i> ₂ ; <i>D</i> _{1,4} // <i>D</i> _{2,3} // <i>O</i> ₅ ; <i>D</i> _{1,4} // <i>D</i> _{2,5} // <i>O</i> ₄ ; <i>D</i> _{1,4} // <i>D</i> _{3,5} // <i>O</i> ₂ ; <i>D</i> _{1,5} // <i>D</i> _{2,3} // <i>O</i> ₄ ; <i>D</i> _{1,5} // <i>D</i> _{2,4} // <i>O</i> ₃ ; <i>D</i> _{1,5} // <i>D</i> _{3,4} // <i>O</i> ₂	<i>D//3O</i> : <i>D</i> _{1,2} // <i>O</i> ₃ // <i>O</i> ₄ // <i>O</i> ₅ ; <i>D</i> _{1,3} // <i>O</i> ₂ // <i>O</i> ₄ // <i>O</i> ₅ ; <i>D</i> _{1,4} // <i>O</i> ₂ // <i>O</i> ₃ // <i>O</i> ₅ ; <i>D</i> _{1,5} // <i>O</i> ₂ // <i>O</i> ₃ // <i>O</i> ₄ ; <i>D</i> _{2,3} // <i>O</i> ₁ // <i>O</i> ₄ // <i>O</i> ₅ ; <i>D</i> _{2,4} // <i>O</i> ₁ // <i>O</i> ₃ // <i>O</i> ₅ ; <i>D</i> _{2,5} // <i>O</i> ₁ // <i>O</i> ₃ // <i>O</i> ₄ ; <i>D</i> _{3,4} // <i>O</i> ₁ // <i>O</i> ₂ // <i>O</i> ₃ ; <i>D</i> _{3,5} // <i>O</i> ₁ // <i>O</i> ₂ // <i>O</i> ₄ ; <i>D</i> _{4,5} // <i>O</i> ₁ // <i>O</i> ₂ // <i>O</i> ₃

Фаза наповнення структури шару базовими операціями передбачає вибір базових операцій для усіх можливих структур.

Побудовані таким чином алгоритми можуть бути представленні використовуючи мнемонічний опис запропонований у роботі [2], де :

P – перетворення;

*O*_{*a*} – виконання однооперандної операції над підблоком *a* ;

*D*_{*a,b*} – виконання двооперандної операції над підблоками *a* та *b*;

*PR*_{*a,b*} – перестановка підблоків *a* та *b*.

|| – паралельне виконання дій;

→ – послідовне виконання дій.

У множині базових операцій визначенні такі:

- однооперандні: циклічний зсув на *k* біт, інвертування, відсутність перетворення;
- двооперандні: додавання за модулем 2, додавання за модулем 2^{*n*}.

Розглянемо варіанти можливих перетворень з використанням наведених структур та базових операцій. Для множини алгоритмів з двома підблоками структурою алгоритму $2O \rightarrow D \rightarrow PR$ та операціями: інвертування, відсутність перетворення, додавання за модулем 2, мнемонічний опис перетворення матиме вигляд :

$$P = NOT_1 || NOP_2 \rightarrow L_{1,2}^2 \rightarrow PR_{1,2}.$$

Таким чином створений механізм формування множин алгоритмів шифрування для одного раунду перетворення та відповідної кількості підблоків, що дозволив розробити програмний застосунок для побудови, аналізу та тестування наборів функцій раундових перетворень для ПНБШ.

III. РЕЗУЛЬТАТИ ТЕСТУВАННЯ

Використовуючи програмний засіб було побудовано усі варіанти наповнення структур базовими операціями для блоків із 2, 3-х підблоків.

До отриманих алгоритмів були висунуті такі вимоги:

1. Відсутність порожнього шару операцій. Шар де всі операції є *NOP* (відсутність перетворення) не вважається результативним. Такі алгоритми по суті мають лише один шар операцій, що є відхиленням від запропонованої структури.
2. Відсутність взаємної компенсації операцій. Операції додавання за модулем 2 та циклічний зсув (в право, в ліво) виконуючись послідовно на одній гілці самокомпенсуються. Така комбінація операцій на одній гілці перетворення у двох послідовних шарах, як додавання за модулем 2 та циклічний зсув вліво, а потім вправо, повертає дані у вхідну комбінацію. Зміна даних відбувається лише за рахунок перестановки, а обчислення, з втратою часу на них, не є результативними.

Для 2-х гілок було отримано 273 можливих алгоритмів шифрування з врахуванням вимог. При опрацюванні варіантів для 3 підблоків отримано 14965 алгоритмів, з урахуванням різних видів шару перестановки.

Для побудови набору необхідних значень із 256 алгоритмів шифрування було проведено аналіз усіх варіантів за показниками:

- Час виконання перетворення (*t*);
- Відносний показник кількості змінених біт у вихідному блоці до вхідного (*dif*).

Тестування усієї вибірки алгоритмів шифрування відбувалось для блоку розміром 128 біт для 1000 різних його значень. Після цього вираховувалось середнє значення показника для одного алгоритму шифрування, та обирались перетворення з врахуванням оптимального співвідношення

цих показиків. Наприклад, для алгоритмів шифрування для 2 підблоків середній час виконання: $t_s = 128.031 \times 10^{-9}$ с. В результаті, були сформовані набори з 256 алгоритмів для блоків з 2, 3 підблоками. Для множин алгоритмів з 4, 5 підблоками сформовані операційні шари без врахування перестановок. Шар перестановок для таких блоків буде розроблятися окремо.

IV. ВИСНОВКИ

Було розглянуто етап формування множини алгоритмів шифрування для раунду перетворення ПНБШ, модель яких представлена у роботі [2,5].

Досліджуваний підхід до реалізації блокових шифрів, базується на використанні псевдодетермінованих послідовностей криптопримітивів та розбитті повідомлення на блоки різної довжини на кожному з раундів перетворення. Саме це дозволяє ускладнити процес зламу оскільки необхідно здійснювати перебір усіх можливих комбінацій базових операцій на кожному з раундів та усіх можливих варіантів розбиття повідомлення на блоки та блоків на підблоки.

На основі отриманих теоретичних результатів розроблено механізм формування множин алгоритмів шифрування для одного раунду перетворення та відповідної кількості підблоків, що дозволив реалізувати програмний застосунок для побудови, аналізу та тестування наборів функцій раундових перетворень для ПНБШ.

Результати тестування отриманих алгоритмів раундового перетворення дозволили, з урахуванням критеріальних показників, сформувати набори з 256 алгоритмів для різної кількості підблоків.

Проведені дослідження завершують теоретичний етап розробки криптографічного перетворення для ПНБШ, що дозволяє в подальшому перейти до реалізації блокових шифрів з різним ступенем недетермінованості їх основних складових, класифікація яких розглянута в роботі [6].

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетики. – М., 1963. – 829 с.
- [2] Лужецький В. А. Блочний шифр на основі псевдодетермінованих послідовностей криптопримітивів / В.А. Лужецький, А. В. Остапенко // Наукові праці ВНТУ. – № 4 (2010). – Режим доступу до статті: <http://www.nbu.gov.ua>
- [3] Остапенко А. В. Криптографічне перетворення ПНБШ / Тези доповідей П'ятої Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія» м. Івано-Франківськ, 27-29 травня 2015 року. – Івано-Франківськ: Супрун В.П., 2015. – С. 187-188.
- [4] Остапенко-Боженова А.В., Каплун В.А. Розгортання ключа для блокових шифрів з псевдодетермінованою послідовністю криптопримітивів / Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання» м. Івано-Франківськ, 14-19 травня 2018 року. – Івано-Франківськ: Супрун В.П., 2018. – С. 178-181.
- [5] А. Ostapenko. Multiplicative additive model of block ciphers based on the pseudonondeterministic sequence of cryptographic primitives / Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки: матеріали III-ої Міжнародної науково - практичної конференції. м.Чернівці, 24-26 жовтня 2013р. – Чернівці, 2013.

- [6] Остапенко-Боженова А.В. Базові ознаки криптографічних перетворень. НТКП ВНТУ. XLVIII Науково-технічна конференція факультету інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії (2019). Режим доступу до статті: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fitki/all-fitki-2019/paper/view/6581/5790>
- [7] Лужецький В. А. Аналіз алгоритмів симетричного блокового шифрування / В.А. Лужецький, А. В. Остапенко // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2012. – № 3. – С. 55-64.
- [8] V.Schneier. Applied Cryptography.- John Wiley & Sons Inc., N.Y. 1996.- 757 p.
- [9] Молдовян Н.А. Скоростные блочные шифры.- СПб, СПбГУ, 1998.- 212 с.

Analysis of Pseudorandom Sequences Using N-Dimensional Statistics

Svitlana Poperehnyak
Faculty of Information Technology,
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Kyiv, Ukraine
spopereshnyak@gmail.com

Аналіз Псевдовипадкових Послідовностей за Допомогою N-Мірних Статистик

Світлана Поперешняк
Факультет інформаційних технологій,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
Kyiv, Ukraine
spopereshnyak@gmail.com

Abstract— an article dedicated to systematization of scientific positions about the static testing of sequences, widely used in cryptographic systems of information protection for the production of key and additional information (random numbers, vectors of initialization etc.). A short overview of famous methods of testing sequences for randomness, and also static tests, developed in the recent decade is given. Perspective direction of research – static testing of sequences using n-dimensional statistics is considered. In the work, formulas are given and theorem for testing sequences for randomness, using two or three-dimensional statistics that can be used for short and medium-sized sequences is formulated.

Анотація—Стаття присвячена систематизації основних наукових положень про статистичному тестуванні послідовностей, широко використовуваних в криптографічних системах захисту інформації для вироблення ключовий і допоміжної інформації (випадкові числа, вектори ініціалізації та ін.). Дан короткий огляд відомих підходів до тестування послідовностей на випадковість, а також статистичних тестів, розроблених в останні десятиліття. Розглядається перспективний напрямок досліджень – статистичне тестування послідовностей з використанням n-мірних статистик. В роботі наведені формули і сформульована теорема для перевірки послідовності на випадковість за допомогою двох і тривимірних статистик, які можуть використовуватися для коротких і середніх послідовностей.

Keywords—algorithms; n-dimensional statistics; random sequence; cryptography; pseudorandom sequence; statistical testing.

Ключові слова— алгоритми; n-мірні статистики; випадкова послідовність; криптографія; послідовність псевдовипадкова послідовність; статистичне тестування.

I. INTRODUCTION

Modern informational systems require a unique approach to the transfer of electronic documents through open communication channels, that is provided using security systems. An effective security system must provide:

- Privacy of information or it's important part

- Authenticity of subjects and objects of communicational interaction;
- protection against unauthorized access
- protection of the rights of information owners;
- operational control of management processes, processing and transmission of information

All listed items that the effective security system must satisfy are solved with the use of the generator of pseudorandom sequences. Such generators are deterministic algorithms and use an initial value as input data, and at the output they generate a sequence of values that is very similar to a random one.[1]

It is known that there is no single “official” set of criteria in the world that would evaluate how the random numbers are applicable to this particular field of cryptography. If a sequence of random numbers is predictable, then even the strongest encryption algorithm in which this sequence will be used turns out to be vulnerable.

There are various approaches to the formal definition of the term “randomness” based on the concepts of computability and algorithmic complexity [2].

II. TESTING OF GENERATORS OF RANDOM AND PSEUDORANDOM NUMBERS

Pseudorandom sequence (PRS) – a sequence of numbers that was calculated using some definite arithmetic rule, but has all the properties of a random number sequence within the scope of the problem to be solved [3].

PRS generators are essential elements of any protection system. The reliability of the protection system is largely determined by the properties of the generators used. High-quality memory bandwidths, being inherently deterministic, nevertheless possess practically all the properties of realizations of truly random processes and successfully replace them, since random sequences are extremely difficult to form.

Random and pseudorandom numbers generators testing (RNG and PRNG), used in cryptographic applications is an urgent task both in practical and theoretical terms. Despite significant advances in this area, developers nevertheless need convenient tools that can provide an acceptable metric that will allow a fairly clear investigation of the degree of randomness of sequences generated by the RNG (PRNG), in addition, to provide developers with sufficient information to decide on randomness sequences.

Today, a sufficiently large number of different types of RNG (PRNG) is developed. However, various approaches to statistical testing were used to demonstrate their statistical properties. Most often, the set and the testing methodology was proposed by generator developer. Thus, a situation has developed which is characterized by the fact that it is impossible to objectively compare different generators from a unified position. The way out of this situation is the use of a certain standard set of statistical tests, united by a unified method of calculating the necessary PRNG performance indicators and deciding on the randomness of the generated sequences. The variety of criteria for evaluating pseudo-random sequences used in encryption is extremely large [4].

Each of the approaches to the analysis of such sequences can be attributed to one of two groups. The first group is related to the search for patterns that allow reproducing an encryption sequence for a relatively small amount of material. At the same time, the main requirements are reduced to the fact that there are no relatively simple inter-character dependencies in the cap. The second group of criteria is related to the evaluation of the statistical properties of a sequence: is there a frequency imbalance in the sequence under study that allows the analyst to assume the value of the next bit with a probability greater than 0.5. At the same time, the properties of the memory bandwidth should be closest to the properties of a truly random sequence, for example, in the memory bandwidth, not only individual signs are uniformly distributed, but also m-grams, i.e. a set of m adjacent signs, $m = 1, 2, \dots$. Both of these groups of sequence analysis methods constitute a systematic approach to the development of stream ciphers and tests designed to detect various types of defects in the PRS under study [3].

III. GENERATION OF RANDOM BINARY SEQUENCE

Firstly, random number generation is meant to obtain a sequence of binary characters 0 and 1, and not bytes, no matter how much the programmers would want it. Such ideal generator is a “perfect” toss of a coin. All the tests described below assess how much the random number generator “looks like” or “does not look like” an imaginary ideal coin (not according to the speed of obtaining “random” signs, but their “qualities”).

Secondly, all random numbers generators are divided into two types

- truly random - physical sensors random number / sensors random number (PSRN /SRN);
- pseudo-random - software sensors / random number generators (SSRN).

The first take some random endless process as input, and the output gives an infinite (depending on the observation time) sequence of 0 and 1. The second is a developer-defined deterministic function, which is initialized by the so-called grain, after which it also outputs a sequence of 0 and 1.

Knowing this grain, you can predict the entire sequence. A good SSRN is one for which it is impossible to predict subsequent values, having the entire history of previous values, having no grain. This property is called direct unpredictability. There is also the reverse unpredictability - the inability to calculate the grain, knowing any number of generated values.

Each of the tests receives the final sequence as input. Next, statistics are calculated that characterize a certain property of a given sequence — it can be a single value or a set of values. After that, these statistics are compared with the reference statistics, which will give a perfectly random sequence. Reference statistics are derived mathematically, many theorems and scientific papers are devoted to this.

IV. EXISTING TOOLS FOR PRS STATISTICAL TESTING

To identify patterns to the analyzed PRS (or to their segments of different lengths) a wide range of different statistical tests developed in recent decades is applied. Consider the well-known sets of statistical tests:

1. 11 tests: Donald Knuth (Stanford University), *The Art Of Computer Programming Vol. 2 Seminumerical Algorithms*;
2. 15 tests: Andrew Rukhin, et. al. (NIST ITL), *NIST Statistical Test Suite*;
3. 12 tests: George Marsaglia (Florida State University), *DIEHARD*;
4. 11 tests: Pierre L’Ecuyer, Richard Simard (Departement d’Informatique et de Recherche Operationnelle Universite de Montreal), *TestU01*;
5. 5 tests: Helen Gustafson, et. al. (Queensland University of Technology), *Crypt-XS*.

There are other descriptions and implementations of statistical tests, largely repeating tests from the sets presented above:

1. Alfred Menezes и др., *Handbook of Applied Cryptography*;
2. Peter Hellekalek (University of Salzburg), *The pLab Project*;
3. John Walker (Autodesk, Inc.), *ENT*;
4. Robert G. Brown (Duke University), *Dieharder*;
5. George Marsaglia (Florida State University), Wai Wan Tsang (The University of Hong Kong), «Distilled» version of Diehard.

Despite a considerable number of existing implementations of statistical tests of the PRS, this direction is constantly evolving, and now new projects are actively emerging that offer new implementations of the tests examined, including in distributed computing systems. The considered sets of statistical tests of PRS constitute a convenient and flexible tool for studying PRS generators used in cryptographic applications. The NIST STS package is more flexible, expandable, and efficient (in terms of time spent on testing) and is the most comprehensive package available for statistical testing of binary sequences. In practice, accepting or rejecting the null hypothesis is based on the results of applying several independent tests. When independent tests lead to different conclusions, a combination of test results using statistics that take into account the totality of the results of all tests used is used. For a small number of combinable tests, Fisher-Pearson statistics is used, which is compared with the chi-square distribution. If the number of combined tests is

large, then the use of Kolmogorov-Smirnov test is recommended. Table 1 gives some tests for testing memory bandwidths of various lengths.

ТАБЛИЦА I. TABLE 1 STATISTICAL TESTS FOR PRS DIFFERENT LENGTHS

№	Packets of static tests	Testing PRS length up to 300 bits	Testing PRS length of order 106 bits
1.	D. Knuths tests	-	<ul style="list-style-type: none"> • Frequency criterion • Series criterion • max-t criterion • Criterion of monotony
2.	NIST STS	<ul style="list-style-type: none"> • Frequency Test • Frequency Test within a Block • Runs Test • Non-overlapping Template Matching Test • Serial Test • Binary Matrix Rank Test • Approximate Entropy Test • Cumulative Sums (Cusum) Test • Test for the Longest Run of Ones in a Block 	<ul style="list-style-type: none"> • Frequency Test within a Block • Runs Test • Overlapping Template Matching Test • Serial Test • Linear Complexity Test • Discrete Fourier Transform Test • Maurer Universal Test • Binary Matrix Rank Test • Approximate Entropy Test • Random Excursions Test • Random Excursions Variant Test • Test for the Longest Run of Ones in a Block
3.	DIEHARD	-	<ul style="list-style-type: none"> • The Birthday Spacing Test
4.	TestU01	<ul style="list-style-type: none"> • Hamming Weight Test • Autocorrelation • Random Walk Test • Longest Run of 1's Test 	<ul style="list-style-type: none"> • Hamming Weight Test • Run and Gap Test • Lempel-Ziv Complexity Test • Autocorrelations Test • Longest Run of 1's Test • CAT Test
5.	Crypt-XS	<ul style="list-style-type: none"> • Frequency Test • Binary Derivative Test 	<ul style="list-style-type: none"> • Complexity Test

A preliminary analysis of the considered statistical tests allowed us to determine which of them are most suitable for use in various tasks of developing tools for cryptographic protection of information. Analysis of existing packages for statistical testing leads to the conclusion that many tests can be successfully used to study the memory bandwidth test for randomness. At the same time, the features of applied problems show that the classical mathematical model of statistical testing does not quite adequately reflect the need for studying certain objects for randomness [6]. This situation occurs when the generated sequence of small length (up to 100 bits). We use the classification given in [7]. In this case, the investigated memory bandwidth difficult to correct be tested using one-dimensional statistics. In this situation, we propose to test the sequence for randomness using two and / or three-dimensional statistics. We describe the corresponding mathematical model.

V. JOINT DISTRIBUTION OF NUMBER OF 2-CHAINS AND NUMBER OF 3-CHAINS OF A PROVIDED TYPE IN BINARY SEQUENCE

Let there be a random or pseudo-random process and random variables associated with it

$$\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n, \quad (1)$$

where $\gamma_i = \{0, 1\}$, $i = 1, 2, \dots, n, n > 0$.

Subsequence $\gamma_i, \gamma_{i+1}, \dots, \gamma_{i+s-1}$ of sequence (1) is called an s-chain $j = 1, 2, \dots, n - s + 1, s = 1, 2, \dots, n$.

Let's mark $\eta(t_1, t_2, \dots, t_s)$ the number of s-chains in sequence (1), that match with t_1, t_2, \dots, t_s , where $t_i = \{0, 1\}$, $i = 1, 2, \dots, s$.

Condition (C): sequence (1) consists of $n, n > 0$, independent identically distributed random variables; $P\{\gamma_i = 1\} = p, P\{\gamma_i = 0\} = q, p + q = 1, i = 1, 2, \dots, n$.

Theorem. Let the conditions be fulfilled (C), k_1, k_2, k_3, t, t_1 are integer numbers, that $k_1 \geq 0, k_2 \geq 0, n \geq k_1, k_3 \geq 0, t, t_1 \in \{0, 1\}$. Then:

$$P\{\eta(tt^*) = k_1, \eta(t1t^*) + \eta(t0t^*) = k_2\} = \sum_{m_1=k}^{n-k_1} p^{m_1} q^{m_0} \sum_{i=0}^1 \prod_{k_1}^{k_1} C_{k_1}^{\delta_1} C_{m_1-k_1}^{k_1-\delta_1}, \quad (2)$$

where $m_0 = n - m_1$, the symbol \sum denotes addition over all nonnegative integers δ_0 and δ_1 such that $\delta_0 + \delta_1 = 2k_1 - k_2, t^* = 1 - t$;

$$P\{\eta(t_1 t_1^*) = k_1, \eta(t_1 1 t_1^*) = k_2\} = \sum_{m_1=k}^{n-k_1} p^{m_1} q^{m_0} C_{k_1}^{k_2} C_{m_1}^{k_1}, \quad (3)$$

$$P\{\eta(t_1 t_1^*) = k_1, \eta(t_1 1 t_1^*) = k_2, \eta(t_1 0 t_1^*) = k_3\} = \sum_{m_1=k}^{n-k_1} p^{m_1} q^{m_0} C_{k_1}^{k_2} C_{k_1}^{k_3} C_{m_1-k_1}^{k_2} C_{m_1-k_1}^{k_3}.$$

VI. EXAMPLES OF THE USAGE OF BINARY STATISTICS FOR ANALYSIS OF BIT SEQUENCE

Consider sequences of length $n = 10$.

By constructing sets of all possible chains with a length of 10 elements, we get the number of chains equal to 2^{10} .

Let us analyze statement (2). For this, we fix, for example, $t = 0$ and calculate the number of k_1 and k_2 , for each of the possible sequences of length 10, where k_1 is the number of occurrences of a subsequence of type (01) and k_2 number of occurrences of a subsequence of type (001) or (011), respectively. Thus, for each of the k_1 and k_2 sets, the probability was found, which is shown in Figure 1, as well as the commutation probability (4 column in Table 2) for determining the confidence intervals.

ТАБЛИЦА II. TABLE 2 – TABLE OF PROBABILITIES OF SEQUENCE WITH THE LENGTH 10 FOR FORMULA (2)

№	(k_1, k_2)	P	P _{cumulative}
1.	(0, 1), (0, 2), (0, 3), (0, 4), (1, 3), (1, 4), (4, 3), (4, 4), (5, 1), (5, 2), (5, 3), (5, 4)	0	0
2.	(5, 0)	0,000976563	0,00097656
3.	(4, 0)	0,002929688	0,00390625
4.	(3, 0)	0,004882813	0,00878906
5.	(2, 0)	0,006835938	0,015625
6.	(1, 0)	0,008789063	0,02441406
7.	(0, 0)	0,010742188	0,03515625
8.	(3, 0)	0,014648438	0,04980469

№	(k_1, k_2)	P	P _{cumulative}
9.	(2, 4)	0,020507813	0,0703125
10.	(4, 1)	0,0234375	0,09375
11.	(4, 2)	0,02734375	0,12109375
12.	(3, 1)	0,05859375	0,1796875
13.	(1, 1)	0,0703125	0,25
14.	(1, 2), (2, 1)	0,08203125	0,33203125
15.	(3, 3)	0,09765625	0,51171875
16.	(2, 3)	0,13671875	0,6484375
17.	(3, 2)	0,146484375	0,79492188
18.	(2, 2)	0,205078125	1

Thus, if $\alpha = 0,05$, then from Table 2 it can be argued that positions from lines 1-8 are non-random, and if $\alpha = 0,1$, then positions from lines 1-10 are non-random.

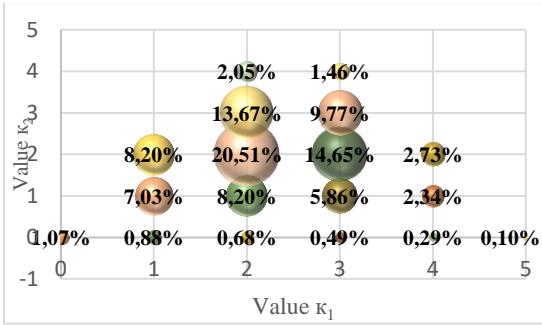


Fig. 1 - Probability distribution depending on k_1 and k_2 according to formula (2) for sequences of length 10.

Consider sequences of length $n = 13$.

By constructing sets of all possible chains with a length of 13 elements, we get the number of chains equal to 2^{13} .

Let us analyze statement (3). Fix $t = 0$ and $t_1 = 0$. To do this, we calculate the number of k_1 and k_2 , for each of the possible sequences of length 13, where k_1 is the number of occurrences of a subsequence of type (01) and k_2 the number of occurrences of a subsequence of type (001). Thus, for each of the k_1 and k_2 sets, the probability was found, which is shown in Figure 2, and the commutation probability (4 column in Table 3) for determining the confidence intervals.

ТАБЛИЦА III. TABLE 3- SEQUENCE PROBABILITY TABLE WITH LENGTH 13 FOR FORMULA (3)

№	(k_1, k_2)	P	P _{cumulative}
1.	(0, 1), (0, 2), (0, 3), (1, 2), (1, 3), (2, 3), (5, 2), (5, 3)	0	0
2.	(4, 3)	0,001953	0,001953
3.	(5, 1)	0,002441	0,004395
4.	(5, 0)	0,003418	0,007813
5.	(0, 0)	0,005859	0,013672
6.	(3, 3)	0,017578	0,03125
7.	(4, 2)	0,023438	0,054688
8.	(1, 0)	0,026855	0,081543
9.	(4, 0)	0,027344	0,108887
10.	(4, 1)	0,054688	0,163574
11.	(2, 0)	0,058594	0,222168
12.	(3, 0)	0,061523	0,283691
13.	(1, 1)	0,080566	0,364258
14.	(2, 2), (3, 2)	0,123047	0,487305
15.	(3, 1)	0,18457	0,794922
16.	(2, 1)	0,205078	1

Thus, if $\alpha = 0,05$, then from Table 3 it can be argued that the positions from lines 1-7 are non-random, and if $\alpha = 0,1$, then the positions from lines 1-9 are non-random.

After analyzing Figure 2, we can conclude that for analyzing the sequence of chains of medium length (from 10 to 100 elements), one-dimensional statistics do not always give the correct result. For example, if we consider a sequence (0 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0), where $k_1 = 3$, then we can conclude with a high degree of probability that the sequence with these characteristics is random, but if we pay attention when $k_1 = 3$ and $k_2 = 3$, it can be argued that this sequence is non-random. This shows the lack of use of one-dimensional statistics for the analysis of short and medium bit sequences.

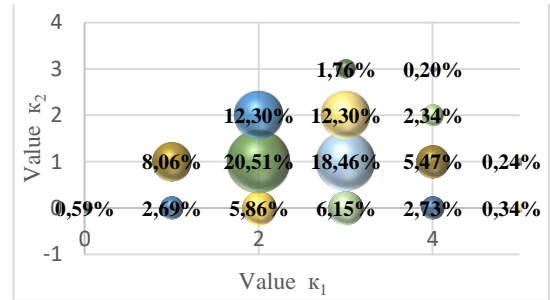


Fig. 2 - The distribution of probabilities depending on k_1 and k_2 according to formula (3) for sequences of length 13.

CONCLUSIONS

The approach to testing using n-dimensional statistics allows you to rely on a deeper justification of the randomness of the generated sequences. The advantage of testing with the help of n-dimensional statistics is also the fundamental possibility of a high degree of parallelism in the computation of a family of statistics. This area is promising for research, especially for sequences of short and medium length, where one-dimensional statistics are often powerless.

REFERENCES

- [10] Устименко Т. А. О случайности псевдослучайных последовательностей // Молодой ученый. — 2010. — №10. — С. 8-11. — URL <https://moluch.ru/archive/21/2189/> (дата обращения: 10.01.2019).
- [11] Arhangel'skaya A.V. Analiz podhodov k opredeleniyu termina «sluchaynost'» / A.V. Arhan-gel'skaya // Nauchnaya sessiya MIFI-2007. XIV Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya «Problemy informatsionnoy bezopasnosti v sisteme vysshey shkoly»: sb. nauch. tr. / Moskovskiy inzhenerno-fizicheskiy institut (gosudarstvennyy universitet). – M.: MIFI, 2007. – S. 22 – 23.
- [12] Харин, Ю.С. Математические и компьютерные основы криптологии: учеб. пособие / Ю.С. Харин, В.И. Берник, Г.В. Матвеев. – Минск: Новое знание, 1999. – 319 с.
- [13] Security Requirements For Cryptographic Modules [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://csrc.nist.gov/publications/fips/fips1402/fips1402.pdf>
- [14] А.М. Коренева, В.М. Фомичёв «Статистическое тестирование псевдослучайных последовательностей» // Безопасность информационных технологий № 2 2016 г .
- [15] Prashanth Busireddygar ; Subhash Kak, «Pseudorandom tableau sequences», IEEE 51st Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, 2017, P. 1733 – 1736
- [16] Гайдышев И.П. Программное обеспечение анализа данных AtteStat. Руководство пользователя. Версия 13 – 2012. – 505 с.

Комп'ютерна Модель Програмно - Апаратної Корекції Помилки з Практичною Реалізацією в Обчислювальній Мікро Системі

Вадим Пуїденко
Циклова комісія "Комп'ютерні науки"
Харківський радіотехнічний коледж
Харків, Україна
vapuydenko@gmail.com

Computer Model of Software and Hardware Correction of an Error with a Practical Realization in a Computing Microsystem

Vadym Puydenko
dept. of Computer Science
Kharkiv Radio Engineering College
Kharkiv, Ukraine
vapuydenko@gmail.com

Анотація – метою представленої авторської науково – дослідної практичної роботи є втілення математичного апарату завадостійкого кодування для створення та дослідження в середовищі комп'ютерного моделювання програмно-апаратних рішень корекції помилки з подальшим застосуванням на практиці. Результати досліджень й, одночасно, тестування комп'ютерних моделей програмно – апаратних рішень корекції помилки стали підґрунтям для побудови програмних додатків та апаратного рішення для кодування та декодування інформаційних пакетів з систематичним циклічним надлишковим кодом БЧХ 7,4 у реальній 8 – бітній обчислювальній мікросистемі з послідовним інтерфейсом каналу передачі даних та, можливою, подальшою корекцією помилки.

Annotation - the purpose of the presented author's scientific practical research work is the implementation of the mathematical apparatus of noise - proof coding for the creation and research in the environment of the computer modeling of software and hardware solutions for an error correction with a further application in practice. The results of researches and, at the same time, the testing of computer models of software and hardware solutions for an error correction became the basis for the construction of software applications and hardware solutions for encoding and decoding information packages with a systematic cyclic redundant code BCH 7,4 in the real 8 -

bit computing microsystem with the serial interface of the channel of data and, a possible, further correction of an error .

Ключові слова: систематичний циклічний надлишковий код Боуза – Чоудхурі – Хоквінгема, примітивний поліном $P(x')$, генеруюча матриця $G_{n,k}$, перевірна матриця $H_{k,r}$, алгебраїчні логічні лінійні рівняння, синдром помилки, вектор помилки, програмно – апаратні рішення корекції помилки.

Keywords: systematic cyclic redundant code of Bowes - Choudhuri - Hockwingham, primitive polynomial $P(x')$, generating matrix $G_{n,k}$, checking matrix $H_{k,r}$, algebraic logical linear equations, error syndrome, error vector, software and hardware solutions for an error correction.

I. ВСТУП

Одна з найбільш важливих і одночасно важких задач у техніці передачі, запису, відтворення і зберігання інформації – забезпечення завадостійкості. В теперішній час завадостійке кодування все більш застосовується у системах супутникового зв'язку, комп'ютерних системах і мережах, цифрових блоках радіотелебачення та мережах смартфонів.

Алгебраїчне кодування лінійних блокових кодів є перспективна гілка теорії завадостійкого кодування, при чому для найбільш важливого класа недвійкових кодів ця гілка ґрунтується на спеціальних розділах абстрактної

алгебри – теорії кінцевих полів та кільцевих груп, дискретних ортогональних перетвореннях, теорії ганкелевих та теплицевих матриць, апроксимації Паде та інших спеціальних главах дискретної математики.

В представленій праці для корекції однократних помилок використовується циклічний надлишковий систематичний код 7,4 Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема, який, на погляд автора, є дуже зручним для використання в мікроконтролерних системах, а саме у 8-бітних обчислювальних системах та мережах на базах мікроконтролерів родин PIC16C7XX, PIC18F4XXX.

II. ПОБУДОВА КОДУ БОУЗА – ЧОУДХУРІ – ХОКВІНГЕМА 7,4

Довжина кодової комбінації n для кодів БЧХ визначається через ступінь m двійки:

$$n=2^m-1 \quad (1)$$

де m – будь-яке ціле натуральне число.

Кількість перевірочних r та інформаційних бітів k визначаються із наступних співвідношень:

$$r \leq \frac{m(d-1)}{2} \quad (2)$$

$$k \geq (2^m-1) - \frac{m(d-1)}{2} \quad (3)$$

де d – кодова відстань.

Для виправлення всіх помилок кратності до t_c і одночасного виявлення всіх помилок кратності t_r ($t_r \geq t_c$) кодова відстань повинна відповідати умові:

$$d_{min} \geq t_r + t_c + 1; \quad (4)$$

Утворюючий поліном визначається по заданій кодовій відстані d і довжині кодової комбінації n . Утворюючий поліном БЧХ - коду - це найменше спільне кратне (НСК) так званих мінімальних поліномів $m_i(x)$, де $i=1,3,5,\dots,d-2$ – порядок поліному $P(x^r)=НСК\{m_1(x), m_3(x), \dots, m_{d-2}(x)\}$. Обчислені значення мінімальних поліномів шістнадцяткової системі числення для степеню m наведені у таблиці 1:

TABLE I. МІНІМАЛЬНІ ПОЛІНОМИ ПРИ ВЕЛИЧИНІ m

Порядок поліному i	Мінімальні поліноми при величині m				
	2	3	4	5	6
1	7 _h	0B _h	13 _h	25 _h	43 _h
3	-	-	1F _h	3D _h	57 _h
5	-	-	7 _h	37 _h	67 _h
7	-	-	-	-	49 _h
9	-	-	-	-	0D _h
11	-	-	-	-	6D _h

Побудова систематичних циклічних надлишкових кодів утворюється шляхом збільшення степеню кодової комбінації $C(x)$ на ступень утворюючого поліному x^r з подальшим діленням результату на значення утворюючого поліному $P(x^r)$. Далі поряд з кожною кодовою комбінацією

розміщає решти від ділення, які є перевірочні біти R . Таки чином в системі утворюється генеруюча матриця $G_{n,k}$ (перші чотири рядки таблиці 2 виділені сірим кольором). Для побудови коду візьмемо поліном третього степеню, що не приводиться $P(x^r)=x^3+x+1$, оскільки для $i=1$ та $m=3$ він і є НСК $\{m_1(x)\}$, довжину пакету $n=7$, кількість інформаційних бітів $k=4$ та розрядність контрольної суми $r=n-k=7-4=3$. Решту з дванадцяти дозволених пакетів отримуємо шляхом визначення логічної операції додавання за модулем 2 на множині пакетів генеруючої матриці $G_{7,4}$ з використанням апарату дискретної математики – комбінаторики. Всі 16 дозволених інформаційних пакетів з кодом БЧХ 7,4 представлені у таблиці 2:

TABLE II. ДОЗВОЛЕНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ПАКЕТИ З СИСТЕМАТИЧНИМ ЦИКЛІЧНИМ НАДЛИШКОВИМ КОДОМ БЧХ 7,4

№	Пакети інформації			Шлях створення
	Біти k	Біти r	Пакет	
1.	1000	101	45 _h	1
2.	0100	111	27 _h	2
3.	0010	110	16 _h	3
4.	0001	011	0B _h	4
5.	1100	010	62 _h	1⊕2
6.	1010	011	53 _h	1⊕3
7.	1001	110	4E _h	1⊕4
8.	0110	001	31 _h	2⊕3
9.	0101	100	2C _h	2⊕4
10.	0011	101	1D _h	3⊕4
11.	1110	100	74 _h	1⊕2⊕3
12.	1011	000	58 _h	1⊕3⊕4
13.	0111	010	3A _h	2⊕3⊕4
14.	1101	001	69 _h	1⊕2⊕4
15.	1111	111	7F _h	1⊕2⊕3⊕4
16.	0000	000	0	1⊕2⊕...⊕15

Якщо будь-який істинний пакет з таблиці 2 поділити на поліном $P(x)$, що не приводиться, то отримаємо залишок рівний 0. Це є ознакою передачі інформації без помилок (наприклад, візьмемо дозволений пакет №7):

$$1001110 \oplus 1011000 = 0010110 \oplus 0010110 = 0$$

III. МЕТОД КОРЕКЦІЇ ПОМИЛКИ

За цим методом перевірка кодової комбінації на боці приймача виконується шляхом порівняння перевірочних розрядів кодової комбінації, що приймаються, і перевірочних розрядів, які обчислені на підставі прийнятих інформаційних. Їх сума за модулем 2 називається синдромом. Характерна особливість синдрому міститься в тім, що він не залежить від виду переданої інформації, а повністю визначається помилками, які зіпсували прийняту комбінацію коду. Між комбінацією синдрому і комбінацією помилки, яка його викликала, немає взаємної відповідності – одному і тому ж синдрому відповідає 2^k різних комбінацій помилок. Оскільки синдром – сума за модулем 2 перевірочних розрядів кодової комбінації і перевірочних розрядів, які обчислені по прийнятим

інформаційним символам, то він співпадає з комбінацією результатів перевірки на парність, які визначаються перевірочною матрицею H:

$$H_{7,3} = \left| R^T, E \right| = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (5)$$

де R^T – транспонована матриця бітів r таблиці 2;
E – одинична діагональна матриця розміром gхg.

Таким чином, визначаємо біти синдрому помилки S шляхом рішення рівнянь:

$$S_1 = a_1 \oplus a_2 \oplus a_3 \oplus b_1; \quad S_2 = a_2 \oplus a_3 \oplus a_4 \oplus b_2; \quad S_3 = a_1 \oplus a_2 \oplus a_4 \oplus b_3; \quad (6)$$

де a_i – одиничні елементи кожного рядка матриці R^T ;
 b_c – одиничні елементи кожного рядка матриці E.

Якщо код використовується для виправлення помилок, то при декодуванні повинно бути раніше визначена відповідність між видом синдрому і видом помилки, яка виправляється. Встановимо цю відповідність з урахуванням (6) у таблиці 3:

TABLE III. Відповідність вектора помилки до обчисленого значення синдрому

Вектор помилки	Синдром помилки
1000000	101
0100000	111
0010000	110
0001000	011
0000100	100
0000010	010
0000001	001

Нехай помилка впливає на шостий розряд дозволеного пакету №7: 0001110 вектор помилки 1000000. Насамперед упевнімося, що при діленні хибного пакету №7 з помилкою у шостому біті отримаємо ненульову остачу:

$$0001110 \oplus 1011000 = 101$$

Застосуємо до цього пакету вище наведені перевірки та обчислимо синдром помилки:

$$\begin{aligned} S_1 &= a_1 \oplus a_2 \oplus a_3 \oplus b_1 = 0 \oplus 0 \oplus 0 \oplus 1 = 1; \\ S_2 &= a_2 \oplus a_3 \oplus a_4 \oplus b_2 = 0 \oplus 0 \oplus 1 \oplus 1 = 0; \\ S_3 &= a_1 \oplus a_2 \oplus a_4 \oplus b_3 = 0 \oplus 0 \oplus 1 \oplus 0 = 1; \end{aligned}$$

Отже, обчислений синдром має двійкове значення S=101. Цьому значенню відповідає вектор помилки 1000000 (таблиця 3). Шляхом додавання за модулем 2 значення вектору помилки до значення зіпсованого пакету, отримаємо значення істинного пакету №7:

$$0001110 \oplus 1000000 = 1001110.$$

IV. КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ АПАРАТУРИ КОРЕКЦІЇ ПОМИЛКИ

Математично доведено, що за прийнятим істинним пакетом обчислений синдром набуває значення 0. Це означає, при істинному значенні прийнятого пакету, буде згенеровано нульовий вектор помилки, що ніяк не вплине на результат корекції, оскільки $x \oplus 0 = x$. Цей факт дозволяє не включати в схему апаратури корекції, яка представлена на рисунках 1 і 2, модуль ділення пакету на поліном, а модулі логіки обчислення значення синдрому і значення вектору помилки та логіки корекції помилки. Таким чином структурна схема комп'ютерної моделі апаратури виправлення помилки у коді БЧХ 7,4 представлена на рисунку 1. Апаратура корекції помилки підключена до портів В і D мікроконтролера PIC16C77 та функціонує під програмним управлінням з боку мікроконтролера. До складу апаратури корекції входять наступні модулі:

- модуль логіки обчислення значення синдрому та значення вектору помилки;
- модуль логіки корекції помилки;
- регістр істинного пакету;
- буфер зберігання істинного пакету з третім станом;

На боці приймача пакет повинен видаватися через порт В мікроконтролера в модуль логіки обчислення значення синдрому та значення вектору помилки і в модуль логіки корекції помилки одночасно. Обчислений синдром формує значення вектору помилки, яке потрапляє на входи модуля логіки корекції помилки, де на цей час має бути присутнім значення отриманого пакету з кодом БЧХ 7,4.

У модулі логіки корекції помилки має здійснитися або не здійснитися корекція пакету, що спричинить подію відтворення значення істинного пакету або подію видачі прийнятого істинного пакету. Далі значення істинного пакету повинно бути передано на входи регістру істинного пакету. Під впливом імпульсу керування в певній лінії порту D значення істинного пакету має бути передано на входи регістру, звідки воно потрапить на входи тристабільного буферу. В цей час всі лінії порту В повинні перемикнутися на режим введення. Далі під впливом імпульсу керування в певній лінії порту D значення істинного пакету має бути передано на входи тристабільного буферу і таким чином значення істинного пакету потрапить назад у надра мікроконтролера.

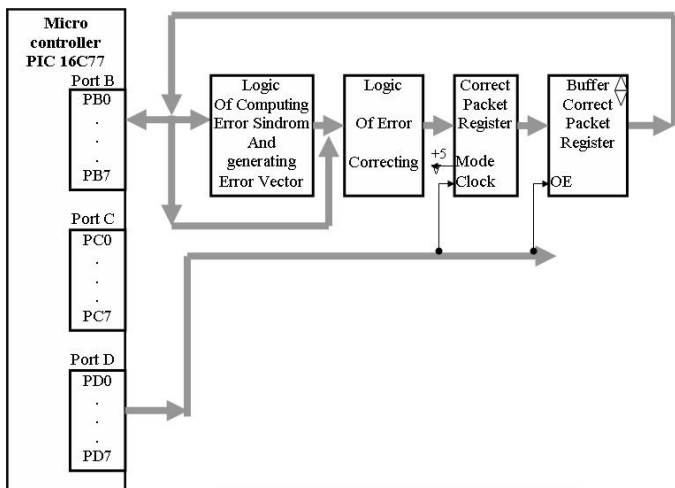


Рис. 1. Структурна схема комп'ютерної моделі апаратури корекції помилок

Комп'ютерна модель апаратури корекції помилки наведена на рисунку 2. Модуль логіки обчислення значення синдрому та значення вектору помилки відносяться наступні електронні компоненти:

- комбінаційна логіка «модуль 2» 74HC86 DD2:A,B,C,D, DD3:D, DD4:A,B,C,D;
- дешифратор 74141 DD5;
- інвертори 7404 DD6:A,B,C,D,E,F, DD7:D;

До модуля логіки корекції помилки відноситься:

- комбінаційна логіка «модуль 2» 74HC86 DD8:A,B,C,D, DD9:A,B,C;

В модель також входить мікросхема універсального регістру 74198 DD10 і мікросхема буфера з третім станом 74S244 DD11. В апаратній корекції при використанні коду БЧХ 7,4 у послідовних каналах зв'язку з інтерфейсами SPI та I²C для передачі байту інформації потрібно два сеанси передачі пакетів:

- сеанс для передачі молодшої тетради байту з контрольною сумою ;
- сеанс для передачі старшої тетради байту з контрольною сумою;

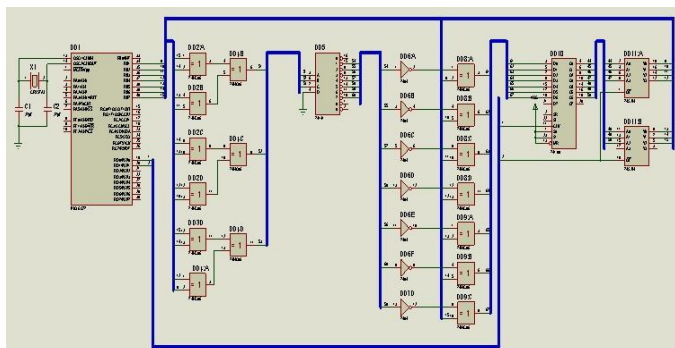


Рис. 2. Комп'ютерна модель апаратури корекції помилки

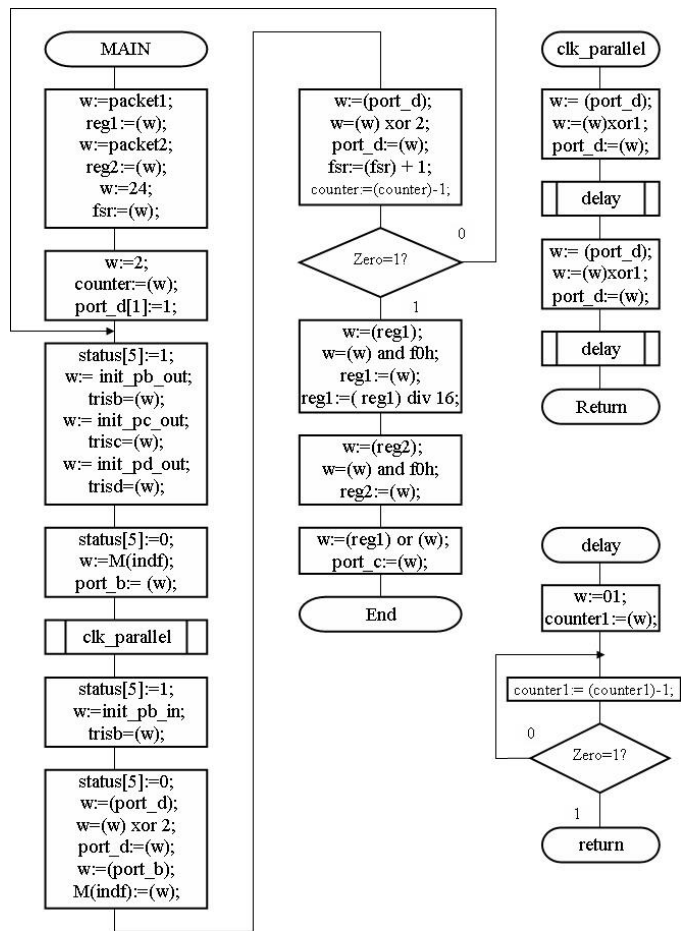


Рис. 3. Алгоритм основної програми MAIN та процедур clk_parallel і delay

Після цих подій в мікроконтролерній системі починається опрацювання алгоритмів, які представлені на рисунку 3. В регістри **reg1** та **reg2** послідовно завантажуються значення прийнятих пакетів. До регістру непрямої адресації **fsr** завантажуються адреса 24h, яка є фізичною адресою регістра **reg1**. В лічильник **counter** завантажуються значення 2 - кількість проходів обробки пакетів, а перша лінія порту D сприймає значення логічної 1, що переводить вихідні лінії тристабільного буферу 74S244 DD11 в третій стан. Далі трапляється перемикання на банк 1 пам'яті даних мікроконтролера і здійснюється ініціалізація на виведення ліній портів A,B та C. З подією перемикання на банк 0 пам'яті даних мікроконтролера пов'язується завантаження в регістр **w** значення пакету, яке видається на порт B. З ліній порту B значення пакету миттєво потрапляє на входи комбінаційної логіки «модуль 2» 74HC86 DD2:A,B,C,D, DD3:D, DD4:A,B,C,D модуля логіки обчислення значення синдрому та значення вектору помилки та входи комбінаційної логіки «модуль 2» 74HC86 DD8:A,B,C,D, DD9:A,B,C модуля логіки корекції помилки. На своїх виходах логіка «модуль 2» 74HC86 DD2:A,B,C,D, DD3:D, DD4:A,B,C,D миттєво створить трибітний синдром помилки, який потрапить на входи дешифратора 74141 DD5. На виході дешифратора DD5 з'явиться вектор

помилки у вигляді унітарного коду в інверсному вигляді. Значення вектору помилки з інверсної форми перетвориться в пряму завдяки інверторам 7404 DD6:A,B,C,D,E,F, DD7:D. Виходи інверторів поєднані з входами комбінаційної логіки «модуль 2» 74HC86 DD8:A,B,C,D, DD9:A,B,C модуля логіки корекції помилки, де вже на вектор чекає значення пакету даних з контрольною сумою. На виходах модуля логіки корекції помилки створиться істинний пакет, який потрапить на входи універсального регістру 74198 DD10. Слід зазначити, що універсальний регістр функціонує у режимі паралельного завантаження інформації. Процедура `clk_parallel` створить керуючий імпульс на лінії 0 порту D, під впливом якого пакет з входів універсального регістру потрапить на його виходи. У свою чергу виходи регістра поєднані з входами тристабільного буфера 74S244 DD11, виходи якого на цей момент часу знаходяться у третьому стані. Програмне перемикання на банк 1 пам'яті даних дозволить ініціювати регістр `tristb` порту V і перемикнути лінії порту V на введення. Програмне перемикання на банк 0 пам'яті даних дозволить програмно маніпулювати лінією 1 порту D і на цій лінії буде програмно створений керуючий потенційний сигнал низького рівня, який дозволить пакету з входів тристабільного буфера 74S244 DD11 потрапити на його виходи та автоматично на лінії порту V. Пакет буде прочитано з ліній порту V в регістр `w` і далі перезаписано у комірку регістрового файлу, на який показує регістр непрямої адресації `indf`. Далі на нульовій лінії порту D буде програмно створений потенційний сигнал високого рівня, що спричинить третій стан вихідних ліній тристабільного буфера 74S244 DD11. Інкремент регістру `fsr` дозволить адресуватися всередині регістрового файлу мікроконтролера на комірку пам'яті, де зберігається другий прийнятий пакет і цикл обробки прийнятого пакету повториться. По закінченні двох циклів обробки прийнятих пакетів в регістрі `reg1` виділяється старша тетрада (інформаційні біти першого пакету) та обнулюються молодша тетрада (знищується контрольна сума), а далі старша і молодша тетрада міняються місцями. В регістрі `reg2` теж виділяється старша тетрада (інформаційні біти другого пакету) та обнулюються молодша тетрада (знищується контрольна сума). Шляхом конкатенації старшої та молодшої тетрад регістрів `reg1` та `reg2` у регістрі `w` утвориться істинний байт інформації, який буде передано на порт C.

V. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛІ АПАРАТУРИ КОРЕКЦІЇ ПОМИЛКИ

Покладаючись на дані таблиці 2 і особливості комп'ютерної моделі на рисунку 2, візьмемо дозволени комбінації №5 та №7 і представимо їх шістнадцятиричною формою запису: 1100 0101 (0C5h) та 1001 1101 (9Dh). У тексті програми це будуть ідентифікатори `Packet5` і `Packet7` відповідно (рисунк 4). Припустимо, що у послідовному каналі зв'язку з інтерфейсами SPI або I²C при передачі не трапилося помилок. Істинні пакети будуть направлені в модуль апаратури корекції, де здійсниться обробка

пакетів. Порт C мікроконтролера – приймача прийме значення байту 10011100 (рисунк 5). Припустимо, що у послідовному каналі зв'язку з інтерфейсами SPI або I²C в обох пакетах трапилися однократні помилки (виділено синім кольором): 0100 0101 (шостий біт пакету `Packet5` – 45h), 1101 1101 (п'ятий біт пакету `Packet7` - 0DDh) рисунок 6. Далі хибні пакети будуть направлені в модулі оптимізованої апаратури корекції, де здійсниться виправлення помилок. Порт C мікроконтролера – приймача прийме значення байту 10011100 (рисунк 7).

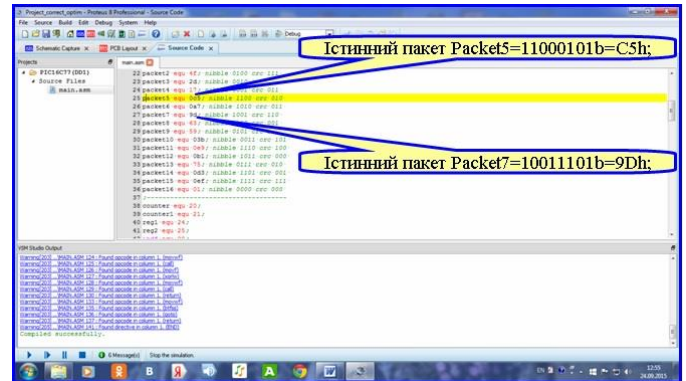


Рис. 4. Значення істинних пакетів `Packet5` і `Packet7` в програмі MAIN

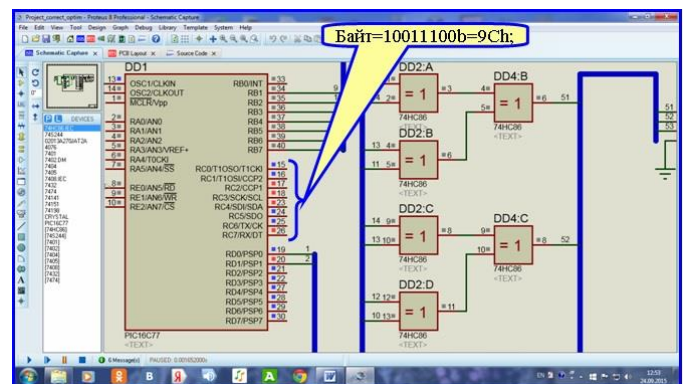


Рис. 5. Істинний байт 9Ch на вихідних лініях порту C

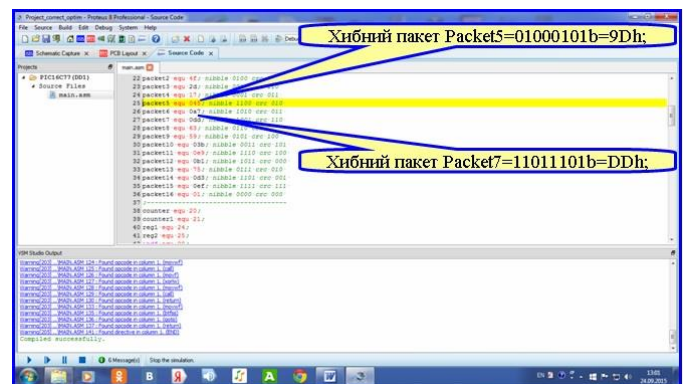


Рис. 6. Значення хибних пакетів `Packet5` і `Packet7` в програмі MAIN

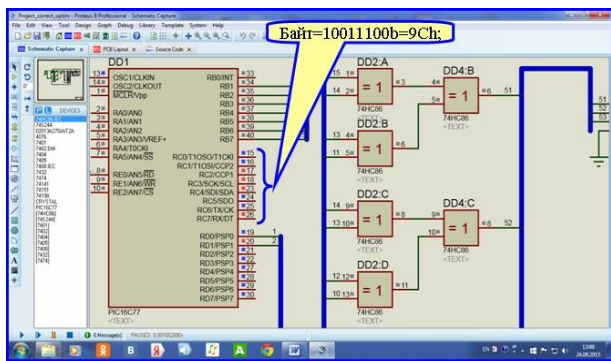


Рис. 7. Істинний байт 9Ch на вихідних лініях порту C

При дослідженні часу, в разі виконання корекції в оптимізованій апаратурі істинних пакетів №5 (11000101b=C5h) і №7 (10011101b=9Dh) або хибних пакетів №5 (01000101b=9Dh) і №7 (11011101b=DDh), утворюється байт інформації 9C h і середовище моделювання Proteus видає час **0,001652000** секунди, тобто **1,652** мс.

VI. КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ ПРОГРАМНОЇ КОРЕКЦІЇ ПОМИЛКИ

При використанні коду БЧХ 7,4 у послідовних каналах зв'язку з інтерфейсами SPI або I²C для передачі байту інформації потрібно два сеанси передачі пакетів:

- сеанс для передачі молодшої тетради байту з контрольною сумою ;
- сеанс для передачі старшої тетради байту з контрольною сумою;

Програмний метод виявлення та виправлення помилки має циклічний характер і виконується за два цикли у відповідності з двома сенсами прийняття пакетів. Представлений алгоритм складається з основної програми MAIN, процедур VERIFY, CORRECT та CONVERT_TO_BYTE (рисунки 8,9,10). В кожному з двох циклів виконання основної програми MAIN кожний 7-бітний пакет передається в процедуру VERIFY. В процедурі виконується перевірка на наявність помилки при передачі у вигляді алгоритму специфічного ділення прийнятого пакету на поліном третього ступеню, що не приводиться, з метою отримання значення залишку. В залежності від значення отриманого залишку залежить виклик процедури корекції помилки CORRECT. Обчислене значення залишку передається в основну програму MAIN. При ненульовому значення залишку управління з основної програми MAIN передається в процедуру CORRECT. Алгоритм процедури здійснить обчислення синдрому помилки у відповідності з логічними рівняннями (6). Обчислений синдром має трибітне двійкове значення яке відповідає двійковому значенню семибітного вектора помилки (таблиця 3). В процедурі CORRECT ця відповідність буде встановлена шляхом порівняння обчисленого значення синдрому з кожним із сьоми закодованих синдромів **serri** у розділі визначення змінних основної програми MAIN. При співпадінні значень синдромів помилки до хибного значення пакету буде додане за модулем два двійкове

значення відповідного вектору помилки. В результаті буде отримане істинне значення пакету. Далі буде здійснений виклик процедури CONVERT_TO_BYTE, де реалізується алгоритм конкатенації тетрад обох пакетів і байт інформації буде видано на порт В мікроконтролера.

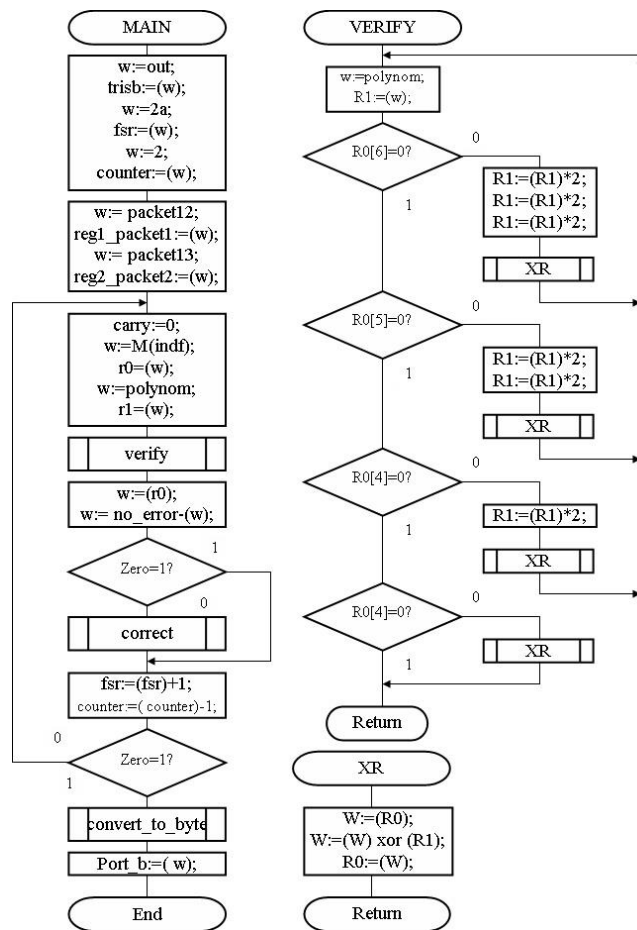


Рис. 8. Алгоритми основної програми MAIN та процедури VERIFY

Слід додати, що представлені на рисунках 8,9,10 алгоритми програмної корекції помилки складені з урахуванням RISC структури гарвардської архітектури процесорного ядра мікроконтролера PIC16C(F)77, в яку входять стек на глибину восьми рівнів, множина внутрішніх та зовнішніх переривань, окремі шини команд та даних, які дозволяють одночасно передавати 14-бітні команди та 8-бітні дані та два послідовних порти: синхронний послідовний порт, який може функціонувати як три провідний периферійний інтефейс SPI або двох провідна шина I²C, та універсальний синхронно – асинхронний прийомо – передавач USART. Мікроконтролери родини PIC в порівнянні з іншими 8-бітними контролерами такого ж класу дозволяють зменшити програму 2:1 та поліпшити швидкодію 4:1 та ідеально підходить для некоштовних додатків, які потребують аналоговий інтерфейс.

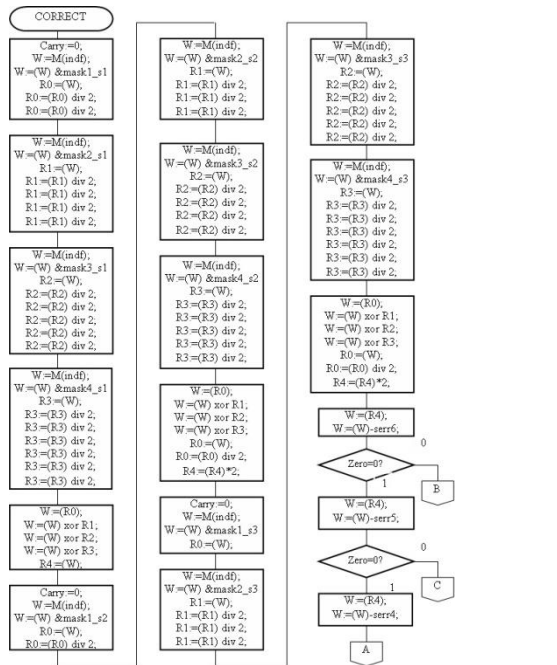


Рис. 9. Алгоритм процедури CORRECT корекції однократної помилки

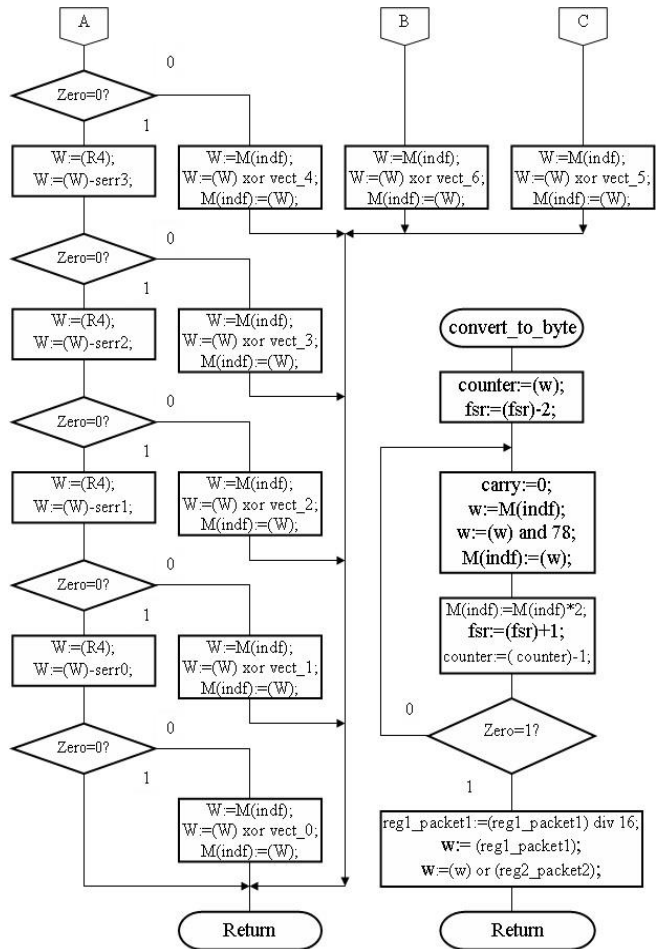


Рис. 10. Алгоритми процедур CORRECT та CONVERT_TO_BYTE

VII. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛІ ПРОГРАМНОЇ КОРЕКЦІЇ ПОМИЛКИ

Отже, покладаючись на дані таблиці 2, візьмемо дозволені комбінації №11 та №12 і представимо їх шістнадцятиричною формою запису: 1110 100 (74h) та 1011 000 (58h). У тексті програми це будуть ідентифікатори Packet11 і Packet12 відповідно (рисунок 11). Припустимо, що у послідовному каналі зв'язку з інтерфейсами SPI або I²C при передачі не трапилося помилок. Тоді при програмній перевірці буде встановлено, що помилки в обох тетрадах байту відсутні і порт В мікроконтролера – приймача прийме значення 10111110 (рисунок 12). Припустимо, що у послідовному каналі зв'язку з інтерфейсами SPI або I²C обох пакетів, трапилися однократні помилки (виділено синім кольором): 1111 100 (третій біт пакету Packet11 – 7Ch), 0011 000 (шостий біт пакету Packet12 - 18h) рисунок 13. Тоді при програмній перевірці буде встановлено, що однократні помилки в обох тетрадах байту присутні, далі вони будуть виправлені і порт В мікроконтролера – приймача прийме значення 10111110 (рисунок 14).

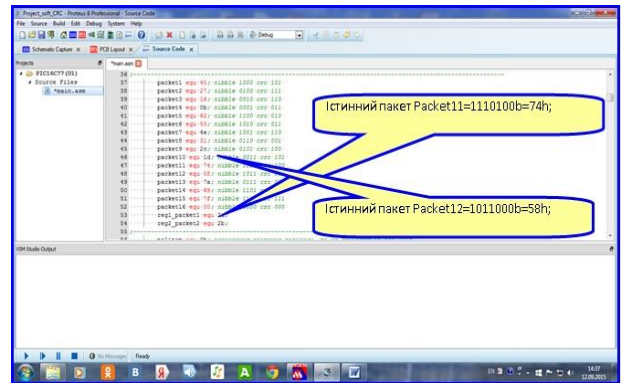


Рис. 11. Значення істинних пакетів Packet11 і Packet12 в програмі MAIN

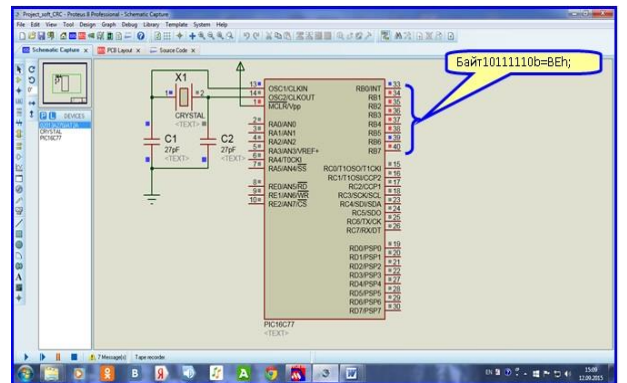


Рис. 12. Істинний байт BEh на вихідних лініях порту C

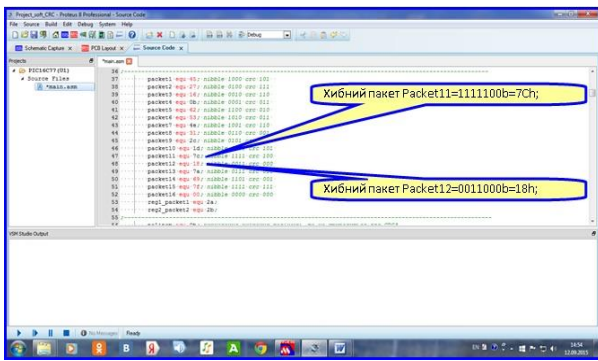


Рис. 13. Значення хибних пакетів Packet11 і Packet12 в програмі MAIN

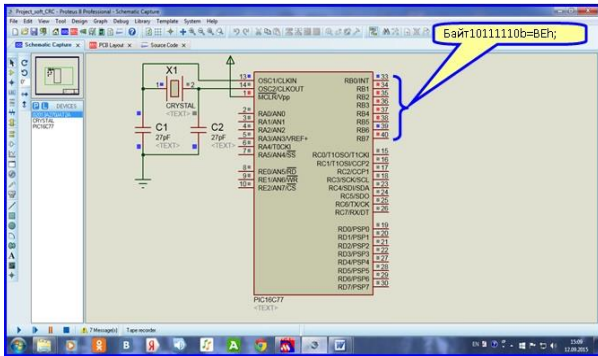


Рис. 14. Істинний байт ВЕh на вихідних лініях порту С

VIII. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛІ ПРОГРАМНО - АПАРАТНОЇ КОРЕКЦІЇ ПОМИЛКИ В ОБЧИСЛЮВАЛЬНІЙ МІКРОСИСТЕМІ

Для практичної реалізації програмно – апаратної корекції помилки була обрана обчислювальна мікросистема на базі 8-бітного мікроконтролера PIC18F4550 з вбудованим USB модулем з метою сполучення з головною комп'ютерною системою для подальшого тестування. На підставі вище наведених досліджень в середовищі комп'ютерного моделювання створений відповідний проєкт обчислювальної мікро системи програмно – апаратної корекції помилки, який показаний на рисунку 15:

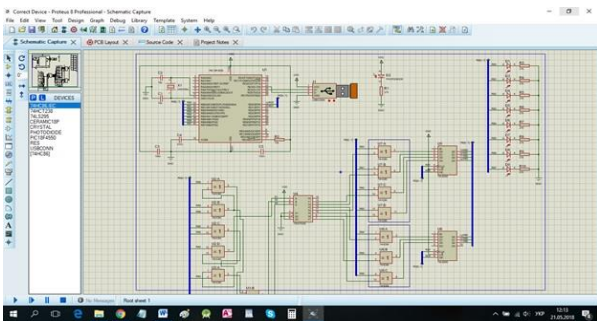


Рис. 15. Обчислювальна мікросистема програмно – апаратної корекції помилки

Також в комп'ютерному середовищі моделювання була створена двобічна печатна плата (рисунок 16) з подальшою 3D візуалізацією мікросистеми (рисунок 17):

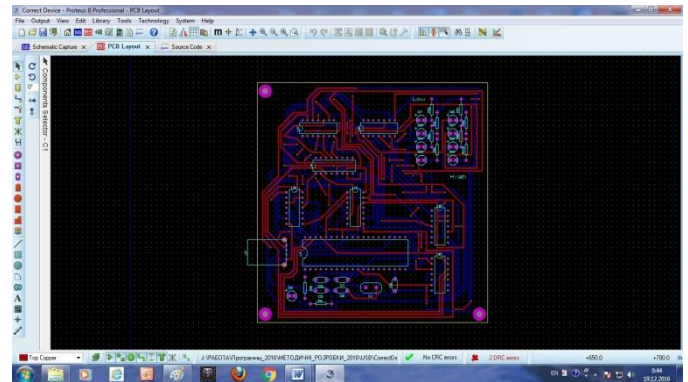


Рис. 16. Двобічна печатна плата обчислювальної мікросистеми корекції

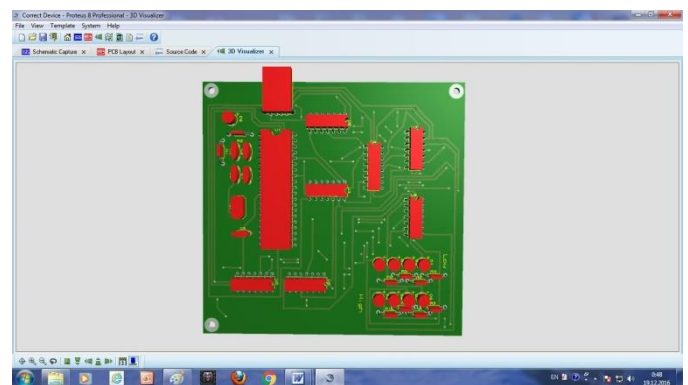


Рис. 17. 3D візуалізація обчислювальної мікросистеми корекції

З урахуванням вищевказаного, вдалося практично реалізувати дослідний зразок обчислювальної мікросистеми програмно – апаратної корекції помилки на базі 8-бітного мікроконтролера PIC18F4550, який представлений на рисунку 18:



Рис. 18. Дослідний зразок обчислювальної мікросистеми програмно – апаратної корекції помилки

У пам'ять програм мікроконтролера PIC18F4550 був записаний програмний код програмної корекції помилки, а також програмний код керування апаратурою корекції помилки. Для хост – контролера USB головної комп'ютерної системи на мові програмування C# було створене спеціалізоване системне програмне забезпечення, яке створює зручний програмний інтерфейс тестування, де є можливість обирати дозволені пакети з кодом БЧХ 7,4 та здійснювати транзакцію між хост – контролером USB головної комп'ютерної системи та модулем USB мікроконтролера через послідовний канал USB (рис. 19):

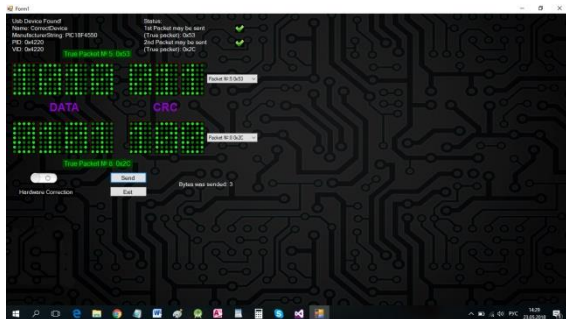


Рис. 19. Програмний інтерфейс тестування дослідного зразка мікросистеми програмно – апаратної корекції помилки

У програмному інтерфейсі передбачена можливість, через випадаючий перелік, обрання двох дозволених пакетів з кодом БЧХ 7,4, внесення штучної помилки у будь – який біт певного пакету з кодом БЧХ 7,4 та керуюча кнопка початку транзакції SEND. Керуюча кнопка перемикає між програмними кодами програмної корекції помилки (Software correction) і програмним кодом керування апаратурою корекції помилки (Hardware correction) використовується за розсудом тестувальника (рис. 20):

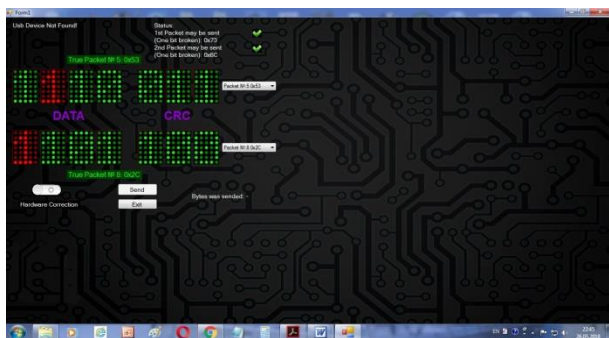


Рис. 20. Програмний інтерфейс тестування дослідного зразка мікросистеми програмно – апаратної корекції помилки

На рисунку 20, перед початком транзакції, червоним кольором штучно зіпсовані 6 – й біт дозволеного пакету №6 (табл. 2) та 5 – й біт дозволеного пакету №9 (табл. 2). При активації керуючої кнопки SEND штучно зіпсовані пакети з кодом БЧХ 7,4 через послідовний канал USB будуть передані в обчислювальну мікросистему програмно – апаратної корекції помилки. В обчислювальні

мікросистемі корекції дослідного зразка передбачено 8 тестових світлодіодів, які після відпрацювання програмного коду керування апаратурою корекції помилки або програмного коду програмної корекції будуть відтворювати істинний байт інформації (рис. 21):

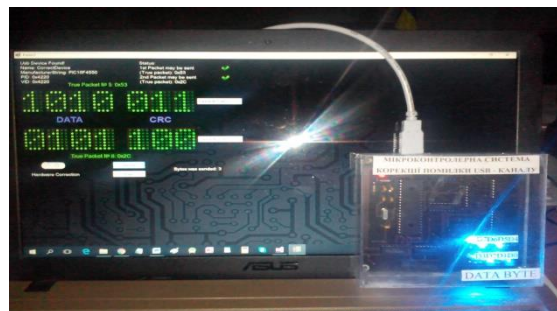


Рис. 21. Відтворення штатними світлодіодами значення істинного байту 5Ah після корекції помилок в пакетах

ВИСНОВКИ

Синтезовані програмні додатки та апаратні рішення корекції помилки були реалізовані в комп'ютерному середовищі моделювання, що дало змогу дослідити швидкодюю корекції помилок та працездатність перед виробництвом дослідного зразка мікросистеми.

При дослідженні програмної корекції помилки був отриманий час в 1,6716 мс. В процесі дослідження апаратури корекції був отриманий час 1,652 мс, що робить її на 0,0196 мс швидше за програмну корекцію, що дає виробникам альтернативу програмній корекції помилки апаратну і навпаки, або одночасне їх використання, що зробить систему передачі інформації удвічі ефективнішою.

Запропоноване практичне рішення програмно – апаратної корекції помилки можна впроваджувати на технологічних об'єктах, де присутня значна протяжність послідовних каналів зв'язку (з ймовірнісними зовнішніми і внутрішніми джерелами завод) між різного типу первинними інтелектуальними датчиками, промисловими контролерами та комп'ютерними системами для значного підвищення достовірності інформації у системі передачі даних.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки Перевод с английского под редакцией Р.Л. Добрушина и С.И. Самойленко Издательство «Мир» Москва
- [2] Муттер В.М. Основы помехоустойчивой передачи информации. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд – ние, 1990. – 288 с.:ил.
- [3] Кодирование информации (двоичные коды). Березюк Н.Г., Андрущенко А.Г., Мощицкий С.С. и др. Харьков, издательское объединение «Вища школа», 1978, 252 с.
- [4] Лидл Р., Нидеррайтер Г., Конечные поля: в 2-х т. Т.1. Пер. с англ. – М.: Мир, 1988.- 430 с.
- [5] Лидл Р., Нидеррайтер Г., Конечные поля: в 2-х т. Т.2. Пер. с англ. – М.: Мир, 1988.- 822 с.
- [6] М. Вернер Основы кодирования. Учебник для ВУЗов Москва: Техносфера, 2006.- 288 с. ISBN 5-94836-019-9

Нечітка Модель Оцінювання Ризиків Інформаційної Безпеки Wi-Fi мереж

Куперштейн Леонід
Кафедра захисту інформації
Вінницький національний технічний університет
Вінниця, Україна
kupershtein.lm@gmail.com

Татарчук Артем
Кафедра захисту інформації
Вінницький національний технічний університет
Вінниця, Україна
arti123t@gmail.com

Войтович Олеся
Кафедра захисту інформації
Вінницький національний технічний університет
Вінниця, Україна
voytovych.olesya@vntu.edu.ua

Буда Антоніна
Кафедра системного аналізу, комп'ютерного
моніторингу та інженерної графіки
Вінницький національний технічний університет
Вінниця, Україна
antbuda@vntu.edu.ua

Fuzzy Model of Information Security Risk Assessment for Wi-Fi Networks

Kupershtein Leonid
dept. of Information Protection
Vinnytsia National Technical University
Vinnytsia, Ukraine
kupershtein.lm@gmail.com

Tatarchuk Artem
dept. of Information Protection
Vinnytsia National Technical University
Vinnytsia, Ukraine
arti123t@gmail.com

Voitovych Olesia
dept. of Information Protection
Vinnytsia National Technical University
Vinnytsia, Ukraine
voytovych.olesya@vntu.edu.ua

Buda Antonina
dept. of System Analysis, Computer Monitoring and
Engineering Graphics
Vinnytsia National Technical University
Vinnytsia, Ukraine
antbuda@vntu.edu.ua

Анотація – Запропоновано модель оцінки рівня ризику інформаційної безпеки для мереж Wi-Fi на основі апарату нечіткої логіки.

Abstract - *The information security risk assessment model for Wi-Fi networks based on the fuzzy logic is proposed. Ключові слова: інформаційна безпека, нечітка логіка, оцінка ризиків, мережа Wi-Fi.*

Keywords: information security, fuzzy logic, risk assessment, Wi-Fi network.

I. ВСТУП

В наш час методи впливу на конкурентів переходять від фізичного впливу до інтелектуального. При цьому використовуються новітні способи і засоби несанкціонованого отримання інформації. Саме тому актуальним є необхідність оцінки ризиків інформаційної безпеки для побудови ефективних систем захисту інформації [1].

Основою оцінки ризиків є побудова моделі, яка дозволить як можна краще описати інформаційну систему з урахуванням її ресурсів та вразливостей.

Існуючі методи оцінки ризиків в більшості своїй засновані на теоріях ймовірності і класичних множин. Ці методи не дозволяють врахувати той факт, що будь-яка

складна система є динамічною системою з набором невизначених даних. Системи оцінки ризиків, побудовані на застосуванні нечіткої логіки, можуть характеризуватися логічністю і високою стійкістю в тому випадку, коли аналіз ризиків здійснюється в умовах нестачі даних і знань.

II. АНАЛІЗ ЗАГРОЗ Wi-Fi

Бездротові мережі на сьогоднішній день використовуються практично у всіх сферах діяльності. Популярність мереж Wi-Fi зумовлена зростанням кількості пристроїв, які використовують технологію Wi-Fi. З точки зору безпеки слід враховувати не тільки загрози, властиві дротовим мережам, але також, і середовище передачі сигналу.

За аспектами інформаційної безпеки можна виділити такі базові загрози мереж Wi-Fi [2, 3]:

A. загрози порушення конфіденційності:

- порушення конфіденційності інформації шляхом перехоплення бездротового трафіку;
- несанкціонований доступ до інформації та сервісів сегментів дротових мереж, з якими працює користувач, використовуючи бездротовий доступ;
- розкриття параметрів бездротової мережі або сегментів дротових мереж, з якими працює користувач, використовуючи бездротовий доступ, за межами контрольованої зони;
- розголошення інформації про налаштування системи захисту бездротової мережі;

B. загрози порушення цілісності:

- спотворення циркулюючої в мережі інформації;
- знищення інформації користувача або інформації, що зберігається в сегментах дротових мереж, з якими працює користувач, за допомогою використання бездротового доступу;
- розсилка пакетів не за адресою, втрата пакетів, неправильна послідовність пакетів, їх підміна;
- втручання в роботу точок доступу;
- руйнування власного програмного забезпечення точок доступу;

C. загрози порушення доступності:

- втручання в процес обміну повідомленнями по мережі;
- блокування прийнятих, або переданих повідомлень на рівні користувачів або точок доступу;
- виведення з ладу точки доступу разом з усіма приєднаними користувачами;
- зменшення швидкості роботи, неадекватна реакція на команди оператора;

D. специфічні загрози:

- несанкціоноване, анонімне використання трафіку Інтернет;
- протиправні анонімні дії від імені користувача бездротової мережі (загроза типу маскарад);
- розкрадання клієнтських пристроїв або точок доступу з метою отримання інформації про налаштування системи захисту бездротової мережі;
- установка несанкціонованих точок доступу і клієнтських мережевих карт;
- несанкціонована зміна налаштувань засобів захисту бездротової мережі;
- несанкціоноване підключення до бездротової мережі;
- навмисні та ненавмисні помилки персоналу;
- відмови та збої бездротового обладнання;
- використання неліцензійного програмного забезпечення.

III. РОЗРОБКА НЕЧІТКОЇ МОДЕЛІ

У процесі аналізу факторів ризику мереж Wi-Fi було виявлено показники, які певним чином можуть впливати на стан інформаційної безпеки. На рис. 1 представлена модель оцінки ризиків.

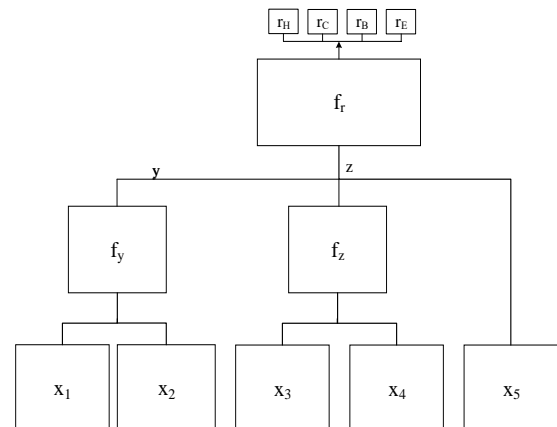


Рис. 1. Модель оцінки ризиків

Модель оцінки ризиків Wi-Fi можна представити у вигляді таких функціональних залежностей [4]:

$$r = f_r(y, z, x_5);$$

$$y = f_y(x_1, x_2);$$

$$z = f_z(x_3, x_4).$$

Рівень загрози (f_y) визначається параметрами, які характеризуються як: ймовірність виникнення загрози (x_1) та наявний захист в мережі (x_2). Показує ступінь активності джерела загрози щодо елементу системи. У зв'язку з різною природою джерел загроз інформація про

їх активність може бути подана кількісними або якісними значеннями.

Рівень порушника (f_z) визначається параметрами, які характеризується як: рівень знань порушника (x_3) та рівень можливості порушника (x_4).

Рівень збитку (x_5) визначає можливі наслідки для організації в разі настання інциденту інформаційної безпеки (погіршення репутації, фінансові збитки, неможливість виконання місії організації, тощо).

Кожна лінгвістична змінна описується терм-множинами.

Ймовірність виникнення (x_1) = {низька(Н), середня(С), висока(В)}.

Найвний захист (x_2) = {дуже низький(ДН), низький(Н), середній(С), високий(В)}.

Рівень знань порушника (x_3) = {низький(Н), середній(С), високий(В)}

Рівень можливості порушника (x_4) = {низький(Н), середній(С), вище середнього(ВС), високий(В)}

Рівень збитку (x_5) = {низький(Н), середній(С), високий(В)}.

Рівень загрози (f_y) = {низький(Н), середній(С), високий(В)}.

Рівень порушника (f_z) = {низький(Н), середній(С), високий(В)}.

Рівень загрози низький ($f_y(H)$) – низька ймовірність появи загрози (характеризується використанням стандарту 801.11i, наявністю системи виявлення вторгнень). Рівень загрози середній ($f_y(C)$) – середня ймовірність появи загрози (характеризується використанням протоколу WPA, автентифікацією за MAC-адресою, фільтрацією MAC-адрес). Рівень загрози високий ($f_y(B)$) (характеризується використанням протоколу WEP, відсутня автентифікація, відсутня фільтрація та приховування).

Рівень порушника дуже низький ($f_z(H)$) – характеризується використанням пасивних засобів (технічні засоби переймання без модифікації компонентів системи). Рівень порушника середній ($f_z(C)$) – характеризується тим, що порушник застосовує методи та засоби дистанційного (з використанням штатних каналів та протоколів зв'язку) упровадження програмних закладок та спеціальних резидентних програм збору, пересилання або блокування даних, дезорганізації систем обробки інформації. Рівень порушника високий ($f_z(B)$) – характеризується тим, що порушник застосовує методи та засоби активного впливу (модифікація та підключення додаткових технічних засобів, підключення до каналів передачі даних).

Параметр рівень збитку краще використовувати якісний, оскільки для кожного підприємства збиток є різним. Для отримання вихідної змінної ризику загрози визначимо таку лінгвістичну змінну:

Ризик (f_r) = {Низький(Н), середній(С), високий(В), екстремальний(Е)}.

Ризик низький ($f_z(H)$) характеризується тим, що це незначна подія: наслідки легко переборні, витрати на ліквідацію наслідків невеликі, вплив на інформаційну технологію незначний. Ризик середній ($f_z(C)$) характеризується тим, що це подія з помірними результатами: ліквідація наслідків не пов'язана з великими витратами, вплив на інформаційну технологію невеликий і не порушує критично важливі функції. Ризик високий ($f_z(B)$) характеризується тим, що це подія з серйозними наслідками: вплив на інформаційні технології відчутний, впливає на виконання критично важливих функцій; ліквідація наслідків пов'язана зі значними витратами. Ризик екстремальний ($f_z(E)$) характеризується тим, що ця подія призводить до неможливості виконання критично важливих функцій.

Кожен параметр моделі, в залежності від лінгвістичної змінної, задається значенням від 0 до 100.

Нечіткою базою знань називається сукупність нечітких правил "Якщо - то", що визначають взаємозв'язок між входами і виходами досліджуваного об'єкта [5]. Узагальнений формат нечітких правил для підприємства:

ПРАВИЛО_1: ЯКЩО «Умова_1» ТО «Заключення_1» (F 1 т),

...

ПРАВИЛО_n: ЯКЩО «Умова_n» ТО «Заключення_n» (F n т),

де $F_i \in [0; n]$ є коефіцієнтом визначеності або ваговим коефіцієнтом відповідного правила.

На етапі фазифікації здійснюється встановлення співвідношення між конкретним (чисельним) значенням окремої вхідної змінної системи нечіткого виводу і значенням функції приналежності відповідного їй терма вхідної лінгвістичної змінної. Після завершення цього етапу для всіх вхідних змінних повинні бути визначені конкретні значення функцій приналежності по кожному із лінгвістичних термів. Мета етапу дефазифікації полягає в тому, щоб, використовуючи результати вихідних лінгвістичних змінних, отримати кількісне значення кожної із вихідних змінних, яке може бути використано спеціальними пристроями.

Перехід від вихідної лінгвістичної змінної до числового значення відбувається за методом центру ваг [6].

На основі зазначеного вище створено нечітку базу правил, за якою буде проведено розрахунок ризику:

Правила для f_y :

$$y_H = (H(x_1) \wedge ДН(x_2)) \vee (H(x_1) \wedge ДН(x_2)) \vee (H(x_1) \wedge H(x_2)) \vee (B(x_1) \wedge ДН(x_2));$$

$$y_C = (C(x_1) \wedge C(x_2)) \vee (H(x_1) \wedge B(x_2)) \vee (C(x_1) \wedge B(x_2)) \vee (B(x_1) \wedge H(x_2));$$

$$y_B = (B(x_1) \wedge B(x_2)) \vee (B(x_1) \wedge C(x_2));$$

Правила для f_z :

$$z_H = (H(x_3) \wedge H(x_4)) \vee (C(x_4) \wedge H(x_3)) \vee (H(x_4) \wedge C(x_3)) \vee (H(x_4) \wedge BC(x_3)) \vee (BC(x_3) \wedge H(x_4));$$

$$z_C = (H(x_3) \wedge B(x_4)) \vee (B(x_4) \wedge H(x_3)) \vee (C(x_4) \wedge C(x_3)) \vee (C(x_3) \wedge BC(x_4)) \vee (BC(x_4) \wedge C(x_3)) \vee (B(x_4) \wedge C(x_3)) \vee (C(x_4) \wedge B(x_3));$$

$$z_B = (B(x_3) \wedge B(x_4)) \vee (BC(x_4) \wedge B(x_3)) \vee (B(x_3) \wedge BC(x_4)) \vee (C(x_3) \wedge BC(x_4)) \vee (BC(x_4) \wedge C(x_3));$$

Правила для f_r :

$$r_H = (H(y) \wedge H(z) \wedge H(x_5)) \vee (C(y) \wedge H(z) \wedge H(x_5)) \vee (H(y) \wedge C(z) \wedge H(x_5));$$

$$r_C = (H(y) \wedge C(z) \wedge C(x_5)) \vee (C(y) \wedge H(z) \wedge C(x_5)) \vee (C(y) \wedge C(z) \wedge C(x_5));$$

$$r_B = (C(y) \wedge C(z) \wedge B(x_5)) \vee (B(y) \wedge C(z) \wedge C(x_5)) \vee (C(y) \wedge B(z) \wedge C(x_5));$$

$$r_E = (B(y) \wedge B(z) \wedge C(x_5)) \vee (B(y) \wedge C(z) \wedge B(x_5)) \vee (B(y) \wedge B(z) \wedge B(x_5));$$

IV. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ

На основі запропонованої моделі було розроблено універсальний програмний додаток, який дозволяє автоматизувати процес оцінювання ризиків інформаційної безпеки мережі Wi-Fi. На рис. 2 наведено фрагмент інтерфейсу програми.

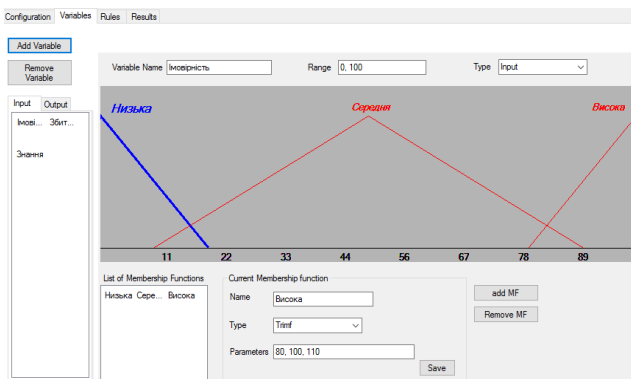


Рис. 2. Вигляд інтерфейсу програмного додатку

У програмному засобі реалізовано алгоритм нечіткого виведення типу Мамдані.

Програмний додаток побудований на основі бази даних, в якій зберігаються усі фактори ризику та їх значення. Універсальність додатку полягає у тому, що

реалізовано можливість формувати набори параметрів в залежності від конкретної ситуації. Є і можливість корегувати значення кожного з параметрів. Так, наприклад, можна додавати інші загрози безпеки, залежно від особливостей кожної окремої мережі або нові загрози, що з'являються з плином часу.

Також програмний додаток дозволяє задавати значення вхідних параметрів моделі, функції приналежності (трикутні та трапецієвидні), нечіткі правила.

Програмний додаток реалізовано для операційної системи Windows на мові програмування C#.

Порівняння результатів тестування програмного додатку з отриманими на тих самих вхідних даних результатами моделювання в пакеті прикладних програм MatLab з використанням інструменту Fuzzy Logic Toolbox показало відхилення в межах допустимої похибки обчислень.

V. ВИСНОВКИ

Розроблено нечітку продукційну модель, яка дозволяє істотно розширити можливості існуючих методик оцінки ризиків інформаційної безпеки мереж Wi-Fi, зняти обмеження на кількість врахованих вхідних змінних і інтегрувати як якісні, так і кількісні підходи до оцінки ризиків. На основі запропонованої моделі розроблено програмний додаток, який призначений для підвищення ефективності роботи спеціалістів з кібербезпеки. За результатами роботи програми можна приймати рішення щодо стану захищеності мережі та доцільності використання існуючих засобів захисту або інтеграції нових контрзаходів.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Лузецький В. А. Основи інформаційної безпеки. / Лузецький В. А., Войтович О. П., Кожухівський В. Д. – Вінниця ВНТУ, 2013. – 246 с.
- [2] Татарчук А. Є. Нечіткий підхід до оцінки ризиків безпеки бездротових мереж / А. Є. Татарчук, Л. М. Куперштейн, // Інтернет-Освіта-Наука: матеріали міжнародної науково-практичної конференції: Тези доп. – Вінниця, 2018. – 173 с
- [3] Щербаков В. Б. Безопасность беспроводных сетей: стандарт IEEE 802.11. / В. Б. Щербаков, С. А. Ермаков – Москва : Радио Софт, 2010. - 256 с.
- [4] Куперштейн Л. М. Нечіткий підхід до оцінки ризиків безпеки бездротових мереж / Л. М. Куперштейн, О. П. Войтович, А. Є. Татарчук // XVI Міжнародна конференція Контроль і управління в складних системах : Тези доп. – Вінниця, 2018. – С. 13.
- [5] Астахов А. М. Искусство управления информационными рисками / А. М. Астахов – Москва : ДМК Пресс, 2010. - 312 с.
- [6] Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, нейронные сети, генетические алгоритмы. - Винница: Універсум-Вінниця, 1999. - 295 с.
- [7] Куперштейн Л. Оцінка ризиків інформаційної безпеки в мережах wi-fi на основі апарату нечіткої логіки / Л. Куперштейн, А. Татарчук, О. Войтович // Міжнародна науково-практична конференція "Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання": Тези доп. – Івано-Франківськ – Яремче, 2017. – С. 224-227.

Нейромережева Модель Біометричної Ідентифікації Людини по Геометрії Обличчя

Юрій Кулаков

кафедра обчислювальної техніки
Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Київ, Україна
info@comsys.kpi.ua

Олег Терейковський

кафедра обчислювальної техніки
Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Київ, Україна
tereikovskiyo@ukr.net

Article Neural Network Model of Biometric Identification of a Person by Geometry of a Face

Yuriy Kulakov

dept. of Computer Engineering
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky
Kyiv Polytechnic Institute"
Kyiv, Ukraine
info@comsys.kpi.ua

Oleh Tereikovskiy

dept. of Computer Engineering
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky
Kyiv Polytechnic Institute" University
Kyiv, Ukraine
tereikovskiyo@ukr.net

Анотація—Стаття присвячена вирішенню науково-прикладної задачі підвищення ефективності засобів ідентифікації людини по геометрії обличчя, що використовуються в інформаційних системах загального призначення. Визначена можливість підвищення ефективності ідентифікації за рахунок нівелювання завад характерних для інформаційних систем загального призначення. Показано, що перспективним шляхом нівелювання таких завад є інтеграція в засоби ідентифікації сучасних типів нейромережевих моделей пристосованих для аналізу зашумлених зображень. Обґрунтована доцільність застосування капсульної нейронної мережі, що являється розвитком загорткової нейронної мережі адаптованим до розпізнавання повернутих та розмитих зображень. В результаті проведених досліджень розроблена нейромережева модель типу CapsNet, призначена для ідентифікації користувача з можливістю урахування повороту обличчя, що є характерною завадою розпізнавання для інформаційних систем загального призначення особи. Перспективи подальших досліджень в області нейросетевий ідентифікації користувача по геометрії обличчя можуть бути пов'язані з удосконаленням архітектурних рішень капсульної нейронної мережі в напрямку зменшення кількості навчальних ітерацій при забезпеченні прийнятної точності розпізнавання. Крім цього підвищення ефективності засобів нейромережевої ідентифікації користувача пов'язане із забезпеченням класифікації розмитого і частково прихованого зображення обличчя.

Abstract—The article is devoted to the solution of the scientific and applied task of increasing the efficiency of human

identification tools in facial geometry, used in information systems of general purpose. The possibility of increasing the identification efficiency due to the leveling of noise characteristic for information systems of general purpose is determined. It is shown that the perspective way of leveling such impediments is to integrate in the means of identification of modern types of neural network models adapted for the analysis of noisy images. The expediency of using the capsule neural network, which is the development of the firewall neural network adapted to the recognition of returned and blurred images, was substantiated. As a result of the research, a neural network model CapsNet designed to identify the user with the ability to take into account the face rotation, is a characteristic barrier to recognition for general-purpose information systems. Prospects for further research in the area of user geometry of the user's neural network identification can be related to the improvement of architectural solutions of the capsular neural network in the direction of reducing the number of training iterations while providing acceptable accuracy of recognition. In addition, the increase in the efficiency of the means of neural network identification of the user is associated with ensuring the classification of blurry and partially hidden image of the face.

Ключові слова—нейромережева модель; капсульна нейронна мережа; ідентифікація особи; геометрія обличчя

Keywords—neural network model; capsule neural network; identification of a person; facial geometry

I. ВСТУП

В даний час однією з найбільш значущих тенденцій еволюції систем захисту інформації є активне впровадження засобів біометричної ідентифікації користувачів. Це обумовлюється збільшенням потоків конфіденційної інформації, доведеними принциповими недоліками класичних систем ідентифікації користувачів, а також об'єктивними вимогами щодо забезпечення негласного і дистанційного функціонування систем контролю доступу. Крім цього підвищена увага до біометричних технологій ідентифікації пояснюється існуванням широкого кола комерційних і соціальних програм, де автоматична ідентифікація людини може бути прийнята досить успішно [1, 7-9].

Аналіз сучасних систем біометричної ідентифікації вказує на те, що в більшості з них в якості біометричного ключа використовуються геометричні параметри рук або вух, «клавіатурний почерк», геометричні параметри рукописних символів, малюнок кровоносних судин на руках або поверхні дна ока, голос, малюнок шкірних покривів пальців користувача (відбитки пальців), а також геометричні параметри обличчя людини. До переваг останніх відносять можливість негласного контролю, високу апробованість і низьку вартість зчитувальних пристроїв. Перспективність біометричних систем ідентифікації користувача на підставі розпізнавання геометрії його обличчя підтверджується як досить широким поширенням подібних засобів ідентифікації, так і великою кількістю відповідних теоретико-практичних досліджень, аналіз яких проведено в [1-10]. Як правило, базою сучасних рішень в області біометричної ідентифікації на основі аналізу геометрії обличчя є різні типи згорткової нейронної мережі (CNN). Інші типи апробованих типів нейромережевих моделей менш ефективні як з точки зору точності розпізнавання, так і з точки зору ресурсоемності. Крім CNN, в засобах розпізнавання для врахування часових залежностей іноді додатково використовуються рекурентні нейронні мережі типу LSTM. В той же час практичний досвід і дані [1, 8] вказують на необхідність підвищення рівня адаптації сучасних нейромережевих моделей ідентифікації користувача до типових перешкод, що виникають при фіксації зображення особи в інформаційних системах загального призначення. Таким чином, **метою** даного дослідження є розробка нейромережевої моделі, що дозволяє реалізувати ідентифікацію користувача на підставі геометрії обличчя людини при впливі перешкод характерних для інформаційних систем загального призначення.

II. РОЗРОБКА НЕЙРОМЕРЕЖЕВОЇ МОДЕЛІ

Проведемо деяке уточнення постановки задачі ідентифікації користувача. Припустимо, необхідність ідентифікації користувача на підставі статичних зображень обличчя потоку людей, зафіксованих за допомогою відеокамер із середніми характеристиками. При цьому питання пов'язані з попередньою фільтрацією зображення, впливом освітленості, виділення на зображенні обличчя окремої особи і нівелювання свідомого спотворення

обличчя людини з метою приховування ним своєї особистості не розглядається. Результати [2-4, 6] вказують на те, що в цьому випадку в інформаційних системах загального призначення основні перешкоди виникають в результаті повороту зображення обличчя людини. Відповідно до [5] усунути дані недоліки можливо за рахунок використання нейромережевої моделі на базі капсульної нейронної мережі, яка є модифікацією CNN пристосованої до аналізу повернутих і зашумлених зображень.

В основу розроблюваної моделі покладена неглибока капсульна нейронна мережа типу CapsNet, запропонована в [5, 6]. Відзначимо, що CapsNet дозволяє не тільки розпізнати аналізоване зображення, але провести його декодування, тобто відновити еталон зображення. Таким чином мережу можна умовно розділити на модуль розпізнавання і модуль декодування. Структура модулю розпізнавання показана на рис. 1, а структура модулю декодування – на рис.2. Зазначимо, що структура цих модулів адаптована до задачі ідентифікації користувача.

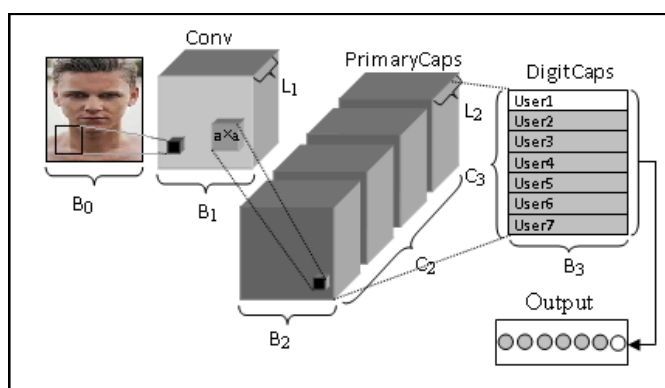


Рис. 1. Модуль розпізнавання нейронної мережі CapsNet

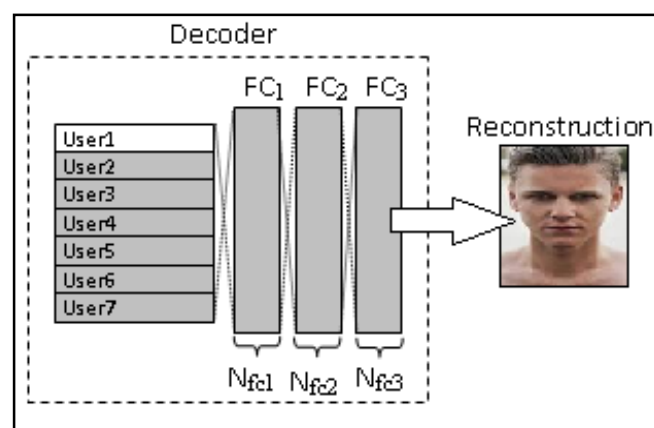


Рис. 2. Модуль реконструкції нейронної мережі CapsNet

Основними структурними одиницями модулю розпізнавання мережі CapsNet є: вхідний шар нейронів, який відповідає аналізованому зображенню, згортковий шар (Conv), шар первинних капсул (PrimaryCaps) і шар згортальних капсул (DigitCaps), кожна з яких відповідає одному з розпізнаються станів. У блок декодування додатково входять три пов'язаних шару нейронів (FC₁,

FC₂, FC₃). Для прикладу на рис. 1 показано, що вихідний сигнал шару DigitCaps свідчить про розпізнанні радісного стану. Також на рис. 2 показано реконструйоване зображення особи, яке відповідає активації нейронів шару FC₃.

На рис. 1, 2 використані наступні позначення, що відповідають параметрам мережі CapsNet:

- V_0 - вертикальний і горизонтальний розмір зображення, що підлягає аналізу.
- V_1 - розмір карт ознак шару згортки Conv.
- V_2 - розмір сітки в шарі PrimaryCaps.
- V_3 - кількість одиниць згортки в кожній з капсул кінцевого шару DigitCaps.
- C_2 - кількість каналів в шарі PrimaryCaps.
- C_3 - кількість капсул в шарі DigitCaps.
- L_1 - кількість карт ознак в шарі Conv.
- L_2 - кількість згортальних одиниць в кожному каналі шару PrimaryCaps.
- a - розмір ядра згортки.
- N_{fc1} , N_{fc2} , N_{fc3} - кількість нейронів в першому, другому і третьому (вихідному) повнозв'язну шарі декодера.

По аналогії з класичною капсульною мережею розмір ядра згортки $a = 9$, крок ядра згортки для Conv $d_1 = 1$, крок ядра згортки для PrimaryCaps $d_2 = 2$, кількість карт ознак $L_1 = 256$, кількість каналів в шарі PrimaryCaps $C_2 = 32$, кількість згортальних одиниць в шарі PrimaryCaps $L_2 = 8$, кількість згортальних одиниць в кожній з капсул шару DigitCaps $V_3 = 8$, величина доповнення кордону вхідного зображення $r_1 = 1$, величина доповнення кордону карт ознак для шару Conv $r_2 = 0$. Чисельні значення інших архітектурних параметрів нейросетевий моделі визначено на підставі даних [10] з урахуванням кількості розпізнаються користувачів і розмірів аналізованих зображень. Розмір вхідного зображення $V_0 = 48$, розмір карт ознак згорткового шару $V_1 = 41$, розмір сітки в шарі PrimaryCaps $V_2 = 17$, кількість капсул в шарі DigitCaps дорівнює кількості розпізнаються користувачів $C_3 = 7$, кількість нейронів в першому повнозв'язну шарі $N_{fc1} = 512$, кількість нейронів у другому повнозв'язну шарі $N_{fc2} = 1024$, кількість нейронів в третьому повнозв'язну шарі дорівнює кількості пікселів в розпізнається зображенні $N_{fc3} = 2304$.

Розрахунок вхідних і вихідних сигналів для нейронів в шарах Conv, FC₁, FC₂, FC₃ відповідає розрахункам в згорткових нейронних мережах [8, 10]. При цьому в шарах Conv, FC₁, FC₂ використовується функція активації ReLU:

$$y = \max(0, x), \quad (1)$$

де x - сумарний вхідний сигнал нейрона, y - вихідний сигнал

В шарі FC₃ використовується сигмоїдальна функція активації виду:

$$y = 1 / (1 + \exp(-x)) \quad (2)$$

Вхідний сигнал деякого нейрона шару Conv розраховується так:

$$x_k^{(i,j)} = x_{0,k} + \sum_{s=1}^a \sum_{t=1}^a w_{k,s,t} x^{(i+s,j+t)}, \quad (3)$$

де $x_k^{(i,j)}$ - вхідний сигнал (i, j)-го нейрону k-ої карти ознак, $x_{0,k}$ - зміщення нейронів k-ої карти ознак, a - розмір ядра згортки, $w_{k,s,t}$ - ваговий коефіцієнт (s, t) -го синаптичного зв'язку нейрона k-ої карти ознак, $x_0^{(i,j)}$ - значення вхідного сигналу (i, j) -го нейрону вхідного шару.

При цьому розрахунок вхідних і вихідних сигналів капсул реалізується і використанням виразів (4-9).

$$v_j = \frac{\|s_j\|^2}{1 + \|s_j\|^2} \frac{s_j}{\|s_j\|}, \quad (4)$$

$$s_j = \sum_{i=1}^{C_3} (c_{i,j} \hat{u}_{ji}), \quad (5)$$

$$\hat{u}_{ji} = W_{i,j} u_i, \quad (6)$$

$$c_{i,j} = \exp(b_{i,j}) / \sum_{k=1}^{C_3} \exp(b_{i,k}), \quad (7)$$

$$\Delta b_{i,j} = v_j \hat{u}_{ji}, \quad (8)$$

$$b_{i,j} = b_{i,j} + \Delta b_{i,j}, \quad (9)$$

де v_j - вихідний вектор j-ої капсули в шарі DigitCaps, s_j - складова j-ої капсули шару DigitCaps в вихідному сигналі мережі, $c_{i,j}$ - ваговий коефіцієнт ступеня узгодженості між i-ою капсулою в шарі PrimaryCaps і j-ою капсулою в шарі DigitCaps, \hat{u}_{ji} - прогнозована величина вихідного сигналу i-ої капсули в шарі PrimaryCaps, $W_{i,j}$ - матриця вагових коефіцієнтів зв'язків між i-ою капсулою в шарі PrimaryCaps і j-ою капсулою в шарі DigitCaps, $b_{i,j}$ - логарифм ймовірності зв'язку між i-ою капсулою в шарі PrimaryCaps і j-ою капсулою в шарі DigitCaps, u_i - вихідний сигнал (вектор) i-ої капсули в шарі PrimaryCaps, $\Delta b_{i,j}$ - корегуючий коефіцієнт при розрахунку $b_{i,j}$.

Відзначимо, що вираз виду (4) представляє собою так звану squash-функцію, а вираз виду (7) - функцію softmax.

Процес навчання нейромережевої моделі полягає в тому, щоб k-а капсула в шарі PrimaryCaps мала довгий вектор реалізації тільки для зображень з відповідним користувачем. Для цього мінімізується функціонал виду:

$$\sum_{k=1}^K E_k \rightarrow \min, \quad (10)$$

$$E_k = T_k \max(0, m^+ - \|v_k\|)^2 + \lambda(1 - T_k) \max(0, \|v_k\| - m^-)^2, \quad (11)$$

де $K = C_3$ - кількість капсул в шарі PrimaryCaps.

При цьому для капсули, яка відповідає k-ому користувачеві $T_k = 1$ тільки якщо на зображенні цей користувач відображається. В протилежному випадку $T_k = 0$. Значення інших коефіцієнтів $m^+ = 0,9$, $m^- = 0,1$, $\lambda = 0,5$.

Для навчання та тестування розробленої нейромережевої моделі використана сформована авторами база даних. В базі даних представлені 280 jpg-файлів з фотографіями обличчя 7 людей. На 140 фотографіях обличчя зафіксовані у фронтальній проекції, на інших 140 фотографіях обличчя зафіксовані у повернутому стані. Кут повороту від -60° до $+60^\circ$. Приклади фоторафій частково показані на рис.3. Кожна фотографія представляє собою зображення в відтинках сірого, з роздільною здатністю 48×48 пікселів.



Рис. 3. Приклади фоторафій обличчя користувачів

На першому етапі досліджень проведено експерименти з ідентифікації користувача на основі аналізу геометрії фронтального, добре освітленого зображення обличчя людини. Другий етап досліджень пов'язаний з ідентифікацією користувача на основі аналізу зображень повернутого обличчя людини. В результаті експериментів визначено, що середня точність ідентифікації на основі фронтального зображення обличчя дорівнює близько 97%, а середня точність ідентифікації становить близько 83%.

Досягнута точність в цілому відповідає подібним сучасним рішенням в області біометричної аутентифікації користувачів і підтверджує перспективність запропонованих рішень.

III. ВИСНОВКИ

В результаті проведених досліджень розроблена нейромережева модель типу CapsNet, призначена для ідентифікації користувача з урахуванням такої характерної для інформаційних систем загального призначення задачі розпізнаванню, як поворот обличчя.

Перспективи подальших досліджень в області нейросетової ідентифікації користувача по геометрії обличчя можуть бути пов'язані з удосконаленням архітектурних рішень капсульної нейронної мережі в напрямку зменшення кількості навчальних ітерацій при забезпеченні прийнятної точності розпізнавання. Крім цього підвищення ефективності засобів нейромережевої ідентифікації користувача пов'язане із забезпеченням класифікації розмитого і частково прихованого зображення обличчя.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Anderson K., McOwan Peter W. A realtime automated system for the recognition of human facial expressions // Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on , vol.36, no.1, pp.96-105, 2006.
- [2] O. Ertugrul, L. A. Jeni and J. F. Cohn, "FACSCaps: Pose-Independent Facial Action Coding with Capsules," 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), Salt Lake City, UT, 2018, pp. 2211-221109. doi: 10.1109/CVPRW.2018.00287.
- [3] S. Ghosh, E. Laksana, S. Scherer, and L.-P. Morency. A multi-label convolutional neural network approach to crossdomain action unit detection. In Affective Computing and Intelligent Interaction (ACII), 2015 International Conference on, pages 609–615. IEEE, 2015.
- [4] A. Gudi, H. E. Tasli, T. M. Den Uyl, and A. Maroulis. Deep learning based face action unit occurrence and intensity estimation. In Automatic Face and Gesture Recognition (FG), 2015 11th IEEE International Conference and Workshops on, volume 6, pages 1–5. IEEE, 2015.
- [5] G. Hinton, S. Sabour and N. Frosst, "Matrix capsules with EM routing", ICLR 2018 Conference, Vancouver Convention Center, Vancouver, BC, Canada April 30 - May 3, 2018.
- [6] J. He, D. Li, B. Yang, S. Cao, B. Sun, and L. Yu. Multi view facial action unit detection based on cnn and blstmrnn. In Automatic Face & Gesture Recognition (FG 2017), 2017 12th IEEE International Conference on, pages 848–853. IEEE, 2017.
- [7] Y Kulakov, R. Rader // Computing Resources Scaling Survey // Of the v international scientific conference Advanced information systems and technologies Aist-2017 (Sumy, may 17–19, 2017) Sumy Sumy state university 2017, C.- 111-1,14 2017.
- [8] Tereykovska, L., Tereykovskiy, I., Aytkhozaeva, E., Tynymbayev, S., Imanbayev, A. (2017), "Encoding of neural network model exit signal, that is devoted for distinction of graphical images in biometric authenticate systems", News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences, Volume 6, Number 426, pp. 217 – 224, 2017.
- [9] Z.Wang, Y. Li, S.Wang, and Q. Ji. Capturing global semantic relationships for facial action unit recognition. In Computer Vision (ICCV), 2013 IEEE International Conference on, pages 3304–3311. IEEE, 2013.
- [10] K. Zhao, W.-S. Chu, and H. Zhang. Deep region and multilabel learning for facial action unit detection. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pages 3391–3399, 2016.

СЕКЦІЯ 6.

Архітектоніка та компоненти комп'ютерних систем та мереж

SECTION 6.

Components, computer systems and networks architectonics

Дослідження Системних Характеристик Прискорювачів Арифметико-Логічних Операцій

Аліна Давлетова
кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Тернопільський національний економічний університет
Тернопіль, Україна
a7davletova@mail.com

Research of Systemic Characteristics of Accelerators of Arithmetic-Logical Operations Article

Alina Davletova
dept. of specialized computer systems
Ternopil National Economic University
Ternopil, Ukraine
a7davletova@mail.com

Анотація—Визначені мінімальні вимоги базових параметрів компонентів спеціалізованих комп'ютерних систем. Класифіковані прискорювачі арифметико-логічних операцій. Досліджені їх системні характеристики. Оптимізовані системні характеристики логічного елемента XOR. Запропоновані повнофункціональні структури неповних та повних двійкових суматорів.

Abstract—Minimal requirements of the basic parameters of components of specialized computer systems are defined. Classified accelerators of arithmetical and logical operations. Their system characteristics are investigated. Optimized of systemic characteristics of logic element XOR. Proposed a full-functional structures of binary half adders and full adders

Ключові слова—компонент; прискорювач арифметико-логічних операцій; логічний елемент; системні характеристики.

Keywords— component; accelerator of arithmetical and logical operations; logical element; systemic characteristics.

I. ВСТУП

Інтенсивне зростання об'ємів інформаційних потоків у сучасних комп'ютеризованих системах та суттєве підвищення математичної та алгоритмічної складності обчислювальних задач, які охоплюють процеси статистичного, кореляційного, спектрального аналізу, стиснення та захисту даних, розпізнавання образів та інше, визначає актуальність оптимізованого вирішення теоретичних та схемотехнічних задач обчислювальної техніки на основі критеріїв максимального підвищення швидкодії та зменшення апаратної складності універсальних мікропроцесорів та проблемно-орієнтованих спецпроцесорів (ПОС). Потужний розвиток у

галузі оптимізації обчислень у наш час отримали комп'ютерні системи на базі універсальних процесорів, спеціалізованих процесорів, а також вбудованих систем.

Реалізація швидкодії алгоритмів з високою швидкістю на основі універсальних спецпроцесорів та двійкової арифметики бюазису Радемахера вже практично вичерпало свої ресурси. Тому перспективним напрямком розвитку теорії, технології та схемотехніки прискорювачів обчислювальних операцій є застосування вбудованих систем та спецпроцесорів в базисах залишкових класів [1].

Особливістю такого класу процесорів є багаторозрядність, яка перевищує 1024, 2048 і більше біт. Наявність великого числа розрядів необхідна при виконанні модульних арифметичних операцій в алгоритмах шифрування даних RSA, Ель-Гамала та еліптичних кривих [2]. Наприклад у задачі обчислення дискретного логарифму $a^x \pmod{P}$ з розрядністю двійкових кодів 1024 біт необхідно $1024 \cdot 5 \cdot 1024 \cdot 1024$ – мікротактів логічних вентилів, що навіть при тактовій частоті процесора більше 10 Гц не забезпечує повнорозрядне шифрування даних у реальному часі, тобто зі швидкістю 0,1-10 Гбіт/с. Тому розробка архітектура високопродуктивних матричних прискорювачів операції множення у базисах Радемахера та Хаара є актуальною проблемою.

II. КЛАСИФІКАЦІЯ ПРИСКОРЮВАЧІВ АРИФМЕТИКО-ЛОГІЧНИХ ОПЕРАЦІЙ

Спеціалізовані комп'ютерні системи (СКС) відрізняються від універсальних та інших класів комп'ютерних систем умовами максимізації або мінімізації системних характеристик їх компонентів. Виходячи з

ресурсних характеристик системних об'єктів глобальної моделі СКС, які описуються узагальненим функціоналом:

$$E_{co} = F(T, V, M, S),$$

де T – час використання ресурсу, V – швидкість виконання системних операцій (формування, передавання, цифрова обробка та зберігання даних), M – об'єм використовуюваного ресурсу пам'яті, S – системні функції.

До характеристик кортежу функціоналу, на відміну від універсальних комп'ютерних систем, висуваються особливі мінімаксні вимоги наступного виду:

$$T = \min \vee \max; \quad V = \min \vee \max; \quad M = \min \vee \max;$$

$$S = \min \vee \max.$$

Вказані вимоги визначають базові параметри компонентів СКС в залежності від класу, характеристик стаціонарності, екологічної безпеки, вибухонебезпечності, особливих умов експлуатації (великі глибини в морі, підземні об'єкти, космічні, стратегічні та ін. об'єкти).

Найчастіше одночасне досягнення суперечливих умов до системних характеристик компонентів СКС є в принципі неможливим або недоцільним. Тому задачі проектування та створення ефективних в архітектурному, функціональному та інформаційному аспектах є багатоваріантними з нечітко вираженими оптимумами, що потребує диференціації проектних рішень, стратегій проектування та побудови значного числа інформаційних моделей об'єктів управління, що обслуговують СКС. Таким чином вдосконалення компонентів вбудованих систем, систем шифрування та захисту інформації, а також спеціалізованих та проблемно-орієнтованих процесорів, які забезпечували б реалізацію обчислень з максимальною швидкістю та мінімальною апаратною складністю потребує глибокого теоретичного та прикладного схемотехнічного обґрунтування системних характеристик мікроелектронних компонентів обчислювальних засобів починаючи з реалізації логічних елементів.

Аналіз існуючих засобів та алгоритмів обчислень дозволяє встановити наступні класи прискорювачів арифметико-логічних операцій (АЛО):

- складні логічні елементи, що реалізують функції типу «виключаючи АБО», «виключаючи І» та імплікація;
- однорозрядні неповні та повні двійкові суматори з однофазними входами та виходами;
- однорозрядні суматори з парафазними входами та виходами;
- багаторозрядні пірамідальні суматори;
- багаторозрядні суматори з прискореними переносами;
- квадратори та інтегруючі квадратори;
- пристрої визначення Хеммінгової віддалі на основі модульної різниці;
- матричні перемножувачі на основі однофазних суматорів;
- матричні перемножувачі на основі парафазних суматорів;
- потокові матричні перемножувачі.

III. ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛОГІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Існують різні схемотехнічні реалізації логічного елемента «виключаюче АБО», структури яких наведені на рис. 1[3].

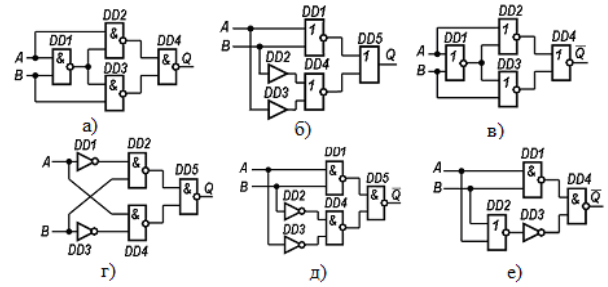


Рис. 1. Класична реалізація логічного елемента «виключаюче АБО»

З рис. 1 видно, що відомі реалізації логічного елемента «виключаюче АБО» характеризуються часовою затримкою сигналу на 3 мікротакти та апаратною складністю 4-5 вентилів. Недоліком існуючих рішень є відсутність парафазних входів. Застосування парафазних входів у XOR дозволяє суттєво підвищити його швидкодію до затримки сигналів на мікротакт та зменшити апаратну складність на основі двох логічних елементів І-НЕ з об'єднанням виходів шляхом виконання логічної функції $XOR = \overline{a \wedge b} \vee \overline{a \wedge \overline{b}}$, що показано на рис. 2а.

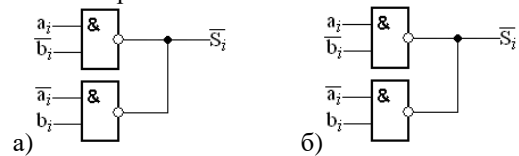


Рис. 2. Логічний елемент XOR з парафазними входами

Вперше застосування таких елементів запропоновано [4] при побудові однорозрядних двійкових суматорів. Функціональні обмеження такої реалізації прискорювачів виконання логічної операції XOR є наявність парафазних входів, що може потребувати додаткового введення на їх входах інвертуючих вентилів, що приводить до зниження їх швидкодії у 2 рази, що показано на рис.2б.

Використання логічних елементів реалізованих на мікроелектронній технології ЕЗЛ передбачає наявність транзисторів на виходах логічних елементів І-НЕ та АБО, що дозволяє об'єднувати їх виходи без втрати функцій та реалізувати логічний елемент «Провідне І». В роботі [5] запропоноване схемотехнічне рішення логічного елемента XOR шляхом реалізації нової логічної функції АБО-І, яка описується рівнянням $XOR = \overline{a \wedge b} \vee a \vee b$.

Структура такого логічного прискорювача показана на рис. 3.

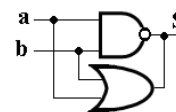


Рис. 3. Структура логічного прискорювача операції XOR

У результаті системні характеристики запропонованого логічного елемента XOR складають: затримка сигналів $\tau_{XOR} = 1$ мікротакт, апаратна складність $A_{XOR} = 2$ елементи. Запропонована схемотехнічна реалізація логічної функції XOR дозволила суттєво оптимізувати системні характеристики практично всіх класифікованих типів прискорювачів.

IV. ВДОСКОНАЛЕННЯ СХЕМОТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ТА ПОКРАЩЕННЯ СИСТЕМНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОРЗЯДНИХ НЕПОВНИХ СУМАТОРІВ

Існують різні класи однорзрядних суматорів, які характеризуються різним ступенем повоти входів та виходів. На рис. 4 показані матриці напівсуматора з однофазними входами та виходами (рис.4.а) та повнофункціональних однорзрядних неповних суматорів двійкової арифметики з парафазними входами та виходами (рис.4б).

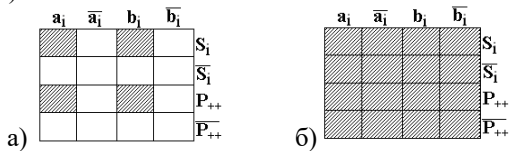


Рис. 4. Функціональні матриці однорзрядних неповних суматорів

На рис. 5 показані відомі схемотехнічні рішення однорзрядних неповних суматорів на логічних елементах І, АБО, НЕ, що відповідають функціональній матриці на рис. 4а.

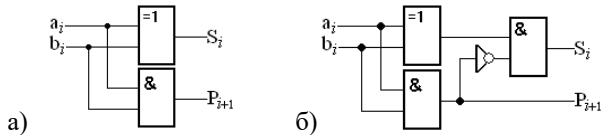


Рис. 5. Схемотехнічні рішення однорзрядних неповних суматорів

Структура неповного суматора рис 5а містить реалізацію елемента XOR на основі 5 логічних елементів (рис. 1б). Виходи S_i та P_{i+1} описуються наступними рівняннями: $S_i = a \wedge \bar{b} \vee \bar{a} \wedge b$, $P_{i+1} = a \wedge b$. Вихідні сигнали структури суматора (рис. 5б) описуються логічними рівняннями $S_i = a \vee b \vee \overline{a \wedge b}$, $P_{i+1} = a \wedge b$. Системні характеристики відомих реалізацій однорзрядних неповних суматорів наведених на рис. 5 наступні: $\tau_{S_i} = 3$, $A_{S_i} = 2 - 4$.

В окремих, випадках, в прискорювачах АЛО використовуються однорзрядні неповні суматори з обмеженим числом функціональних входів та виходів, які описуються наступними функціональними матрицями (рис.6).

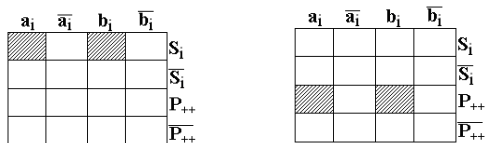


Рис. 6. Функціональні матриці однорзрядних неповних суматорів з обмеженим числом функціональних входів та виходів

Більш швидкодіючими є неповні однорзрядні суматори з парафазними входами та однофазними виходами, функціональна матриця таких суматорів наведена на рис. 7а, а приклад їх схемотехнічних рішень - на рис. 7б.

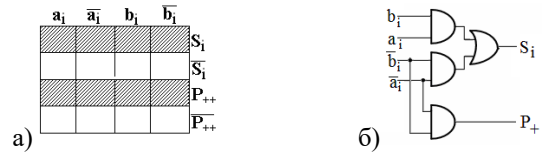


Рис. 7. Функціональна матриця (а) та схемотехнічне рішення (б) неповного однорзрядного суматора з парафазними входами та однофазними виходами

Системні характеристики неповного однорзрядного суматора з парафазними входами та однофазними виходами: $\tau_{S_i} = 2$, $\tau_{P_{i+1}} = 1$, $A_{S_i} = 3$, $A_{P_{i+1}} = 1$.

Оптимізувати характеристики часової складності, яка є ключовою у задачі максимального підвищення швидкодії суматорів, дозволяють повнофункціональні архітектури, тобто напівсуматори з наявністю всіх прямих та інверсних входів та виходів (рис.8).

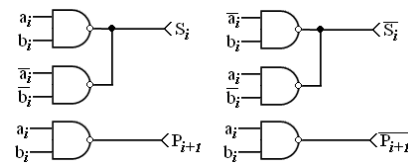


Рис. 8. Структура однорзрядного неповного суматора з повнофункціональними входами та виходами

Застосування такого класу компонентів цифрової техніки при побудові багаторзрядних спецпроцесорів, додавання великого числа двійкових кодів, матричних перемножувачів у базисі Радемахера та Крестенсона, квадраторів, степеневих обчислювачів по модулю, а також спецпроцесорів міжбазисних перетворень Радемахера-Крестенсона та Хаара-Крестенсона дозволяє покращити їх системні характеристики.

V. ВДОСКОНАЛЕННЯ СХЕМОТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ТА ПОКРАЩЕННЯ СИСТЕМНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОРЗЯДНИХ НЕПОВНИХ СУМАТОРІВ

Відомі структури [6] повних однорзрядних суматорів з однофазними входами та виходами на логічних елементах І, АБО, НЕ наведені на рис. 9.

Системні характеристики широковживаних схемотехнічних рішень повних однорзрядних суматорів наведених на рис. 9 наступні: $\tau_{S_i} = 3 - 5$, $A_{S_i} = 5 - 9$.

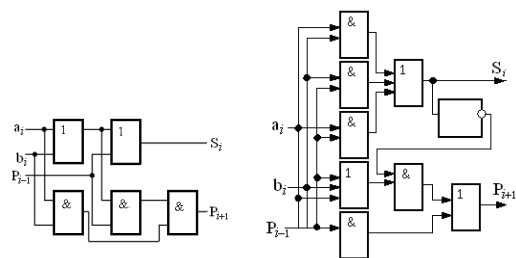


Рис. 9. Схемотехнічні рішення повних однорзрядних суматорів

Функціональна матриця повних однорозрядних двійкових суматорів з однофазними входами та виходами наведена на рис. 10.

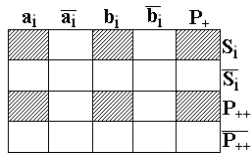


Рис. 10. Функціональна матриця однорозрядних повних суматорів з однофазними входами та виходами

Аналіз системних характеристик однорозрядних суматорів показує, що їх архітектури не є повнофункціональними, тобто не мають прямих та інверсних входу-виходів, що не дозволяє оптимізувати їх мінімаксні характеристики, особливо - часової складності.

VI. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВНИХ ОДНОРОЗЯДНИХ СУМАТОРІВ З ПАРАФАЗНИМИ ВХОДАМИ ТА ВИХОДАМИ

На рис. 11 показана структура однорозрядного суматора з повнофункціональними входу-виходами.

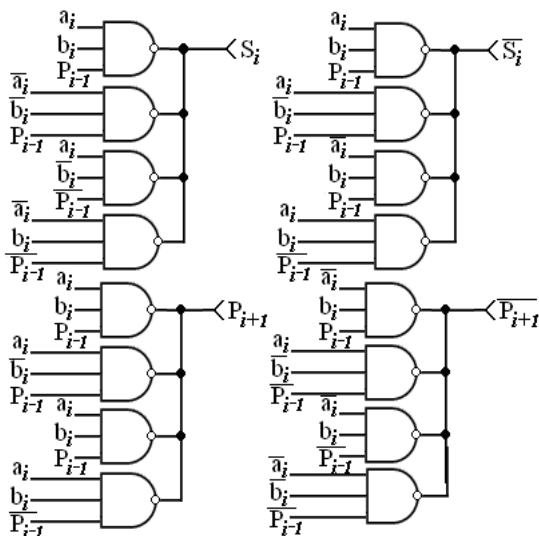


Рис. 11. Структура однорозрядного суматора з повнофункціональними входу-виходами

Структура однорозрядного суматора з характеризується наступними системними характеристиками: часової - $\tau = 1$ та апаратної складності $A = 16$. При побудові багаторозрядних суматорів відповідно часова складність складатиме $\tau = n$, де n - розрядність суматора, яка досягається за рахунок реалізації їх оснащення повнофункціональним набором входу-виходів та незначного зростання апаратної складності.

Використання такого класу сумматорів в якості компонентів спеціалізованих та проблемно-орієнтованих процесорів, а також вбудованих систем, систем шифрування та захисту інформації, забезпечувало б реалізацію обчислень з максимальною швидкістю та мінімальною апаратною складністю.

Функціональна матриця повних однорозрядних двійкових суматорів з парафазними входами та виходами наведена на рис.12.

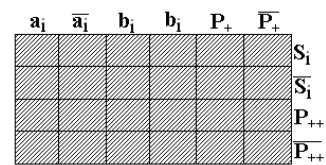


Рис. 12. Функціональна матриця повних одно розрядних двійкових суматорів з парафазними входами та виходами

ВИСНОВКИ

Запропоновані повнофункціональні структури неповних та повних двійкових суматорів можуть бути використані як компоненти багаторозрядних суматорів, арифметико-логічних пристроїв, міжбазисних перетворень та матричних перемножувачів, що дозволить в 5-8 разів зменшити часову складність компонентів багаторозрядних проблемно-орієнтованих процесорів і відповідно підвищити на 1-2 порядки реалізацію алгоритмів шифрування даних на основі модульної арифметики.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Николайчук Я.М., Коды поля Галуа: теория та застосування, Тернопіль, Терно-граф, 576 с., 2012.
- [2] Круліковський Б.Б., Давлетова А.Я., Кімак В.Л. «Системні характеристики компонентів багаторозрядних процесорів шифрування даних», ICSM-2014, Тернопіль, с.105-107с. 2014.
- [3] Шило В.Л. Популярные цифровые микросхемы: Справочник, М: Радио и связь, 352с., 1988.
- [4] Карцев М.А. Арифметика цифровых машин, М.: Наука, 535 с., 1969.
- [5] Давлетова А.Я., Николайчук Я.М. Пат.115861 Україна МПК G06F 7/00 (2017.01) / Однорозрядний напівсуматор / №u2016 12463; заявл.07.12.2016; опубл. Бюл. №8, 25.04.2017.
- [6] Boris Krulikovskiy, Nataliia Vozna, Volodymyr Kimak, Davletova Alina "The Method to Optimize Structural, Hardware and Time Complexities Characteristics Multi-Bit Adders of Special Processors for Data Encryption", Modern Problem of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: proceedings of the XIII th International Conference TSET', pp. 455-459, 2016.

Моделювання Елементів Мікросистем-на-Кристали зі Структурами «Кремній-на-Ізоляторі» для Біомедичних Досліджень

М.В.Котик, І.Т.Когут, Т.Г.Бенько
кафедра комп'ютерної інженерії та електроніки
Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,
Івано-Франківськ, Україна.
mikot@i.ua

Modeling Elements System-on-Chip with Structures "Silicon-on-Insulator" for Biomedical Research

М. Kotyk, I. Kogut, T. Benko
Department of Computer Engineering and Electronics
Vasyl Stefanyk Precarpathian National University,
Ivano-Frankivsk, Ukraine.
mikot@i.ua

Анотація— В роботі наведено результати проектування та моделювання керуючих та чутливих елементів схем для систем біомедичного неінвазивного дослідження контролю рівня глюкози в крові з використанням мікросистем-на-кристалі (МнК) зі структурами кремній-на-ізоляторі (КНІ). Розробка таких компонентів дає змогу забезпечення високого рівня чутливості, що є критично важливим для пристроїв такого типу.

Abstract— The paper presents the results of design and modeling and control of sensitive elements of circuits for biomedical research noninvasive monitoring of blood glucose using a systems-on-chip (SoC) structures with silicon-on-insulator (SOI). Development of these components allows ensuring a high level of sensitivity, which is critical for devices of this type.

Ключові слова— мікросистема-на-кристалі, фоточутливі елементи, кремній-на-ізоляторі, біомедичні пристрої, кільцевий генератор.

Keywords— system-on-chip, photosensitive elements, silicon-on-insulator, biomedical devices, ring oscillator.

I. ВСТУП

Важливими елементами мікросистем-на-кристалі (МнК) є кільцеві генератори (КГ), що можуть бути використані як складові у схемах реєстрації інформації про зміни фізичних величин від різних типів сенсорних елементів (СЕ), зокрема ємнісних, резистивних, світлочутливих, транзисторного типу та інших. Окрім цього, кільцеві генератори є інформативним об'єктом для оцінки параметрів елементної бази з новими і

малодослідженими технологіями та можуть бути джерелом імпульсних сигналів в інтегральних схемах і сенсорних мікросистемах-на-кристалі [1].

Аналіз існуючих мікроелектронних технологій показує, що найбільш перспективною конструктивно-технологічною базою для створення таких систем видаються структури «кремній-на-ізоляторі» (КНІ), які завдяки своїм переважачим властивостям щодо електричних характеристик, споживаної потужності, стійкості до зовнішніх впливів (висока/низька температура, підвищений рівень радіації, сильні магнітні поля і т.д.) є суттєво кращими порівняно з відомими на об'ємному кремнії. Окрім того, КНІ-структури мають суттєві переваги як конструктивний матеріал для створення нових приладних елементів, в тому числі як і з новими тривимірними конструкціями, так і можливостями інтеграції з герметизованими або негерметизованими мікропорожнинами під поверхнею кремнієвої пластини [2]. Це відкриває додаткові перспективи створення нових інтегрованих приладних структур і дозволить розширити функціональні можливості сенсорних мікросистем-на-кристалі, розширить сфери їх застосування [1,2].

В статті наведено результати схематологічного моделювання розроблених електричних схем, топології КГ генераторів на основі КНІ структур, що складаються з непарної кількості інверторів. Також досліджено частотні та енергетичні характеристики КГ залежно від їх схематехнічної та конструктивно-технологічної реалізації. Спроековано і промодельовано схеми первинного

перетворення інформації від інтегральних чутливих елементів (ЧЕ) для МнК

II. КІЛЬЦЕВИЙ ГЕНЕРАТОР, ЯК ЧУТЛИВИЙ ЕЛЕМЕНТ МНК

При моделюванні КГ були використані КНІ КМОН n- і p-канальні транзистори з топологічними розмірами $W=10$ мкм, $L=2$ мкм та $W=20$ мкм, $L=2$ мкм відповідно. У всіх досліджуваних схемах напруга живлення становила від 2,5 В до 5 В.

Запропонована схема на основі послідовно з'єднаних КМОН інверторів дозволяє суттєво підвищити чутливість опрацювання сигналів, отриманих від оптичних сенсорів, що є критично важливим для біомедичних досліджень, зокрема неінвазивних досліджень рівня глюкози в крові.

Електрична схема кільцевого генератора з використанням керуючого n-канального транзистора на рис.1.

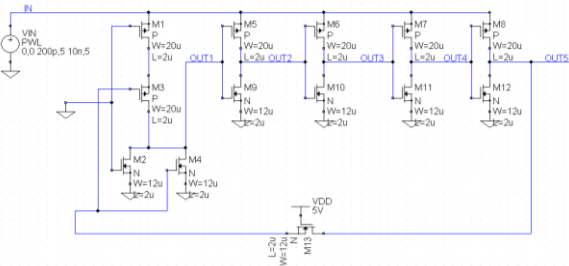


Рис.1. Електрична кільцевого генератора з використанням n-канального транзистора як елемента керування частотою.

Результат моделювання генератора з різними розмірами керуючого n-канального транзистора схему якого подано у попередньому рисунку зображені на рис.2.

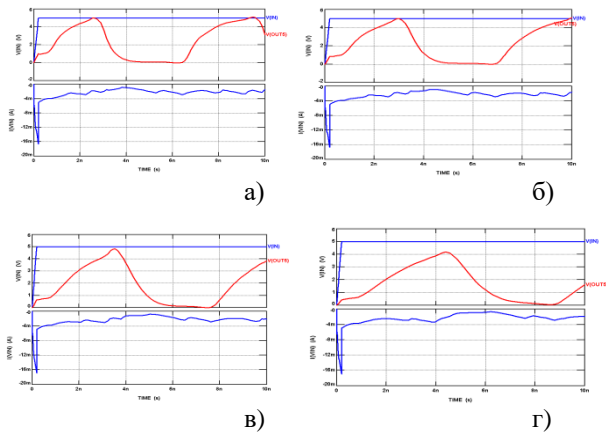


Рис. 2. Результат моделювання генератора з розмірами керуючого n-канального резистора а) $W=12\mu$, $L=2\mu$, б) $W=24\mu$, $L=2\mu$, в) $W=48\mu$, $L=2\mu$, г) $W=96\mu$, $L=2\mu$

Отже при моделюванні генератора з використанням керуючого n-канального транзистора отримуємо результат, що при збільшенні розмірів транзистора зменшується величина амплітуди, а при зменшенні розмірів

відповідно навпаки, тобто керований кільцевий генератор можна використати як чутливий елемент в біомедичних пристроях.

III. ФОТОЧУТЛИВИЙ ЕЛЕМЕНТ

Дуже поширеною на даний час постала проблема моніторингу показників рівня глюкози в крові для людей із діабетом обох типів. Було досліджено, що оптимальною довжиною інфрачервоного випромінювання є 940 нм. [3]. Наступним кроком стала розробка фоточутливого транзистора, монолітно інтегрованого із інтерференційним оптичним фільтром, для заданої довжини хвилі. На рис. 3 Зображено топологію, тривимірне зображення, перерізи та розподіл товщин шарів розробленого фоточутливого елемента. Товщини шарів було підібрано, для максимальної взаємодії із оптичними променями, довжиною хвилі 940 нм

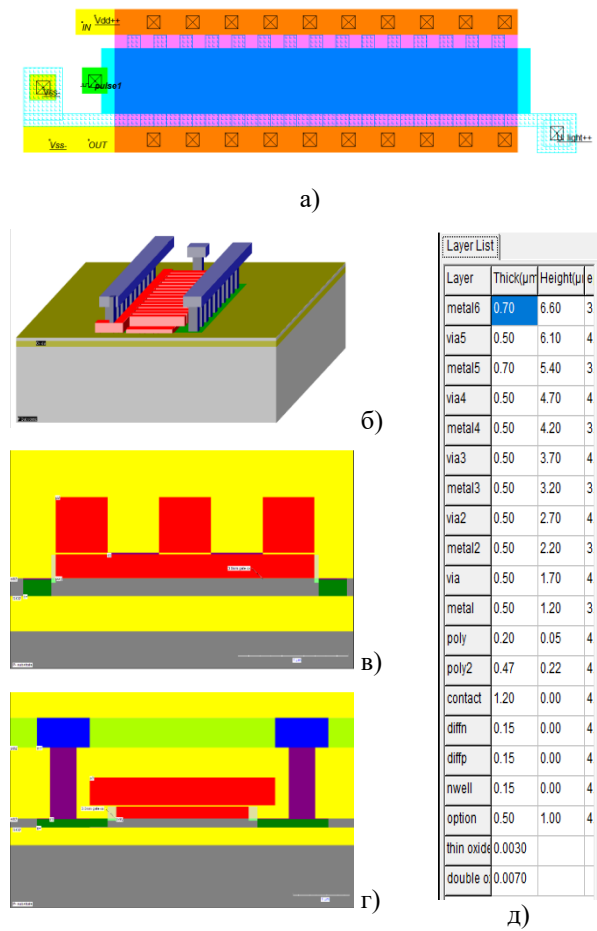


Рис. 3. Топологію (а), тривимірне зображення (б), перерізи (в,г) та розподіл товщин шарів (д) розробленого фоточутливого елемента.

Проведено моделювання енергетичних, часових та температурних характеристик. Досліджено, що в діапазоні температур 20-60 °C розроблений елемент є температурно стабільним, що дає змогу зробити висновок про не залежність показів біомедичних приладів на основі розробленого елемента від показів температури проведення біомедичного дослідження. [4]. Результати моделювання температурних характеристик зображено на рис. 4.

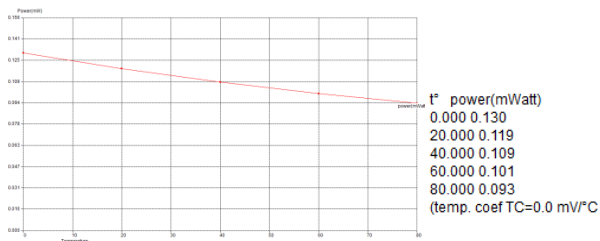


Рис. 4. Результати моделювання температурних характеристик розробленого фоточутливого елемента.

Порівняльні результати до і після дії на світлочутливий шар зображено на рис. 5.

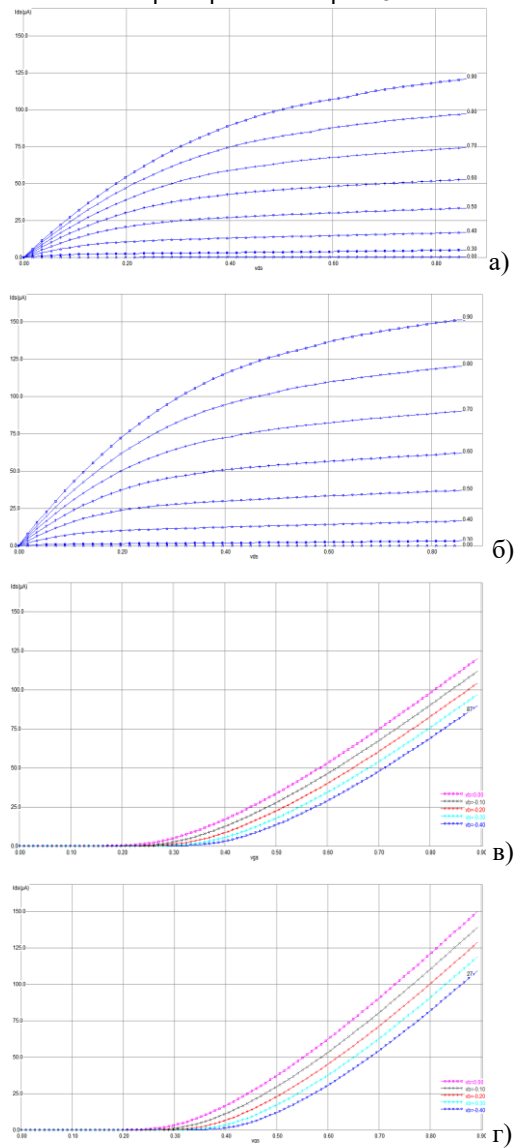


Рис. 5. Струму стоку від напруги стоку(а,в) та струму стоку від напруги на затворі (б,г) до і після роботи інтерференційного фільтра.

Під дією світла, яке впливає на порогову напругу зростає струм на затворі, зміна якого призводить до зміни частоти генерації кільцевого генератора зі керуючим фоточутливим n-канальним транзистором.

IV. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ КІЛЬЦЕВОГО ГЕНЕРАТОРА

Розроблений фоточутливий елемент було інтегровано в кільцевий генератор, як керуючий елемент. Топологія, об'ємне зображення та переріз інверторної пари зображено на рис. 6.

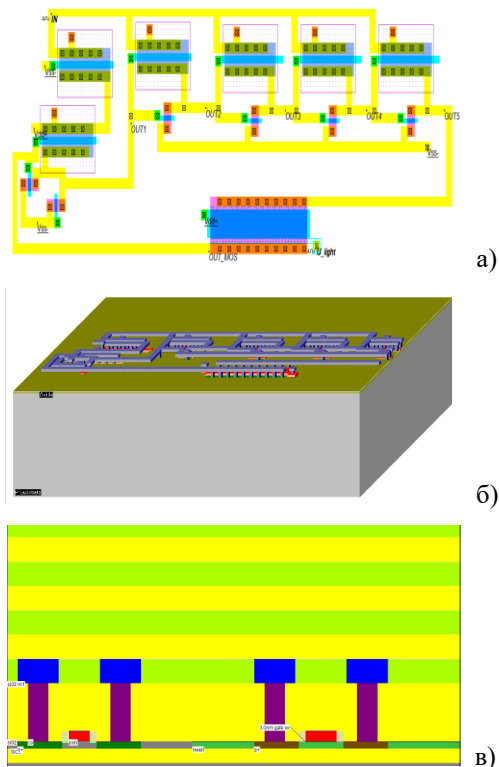
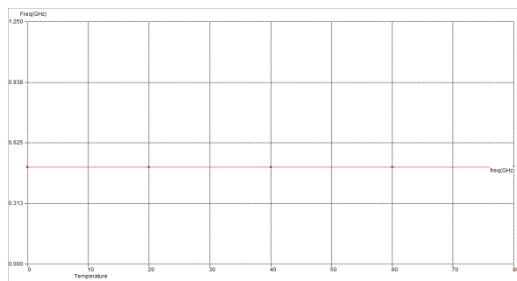


Рис. 6. Топологія (а), об'ємне зображення (б) та переріз інверторної пари (в).

Проведено моделювання часових, температурних та енергетичних характеристик розробленої мікросистеми-на-кристалі для біомедичних неінвазивних досліджень рівня глюкози на основі КГ та транзисторного елемента керування частотою - фоточутливого елемента, монолітно інтегрованого із інтерференційним фільтром для заданої довжини хвилі 940 нм. На рис. 7 зображено результати моделювання температурних, часових та енергетичних досліджень розробленої мікросистеми-на-кристалі. Із наведених рисунків видно, що технологія виготовлення даного типу мікросистеми-на-кристалі є повністю сумісна із технологією виготовлення транзисторів зі структурами «кремній-на-ізоляторі», що в свою чергу дає змогу твердити про можливість виготовлення розроблених елементів із вищезгаданими структурами, котрі володіють кращими характеристиками, зокрема енергетичними. Елементи зі структурами «кремній-на-ізоляторі» є в півтори рази кращими по споживаній потужності, що є критично важливим для розробки автономних біомедичних пристроїв.



a)

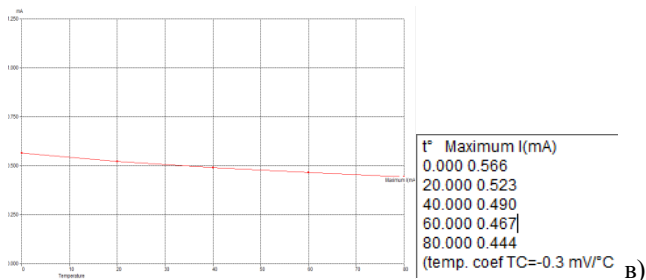
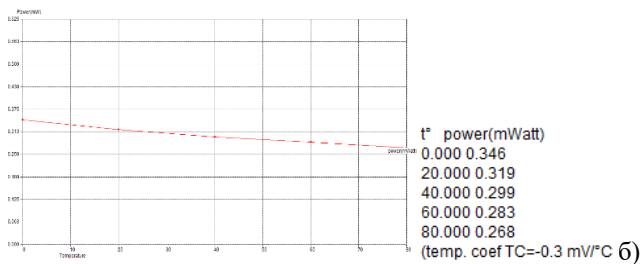


Рис. 7. Результати моделювання температурних характеристик: залежність частоти генерації від температури (а), залежність розсіюваної потужності від температури (б) та залежність струму стоку від температури (в).

Результати моделювання часових та енергетичних характеристик зображені на рис. 8

ВИСНОВКИ

На основі проведених досліджень, враховуючи всі особливості і вимоги середовища біомедичного дослідження і застосування, було розроблено і промодельовано спеціалізований СЕ у вигляді фототранзистора, зі структурою КНІ для неінвазивного дослідження РГК. Проведено дослідження основних фізичних величин спеціалізованого СЕ, які характеризують процеси в структурі фототранзистора. Спеціалізований СЕ монолітно інтегровано із інтерференційним оптичним фільтром для заданої довжини хвилі – 940 нм. Виходячи із результатів цих моделювань видно, що технологія виготовлення світлочутливого елемента є сумісною із технологією КНІ-транзисторних структур і придатна для їх монолітної інтеграції в МнК.

Отримані результати схематологічного моделювання показують, що частотні характеристики кільцевих генераторів суттєво залежать від кількості інверторів та товщини підзатворного діелектрика КМОН КНІ транзисторів. 4. Введення в склад кільцевих генераторів елементів, чутливих до змін ємності, опору або

фоточутливих елементів дозволяє створювати високочутливі сенсорні схеми в інтегральному виконанні. Як показали результати моделювань незначна зміна ємності, опору або інтенсивності освітлення чутливого елемента в складі схеми з кільцевим генератором призводить до суттєвої зміни частоти генерації.

Отримані при моделюваннях результати можуть бути використані при проектуванні сенсорних мікросистем-на-кристали з використанням кільцевих генераторів інтегрованих з чутливими елементами, наприклад сенсорами тиску, температури, світлочутливих елементів для неінвазивних глюкометрів та інших пристроїв зі структурами КНІ.

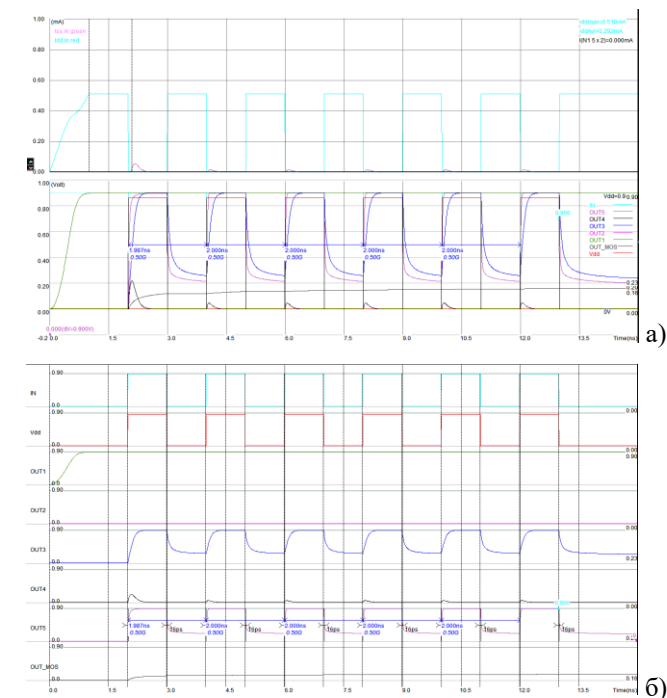


Рис. 8. Результати моделювання часових та енергетичних досліджень розробленої сенсорної мікросистеми-на-кристали: (а)- залежність струму стоку від часу, (б)-залежність струму стоку від напруги стоку

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Котик М. В., Схематологічне моделювання КНІ МОН кільцевих генераторів для сенсорних мікросистем-на-кристали, Котик М. В., Довгий В. В., Когут І. Т., Голота В. І., ФХТТ, Т. 19, № 4 (2018) С. 358-362, м. Івано-Франківськ, 2018 р.
- [2] Kogut I. T. The device-technological simulation of local 3D SOI-structures / I. T. Kogut, V. I. Holota, A. O. Druzhinin, V. V. Dovhij // NATO Advanced Research Workshop "Functional Nanomaterials and Devices for Electronics, Sensors, Energy Harvesting". – Lviv, 2015. – P. 17-18.
- [3] Котик М. В. Сенсорні елементи і пристрої оперативної діагностики рівня глюкози в крові / М. В. Котик, І. Т. Когут // Журнал "Фізика хімія твердого тіла". Івано-Франківськ, 2016. – № 1. – С. 108-113.
- [4] Kotyck M, Sensory Elements and Devices Operational Diagnostic Blood Glucose Using Near Infrared Radiation / M. Kotyck, I. Kogut, Ch. Saffouri // PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLIDSTATE - 2017. – V. 18, № 4 (2017) P. 467-471.

Швидкодіючі Багаторозрядні Матричні Перемножувачі

v.dr_2000@ukr.net

Борис Круліковський
кафедра кафедри обчислювальної техніки
Національний університет водного господарства та
природокористування
Рівне, Україна
kboris@ukr.net

Аліна Давлетова
кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Тернопільський національний економічний університет
Тернопіль, Україна
a7davletova@mail.com

Володимир Грига
кафедра комп'ютерної інженерії та електроніки
Прикарпатський національний університет імені Василя
Стефаніка
Івано-Франківськ, Україна

Ярослав Николайчук
кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Тернопільський національний економічний університет
Тернопіль, Україна
scs.kafedra@mail.com

High-Speed Multi-Matrix Multiplier

scs.kafedra@mail.com

Boris Krulikovsky
dept. of Computer Science Department
National University of Water Management and Nature
Management
Rivne, Ukraine
kboris@ukr.net

Alina Davletova
dept. of specialized computer systems
Ternopil National Economic University
Ternopil, Ukraine
a7davletova@mail.com

Volodymyr Gryga
dept. of Computer Engineering and Electronics
Precarpathian National University named after Vasyl
Stefanyk
Ivano-Frankivsk, Ukraine

Yaroslav Nykolaychuk
dept. of Specialized Computer Systems
Ternopil National Economic University
Ternopil, Ukraine
scs.kafedra@mail.com

Анотація—В роботі класифіковані базові типи паралельних та послідовних неповних та повних однорозрядних суматорів. Досліджені системні характеристики часової, апаратної та структурної складності однорозрядних суматорів, які виконують різні функції модульної арифметики в багаторозрядних спецпроцесорах шифрування даних. Запропоновано структуру швидкодіючого матричного перемножувача.

Ключові слова—компонент; спецпроцесор, суматор, перемножувач.

Keywords— component; special processor, adder, multiplier.

Abstract— In this paper, the basic types of parallel and sequential incomplete and complete single-digit adders are classified. The system characteristics of the time, hardware, and structural complexity of single-digit adders that perform various functions of modular arithmetic in multi-bit data encryption special processors are investigated. A structure of a fast matrix multiplier is proposed.

I. ВСТУП

Цифрова техніка і мікроелектроніка, за останні пів століття, отримали стрімкий розвиток, як в теоретичному аспекті, так і в схемотехніці та системотехніці фундаментальні основи теорії елементної бази, функціональних та структурних компонентів універсальних цифрових процесорів та спецпроцесорів закладені у роботах відомих вчених та спеціалістів у галузі цифрової техніки та мікроелектроніки.

Фундаментальні основи теорії елементної бази, функціональних та структурних компонентів універсальних цифрових процесорів та спецпроцесорів

закладені у роботах відомих вчених та спеціалістів у галузі цифрової техніки та мікроелектроніки. Значний розвиток теорії, архітектури, арифметики та схемотехніки у теоретико-числовому базисі Крестенсона досягнений завдяки науковим працям І.А. Акушського, В.А. Торгашева, Н.І. Червякова, Є.І. Брюховина, Я.М. Николайчука, О.І. Волинського. Успішний розвиток у наш час отримує теорія та техніка побудови цифрових компонентів та процесорів на основі вертикальної інформаційної технології у ТЧБ Галуа Я.М. Николайчук, В.С. Глухов, П.В. Гуменний, А.Р. Воронич [1].

Аналіз класики побудови компонентів таких процесорів показує, що найважливішою задачею оптимізації їх системних характеристик є досягнення максимальної швидкодії. Важливим компонентом при цьому є багаторозрядний суматор двійкової системи числення. Він є базовим елементом в акумуляторах, арифметико-логічних пристроях та пристроях модульної арифметики: квадраторах, векторно-матричних перемножувачах та пристроях модульного експоненціювання даних.

Аналіз класики реалізації таких компонентів показує, що вони характеризуються рядом функціональних обмежень, оскільки були орієнтовані на побудову процесорів невеликої розрядності (до 32 біт). Відомі методи реалізації прискорювачів операцій сумування та множення характеризуються значним зростанням апаратної складності та нерегулярності структури при зростанні розрядності процесорів (1024, 2048...біт). Це суттєво обмежує можливість ефективного застосування відомих реалізацій компонентів суматорів в мікроелектронному виконанні на кристалах.

Оптимізація системних характеристик структурної, апаратної та часової складності багаторозрядних суматорів спецпроцесорів шифрування даних є актуальною науково-технічною проблемою, що потребує переосмислення критеріїв оптимальності синтезу таких базових компонентів обчислювальної техніки.

II. СТРУКТУРА ТА СИСТЕМНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВНИХ ТА НЕПОВНИХ ОДНОРОЗЯДНИХ СУМАТОРІВ

Арифметична операція додавання існує практично у всіх алгоритмах опрацювання сигналів та обчислень. Ця операція та компоненти, які її реалізують є ваговим атрибутом, який суттєво може впливати на продуктивність, апаратну та структурну складність високорозрядних БСП, що є предметом досліджень даної роботи. На рис.1 та рис. 2 показані входи / виходи та позначення однорозрядних напівсуматорів (НС) та повних суматорів (СМ) паралельного типу.

У загальному випадку структура однорозрядного напівсуматора (НС) та повного суматора (СМ) паралельної дії у базисі Радемахера представлена на рис.1, де a_i , b_i – відповідно біти i -го розряду; S_i – результат сумування в i -му розряді; P_{i-1} , P_{i+1} – відповідно переноси бітів з i -го розряду та $i+1$ -й розряд.

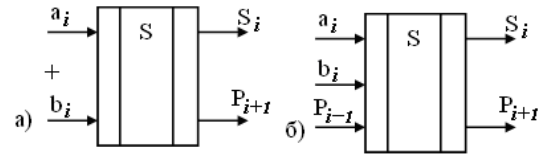


Рис. 1. Вхідні та вихідні логічні сигнали НС (а) та СМ (б) базису Радемахера

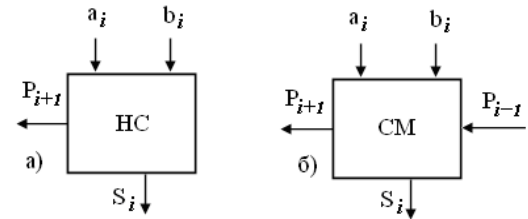


Рис. 2. Умовні позначення неповного (а) та повного (б) суматорів

У загальному випадку структура однорозрядного напівсуматора (НС) та повного суматора (СМ) паралельної дії у базисі Радемахера представлена на рис.1, де a_i , b_i – відповідно біти i -го розряду; S_i – результат сумування в i -му розряді; P_{i-1} , P_{i+1} – відповідно переноси бітів з i -го розряду та $i+1$ -й розряд.

При побудові структурних схем багаторозрядних суматорів, арифметико-логічних пристроїв (АЛП), міжбазисних перетворень коду у двійковий код та матричних перемножувачів використовують позначення НС (а) та СМ (б) суматора подані на рис.2.

Реалізація різних структур НС та СМ виконується на основі таблиці істинності та відповідних логічних рівнянь.

a_i	b_i	P_{i+1}	S_i
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

$$S_i = \overline{a_i} \wedge b_i \vee a_i \wedge \overline{b_i};$$

$$S_i = \overline{a_i} \wedge \overline{b_i} \wedge (a_i \vee b_i);$$

$$P_{i+1} = a_i \wedge b_i;$$

$$P_{i+1} = \overline{a_i} \wedge \overline{b_i} \vee a_i \wedge \overline{b_i} \vee \overline{a_i} \wedge b_i;$$

$$P_{i+1} = a_i \wedge b_i .$$

P_{i-1}	a_i	b_i	P_{i+1}	S_i
0	0	0	0	0
0	0	1	0	1
0	1	0	0	1
0	1	1	1	0
1	0	0	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	1	0
1	1	1	1	1

$$S_i = \overline{P_{i-1}} \wedge \overline{a_i} \wedge b_i \vee \overline{P_{i-1}} \wedge a_i \wedge \overline{b_i} \vee P_{i-1} \wedge \overline{a_i} \wedge \overline{b_i} \vee P_{i-1} \wedge a_i \wedge b_i;$$

$$P_{i+1} = \overline{P_{i-1}} \wedge a_i \wedge b_i \vee P_{i-1} \wedge (a_i \vee b_i);$$

$$P_{i+1} = \overline{P_{i-1}} \wedge a_i \wedge b_i \vee P_{i-1} \wedge \overline{a_i} \wedge b_i \vee P_{i-1} \wedge a_i \wedge \overline{b_i} \vee P_{i-1} \wedge \overline{a_i} \wedge \overline{b_i};$$

$$\overline{P_{i+1}} = \overline{P_{i-1}} \wedge (\overline{a_i} \vee \overline{b_i}) \vee P_{i-1} \wedge \overline{a_i} \vee \overline{b_i};$$

$$\overline{S_i} = \overline{P_{i-1}} \wedge \overline{a_i} \wedge \overline{b_i} \vee \overline{P_{i-1}} \wedge \overline{a_i} \wedge b_i \vee \overline{P_{i-1}} \wedge a_i \wedge \overline{b_i} \vee \overline{P_{i-1}} \wedge a_i \wedge b_i.$$

Критерії системної складної структури однорозрядних двійкових суматорів розроблені в роботах [2-3] включають наступні системні характеристики:

- апаратна складність визначається числом логічних елементів або вентилів мікроелектронної реалізації;
- часова складність визначається сумарною затримкою сигналів у максимальному числі послідовно з'єднаних вентилів;
- структурна складність визначається коефіцієнтом структурної складності [2].

III. СТРУКТУРА ТА СИСТЕМНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СУМАТОРІВ ОДНОРОЗРЯДНИХ ПОВНОФУНКЦІОНАЛЬНИХ СУМАТОРІВ

Аналіз системних характеристик однорозрядних суматорів показує, що їх архітектури не є повнофункціональні, тобто не мають всіх прямих та інверсних вхідно-виходів. Це не дозволяє оптимізувати їх мінімаксні характеристики, особливо часової складності, яка є ключовою у задачі максимального підвищення швидкодії суматорів та інших матрично-модульних компонентів БСП.

На рис.3. показані позначення повнофункціональних однорозрядних суматорів, які містять всі прямі та інверсні вхідно-виходи.

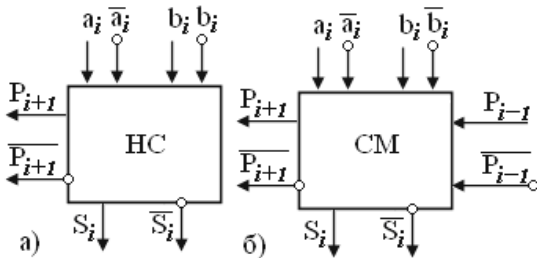


Рис. 3. HC та CM оснащені повнофункціональними вхідно-виходами

В табл.1 приведені структури запропонованих суматорів з відповідною часовою складністю

$$\tau = 1 \text{ та } \tau = n,$$

де n - розрядність суматора, яка досягається за рахунок реалізації їх оснащення повнофункціональним набором вхідно-виходів та незначного зростання апаратної складності.

Важливим класом компонентів БРП шифрування даних є суматори по модулю P . В роботах [4] запропоновані структури таких однорозрядних суматорів, які враховують значення розрядного біта числа P (0 або 1) і характеризуються наближеними до мінімальних системними характеристиками (табл..2, п.1). В табл..2, п.2 показані структури таких суматорів з мінімальною часовою складністю.

TABLE I. СТРУКТУРА ОДНОРОЗРЯДНИХ СУМАТОРІВ 3 ПОВНОФУНКЦІОНАЛЬНИМИ ВХІДНО-ВИХОДАМИ

HC		$A = 6;$ $\tau = 1;$ $S = 230$
CM		$A = 16;$ $\tau = 1;$ $S = 398$

TABLE II. СТРУКТУРА ОДНОРОЗРЯДНИХ МОДУЛЬНИХ СУМАТОРІВ

1		
2		

Запропоновані повнофункціональні структури компонентів багаторозрядних суматорів дозволило в 5-8 разів зменшити часову складність компонентів БСП і відповідно підвищити на 1-2 порядки реалізацію алгоритмів шифрування даних на основі модульної арифметики. Приведені в таблицях 3 і 4 структури компонентів багаторозрядних суматорів характеризуються високою однорідністю, що суттєво спрощує їх синтез та реалізацію топології на мікроелектронних кристалах ПЛІС.

IV. СТРУКТУРА МАТРИЧНОГО ПЕРЕМНОЖУВАЧА

Аналіз системних операцій, які виконуються у реальному часі однокристальними мікроконтролерами та сигнальними процесорами показує, що основна швидкодія обчислювальних операцій залежить від структурної організації та схемотехнічних рішень їх ядер на базі арифметико-логічних пристроїв (АЛП). Названий компонент процесорів призначений для виконання базових операцій: додавання, віднімання, піднесення до квадрату, множення, ділення, порівняння та накопичення цифрових даних. При цьому найбільшу затримку швидкодії створюють однорозрядні та багаторозрядні комбінаційні, пірамідальні та накопичувальні суматори, сопроцесори піднесення до квадрату, матричного множення, порівняння та сортування цифрових даних.

З метою суттєвого підвищення швидкодії названих компонентів прискорювачів базових операцій АЛП, запропоновані структурні та схемотехнічні рішення однорозрядних неповних та повних суматорів на логічних елементах "І-НЕ", "Провідне АБО", та "Монтажне І" із затримкою сигналів на 1 мікро такт [5].

Запропонована структура швидкодіючого матричного перемножувача (рис.4), що містить перший (вхідний) і другий (вихідний) регістри пам'яті на D-тригерах та матрицю однорозрядних повних суматорів з парафазними входами та виходами, що дозволяє реалізувати інформаційні переноси між суматорами з гранично мінімальною затримкою сигналів на 1 мікротакт, а крім того підвищити регулярність структури матриці суматорів, що спрощує проектування та нароження розрядності утиліті таких багаторозрядних пристроїв на реконфігурованих програмних кристалах ПЛІС. [6]

У якості компонента високопродуктивних проблемно-орієнтованих багаторозрядних процесорів опрацювання та шифрування інформації може бути використаний матричний перемножувач.

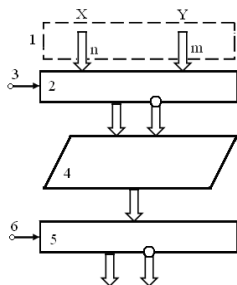


Рис. 4. структурна схема матричного перемножувача

Структурна схема пристрою, який містить 1 – вхідну шину двійкових кодів перемножуваних чисел, 2 – перший регістр пам'яті, 3 – перший синхронізуючий вхід пристрою, 4 – матрицю повних однорозрядних суматорів з парафазними входами і виходами, 5 – другий регістр пам'яті, 6 – другий синхронізуючий вхід пристрою

При подачі на синхронізуючий вхід (3) першого регістра пам'яті (2) вхідні коди (X і Y) перемножуваних чисел записуються у D-тригери, на парафазних (прямих та

інвертованих) виходах першого регістра пам'яті 2 формуються парафазні коди перемножуваних чисел, які поступають на відповідні парафазні входи матриці повних однорозрядних суматорів 4, на однофазних виходах якої формується код добутку вхідних двійкових чисел, який по сигналу синхронізації третього входу пристрою 6 записується у другий регістр пам'яті 5, на парафазних виходах якого формується вихідний код добутку двох двійкових чисел.

V. ВИСНОВОК

У роботі запропонована структура швидкодіючого матричного перемножувача, у якій в результаті введення синхронізованих першого та другого регістрів пам'яті на D-тригерах досягається розширення функціональних можливостей матричного перемножувача, що дозволяє його застосування у якості компонента більш складних спецпроцесорів. Введення, у якості базового компонента, однорозрядних повних суматорів з парафазними входами та виходами дозволяє досягнути підвищення швидкодії пристрою у $5 \div 6$ разів у порівнянні з відомими та розширити функціональні можливості..

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Спеціалізовані комп'ютерні технології в інформатиці/ за загальною ред. Я.М. Николаичука. – Тернопіль: «Бескиди», 913 с. 2017
- [2] Возна Н.Я. Основи теорії структуризації поліфункціональних елементів складних систем // Вісник Хмельницького національного університету.- Хмельницький, 2015.- №2 (223) - С.204-208.
- [3] Николаичук Я.М. Проектування спеціалізованих комп'ютерних систем / Навчальний посібник / Я.М. Николаичук, Н.Я. Возна, І.Р. Пітух.-Тернопіль: ТзОВ "Терно-граф". 2010. — 392 с., іл.
- [4] Krulikovskiy B., Volynskyy O., Davletova A., Kimak V. "Theoretical Foundations Synthesis of Components and Accelerators for Haar's, Rademacher's and Krestenson's Basis Multi-digit Processors" Conference CADSM 2015, p. 129-133, 2015.
- [5] Boris Krulikovskiy, Natalia Vozna, Volodymyr Kimak, Davletova Alina, "The Method to Optimize Structural, Hardware and Time Complexities Characteristics Multi-Bit Adders of Special Processors for Data Encryption", Conference TSET'2016, p. 455-459, 2016.
- [6] Давлетова А.Я., Грига В.М., Николаичук Я.М. Матричний перемножувач Пат.132520 Україна МПК (2006.01) G06F 7/52 Матричний перемножувач / № у 2018 10301; заявл. 17.10.2018; опубл. Бюл.№ 4, 25.02.2019.

Моделювання П'єзоелектричного Приводу Клапану Подачі Газу Суднового Дизеля в Сімінтек

Віталій Нікольський
кафедра теорії автоматичного
управління та обчислювальної
техніки
Національний університет
«Одеська морська академія»
Одеса, Україна
prof.nikolskyi@ukr.net

Марк Нікольський
кафедра автоматизації дизельних
та газотурбінних установок
Національний університет
«Одеська морська академія»
Одеса, Україна
markdezert@ukr.net

Віктор Лисенко
кафедра теорії автоматичного
управління та обчислювальної
техніки
Національний університет
«Одеська морська академія»
Одеса, Україна
Victor.Lisenko.1990@gmail.com

Simulation of the Piezoelectric Actuator of a Gas Admission Valve Ship`s Diesel in Simintech

Vitalii Nikolskyi
dep. of Theory of Automatic Control
and Computing
National University "Odessa
Maritime Academy"
Odessa, Ukraine
prof.nikolskyi@ukr.net

Mark Nikolskyi
dep. of automation of diesel and gas
turbine plants
National University "Odessa
Maritime Academy"
Odessa, Ukraine
markdezert@ukr.net

Viktor Lisenko
dep. of Theory of Automatic Control
and Computing
National University "Odessa
Maritime Academy"
Odessa, Ukraine
Victor.Lisenko.1990@gmail.com

Анотація — Підвищення вимог безпеки та забезпечення працездатності суднових двопаливних дизелів, які використовуються на газовозах, вимагає застосування пристроїв на нових фізичних принципах. На теперішній час існує проблема з клапаном подачі газу в судновий дизель-генератор, привод якого реалізовано за допомогою електромагнітного соленоїду, внутрішні процеси в якому призводять до виходу клапану з ладу. Метою дослідження є розробка моделі п'єзоелектричного приводу клапану подачі газу на основі складального стовпа п'єзоелектричних шайб в середовищі моделювання SimIntech, яка дозволяє визначити час спрацювання приводу клапану при заданому зусиллі.

Ключові слова: клапан подачі газу, GAV, п'єзоактуатор, двопаливний двигун внутрішнього згорання, SimInTech.

Abstract — Increasing the safety and performance requirements of marine dual-fuel internal combustion engine (diesel generators) used on gas-vehicle vessels requires the use of devices that ensure their operation on new physical principles. At present, there is a problem with the gas valve, the drive of which is implemented with an electromagnetic solenoid, internal processes which lead to its failure. It is proposed to replace the drive with a piezoelectric Linear Actuators stand for high

dynamics and forces. The purpose of the study is to develop a model of piezoelectric drive of the gas admission valve on stacked and multilayer versions in the SimIntech simulation environment for assessing the possibility of its use in the gas admission valve under the following conditions: displacement 0.4 mm and operating time no more than 2 ms. A sub-model of a single piezo layer of the was developed, which was added to the SimIntech environment palette using the library editor. A script was created to automatically convert layer parameters. The study of the model of the stacked and multilayer versions from three piezo layers has been carried out. The results of the research of the model, which proved the possibility of using the Linear Actuators for the drive of the gas injection valve, are presented.

Keywords: gas admission valve, GAV, piezo Linear Actuators, dual-fuel internal combustion engine, SimInTech.

I. ВСТУП

При роботі суднових двопаливних дизелів (тип DF) [1] спостерігаються перебої в роботі клапанів подачі газу SOGAV-250, які обумовлені процесами, що протікають в електромагнітному соленоїді [2]. В [3-5] запропонована

конструкція клапана з п'єзоелектричним приводом, який виконано зі складального стовпа п'єзоелектричних шайб.

Метою дослідження є створення моделі приводу клапана подачі газу суднового двопаливного дизель-генератора в середовищі електронного моделювання SimIntech для визначення можливості використання п'єзоелектричних складальних стовпів при переміщенні клапана на відстань 0,4 мм за час, який не перевищує 2 мс та зусиллі з боку блока притисних пружин у 100 Н.

II. ОСНОВНА ЧАСТИНА

В [6] запропоновані конструкції складальних стовпів на основі п'єзоелектричних шайб з поздовжньою поляризацією, поперечним перерізом S_0 і первинною товщиною l_0 , що отримали розвитку при створенні віскозиметрів [4] і систем управління подачею палива в судновий дизель з електронним управлінням WARTSILA 12RT-Flex96C в [5].

Так, довжина складального стовпа змінюється під дією електричного поля E в напрямку дії поля на значення Δ , що призводить до переміщення виконавчого органу (клапан подачі газу) масою m_0 , який з'єднаний з його вільним кінцем. Поряд з виконавчим органом переміщуються також елементи активної частини п'єзоелектричних шарів складального стовпа. Їх маса m_k , як правило менше, ніж маса виконавчого органу. При цьому інерцією елементарних об'ємів шарів, які переміщуються, як правило, нехтують. Один кінець складального стовпу, який закріплено на корпусі клапана, не приймає участі в русі.

Для моделювання процесів в п'єзоелектричному складальному стовпі було застосовано середовище моделювання SimIntech64 (Безлімітна ліцензія. Користувач: Нікольський Віталій. Організація: НУ «ОМА». Серійний номер: D63B30FDA70) [6]. На рис. 1, а приведено графічне зображення розробленої субмоделі одного шару, а на рис. 1, б – внутрішня схема моделі, де: F_y – зусилля пружної деформації шару, Н; F_E – зусилля в шарі, викликане прикладеним електричним полем, Н; F_C – статичне зусилля, яке діє з боку клапану подачі газу, Н; $F_{дин}$ – динамічне зусилля в ПР, яке пропорційне швидкості зсуву поршня і викликаними при цьому процесами дисипації енергії в шарі, Н; K_y – коефіцієнт пружності шару, Н/м; K_d – коефіцієнт внутрішнього демпфірування шару, кг/с; L_i – деформація шару, мм; $K_{п}$ – коефіцієнт прямого п'єзоэффекту, К/м; V_i – швидкість вільного кінця стовпа, м/с.

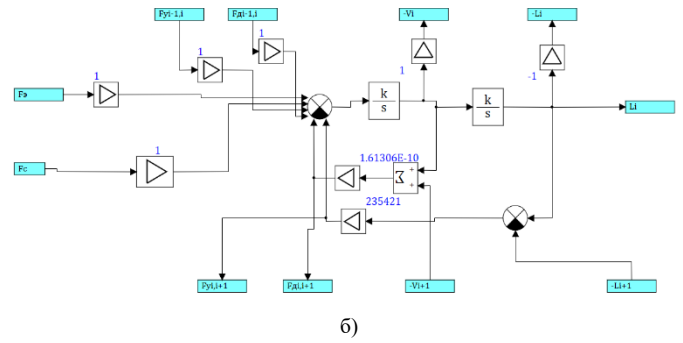
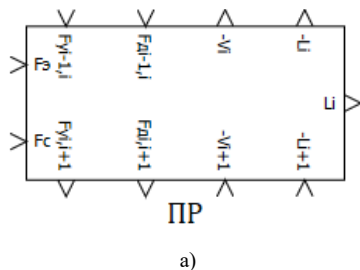


Рис. 1. Субмодель шару складального стовпа

Надалі для субмоделі шару у вкладці Властивості (рис. 2) сформовано властивості п'єзоелектричного шару. Оскільки в дослідженні була задіяна кераміка ЦТС-19, в колонку Значення були введені відповідні числові значення.

Свойства: Macro21

Свойства	Параметры	Общие	Порты	Визуальные слои
Название	Имя	Фо...	Значение	
Толщина слоя, м	l		0.003	
Плотность керамики, кг/м ³	p		7600	
Относительная диэлектрическая проницаемость	k33T		8.85E-12	
Модуль Юнга, Н/м ²	YE33		5.92E10	
Коеффициент электромеханической связи	k33		0.68	
Добротность	Qm		50	
Диэлектрическая проницаемость	e33		1600	
Диаметр слоя, м	d		0.01	

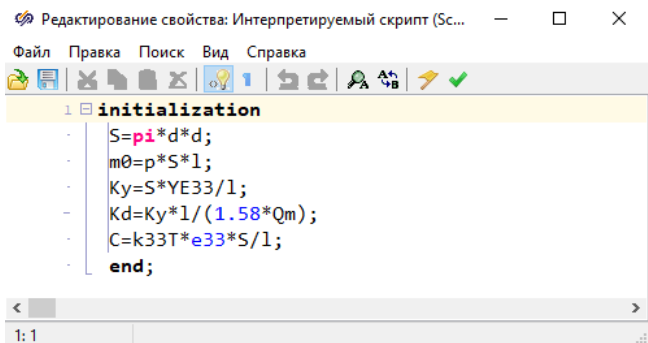
Рис. 2. Вікно вводу властивостей п'єзокераміки

Для розрахунку параметрів у вкладці Загальні в рядку Script (рис. 3, а) були прописані формули, за якими відбувалися розрахунки (рис. 3, б).

Свойства: Macro20

Свойства	Параметры	Общие	Порты	Визуальные слои
Название	Имя	Форм...	Значение	
Зеркально отразить	Mirror		<input type="checkbox"/> Нет	
Имя объекта	Name		Macro20	
Имя файла субмодели	FileName			
Индекс блока	BlockIndex			
Интерпретируемый скрипт	Script		<code>ly=S*YE33/l; kd=ky*!(1.58*Qm); C=k33T*e33*S/l; end;</code>	
Координаты точек	Points		[(408, 176),(485, 176),(408, 139),(408, 221)]	
Коеффициент прозрачности	Opacity	1.000...	1	
Не масштабировать изображение	NotChangeE...		<input type="checkbox"/> Нет	
Номер решателя	Layer		0	
Обновлять имя файла субмодели	UpdateFile...		<input checked="" type="checkbox"/> Да	
Пересчитывать скрипт всегда	RecalcAlways		<input type="checkbox"/> Нет	
Подпись блока	LabelText		ПР	
Подсказка	Hint			
Показывать рамку	ShowFrame		<input type="checkbox"/> Нет	

а)



б)

Рис. 3. Вкладка Загальні (а) та редактор властивостей (б)

Результат розрахунку відображається у вкладці Параметри (рис. 4).

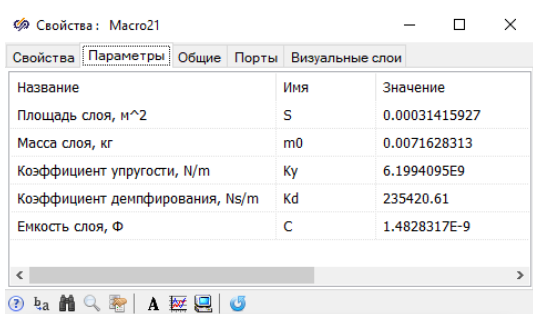


Рис. 4. Вкладка Параметри, де відображаються результати розрахунку шару

Після цього субмодель за допомогою редактору Бібліотеки вкладки Сторінка було внесено в панель керування (рис. 5). Слід зазначити, що ці операції можливі тільки при наявності ліцензії на Ядро. Але в ознайомчій версії також можливо зібрати субмодель, але автоматичного перерахунку параметрів від виду п'єзокераміки, яка задіяна в дослідженнях, не буде відбуватися. Кожна зміна будь-якої властивості потребує ручного перерахунку параметрів, що ускладнює процес.

На рис. 6 зображено модель складального стовпа з трьох шарів п'єзокераміки ЦТС-19. До блоку графічного відображення введено опорний синусоїдальний сигнал частотою 1 кГц, який допоможе при визначенні реального часу розрахунку процесу. Пунктиром зображено вміст блоку перетворення електричного сигналу в електричне зусилля F_E . Постійна часу T інерційної ланки 1-го порядку – $R_{вт} \cdot C$, де C – ємність складального стовпа, $R_{вт}$ – вихідний опір пристрою керування.

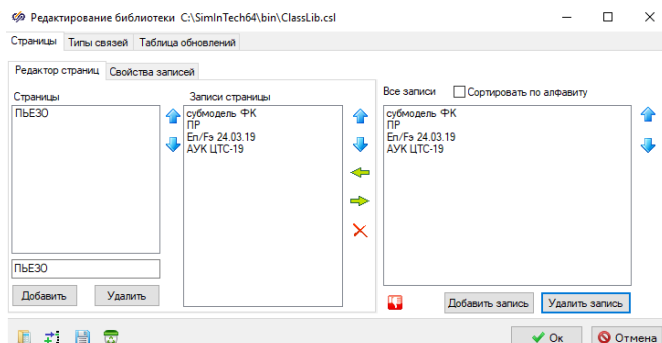


Рис. 5. Вікно редактору Бібліотеки

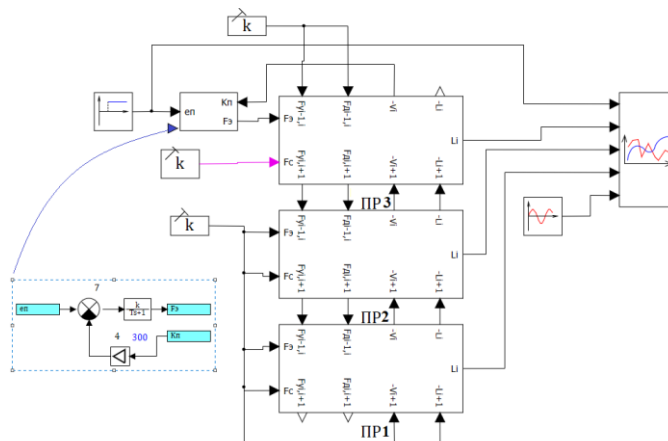


Рис. 6. Модель складального п'єзоелектричного стовпа з трьох шарів при подачі імпульсу типу Сходінка

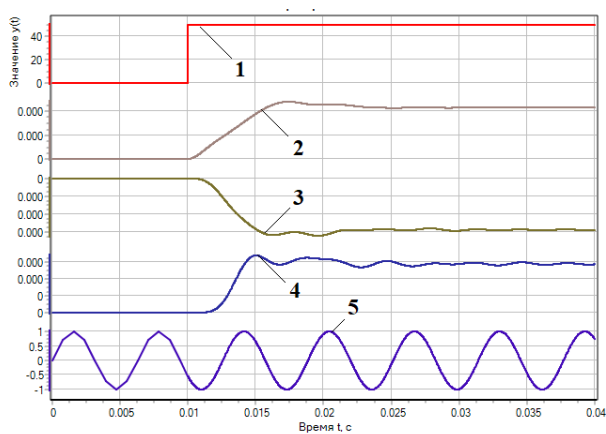
При розрахунках було застосовано метод діагонально неявний (DIRK2), який задається таблицею Бутчера та має 2-й порядок. Цей метод також реалізований і в системі MATLAB / Simulink під назвою Ode23tb. Реалізація цього методу в SimInTech і в MATLAB розрізняються, внаслідок чого можуть трохи відрізнятися і результати його застосування в цих системах.

На рис. 7, а наведені результати моделювання складального стовпа з трьох шарів, де: 1 – сигнал, що подається на електроди складального стовпа; 2 – переміщення третього шару, який з'єднаний з клапаном; 3 – переміщення другого шару; 4 – переміщення першого шару, який нерухомо закріплений на основі клапану; 5 – зусилля, яке розвиває складальний стовп; 6 – сигнал з опорного генератору синусоїдальних сигналів частотою 1 кГц.

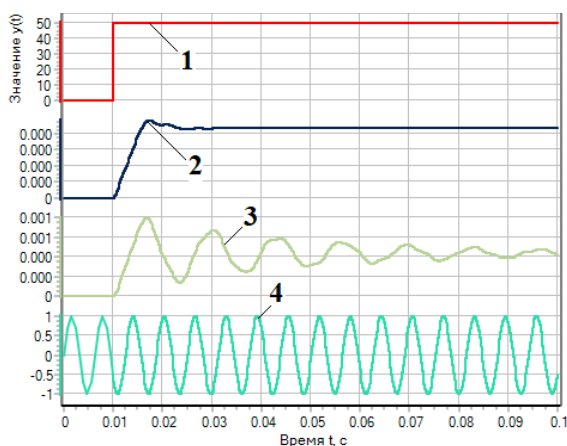
На рис. 7, б зображено результати моделювання складального стовпа для різних значень вихідного опору пристрою керування $R_{вт}$: 1 – сигнал амплітудою 50 В, який подається на електроди складального стовпа; 2 – переміщення третього шару при $R_{вт} = 500$ Ом; 3 – переміщення третього шару при $R_{вт} = 50$ Ом; 4 – сигнал з опорного генератору синусоїдальних сигналів частотою 1 кГц.

На рис. 7, в наведено числові значення точок курсору. Так, синім кольором виділено значення амплітуди переміщення вільного кінця складального стовпа, яке

склало $4.7 \cdot 10^{-4}$ м, тобто не більше 5% від загального розміру стовпа, який складає $9 \cdot 10^{-3}$ м. Час переміщення становить 1 мс. Однак, час перехідного режиму становить 3 мс.



а)



б)

Ближайшие к курсору точки

График	X	Y
График	0.01	0
График	0.0167642	0.0004714
График	0.0169735	0.0007878
График	0.0142462	0.9940510

в)

Рис. 7. Результат моделювання перехідних процесів в складальному стовпі

На рис. 8 наведено графік зусилля, яке розвиває складальний стовп (30 Н). Тобто, для досягнення зусилля у 100 Н, потрібно збільшити габаритні розміри складального стовпа, або задіяти паралельне механічне з'єднання чотирьох стовпів, наприклад, як в [8].

Слід зазначити, що в [6] запропоновано цілий арсенал засобів, які дозволяють зменшити час перехідного режиму за рахунок використання або поодинокого управління шарами складального стовпа, або групами. Також в [5] запропоновано використання системи нечіткого позиціонування складальним стовпом.

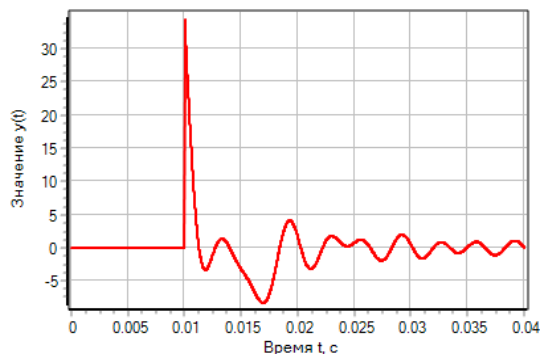


Рис. 8. Графік зусилля, яке розвиває складальний стовп

III. ВИСНОВОК

Таким чином, результати моделювання довели, що п'єзоелектричний складальний стовп повинен мати 24 шари для того, щоб здійснити переміщення, яке вимагається. Однак, збільшення шарів призводить до збільшення ємності складального стовпа. Тому, як варіант, можливе використання роздільного керування кожним шаром або групою/ми шарів. Все це потребує подальших досліджень.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Wartsila Service Letters #444 SL87-223/UM MC/MCE Engines. Super-VIT Fuel Pumps: Adjustment & Maintenance: [Online]. Available: <http://marengine.com/ufiles/SL87-223.pdf>. 20.04.2019.
- [2] JUSSI PEURALA Model-based design, modelling and simulation of digital hydraulic GAS admission valve / Master of Science Thesis, 132 pages, 12 Appendix pages May 2014: [Online]. Available: <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/22251/peurala.pdf;sequence=1>. 20.04.2019
- [3] Нікольський В. В., Лисенко В. С., Нікольський М. В. Рішення про видачу деклараційного патенту на корисну модель, Клапан подачі газу зі складальним стовпом п'єзоелементів. - № 5367/3У/19 від 01.03.19; Заява U201809785, від 01.10.2018.
- [4] Нікольський В.В., Лисенко В.С., Нікольський М.В. Використання п'єзоприводу для клапана подачі газу двохпаливного двигуна внутрішнього згоряння // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2017. – Вып. 23. Одесса: НУ "ОМА". – С. 65 – 69.
- [5] V. Nikolskyi, Ye. Ozhenko, K. Berezhnyi, V. Lisenko "Fuzzy logic positioning system of ship's diesel generators actuating mechanisms" in *Information Technologies and Computer Modelling: International Scientific and Practical Conference ITCM-2018: Precarpath. Nation. Univ., Ivano-Frankivsk*, 2018, in press.
- [6] Никольский А.А. Точные двухканальные следящие электроприводы с пьезокомпенсаторами. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 160 с.
- [7] Презентация. Технология SimInTech — моделирование, разработка и создание САУ [Online]. Available: http://simintech.ru/?page_id=2443. 20.04.2019.
- [8] Оженко Е. М. Модели, методы та засоби покращення системи подачі палива суднового дизеля на базі п'єзоелектричних перетворювачів: Дис. ... кан. техн. наук: 05.13.05. – Одесса, 2018. – 166 с.

Оптимізація Комп'ютерної Моделі Блоку LRU Кеш-пам'яті Процесорного Ядра Архітектури ІА - 32

Вадим Пуйденко
Циклова комісія "Комп'ютерні науки"
Харківський радіотехнічний коледж
Харків, Україна
vapuydenko@gmail.com

Optimization of the Computer Model of the Memory Cache LRU Unit of the Processor Core of the Architecture IA-32

Vadym Puydenko
dept. of Computer Science
Kharkiv Radio Engineering College
Kharkiv, Ukraine
vapuydenko@gmail.com

Анотація – в представленій науково-дослідницькій праці автором оптимізується рішення задачі синтезу функціональної логіки роботи блоку LRU внутрішньої кеш-пам'яті процесорного ядра ІА – 32. В результаті аналізу виникла ідея з двома шляхами розв'язання проблеми, де в обох випадках за основу оптимізації прийнята основна модель синхронного потенційного автомату в якості синхронного двійкового лічильника з регулярними структурами у вигляді синхронних JK – тригерів з дотриманням логіки керування заміщенням рядків при повній достовірності обраної множини блоку даних згідно алгоритму pseudo – LRU. Перший варіант рішення дотримується концепції підтримки оновлення бітів $B_2+B_1+B_0$ блоку LRU з мінімізацією повністю та неповністю визначених функцій, що перемикаються: $L=f(B)$ обрання рядків L_i множини серед достовірних та $V^+=f(B)$ формування оновлених значень бітів V_j^+ з урахуванням попереднього стану цих бітів Другий варіант змінює класичну архітектуру блоку LRU за рахунок відмови від бітів $B_2B_1B_0$, що витікає з оптимальних простих функцій $L=f(Q)$ та $Q^+=f(Q)$ і, як наслідок, значно оптимізує перший варіант. В результаті синтезу отримані оптимальні мінімальні логічні рівняння, які описують певну функціональну логіку реальної роботи блоку LRU внутрішньої кеш-пам'яті, як компоненти центрального процесора архітектури ІА-32.

Annotation – in the presented research work, the author optimizes the solution to the problem of the synthesis of the functional logic work of the LRU unit of the internal cache memory of the processor core IA-32. As a result of the analysis, an

idea with two ways of solving the problem emerged, where in both cases based on the optimization the basic model of the synchronous potential automaton is adopted as a synchronous binary counter with regular structures in the form of synchronous JK – triggers following the logic of the line replacement control with the accuracy of the selected data unit rows of plurals according to the pseudo - LRU algorithm. The first option solution follows the concept of support for updating $B_2+B_1+B_0$ bits of the LRU unit with minimization of completely and incompletely defined switching functions: $L = f(B)$ selection of L_i lines rows of plurals among the reliable ones and $V^+ = f(B)$ for the formation of updated values of bits V_j taking into account the previous state of these bits. The second option changes the classical architecture of the LRU unit due to the refusal of the $B_2B_1B_0$ bits that follows from the optimal simple functions $L = f(Q)$ and $Q^+ = f(Q)$ and, as a result, significantly optimizes the first option. As a result of the synthesis, optimal minimum logical equations were obtained that describe a certain functional logic of the real work of the LRU unit of the internal cache memory as components of the central processor architecture of the IA-32.

Ключові слова – алгоритм pseudo-LRU, функціональна логіка, внутрішня кеш-пам'ять, блок LRU.

Keywords – pseudo-LRU algorithm, functional logic, on-chip memory cache, LRU unit.

I. ВСТУП

В попередній роботі автора [1] фрагмент функціональної логіки блоку LRU з використанням

алгоритму pseudo-LRU описується мінімальними логічними рівняннями повністю та неповністю визначених функцій, що перемикаються: $L=f(B)$ обрання рядків L_i множини серед достовірних та $V^+=f(L,B)$ формування оновлених значень бітів V_j^+ з урахуванням попереднього стану цих бітів:

$$L_0 = \overline{B_1} \& \overline{B_0}; \quad L_1 = B_1 \& \overline{B_0}; \quad L_2 = \overline{B_2} \& B_0; \quad L_3 = B_2 \& B_0; \quad (1)$$

$$B_0^+ = \overline{L_3} \& \overline{L_2} \& B_0 \vee L_1 \vee L_0 = \overline{L_3 \& L_2 \& B_0} \& L_1 \& L_0; \quad (2)$$

$$B_1^+ = \overline{L_1} \& B_1 \vee L_0 = \overline{L_1} \& B_1 \& L_0; \quad (3)$$

$$B_2^+ = \overline{L_3} \& B_2 \vee L_2 = \overline{L_3} \& B_2 \& L_2; \quad (4)$$

Рівняння (1),(2),(3),(4) описують фрагмент схематехнічного рішення блоку LRU внутрішньої кеш-пам'яті (рис. 1):

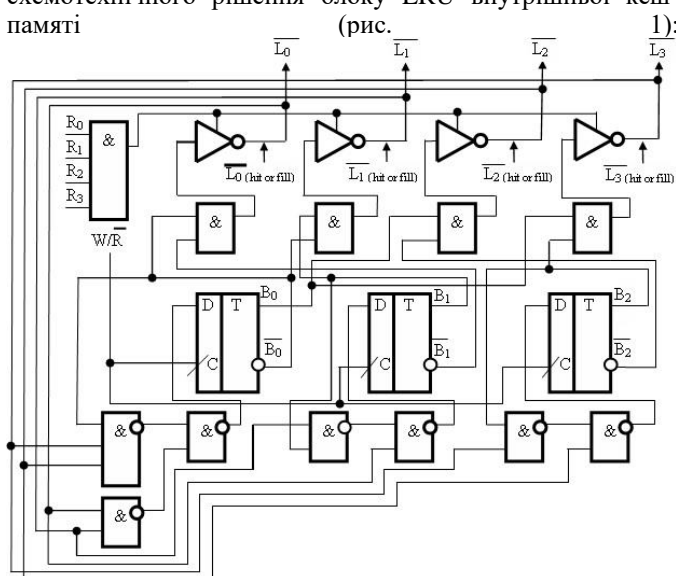


Рис. 1. Схематехнічне рішення блоку -LRU для рядків L3L2L1L0 певної множини даних

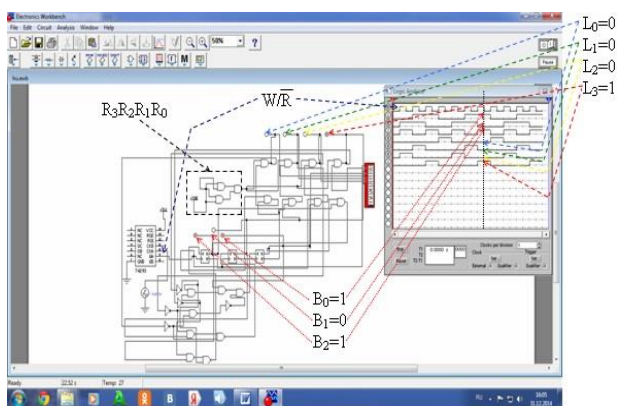


Рис. 2. Комп'ютерна модель блоку LRU

У процесі дослідження комп'ютерної моделі (рис. 2), при активності сигналу запису $W/\#R$, спостерігалася зміна

станів бітів $B_2B_1B_0$ у послідовності $000 \rightarrow 011 \rightarrow 110 \rightarrow 101$, що відповідає обранню рядків певної множини даних $L_0 \rightarrow L_2 \rightarrow L_1 \rightarrow L_3$, як найменш нещодавно використані та повністю задовільняє алгоритму pseudo-LRU заміщення рядків множини даних серед достовірних.

II. ПЕРШИЙ ВАРІАНТ СИНТЕЗУ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ

Згідно з попередніми дослідженнями комп'ютерної моделі блоку LRU (рис.2) складемо спрямований граф переходів стану бітів $V \rightarrow V^+$ під впливом сигналу запису/читання $W/R\#$ (рис.5) :

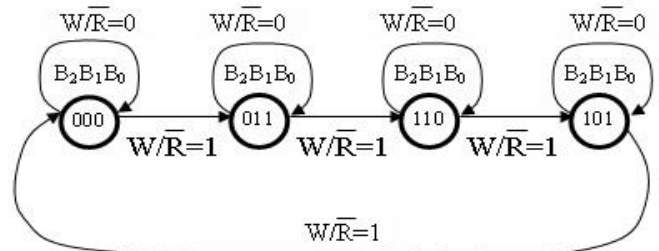


Рис. 3. Спрямований граф переходів стану бітів $V \rightarrow V^+$

Перенесемо відомі стани переходів бітів $V \rightarrow V^+$ з вершин спрямованого графу у відповідні карти Карно (рис. 4):

B_2^+	B_1B_0	00	01	11	10
B_2	0	0	x	1	x
	1	x	0	x	1

B_2^+	B_1B_0	00	01	11	10
B_2	0	1	x	1	x
	1	x	0	x	0

B_2^+	B_1B_0	00	01	11	10
B_2	0	1	x	0	x
	1	x	0	x	1

Рис. 4. Стани переходів бітів $V \rightarrow V^+$ у відповідних картах Карно

Оскільки в якості регулярних структур обрані синхронні тригери JK – типу, складемо карти Карно неповністю визначених функцій збудження $J_i=f(B_2B_1B_0)$ та $K_i=f(B_2B_1B_0)$, що перемикаються для інформаційних входів J і K тригерів відповідно (рис. 5):

J_2	B_1B_0	00	01	11	10
B_2	0	0	x	1	x
	1	x	x	x	x

J_1	B_1B_0	00	01	11	10
B_2	0	1	x	x	x
	1	x	0	x	x

J_0	B_1B_0	00	01	11	10
B_2	0	1	x	x	x
	1	x	x	x	1

K_2	B_1B_0	00	01	11	10
B_2	0	x	x	x	x
	1	x	1	x	0

K_1	B_1B_0	00	01	11	10
B_2	0	x	x	0	x
	1	x	x	x	1

K_0	B_1B_0	00	01	11	10
B_2	0	x	x	1	x
	1	x	1	x	x

Рис. 5. Карти Карно неповністю визначених функцій збудження $J_i=f(B_2B_1B_0)$ та $K_i=f(B_2B_1B_0)$, що перемикаються для інформаційних входів J і K тригерів відповідно

Знайдені відповідні контерми на певних картах Карно функції збудження дадуть наступні мінімальні логічні рівняння, які описують функціональну логіку роботи синхронного цифрового автомату:

$$J_1=1; K_0=1; \quad (5)$$

$$J_1=\#B_2; K_1=B_2; \quad (6)$$

$$J_2=B_0; K_2=B_0; \quad (7)$$

Отримані мінімальні логічні рівняння (5),(6),(7) з урахуванням (1) дозволяють створити кінцевий синхронний цифровий автомат оптимізованого блоку LRU (рис. 6):

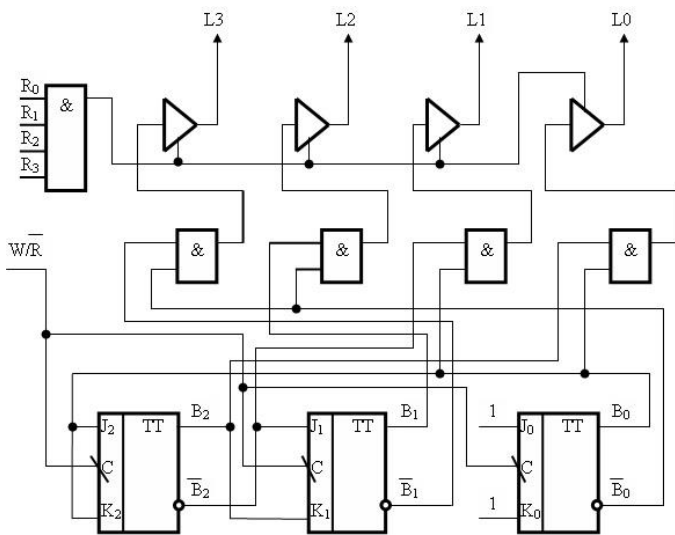


Рис. 6. Кінцевий синхронний цифровий автомат оптимізованого блоку LRU

III. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИМІЗОВАНОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛІ БЛОКУ LRU

Згідно з отриманою схемотехнікою функціональної логіки кінцевого синхронного цифрового автомату оптимізованого блоку LRU побудуємо комп'ютерну модель оптимізованого блоку LRU (рис.7):

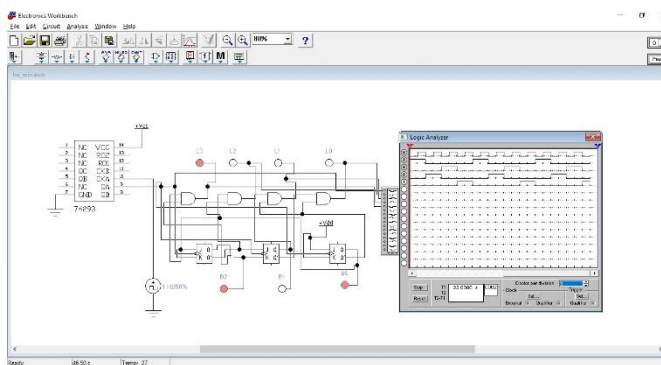


Рис. 7. Комп'ютерна модель оптимізованого блоку LRU

В процесі дослідження комп'ютерної моделі оптимізованого блоку LRU спостерігається зміна стану бітів $B \rightarrow B^+$ під впливом сигналу запису/читання $W/R\#$, послідовність якої була запрограмована у верхинах спрямованого графу на рисунку 5: $000 \rightarrow 011 \rightarrow 110 \rightarrow 101$, що повністю відповідає алгоритму pseudo – LRU з послідовністю обрання рядків L_i серед достовірних відповідної множини блоку даних: $L0 \rightarrow L2 \rightarrow L1 \rightarrow L3$.

IV. ДРУГИЙ ВАРІАНТ СИНТЕЗУ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ

В цьому варіанті оптимізації передбачається ідея заміни простої функції $L=f(B)$ на просту функцію $L=f(Q)$, яка описує функціональну логіку роботи декодера 2 в 4. Складемо таблицю істини логіки роботи декодера (табл.1):

TABLE III. ФУНКЦІЯ $L=f(Q)$ ОПИСУ ЛОГІКИ РОБОТИ КОДЕРА 2 В 4

Q_1	Q_0	L_3	L_2	L_1	L_0
0	0	0	0	0	1
0	1	0	0	1	0
1	0	0	1	0	0
1	1	1	0	0	0

Перенесемо дані з таблиці 1 у відповідні карти Карно на рисунку 8:

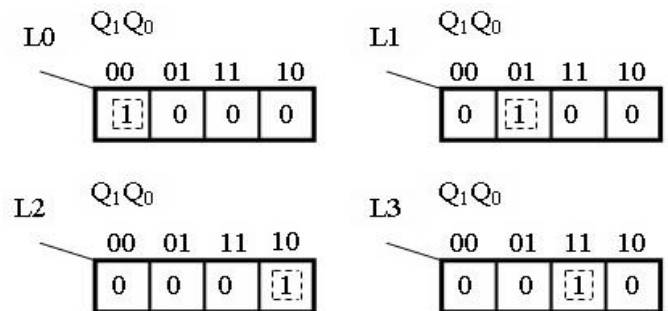


Рис. 8. Карти Карно мінімізації функціональної логіки роботи кодера

Мінімальні логічні рівняння набудуть вигляду:

$$L_0 = \bar{Q}_1 \bar{Q}_0; L_1 = \bar{Q}_1 Q_0; L_2 = Q_1 \bar{Q}_0; L_3 = Q_1 Q_0; \quad (8)$$

На підставі попередньо встановленої відповідності між бітами $B_2 B_1 B_0$ та послідовністю обрання рядків $L_0 \rightarrow L_2 \rightarrow L_1 \rightarrow L_3$ складемо спрямований граф переходів стану $Q_1 Q_0 \rightarrow Q_1^+ Q_0^+$ обрання рядка L_i під впливом сигналу запису/читання $W/\#R$ (рис. 9):

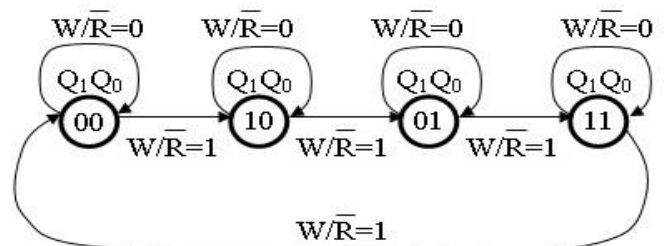


Рис. 9. Спрямований граф переходів стану $Q_1 Q_0 \rightarrow Q_1^+ Q_0^+$

Перенесемо відомі стани переходів $Q_1Q_0 \rightarrow Q_1^+Q_0^+$ з вершин спрямованого графу у відповідні карти Карно функцій збудження $J_i=f(Q_1Q_0)$ та $K_i=f(Q_1Q_0)$ (рис. 10):

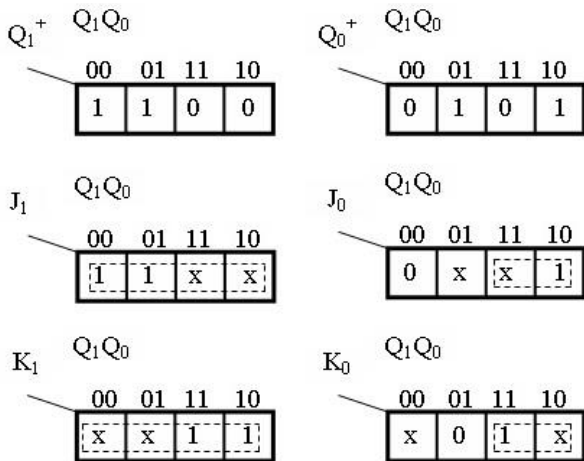


Рис. 10. Карти Карно стану переходів $Q_1Q_0 \rightarrow Q_1^+Q_0^+$ та неповністю визначених функцій збудження $J_i=f(Q_1Q_0)$ та $K_i=f(Q_1Q_0)$, що перемикаються для інформаційних входів J і K тригерів відповідно

Мінімальні логічні рівняння набудуть вигляду:

$$J_0 = Q_1; K_0 = Q_1; J_1 = 1; K_1 = 1; \quad (9)$$

З урахуванням (8) та (9) кінцевий синхронний цифровий автомат оптимізованого блоку LRU буде таким (рис. 11):

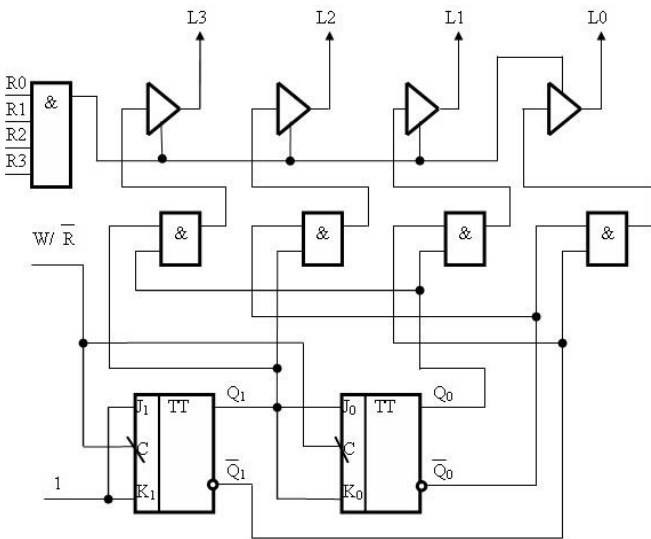


Рис. 11. Кінцевий синхронний цифровий автомат оптимізованого блоку LRU

V. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИМІЗОВАНОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛІ БЛОКУ LRU

Згідно з отриманою схемотехнікою функціональної логіки кінцевого синхронного цифрового автомату оптимізованого блоку LRU побудуємо комп'ютерну модель оптимізованого блоку LRU (рис.12). В процесі дослідження комп'ютерної моделі оптимізованого блоку LRU спостерігається зміна стану виходів $Q_1Q_0 \rightarrow Q_1^+Q_0^+$

$00 \rightarrow 10 \rightarrow 01 \rightarrow 11$, послідовність якої була запрограмована у вершинах спрямованого графу (рис. 9), що відповідає послідовності обрання рядів $L0 \rightarrow L2 \rightarrow L1 \rightarrow L3$ множини.

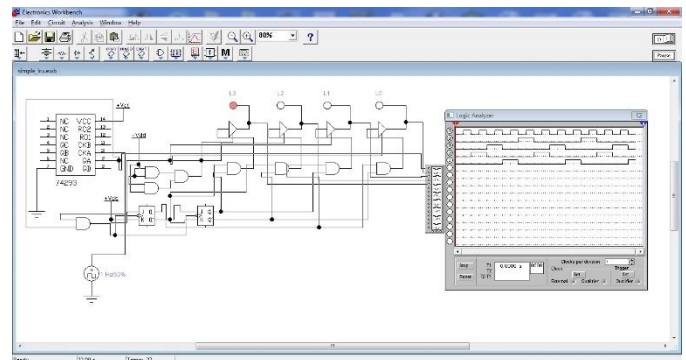


Рис. 12. Комп'ютерна модель оптимізованого блоку LRU

ВИСНОВКИ

Перший варіант синтезу задачі оптимізації несе в собі заміну складної перемикальної функції $V^+=f(L,B)$ на просту перемикальну функцію $V^+=f(B)$ з переходом від мінімальних логічних рівнянь (2),(3),(4) до мінімальних логічних рівнянь (5),(6),(7), що автоматично усуває відповідну функціональну логіку відновлення бітів $V_2V_1V_0$ [1], але при цьому зберігається класична архітектура блоку LRU.

Другий варіант синтезу задачі оптимізації передбачає заміну простої перемикальної функції $L=f(B)$ на просту перемикальну функцію $L=f(Q)$, яка описує функціональну логіку роботи декодера 2 в 4 та одночасний перехід від мінімальних логічних рівнянь (1),(2),(3),(4) до мінімальних логічних рівнянь (8),(9), що тягне за собою не тільки усунення функціональної логіки відновлення бітів $V_2V_1V_0$ [1], але й зкорочення кількості з трьох до двох синхронних тригерів JK - типу, при чому змінюється архітектура блоку LRU на користь швидкодії та надійності роботи.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Вадим Пуйденко «Комп'ютерна модель блоку LRU кеш – пам'яті процесорного ядра архітектури IA - 32» с.363 I – 74 Т «Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання» матеріали статей Міжнародної науково – практичної конференції, м. Івано – Франківськ, 14 – 19 травня 2018 року. - Івано – Франківськ: Супрун В.П., 2018. – 406 с. ISBN 978-617-7468-26-3
- [2] В.Л. Григорьев Микроспроцессор i486. Архитектура и программирование. Книга 2,3,4. Аппаратная архитектура. – М., ГРАНАЛ, 1993. – с. 111, ил. 54
- [3] Б.Э. Смит, М.Т. Джонсон Архитектура и программирование микропроцессора INTEL 80386 – М.:ТОО «Конкорд», 1992. – 334 с.
- [4] Брей Б. Микропроцессоры Intel: 8086/8088, 80186/80188, 80286, 80386, i486, Pentium, Pentium Pro, Pentium 2, Pentium 3, Pentium 4. Архитектура, программирование и интерфейсы. Шестое издание: Пер. с англ. - СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1328 с.: ил.
- [5] Intel® 64 and IA-32 Architectures Software Developer's Manual <http://www.intel.com>
- [6] Гук М. Процессоры P-II, P-Pro и просто Pentium. С-Петербург.: Питер Ком, 1999.- 288 с.
- [7] Гук М., Юров В. Процессоры Pentium 4, Athlon и Duron.- СПб.: Питер, 2001.- 512 с.

СЕКЦІЯ 7.

**Математичне та комп'ютерне
моделювання складних систем**

SECTION 7.

Mathematical and computer modelling of complex systems

Моделювання процесу управління ПД контролером безпечного приземлення квадрокоптера при аварії

Богдан Благітко, Юрій Мочульський
Кафедра радіофізики та комп'ютерних технологій
ЛНУ імені Івана Франка
Львів, Україна
blagitko@gmail.com, mochulsky@ukr.net

Ігор Заячук
Центр математичного моделювання
ІППММ ім. Я.С. Підстригача НАН України
Львів, Україна
igorzaj@gmail.com

Modeling the process of controlling the PD controller for safe landing of a quadcopter in case of an accident

Bohdan Blagitko, Yuriy Mochulsky
Department of Radiophysics and Computer Technologies
Ivan Franko Lviv's National University
Lviv, Ukraine
blagitko@gmail.com, mochulsky@ukr.net

Ihor Zajachuk
Centre of Mathematical Modeling
Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics
and Mathematics Ukrainian Academy of Science
Lviv, Ukraine
igorzaj@gmail.com

Анотація— За допомогою математичного моделювання визначено основні особливості безпечного приземлення аварійного квадрокоптера у разі використання ПД-контролера. Наведені результати моделювання приземлення квадрокоптера при виході з ладу однієї з чотирьох пар електродвигун-гвинт. Наведені значення вертикальних і горизонтальних швидкостей в момент приземлення в залежності від часу запізнення команди ПД-контролера на приземлення.

Abstract— With the help of mathematical modeling, the main features of the safe landing of an emergency quadcopter in the case of use of the PD-controller are determined. The results of simulation of the landing of the quadcopter in case of failure of one of four pairs of electric motor screw are considered. The values of vertical and horizontal velocities at the time of landing are given, depending on the delay time of the command of the PD controller to the landing.

Ключові слова— квадрокоптер, висотомір, 3-осьовий гіроскоп, 3-осьовий акселерометр, 3-осьовий магнітометр, ПД контролер.

Keywords— quadcopter, altimeter, 3-axis gyroscope, 3-axis accelerometer, 3-axis magnetometer, PD controller.

I. ВСТУП

Чимало процесів, які засновані на передаванні маси, енергії, інформації тощо, супроводжуються наявністю запізнювання. Це запізнювання може бути зумовлене різними причинами – обмеженістю швидкості поширення взаємодії (наприклад, електричного сигналу), “не миттєвістю” нервової та м’язової реакції в системах людина–машина, наявністю інерційності деяких елементів, обмеженістю швидкості перебігу технологічних процесів (наприклад, горіння в камері двигуна). У багатьох випадках вилучення запізнювання з розгляду, однак, дає змогу адекватно описувати реальні процеси. Проте іноді неврахування запізнювання призводить до абсурдних (або, у крайньому випадку, не еквівалентних реальності) висновків.

Переважно у статтях, присвячених проблемам польоту квадрокоптера, апріорі передбачається, що всі чотири пари електродвигун-гвинт та їх схема керування є справними [1-3]. На практиці часто виникають ті або інші несправності в послідовності ланок: схема управління - електродвигун-гвинт. Коли несправність несподівано раптово з'являється під час польоту квадрокоптера, виникає надзвичайна

ситуація. Результати математичного моделювання аварійних приземлень квадрокоптера після виходу з ладу однієї з чотирьох пар електродвигун-гвинт приведені в наступній роботі [4].

У статті [4] запропоновано спосіб безпечного приземлення квадрокоптера, в якого одна з чотирьох пар електродвигун-гвинт несподівано відмовляє в польоті. Для зменшення вертикальної складової швидкості приземлення при виході з ладу однієї з чотирьох пар електродвигун-гвинт пропонується миттєво відключити напругу живлення від електродвигуна, який розташований на протилежному кінці консолі. У цьому випадку горизонтальні складові швидкості практично нульові, а вертикальна складова швидкості приземлення суттєво зменшується в порівнянні із швидкістю падіння аварійного квадрокоптера на землю.

Однак реалізація запропонованого методу має суттєві недоліки, які роблять її неможливою. Адже необхідно розпізнати пару електродвигун-гвинт, яка вийшла з ладу, і відключити живлення електродвигуна на протилежному від несправної пари електродвигун-гвинт кінці консолі. На все це необхідний деякий час, який обумовлює запізнення команди.

У цій статті розглянуті основні особливості впливу запізнення команди на безпечне приземлення аварійного квадрокоптера у разі використання ПД-контролера.

II. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРИЗЕМЛЕННЯ КВАДРОКОПТЕРА У ВИПАДКУ ВІДМОВИ ОДНІЄЇ З ЧОТИРЬОХ ПАР ЕЛЕКТРОДВИГУН-ГВИНТ

Математична модель квадрокоптера в польоті в тому випадку, якщо всі чотири пари електродвигун - гвинт і схема управління ними є справними, розглядаються як дві, зв'язані між собою, але принципово різні математичні моделі. Фактично математичною моделлю квадрокоптера є БПЛА, на входи якого поступають значення напруги живлення електродвигунів, а виходи - висота і кути крену, тангажу та рискання. Вектор вхідних сигналів \bar{U} обчислюють мікроконтролером на підставі змінних стану, отриманих у момент часу t_i . Результати обчислень отримують із запізненням τ , тобто в момент часу $t_i + \tau$. Математичною моделлю ПД-контролера є система, в яку вводяться виміряні значення з датчиків висоти, кути крену, тангажу та рискання, а мікроконтролер реалізує алгоритм ПД-контролера і виводить значення напруги електродвигунів.

Математична модель квадрокоптера в польоті в тому випадку, коли всі чотири пари електродвигун-гвинт і схема керування справні, описується системою диференціальних рівнянь 16-го порядку у вигляді Коші [4].

У разі виходу з ладу однієї з чотирьох пар електродвигун-гвинт квадрокоптера можливі наступні випадки: відмова носової пари електродвигун-гвинт; відмова хвостової пари електродвигун-гвинт; відмова правої пари електродвигун-гвинт; відмова лівої пари електродвигун-гвинт. Моделювання несправності виконано шляхом вимкнення живлення несправного двигуна.

Для розв'язання диференціальних рівнянь математичної моделі квадрокоптера використовувався неявний метод Рунге-Кутта TR-BDF2 (на першому етапі рівняння інтегрують методом трапецій, а на другому етапі використовується формула диференціювання назад другого порядку).

Приземлення квадрокоптера відбувається після того, як він знаходиться на висоті 50м над точкою з координатами $X = 0, Y = 0$. Квадрокоптер в цей час "зависає" нерухомо (кути тангажу і крену нульові). Основні параметри квадрокоптера: маса - 468г, відстань від центру мас до електродвигуна - 22.5см, ЕРС акумулятора - 11.1 В.

«Ніс» квадрокоптера скерований в напрямку плюс по осі X. У цьому випадку початкові значення кутів тангажу і крену дорівнюють нулю, а кут рискання - 90° . Моделювання відмови конкретної пари гвинта електродвигун-гвинт здійснюється шляхом присвоєння напруги живлення відповідного двигуна величини 0.0В для всіх моментів часу $t \Rightarrow ta$, де ta - момент відмови конкретної пари електродвигун-гвинт квадрокоптера.

III. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРИЗЕМЛЕННЯ КВАДРОКОПТЕРА У ВИПАДКУ ВІДМОВИ ОДНІЄЇ З ЧОТИРЬОХ ПАР ЕЛЕКТРОДВИГУН-ГВИНТ

Якщо, відповідно до запропонованого способу [4], одночасно з відмовою конкретного двигуна, вимикається живлення електродвигуна, розташованого на протилежному кінці тієї ж траверси, що і дефектний електродвигун, то час падіння становить 11.7с. Вертикальна швидкість приземлення у всіх випадках несправностей становить 5.6м/с.

Горизонтальні компоненти швидкості весь час будуть дорівнювати нулю, тобто квадрокоптер падає вертикально вниз. Тангаж і крен під час падіння є нульовими, тобто квадрокоптер завжди приземляється на шасі. У зв'язку з тим, що в цьому випадку не компенсуються моменти сил двох працюючих електродвигунів, швидкість обертання навколо вертикальної осі в момент приземлення складає 4.4рад/с. Така кутова швидкість створюватиме на відстані 22.5см від центру мас кутове прискорення 4.4м/с².

Як вже згадувалося вище, є деяка затримка в команді для виявлення несправності, прийняття рішення і вимкнення живлення двигуна, розташованого на протилежному кінці тієї ж консолі, що й несправний електродвигун. Це істотно відрізняється від ідеального випадку застосування запропонованого способу, результати якого описані в статті [4]. В цьому випадку необхідно ввести у математичну модель польоту квадрокоптера нову змінну lag [s], яка при математичному моделюванні відобразить числове значення запізнення команди керування на відключення електроенергії того двигуна, який розташований на протилежному кінці тієї ж консолі, що й несправний електродвигун. Діапазон зміни значень запізнення команди відключення електродвигуна вибирається по значеннях вертикальної складової швидкості на момент приземлення, графік якої наведений на рис.1.

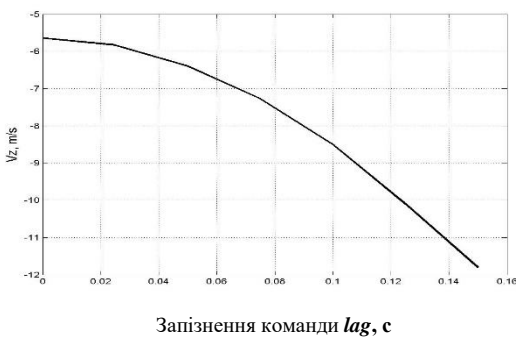


Рис. 1. Залежність вертикальної складової швидкості в момент приземлення квадрокоптера від запізнення команди відключення живлення електродвигуна.

Тут присутні два крайні значення вертикальної швидкості: одне відповідає ситуації, коли жоден метод не використовується для зменшення вертикальної швидкості, а інше відповідає застосуванню запропонованого методу.

З таблиці 1 випливає, що у разі несправності носового або хвостового двигуна, квадрокоптер падає на землю гвинтами вниз (кут тангажу становить 180° , відповідно). У цьому випадку вертикальна складова швидкості приземлення становить 12.7 м/с. Додаткову небезпеку викликають ненульові значення горизонтальних складових швидкості приземлення. Залежно від коефіцієнта тертя об землю, квадрокоптер буде ще деякий час рухатися по землі після приземлення.

TABLE I. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРИЗЕМЛЕННЯ АВАРІЙНОГО КВАДРОКОПТЕРА ПРИ ВИХОДІ З ЛАДУ ОДНІЄІ З ЧОТИРЬОХ МОТОРНО-ГВИНТОВИХ ПАР

Несправний двигун	Тангаж	Крен	Рискання	V_x m/s	V_y m/s	V_z m/s
Носовий	180°	40°	10°	0	1.47	-12.7
Правий	-47°	180°	160°	-1.05	0.59	-12.7
Хвостовий	180°	-33°	5°	0.03	-1.44	-12.7
Лівий	28°	-170°	-180°	1.1	-0.6	-12.7

Таблиця 1 також показує, що у разі несправності правого або лівого двигуна, квадрокоптер падає на землю гвинтами вниз (кут крену становить 180° , відповідно). У цьому випадку вертикальна складова швидкості приземлення також становить 12.7 м/с.

Як і в попередньому випадку, додаткову небезпеку викликають ненульові значення горизонтальних складових швидкості приземлення.

Залежно від коефіцієнта тертя об землю, квадрокоптер буде ще деякий час рухатися по землі після приземлення.

Результати математичного моделювання процесу приземлення квадрокоптера у разі виходу з ладу однієї з чотирьох пар електродвигуна квадрокоптера та застосування запропонованого способу безпечного приземлення аварійного квадрокоптера наведені в таблиці II. Якщо, відповідно до запропонованого способу, одночасно з несправним двигуном, потужність електродвигуна, розташованого на протилежному кінці тієї ж траверси, що і дефектний електродвигун, вимикається, то час падіння становить $11,7$ с. Вертикальна швидкість

приземлення у всіх випадках несправності становить 5.6 м/с. Горизонтальні компоненти швидкості приземлення весь час будуть дорівнювати нулю, тобто квадрокоптер падає вертикально вниз. Тангаж і крен під час падіння є нульовими, тобто квадрокоптер завжди приземляється на шасі.

TABLE II. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ БЕЗПЕЧНОГО ПРИЗЕМЛЕННЯ АВАРІЙНОГО КВАДРОКОПТЕРА ПРИ ВИХОДІ З ЛАДУ ОДНІЄІ З ЧОТИРЬОХ МОТОРНО-ГВИНТОВИХ ПАР.

Несправний двигун	Тангаж	Крен	Рискання	V_x m/s	V_y m/s	V_z m/s
Носовий	0°	0°	175°	0	0	-5.6
Правий	0°	0°	5°	0	0	-5.6
Хвостовий	0°	0°	175°	0	0	-5.6
Лівий	0°	0°	5°	0	0	-5.6

Між цими крайніми значеннями вертикальної швидкості приземлення є проміжний діапазон значень, який обумовлений величиною запізнення команди на приземлення квадрокоптера.

У всіх статтях [1-3] моделювання польоту квадрокоптера рухи розглядаються як рухи матеріальної точки маси m . Для того, щоб побачити не тільки рух центру мас квадрокоптера, але і його обертання під час аварійного приземлення, тут були додані переміщення двох точок квадрокоптера, центру мас і носового двигуна.

На рис.2 представлені графіки траєкторій процесу приземлення квадрокоптера у випадку несправного лівого електродвигуна і вимкненого із запізненням правого електродвигуна (траєкторії 2-4), а також графіки траєкторії процесу приземлення квадрокоптера з дефектним правим електродвигуном і вимкненим із запізненням лівим електродвигуном (траєкторії 5-7). Траєкторія 1 відображає процес приземлення квадрокоптера при аварії будь-якого одного із електродвигунів і миттєвому відключенні відповідного електродвигуна, тобто при запізненні команди $lag = 0.0$ с. Траєкторії 2 і 5 відображають процес приземлення квадрокоптера при запізненні команди $lag = 0.05$ с. Траєкторії 3 і 6 представляють процес приземлення квадрокоптера при запізненні команди $lag = 0.10$ с. Траєкторії 4 і 7 відображають процес приземлення квадрокоптера при запізненні команди $lag = 0.15$ с. Пунктирна лінія показує траєкторію центру мас квадрокоптера, а лінія з маркерами - траєкторія руху носового двигуна.

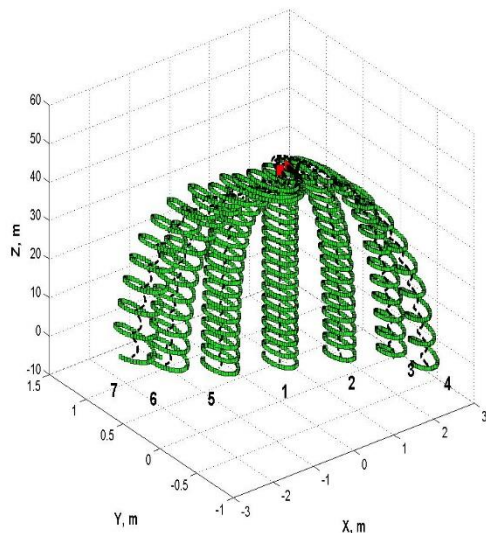


Рис. 2. Траєкторії руху квадрокоптера з ПД-контролером: 2-4 у разі відмови лівої пари двигун-гвинт; 3-7 - в разі виходу з ладу правої пари двигун-гвинт.

На рис.3 наведено графіки траєкторій процесу приземлення квадрокоптера у випадку несправного носового електродвигуна і вимкненого із запізненням хвостового електродвигуна (траєкторії 8-10), а також графіки траєкторії процесу приземлення квадрокоптера із дефектним хвостовим електродвигуном і вимкненим із запізненням носовим електродвигуном (траєкторії 11-13). Траєкторії 8 і 11 відображають процес приземлення квадрокоптера при запізненні команди $lag = 0.05c$. Траєкторії 9 і 12 представляють процес приземлення квадрокоптера при запізненні команди $lag = 0.10c$. Траєкторії 10 і 13 відображають процес приземлення квадрокоптера при запізненні команди $lag = 0.15c$.

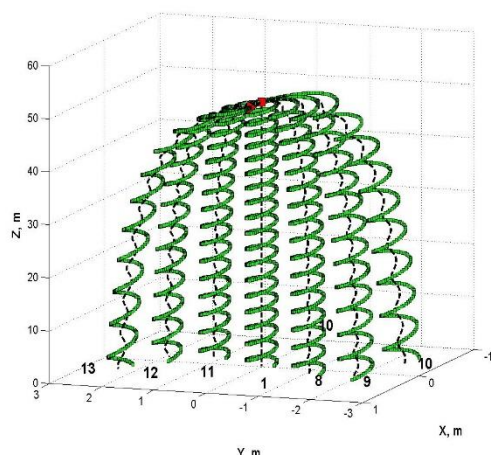


Рис. 3. Траєкторії руху квадрокоптера з ПД-контролером: 8-10 у разі відмови носової пари двигун-гвинт; 11-13 - в разі виходу з ладу хвостової пари двигун-гвинт.

IV. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРИЗЕМЛЕННЯ КВАДРОКОПТЕРА ПРИ ЗАПІЗНЕННІ КОМАНДИ ПД-РЕГУЛЯТОРА

Результати математичного моделювання процесу приземлення квадрокоптера у разі виходу з ладу однієї з чотирьох пар електродвигун-гвинт квадрокоптера та застосуванні запропонованого способу безпечного приземлення аварійного квадрокоптера при запізненні команди на приземлення $lag = 0.05c$ наведені в таблиці III.

TABLE III. РЕЗУЛЬТАТИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ БЕЗПЕЧНОГО ПРИЗЕМЛЕННЯ АВАРІЙНОГО КВАДРОКОПТЕРА ПРИ ЗАПІЗНЕННІ КОМАНДИ НА ПРИЗЕМЛЕННЯ $LAG = 0.05c$.

Несправний двигун	Тангаж	Крен	Рискання	V_x m/s	V_y m/s	V_z m/s
Носовий	-10°	-18°	-175°	-0.1	-0.15	-6.37
Правий	19.5°	10°	-6°	0.17	0.11	-6.37
Хвостовий	9.5°	19.5°	-174°	0.1	0.17	-6.37
Лівий	-19°	-8.2°	15°	-0.23	-0.038	-6.37

Результати математичного моделювання процесу приземлення квадрокоптера у разі виходу з ладу однієї з чотирьох пар електродвигун-гвинт квадрокоптера та застосуванні запропонованого способу безпечного приземлення аварійного квадрокоптера при запізненні команди на приземлення $lag = 0.15c$ наведені в таблиці IV.

TABLE IV. РЕЗУЛЬТАТИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ БЕЗПЕЧНОГО ПРИЗЕМЛЕННЯ АВАРІЙНОГО КВАДРОКОПТЕРА ПРИ ЗАПІЗНЕННІ КОМАНДИ НА ПРИЗЕМЛЕННЯ $LAG = 0.15c$.

Несправний двигун	Тангаж	Крен	Рискання	V_x m/s	V_y m/s	V_z m/s
Носовий	4°	-51°	30°	-0.5	0.4	-10.2
Правий	-48.5°	-5.6°	118°	-1.08	-0.38	-10.4
Хвостовий	-4°	51°	30°	0.3	-0.4	10.23
Лівий	-51.6°	7.6°	67.4°	0.75	0.46	-10.7

ВИСНОВКИ

Якщо запізнення команди ПД-регулятора на приземлення не перевищує $0.05c$, то безпечно приземлення аварійного квадрокоптера гарантоване. При запізненні більше $0.05c$ квадрокоптер терпить аварію.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] H. Huang., G. M. Hoffmann, S. L. Waslander, C. J. Tomlin, "Aerodynamics and control of autonomous quadrotor helicopters in aggressive maneuvering," IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 2009, 3277–3282.
- [2] D. Wissiere, "Experimental autonomous flight of a small-scaled helicopter using accurate dynamics model and low-cost sensors" / David Wissiere, Piere-Jean Bristeau, Alain Piere Martin, Nikolas Petit // Proceeding of the 17th Word Congress The International Federation of Automatic Control, Seoul Korea, July 6-11, 2008, 14642-14650.
- [3] Marcelo Becker. In-Flight Collision Avoidance Controller Based Only on OS4 Embedded Sensors/ R.C.B.Sampaio, S.Bounabdallah, V.de Perrot, R.Siegwart// Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. vol.34 no.3 Rio de Janeiro July/Sept. 2012 – March 2012. – Vol. XXXIV, No.3, July-September 2012– C. 294–107.
- [4] Blagitko B., Y. Mochulsky, "Method of safe landing the emergency quadcopter," Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska", IAPGOS 2018; 8 (4): 44-47.

Ефективні обчислювальні схеми для узагальненого двовимірного дробового за часом рівняння дифузії

В. О. Богаєнко

Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України
Київ, Україна
sevab@ukr.net

Efficient computation schemes for generalized two- dimensional time-fractional diffusion equation

V. O. Bohaienko

V. M. Glushkov Institute of cybernetics of NAS of Ukraine
Kyiv, Ukraine
sevab@ukr.net

Анотація—У роботі експериментально аналізується вплив обчислювальних алгоритмів апроксимації похідної на точність та швидкість розв'язання дробового за часом змінною двовимірного рівняння дифузії з узагальненою похідною Капуто методом скінченних різниць. Розглядаються випадки розв'язання задачі на CPU та GPU.

Abstract—In the paper we experimentally study the influence of computational algorithms of derivative approximation on the accuracy and performance of solving time-fractional two-dimensional diffusion equation with generalized Caputo derivative using finite difference method. The cases of solving the problem on CPU and GPU are considered.

Ключові слова—узагальнена похідна Капуто; рівняння дифузії; скінченно-різницева схема; GPU

Keywords—generalized Caputo derivative; diffusion equation; finite-difference method; GPU

I. INTRODUCTION

Diffusion processes in different media are actively studied using differential equations of fractional order [1,2]. In most cases, the values of fractional derivatives' parameters are fitted to experimental data and the generalized forms of fractional derivatives [3-6] can be used to increase the adaptability of models to the specific real-world cases.

Numerical solution of initial-boundary value problems for fractional differential equations has a high computational complexity due to a need to approximate fractional derivatives. Generalization of derivatives leads to even higher complexity and makes urgent the development of new numerical algorithms.

The main approaches to lower computational complexity when solving fractional differential equations include the usage of parallel computing techniques [7,8,9] and the application of

short memory principle [2,10,11]. The latter consists in the integration of a function over a fixed interval reducing the complexity of fractional derivative computation from linear to constant. Addressing the issue of balancing approximation accuracy and complexity, basic fixed memory principle [2] discards history information and piecewise memory principle [10] reduces complexity approximating fractional derivative's kernel and considering all past data. In the case of a generalized Caputo derivative with respect to a function, power series expansions [4] can be used for this purpose.

In multi-dimensional case, one of the most used methods that decrease the complexity is the locally one-dimensional schemes [12,13] that reduce high-dimensional problems to a set of one-dimensional ones.

On the base of these principles, the paper experimentally studies performance and accuracy issues when using short memory approximates of generalized Caputo derivative while solving two-dimensional diffusion equation using a locally one-dimensional finite difference scheme.

II. PROBLEM STATEMENT AND FINITE DIFFERENCE SCHEME

We consider the following two-dimensional equation that models time-fractional diffusion [14]:

$$\sigma D_{t,g}^{(\beta)} C = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) - v_x \frac{\partial C}{\partial x} - v_y \frac{\partial C}{\partial y} + F, \quad (1)$$

where $C(x,t)$ is the diffusive substance concentration, σ is the porosity of the medium, D is the diffusion coefficient, F is the given function, $D_{t,g}^{(\beta)}$ is the generalized Caputo fractional

derivative with respect to time variable t that has the following form:

$$D_{t,g}^{(\beta)} H(x,t) = \frac{1}{\Gamma(1-\beta)} \int_0^t \frac{\partial H(x,t)}{\partial t} (g(t) - g(\tau))^{-\beta} d\tau$$

Filtration process is considered in the domain described in [15]. Following [15,16] we find the components of the filtration velocity vector v_x, v_y using the model of steady-state filtration in potential velocity field. Further, in the system (1) we perform the transition to the new variables φ, ψ that represent the points of geometrically simpler domain of complex flow potential and obtain the system

$$\sigma D_{t,g}^{(\beta)} C(\varphi, \psi, t) = v^2(\varphi, \psi) \left[D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial \varphi^2} - \frac{\partial^2 C}{\partial \psi^2} \right) - \frac{\partial C}{\partial \varphi} + F \right]. \quad (2)$$

For the system (2) we, following [14], pose first-order initial and boundary conditions.

Considering uniform grid domain

$$\omega_{h\tau} = \{(\varphi_i, \psi_k, t_j) : \varphi_i = ih_1 \ (i = \overline{0, m+1}), \\ \psi_k = h_2(k - 0.5) \ (k = \overline{0, n+1}), t_j = j\tau$$

where h_1, h_2, τ are the steps with respect to the spatial and the time variables, correspondingly, and applying the splitting approach [17] to the system (2) we obtain:

$$\frac{\sigma}{2} \Delta_t^{(\beta)} \bar{C} = v^2 \left((D \bar{C}_{\varphi})_{\varphi} - \bar{C}_{\varphi} + 0.5F \right), \quad (3)$$

$$\frac{\sigma}{2} \Delta_t^{(\beta)} \hat{C} = v^2 \left((D \hat{C}_{\psi})_{\psi} - 0.5F \right), \quad (4)$$

$$\Delta_t^{(\beta)} \bar{C} = \frac{1}{\tau} \left(2b_j (C^{j+1/2} - C^j) + \sum_{s=0}^{j-1} \bar{b}_s^{(j)} (C^{s+1} - C^s) \right), \quad (5)$$

$$\Delta_t^{(\beta)} \hat{C} = \frac{2}{\tau} \sum_{s=0}^j \left[\bar{b}_s^{(j)} C^{s+1} + (\bar{q}_s^{(j)} - \bar{b}_s^{(j)}) C^{s+1/2} - \bar{q}_s^{(j)} C^s \right], \quad (6)$$

$$b_j = \frac{1}{\Gamma(1-\beta)} \int_{t_j}^{t_{j+1/2}} \frac{d\tau}{(g(t_{j+1/2}) - g(\tau))^\beta}, \quad (7)$$

$$\bar{b}_s^{(j)} = \frac{1}{\Gamma(1-\beta)} \int_{t_s}^{t_{s+1}} \frac{d\tau}{(g(t_{j+1/2}) - g(\tau))^\beta},$$

$$\bar{q}_s^{(j)} = \frac{1}{\Gamma(1-\beta)} \int_{t_s}^{t_{s+1/2}} \frac{d\tau}{(g(t_{j+1}) - g(\tau))^\beta},$$

$$\bar{b}_s^{(j)} = \frac{1}{\Gamma(1-\beta)} \int_{t_{s+1/2}}^{t_{s+1}} \frac{d\tau}{(g(t_{j+1}) - g(\tau))^\beta}.$$

The systems (3),(4) can be easily transformed to an independent sets of three-diagonal linear equation systems that is solved using the Thomas algorithm [17].

III. COMPUTATIONAL SCHEMES

The computation of fractional derivative approximations (5),(6) has the biggest impact on the speed of the solution because its execution time linearly increases with the increase of time step number. The amount of memory needed to store problems solution on previous time steps also linearly increase. Apart from the direct computations upon (5),(6) (algorithm 1), we consider two following algorithms that lower computational complexity.

At first, we consider the fixed memory principle restricting sums in (5), (6) by the condition $\bar{b}_s^{(j)} > \varepsilon_1$ where ε_1 is the given constant (algorithm 2). The values of the integrals (7) are computed using the recursive subdivision algorithm describes in [18]. In this case, time needed to perform computations on one time step along with memory needed to store solutions tend to be constant starting from some step.

In addition, we propose the algorithm 3 that is based on the following series expansion of the integrals (7) [18].

Assuming there exists an infinitely differentiated function $f(\tau) : f(g(\tau)) = \tau$, after making a change of variables in the form of $x = g(\tau) \Rightarrow \tau = f(x)$, the integrals can be expressed as

$$b_s^{(j)} = \int_{t_s}^{t_{s+1}} (g(t_j) - g(\tau))^{-\beta} d\tau = \int_{g(t_s)}^{g(t_{s+1})} f'(x) (g(t_j) - x)^{-\beta} dx.$$

Expanding $(g(t_j) - x)^{-\beta}$ using the generalized Newton binomial series and expanding $f'(x)$ in the Taylor series at $x = g(t_{s+1})$ we have

$$b_s^{(j)} = \sum_{n=0}^{\infty} \left((-1)^n \binom{-\beta}{n} g(t_j)^{-\beta-n} S_n \right),$$

$$S_n(t_s, t_{s+1}) = \sum_{m=0}^{\infty} \left[B_m \frac{f^{(m+1)}(g(t_{s+1}))}{m!} \right], \quad (8)$$

$$B_m = \int_{g(t_s)}^{g(t_{s+1})} x^n (x - g(t_{s+1}))^m dx.$$

$$B_0 = \int_{g(t_s)}^{g(t_{s+1})} x^n dx = \frac{1}{n+1} (g(t_{s+1})^{n+1} - g(t_s)^{n+1}),$$

$$B_{i+1} = -\frac{n+i+2}{g(t_{s+1})(i+1)} \left(B_i - \frac{g(t_s)^{n+1} (g(t_s) - g(t_{s+1}))^{i+1}}{g(t_{s+1})(i+1)} \right).$$

The main feature of the scheme (8) is that the values of the coefficients S_n once calculated for the fixed t_s and t_{s+1} can be cached and further used when t_j changes.

Computations of the sums from the approximation (5),(6) using (8) can be recurrently organized as follows:

$$\sum_{s=0}^{j-1} \bar{b}_s^{(j)} (C^{s+1} - C^s) \approx \sum_{i=0}^K \left((-1)^i \binom{-\alpha}{i} g(t_{j-1})^{-\alpha-i} S_{n,i-1} \right),$$

$$S_{n,j} = S_{n,j-1} + (C^j - C^{j-1})S_n(t_{j-1}, t_j), S_{n,1} = 0. \quad (9)$$

where K is the given restriction on the number of terms in series.

Due to a poor convergence of the series (8) when $t_{s+1} = t_j$, we compute the values of b_j and $\bar{b}_j^{(j)}$ using the recursive subdivision algorithm.

The computations of right parts of linear equation systems arising from (3),(4) along with their solution can be performed independently. This allows straightforward application of multithreading and GPU-computing techniques to the considered problem.

IV. NUMERICAL EXPERIMENTS

The efficiency of the computational schemes was tested solving the model problem for the equation (2) for which $C(\varphi, \psi, t) = \varphi^2 \psi^2 + t^2$ is the solution when

$$F(\varphi, \psi, t) = \sigma \frac{\Gamma(1+2/\gamma)}{\nu^2 \Gamma(1-\alpha+2/\gamma)} t^{2-\alpha\gamma} - 2(D(\varphi^2 + \psi^2) - \varphi\psi^2)$$

and $g(t) = t^\gamma$ (i.e. Caputo-Katugampola fractional derivative [19] was used).

The discretized system (4),(5) was solved for 1000 time steps of size $\tau = 0.001$ on 50x50 cells grid. Algorithms' performance was measured for $\gamma = 0.5, 1, 2$.

Solution process was performed with CPU OpenMP-multithreaded implementation of the algorithms and with GPU implementation using OpenCL. AMD E2-9000 CPU and AMD Radeon R2 240 GPU was used.

The model problem was solved using three above-described computational schemes for the approximations (5),(6). Algorithm 2 was used with $\varepsilon_1 = 0.1, 0.01, 0.001$ while algorithm 3 - with $K = 100, 75, 50, 25$. Distribution of solution error (average square deviation on the last time step) and total computation time when executing on 2 CPU threads for $g(t) = t^{1/2}$ is given in Fig.1.

While direct computations upon (5),(6) yield to the most accurate solution, time spent to obtain it was substantially (for 3 to 22-times) bigger than in other tested cases. For both fixed memory algorithm 2 and restricted series expansion algorithm 3, a decrease in the amount of time spent to obtain the solution was accompanied by the decrease in the solution's accuracy. In the case of fast solution modes when $\varepsilon_1 \geq 0.01$ and $K \geq 50$, more accurate solutions was obtained by the algorithm 3. When more computational time consumption is acceptable, simple summation restrictive algorithm 2 gives better accuracy (Fig.1). These conclusions were true for all tested values of γ .

Computation time linearly increased with the increase of time step number for the algorithm 1, was constant for the algorithm 3, and became constant after some small number of time steps for the algorithm 2.

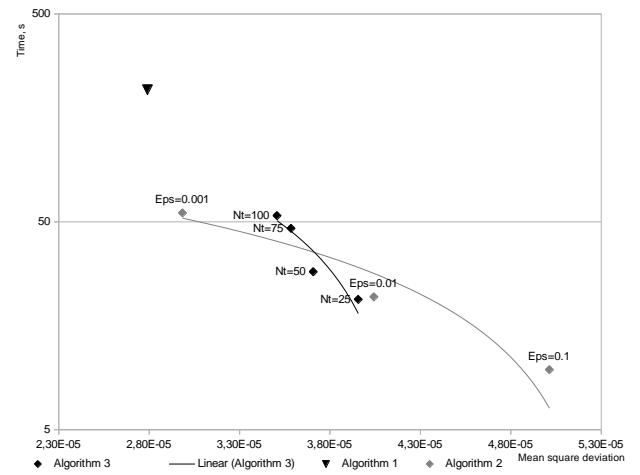


Fig. 1. Distribution of solution error and total computation time for $g(t) = t^{1/2}$

When GPU was used for computations, the speed-up comparing with the execution on 2 CPU threads is given in Fig.2. The speed-up became close to constant after some time step for all the tested algorithms. The slower is the algorithm, the higher is the speed-up and more time is needed to achieve its bigger values (Fig.2).

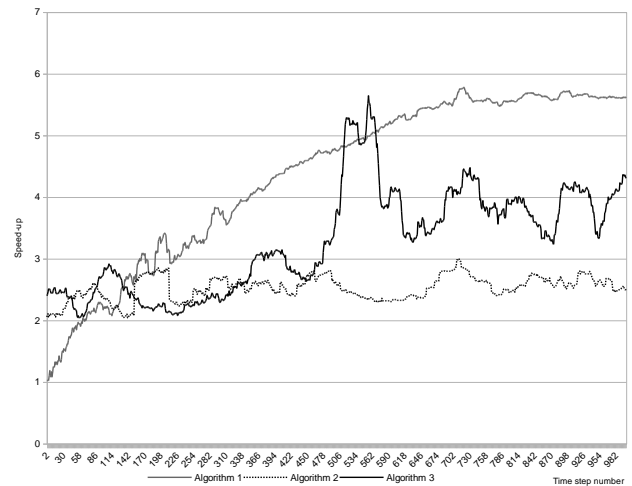


Fig. 2. Speed-up of the algorithms while executing them on GPU

CONCLUSIONS

Linear increase of computational cost while solving fractional differential diffusion equations leads to a need to develop and study speed and accuracy balancing computational algorithms for derivatives approximation.

On the base of the approach of variable separating series expansion of fractional derivative's kernels and the fixed memory principle we present a new scheme (algorithm 3) for generalized Caputo derivative values computation.

Experimental study of the proposed algorithm was performed comparing it to the direct derivative's approximation (algorithm 1) and basic fixed memory principle application to it (algorithm 2). Computational experiments results show that for

the Caputo-Katugampola derivative, depending on the derivative's parameter value, 4-5 times speed-up can be obtained by the algorithm 2 with 7-11% loss of accuracy. For the proposed series expansion scheme 7-9 times speed-up was achieved with 8-30% loss of accuracy.

GPU implementation of the algorithms allow obtaining problem's solutions ~5 times faster for the non-optimized algorithm 1 comparing to ~2 times speed-up for the algorithms 2 and 3. Lower speed-up of the algorithm 3 can be caused by lower GPU performance comparing to CPU while doing mathematical computations that are significantly more complex than in the algorithm 1.

REFERENCES

- [1] R. Gorenflo, F. Mainardi, "Fractional calculus: integral and differential equations of fractional order" in *Fractals and Fractional Calculus in Continuum Mechanics*, Wien, Austria, Springer Verlag, 1997, pp.223–276.
- [2] I. Podlubny, "Fractional differential equations", New York, Academic Press, 1999.
- [3] F. Jarad, Th. Abdeljawad, D. Baleanu, "On the generalized fractional derivatives and their Caputo modification", *J. Nonlinear Sci. Appl.*, vol. 10, pp. 2607-2619, 2017.
- [4] R. Almeida, "A Caputo fractional derivative of a function with respect to another function", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 44, pp. 460-481, 2017.
- [5] R. Almeida, A.B. Malinowska, M.T. Monteiro, "Fractional differential equations with a Caputo derivative with respect to a kernel function and their applications", *Math. Meth. Appl. Sci.*, vol. 41, pp. 336-352, 2018.
- [6] V.M. Bulavatsky, Yu.G. Kryvonos, "Mathematical Models with a Control Function for Investigation of Fractional-differential Dynamics of Geomigration Processes", *Journal of Automation and Information Sciences*, no. 6, pp. 1-11, 2014.
- [7] K. Diethelm, "An efficient parallel algorithm for the numerical solution of fractional differential equations", *Fract. Calc. Appl. Anal.*, vol. 14, no. 3, pp. 475-490, 2011.
- [8] C.Gong, W. Bao, G. Tang, "A parallel algorithm for the Riesz fractional reaction-diffusion equation with explicit finite difference method", *Fract. Calc. Appl. Anal.*, vol. 16, no. 3, pp. 654–669, 2013.
- [9] V.A. Bogaenko, V.M. Bulavatskiy, Iu.G. Kryvonos, "On Mathematical modeling of Fractional-Differential Dynamics of Flushing Process for Saline Soils with Parallel Algorithms Usage", *Journal of Automation and Information Sciences*, vol. 48, no. 10, pp.1-12, 2016.
- [10] C. Gong, W. Bao, J. Liu, "A piecewise memory principle for fractional derivatives", *Fract. Calc. Appl. Anal.*, vol. 20, no. 4, pp. 1010–1022, 2017.
- [11] N.J. Ford, A.C. Simpson, "The numerical solution of fractional differential equations: Speed versus accuracy", *Numerical Algorithms*, vol. 26, no. 4, pp. 333-346, 2001.
- [12] A. Chen, C.P. Li, "A novel compact ADI scheme for the time-fractional subdiffusion equation in two space dimensions", *Int. J. Comput. Math.*, vol. 93, no. 6, pp. 889-914, 2016.
- [13] V.M. Bulavatsky, V.A. Bogaenko, "Mathematical Modeling of the Dynamics of Nonequilibrium in Time Convection--Diffusion Processes in Domains with Free Boundaries", *Cybernetics and Systems Analysis*, vol. 52, no. 3, pp. 427-440, 2016.
- [14] V.A. Bogaenko, V.M. Bulavatsky "Computer modeling of the dynamics of migration processes of soluble substances in the case of groundwater filtration with free surface on the base of the fractional derivative approach (in Russian)", *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, vol. 12, pp. 21-29, 2018.
- [15] V.M. Bulavatsky, "Mathematical modeling of dynamics of the process of filtration convection diffusion under the condition of time nonlocality", *Journal of Automation and Information Science*, vol. 44, no. 2, pp.13–22, 2012.
- [16] P.Ya. Polubarinova-Kochina, "Theory of groundwater movement (in Russian)", Moscow, USSR, Nauka, 1977.
- [17] A. Samarskii, "The Theory of Difference Schemes", New York, CRC Press, 2001.
- [18] V.O. Bohaienko, "Numerical Integration Schemes for Finite Difference Solution of Time-Fractional Diffusion Equation with Generalized Caputo Derivative" in *"Informational technologies and computer modelling"*; papers of the International scientific and practical conference, Ukraine, Ivano-Frankivsk, 14-19 May 2018, pp. 250-253.
- [19] U.N. Katugampola, "New approach to generalized fractional derivatives", *Bul.Math. Anal. Appl.*, no. 6, p. 1-15, 2014.

Прогнозування Зміни Характеристик Фільтруючих Матеріалів у Процесі Зворотньої Промивки Пористих Завантажень Багатошарових Фільтрів

Андрій Бомба

кафедра інформатики та прикладної математики
Рівненський державний гуманітарний університет
Рівне, Україна
abomba@ukr.net

Юрій Климюк

кафедра інформаційних систем та обчислювальних
методів
Міжнародний економіко-гуманітарний університет
імені академіка Степана Дем'янчука
Рівне, Україна
klimyuk@ukr.net

Prediction of Changes in the Characteristics of Filter Materials in the Process of Backwashing of Porous Loads of Multilayer Filters

Andrii Bomba

dept. of Informatics and Applied Mathematics
Rivne State University of Humanities
Rivne, Ukraine
abomba@ukr.net

Yurii Klymyuk

dept. of Information Systems and Computing Methods
Academician Stepan Demianchuk International University
of Economics & Humanities
Rivne, Ukraine
klimyuk@ukr.net

Анотація — Сформовано математичну модель для прогнозування процесу зворотньої промивки кусково-однорідних пористих завантажень швидких багатошарових фільтрів конусоподібної форми від багатоконпонентних домішок при додержанні сталої швидкості промивки, що враховує дослідження зміни характеристик фільтруючих матеріалів. Запропонована модель дозволяє шляхом проведення комп'ютерних експериментів спрогнозувати оптимальні варіанти використання сорбційної ємності фільтруючих матеріалів кусково-однорідних пористих завантажень швидких багатошарових фільтрів конусоподібної форми при їх багаторазовому використанні, дослідити збільшення тривалості роботи швидких фільтрів за рахунок вибору їх форми і висоти шарів та скоротити до мінімуму час, необхідний для їх очищення.

Abstract — A mathematical model to predict the process of backflow of piecewise homogeneous porous loads in rapid multi-layered cone-shaped filters from multicomponent impurities while respecting the constant rate of flushing, taking into account the research of changes in the characteristics of filter materials properties.

The proposed model allows, through computer experiments, to predict the optimal options for using the sorption capacity of filtering materials of piecewise homogeneous porous loads of rapid multi-layered cone-shaped filters with their repeated use, to investigate the increase in the operation time of rapid filters by choosing their shape and height of the layers and reduce the time to minimum necessary to clean them.

Ключові слова — математична модель, прогнозування, процес зворотньої промивки, багатоконпонентна домішка, швидкий фільтр, конусоподібна форма, пористе завантаження.

Keywords — mathematical model, prediction, backwash process, multicomponent impurity, rapid filter, cone-shaped form, porous load.

I. ВСТУП

Будь-яка вода перед її використанням для господарсько-питного водопостачання потребує очищення. Основними методами очищення води є освітлення, знебарвлення та знезараження [1, 2]. Заключною стадією є її доочистка у швидких багатошарових фільтрах. Досвід експлуатації

швидких фільтрів показує необхідність їх очищення 1-2 рази на добу. Очищення швидких фільтрів проводять шляхом промивання фільтруючого матеріалу пористих завантажень зворотним струмом чистої води зі швидкістю, яка у кілька разів більша швидкості фільтрування (рис. 1). Промивання зазвичай триває 5-7 хв. Постійно зростаючі потреби у господарстві в очищеній воді та зростання вартості фільтрувальних матеріалів вимагають проведення досліджень, пов'язаних із більш якісним використанням фільтрувальних матеріалів пористих завантажень швидких багат шарових фільтрів, збільшенням тривалості їх безперервної роботи і скороченням до мінімуму часу, необхідного для їх очищення.

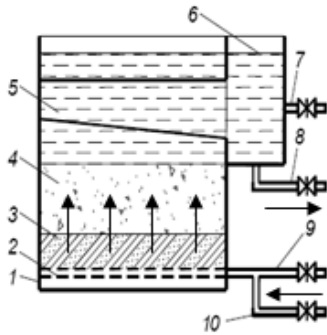


Рис. 1. Схема промивки швидкого фільтру з пористим завантаженням:
1 – місткість; 2 – розподільна система; 3 – підтримувальні шари; 4 – фільтруюча заправка; 5 – жолоб; 6 – боковий карман; 7 – подача вихідної води; 8 – відведення промивної води; 9 – подача промивної води; 10 – відведення фільтру

II. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Як показує аналіз літературних джерел, зокрема [3], в якості математичної моделі процесу доочистки рідини від домішок вітчизняними дослідниками найчастіше використовується модель Д. М. Мінца при сталій швидкості фільтрування або деяка її модифікація (вдосконалена модель). У [4] запропоновано її просторове узагальнення для прогнозування процесу доочистки води від багатоконцентних домішок у швидких фільтрах конусоподібної форми при додержанні сталої швидкості фільтрування, яка є більш ефективною для проведення теоретичних досліджень, націлених на оптимізацію параметрів процесу фільтрування (тривалості роботи, форми, розмірів фільтра тощо) за рахунок введення двох додаткових рівнянь для визначення зміни коефіцієнта фільтрації та активної пористості завантаження вздовж висоти фільтру, врахування дифузії та масообмінних процесів між компонентами багатоконцентної домішки у фільтраційній течії і в осаді, адсорбованому на зернах завантаження. Актуальною задачею є узагальнення відповідної моделі для прогнозування процесу зворотної промивки кусково-однорідних пористих завантажень швидких багат шарових фільтрів конусоподібної форми від багатоконцентних домішок при додержанні сталої швидкості промивки, що враховує дослідження зміни характеристик фільтруючих матеріалів.

III. МЕТА РОБОТИ

Сформувані математичну модельну задачу для прогнозування процесу очищення швидких багат шарових фільтрів конусоподібної форми з кусково-однорідними пористими завантаженнями від багатоконцентних домішок методом зворотної промивки при додержанні сталої швидкості промивки з урахуванням дослідження зміни коефіцієнтів фільтрації та активної пористості вздовж висоти фільтру.

IV. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Розглядається процес очищення швидкого багат шарового фільтру конусоподібної форми від багатоконцентної домішки при додержанні сталої швидкості промивки із врахуванням дослідження зміни коефіцієнтів фільтрації та активної пористості вздовж висоти фільтру кусково-однорідного пористого завантаження – просторової однозв'язної області G_z ($z = (x, y, z)$), обмеженої гладкими, ортогональними між собою в кутових точках та по ребрах, двома екіпотенціальними поверхнями S_z, S^* і поверхнею течії S^{**} та розділеної деякими заданими $p-1$ екіпотенціальними поверхнями S_{*r}^* ($r = \overline{1, p-1}$) на p підобластей G_z^r ($r = \overline{1, p}$) (рис. 2). Відповідна модельна задача полягає в розв'язанні систем рівнянь:

$$\left\{ \begin{aligned} \vec{v} = \vec{\kappa}_0^0 \cdot \text{grad } \varphi, \text{div } \vec{v} = 0, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{aligned} (\sigma \cdot C_j)_t' &= \text{div}(D_j \cdot \text{grad } C_j) - \vec{v} \cdot \text{grad } C_j - \\ &- \sum_{k=1}^m a_{j,k} \cdot C_j + \sum_{k=1}^m a_{k,j} \cdot C_k + \alpha_j \cdot C_j - \beta_j \cdot U_j, \\ (\sigma \cdot U_j)_t' &= \text{div}(D_j^* \cdot \text{grad } U_j) - \sum_{k=1}^m a_{j,k}^* \cdot U_j + \\ &+ \sum_{k=1}^m a_{k,j}^* \cdot U_k - \alpha_j \cdot C_j + \beta_j \cdot U_j \quad (j = \overline{1, m}), \\ \kappa_t' &= \sum_{k=1}^m \mu_k \cdot U_k, \sigma_t' = \sum_{k=1}^m \gamma_k \cdot U_k, \\ (x, y, z) &\in G_z^r, r = \overline{1, p} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

за крайових і початкових умов:

$$\left\{ \begin{aligned} \varphi|_{S_*} &= \varphi_*, \varphi|_{S^*} = \varphi^*, \varphi_n'|_{S^{**}} = 0, \\ C_j|_{S_*} &= c_j^*, C_j'|_{S_*} = 0, C_j'|_{S^{**}} = 0, \\ U_j|_{S_*} &= c_j^*, U_j'|_{S_*} = 0, U_j''|_{S^{**}} = 0 \quad (j = \overline{1, m}), \\ C_j|_{t=0} &= c_j^0, U_j|_{t=0} = u_j^0 \quad (j = \overline{1, m}), \kappa|_{t=0} = \kappa_0^0, \sigma|_{t=0} = \sigma_0^0 \end{aligned} \right.$$

та умов узгодженості на поверхнях розділу:

$$\left\{ \varphi|_{S_{*r}^-} = \varphi|_{S_{*r}^+} = \varphi_{*r}^*, \kappa_r^0 \cdot \varphi_n'|_{S_{*r}^-} = \kappa_r^0 \cdot \varphi_n'|_{S_{*r}^+} \quad (r = \overline{1, p-1}), \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_j|_{S_{r^-}} = C_j|_{S_{r^+}}, \\ U_j|_{S_{r^-}} = U_j|_{S_{r^+}}, \\ D_{r,j} \cdot C'_{j\bar{n}} - v_{rn}^0 \cdot C_j|_{S_{r^-}} = D_{r+1,j} \cdot C'_{j\bar{n}} - v_{rn}^0 \cdot C_j|_{S_{r^+}}, \\ D_{r,j}^* \cdot U'_{j\bar{n}}|_{S_{r^-}} = D_{r+1,j}^* \cdot U'_{j\bar{n}}|_{S_{r^+}}, \\ \sum_{j=1}^m (D_{r,j} \cdot C'_{j\bar{n}} - v_{rn} \cdot C_j + D_{r,j}^* \cdot U'_{j\bar{n}}) \Big|_{S_{r^-}} = \\ = \sum_{j=1}^m (D_{r+1,j} \cdot C'_{j\bar{n}} - v_{rn} \cdot C_j + D_{r+1,j}^* \cdot U'_{j\bar{n}}) \Big|_{S_{r^+}}, \\ (\sigma \cdot \sum_{j=1}^m (C_j + U_j))'_i \Big|_{S_{r^-}} = (\sigma \cdot \sum_{j=1}^m (C_j + U_j))'_i \Big|_{S_{r^+}}, \\ (j = \overline{1, m}, r = \overline{1, p-1}), \end{array} \right.$$

де $\varphi = \varphi(x, y, z)$ і $\vec{v} = \vec{v}(v_x, v_y, v_z)$ – відповідно потенціал і вектор швидкості фільтрації, $0 < \varphi_* = \varphi_{*0}^* < \varphi_{*1}^* < \varphi_{*2}^* < \dots < \varphi_{*(p-1)}^* < \varphi_{*p}^* = \varphi^* < \infty$, φ_* і φ^* – довільні дійсні додатні числа, φ_{*1}^* , φ_{*2}^* , ..., $\varphi_{*(p-1)}^*$ – невідомі значення потенціалу,

$|\vec{v}| = \sqrt{v_x^2(x, y, z) + v_y^2(x, y, z) + v_z^2(x, y, z)} \gg 0$, $\tilde{\kappa}_0^0$ – початковий коефіцієнт фільтрації, $\tilde{\kappa}_0^0 = \{\tilde{\kappa}_r^0, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}$, $\tilde{\kappa}_r^0 > 0$ ($r = \overline{1, p}$), \bar{n} – зовнішня нормаль до відповідної поверхні; $C_j = C_j(x, y, z, t)$ і $U_j = U_j(x, y, z, t)$ – концентрації j -тої компоненти багатокомпонентної домішки відповідно у воді, якою здійснюється промивання, і осаді, адсорбованому на зернах завантаження; $\kappa = \kappa(x, y, z, t)$ і $\sigma = \sigma(x, y, z, t)$ – відповідно коефіцієнт фільтрації і активна пористість завантаження, D_j і D_j^* – коефіцієнти дифузії j -тої компоненти багатокомпонентної домішки відповідно у воді, якою здійснюється промивання, і осаді, адсорбованому на зернах завантаження,

$D_j = \{D_{r,j}, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}$, $D_{r,j} = \varepsilon \cdot d_{r,j}$, $d_{r,j} > 0$ ($r = \overline{1, p}$, $j = \overline{1, m}$), $D_j^* = \{D_{r,j}^*, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}$, $D_{r,j}^* = \varepsilon \cdot d_{r,j}^*$, $d_{r,j}^* > 0$ ($r = \overline{1, p}$, $j = \overline{1, m}$), $a_{j,k}$ і $a_{j,k}^*$ – коефіцієнти, що характеризують швидкість протікання масообмінних процесів між j -тою і k -тою компонентами багатокомпонентної домішки відповідно у воді, якою здійснюється промивання, і осаді, адсорбованому на зернах завантаження,

$a_{j,k} = \{a_{r,j,k}, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}$, $a_{r,j,k} = \varepsilon \cdot \bar{a}_{r,j,k}$ ($r = \overline{1, p}$, $j = \overline{1, m}$, $k = \overline{1, m}$), $a_{j,k}^* = \{a_{r,j,k}^*, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}$, $a_{r,j,k}^* = \varepsilon \cdot \bar{a}_{r,j,k}^*$ ($r = \overline{1, p}$, $j = \overline{1, m}$, $k = \overline{1, m}$), α_j і β_j – коефіцієнти, що характеризують обсяги адсорбованої і десорбованої за одиницю часу j -тої компоненти багатокомпонентної домішки,

$\alpha_j = \{\alpha_{r,j}, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}$, $\beta_j = \{\beta_{r,j}, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}$, $\alpha_{r,j} = \varepsilon \cdot \bar{\alpha}_{r,j}$ ($r = \overline{1, p}$, $j = \overline{1, m}$), μ_j і γ_j – коефіцієнти, що характеризують швидкість зміни відповідно коефіцієнта фільтрації та активної пористості завантаження за рахунок десорбції j -тої компоненти багатокомпонентної домішки, $\mu_j = \{\mu_{r,j}, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}$, $\gamma_j = \{\gamma_{r,j}, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}$, $\mu_{r,j} = \varepsilon \cdot \bar{\mu}_{r,j}$, $\gamma_{r,j} = \varepsilon \cdot \bar{\gamma}_{r,j}$ ($r = \overline{1, p}$, $j = \overline{1, m}$), ε – малий параметр, $\tilde{n}_j^0 = \{\tilde{n}_{r,j}^0, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}$, $u_j^0 = \{u_{r,j}^0, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}$, $\kappa_r^0 = \{\kappa_r^0, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}$, $\sigma_r^0 = \{\sigma_r^0, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}$, $c_j^* = c_j^*(M, t)$, $c_{r,j}^0 = c_{r,j}^0(x, y, z)$ ($r = \overline{1, p}$, $j = \overline{1, m}$), $u_j^* = u_j^*(M, t)$, $u_{r,j}^0 = u_{r,j}^0(x, y, z)$ ($r = \overline{1, p}$, $j = \overline{1, m}$) і $\kappa_r^0 = \kappa_r^0(x, y, z)$, $\sigma_r^0 = \sigma_r^0(x, y, z)$ ($r = \overline{1, p}$) – достатньо гладкі функції, узгоджені між собою, $M \in S_*$, v_{rn}^0 і v_{rn} ($r = \overline{1, p-1}$) – відповідно початкові і поточні нормальні складові швидкості на поверхнях розділу S_{r^*} ($r = \overline{1, p-1}$).

$\alpha_j = \{\alpha_{r,j}, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}$, $\beta_j = \{\beta_{r,j}, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}$, $\alpha_{r,j} = \varepsilon \cdot \bar{\alpha}_{r,j}$ ($r = \overline{1, p}$, $j = \overline{1, m}$), μ_j і γ_j – коефіцієнти, що характеризують швидкість зміни відповідно коефіцієнта фільтрації та активної пористості завантаження за рахунок десорбції j -тої компоненти багатокомпонентної домішки, $\mu_j = \{\mu_{r,j}, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}$, $\gamma_j = \{\gamma_{r,j}, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}$, $\mu_{r,j} = \varepsilon \cdot \bar{\mu}_{r,j}$, $\gamma_{r,j} = \varepsilon \cdot \bar{\gamma}_{r,j}$ ($r = \overline{1, p}$, $j = \overline{1, m}$), ε – малий параметр, $\tilde{n}_j^0 = \{\tilde{n}_{r,j}^0, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}$, $u_j^0 = \{u_{r,j}^0, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}$, $\kappa_r^0 = \{\kappa_r^0, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}$, $\sigma_r^0 = \{\sigma_r^0, (x, y, z) \in G_z^r, r = \overline{1, p}\}$, $c_j^* = c_j^*(M, t)$, $c_{r,j}^0 = c_{r,j}^0(x, y, z)$ ($r = \overline{1, p}$, $j = \overline{1, m}$), $u_j^* = u_j^*(M, t)$, $u_{r,j}^0 = u_{r,j}^0(x, y, z)$ ($r = \overline{1, p}$, $j = \overline{1, m}$) і $\kappa_r^0 = \kappa_r^0(x, y, z)$, $\sigma_r^0 = \sigma_r^0(x, y, z)$ ($r = \overline{1, p}$) – достатньо гладкі функції, узгоджені між собою, $M \in S_*$, v_{rn}^0 і v_{rn} ($r = \overline{1, p-1}$) – відповідно початкові і поточні нормальні складові швидкості на поверхнях розділу S_{r^*} ($r = \overline{1, p-1}$).

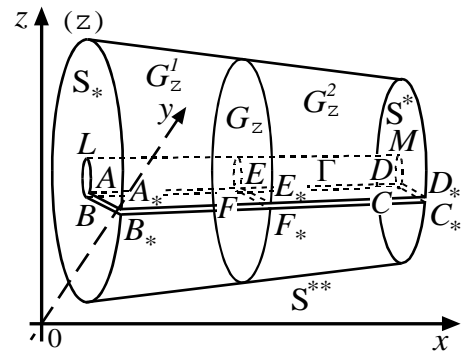


Рис. 2. Просторова двошарова область фільтрації G_z з умовним розрізом Γ (модельний конусоподібний фільтр)

Шляхом фіксації на поверхні S_* деякої точки A та послідовного виконання умовних розрізів $\Gamma_1 = ALMDBLMC$ і $\Gamma_2 = ADD_*A_*BCC_*B_*$ вздовж відповідних поверхонь течії (для зручності позначимо $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2$) наведена вище задача зводиться до розв'язання в отриманій однозв'язній кусково-однорідній області $G_z \setminus \Gamma$ – криволінійному паралелепіпеді $ABCD_*B_*C_*D_*$, обмеженому двома екіпотенціальними поверхнями ABB_*A_* , CDD_*C_* і чотирма поверхнями течії $ABCD = ALMD \cup BLMC$, $A_*B_*C_*D_*$, $ADD_*A_* = BCC_*B_*$ та розділений деякими заданими екіпотенціальними поверхнями $E_r F_r F_{*r} E_{*r}$ ($r = \overline{1, p-1}$) на p підобластей:

$$G_z^1 \setminus \Gamma^1 = ABF_r E_r A_* B_* F_{*r} E_{*r},$$

$$G_z^r \setminus \Gamma^r = E_{r-1} F_{r-1} F_r E_r E_{*(r-1)} F_{*(r-1)} F_{*r} E_{*r} \quad (r = \overline{2, p-1}),$$

$$G_z^p \setminus \Gamma^p = E_{p-1} F_{p-1} C D E_{*(p-1)} F_{*(p-1)} C_* D_* \quad ($$

$$\Gamma = \Gamma^1 \cup \Gamma^2 \cup \dots \cup \Gamma^p, \quad \Gamma^1 = A E_1 E_{*1} A_* B F_1 F_{*1} B_* ,$$

$$\Gamma^r = E_{r-1} F_{r-1} F_r E_r E_{*(r-1)} F_{*(r-1)} F_{*r} E_{*r} \quad (r = 2, p-1),$$

$$\Gamma^p = E_{p-1} D D_* E_{*(p-1)} F_{*(p-1)} C C_* E_{*(p-1)} \quad (\text{рис. 2}),$$

які є гладкими і ортогональними між собою в кутових точках та вздовж ребер, з додаванням умови непроникності $\varphi'_n|_{\Gamma} = 0$ вздовж розрізу Γ задачі, що описується системами рівнянь (1), (2) з наступними крайовими і початковими умовами:

$$\begin{cases} \varphi|_{ABB,A_*} = \varphi_*, \varphi|_{CDD,C_*} = \varphi^*, \\ \varphi'_n|_{ABCD \cup A_* B_* C_* D_* \cup ADD,A_* \cup BCC,B_*} = 0, \\ \begin{cases} C_j|_{ABB,A_*} = c_j^*, C'_j|_{CDD,C_*} = 0, \\ C'_j|_{ABCD \cup A_* B_* C_* D_* \cup ADD,A_* \cup BCC,B_*} = 0 \quad (j = \overline{1,m}), \end{cases} \\ \begin{cases} U_j|_{ABB,A_*} = c_j^*, U'_j|_{CDD,C_*} = 0, \\ U'_j|_{ABCD \cup A_* B_* C_* D_* \cup ADD,A_* \cup BCC,B_*} = 0 \quad (j = \overline{1,m}), \end{cases} \\ C_j|_{t=0} = c_j^0, U_j|_{t=0} = u_j^0 \quad (j = \overline{1,m}), \kappa|_{t=0} = \kappa_0^0, \sigma|_{t=0} = \sigma_0^0 \end{cases}$$

та умовами узгодженості на поверхнях розділу $E_r F_r F_{*r} E_{*r}$ ($r = \overline{1, p-1}$):

$$\begin{cases} \varphi|_{E_r F_r F_{*(r-1)} E_{*(r-1)-}} = \varphi|_{E_r F_r F_{*(r-1)} E_{*(r-1)+}} = \varphi_{*r}^*, \\ \kappa_0^r \cdot \varphi'_n|_{E_r F_r F_{*(r-1)} E_{*(r-1)-}} = \kappa_0^r \cdot \varphi'_n|_{E_r F_r F_{*(r-1)} E_{*(r-1)+}} \quad (r = \overline{1, p-1}), \\ \begin{cases} C_j|_{E_r F_r F_{*(r-1)} E_{*(r-1)-}} = C_j|_{E_r F_r F_{*(r-1)} E_{*(r-1)+}}, \\ U_j|_{E_r F_r F_{*(r-1)} E_{*(r-1)-}} = U_j|_{E_r F_r F_{*(r-1)} E_{*(r-1)+}}, \\ D_{r,j} \cdot C'_j|_{E_r F_r F_{*(r-1)} E_{*(r-1)-}} - \nu_{rn}^0 \cdot C_j|_{E_r F_r F_{*(r-1)} E_{*(r-1)-}} = \\ = D_{r+1,j} \cdot C'_j|_{E_r F_r F_{*(r-1)} E_{*(r-1)+}} - \nu_{rn}^0 \cdot C_j|_{E_r F_r F_{*(r-1)} E_{*(r-1)+}}, \\ D_{r,j}^* \cdot U'_j|_{E_r F_r F_{*(r-1)} E_{*(r-1)-}} = D_{r+1,j}^* \cdot U'_j|_{E_r F_r F_{*(r-1)} E_{*(r-1)+}}, \\ \sum_{j=1}^m (D_{r,j} \cdot C'_j|_{E_r F_r F_{*(r-1)} E_{*(r-1)-}} - \nu_{rn}^0 \cdot C_j|_{E_r F_r F_{*(r-1)} E_{*(r-1)-}} + D_{r,j}^* \cdot U'_j|_{E_r F_r F_{*(r-1)} E_{*(r-1)+}}) = \\ = \sum_{j=1}^m (D_{r+1,j} \cdot C'_j|_{E_r F_r F_{*(r-1)} E_{*(r-1)+}} - \nu_{rn}^0 \cdot C_j|_{E_r F_r F_{*(r-1)} E_{*(r-1)+}} + D_{r+1,j}^* \cdot U'_j|_{E_r F_r F_{*(r-1)} E_{*(r-1)+}}) , \\ (\sigma \cdot \sum_{j=1}^m (C_j + U_j))'_i|_{E_r F_r F_{*(r-1)} E_{*(r-1)-}} = \\ = (\sigma \cdot \sum_{j=1}^m (C_j + U_j))'_i|_{E_r F_r F_{*(r-1)} E_{*(r-1)+}} \end{cases} \\ (j = \overline{1,m}, r = \overline{1, p-1}), \end{cases}$$

і подальшого “склеювання” берегів умовного розрізу Γ із використанням умов:

$$\begin{cases} \varphi|_{ALMD} = \varphi|_{BLMC}, \varphi'_n|_{ALMD} = \varphi'_n|_{BLMC}, \\ \varphi|_{ADD,A_*} = \varphi|_{BCC,B_*}, \varphi'_n|_{ADD,A_*} = \varphi'_n|_{BCC,B_*}, \end{cases}$$

та узгодженості величин концентрацій компонент багатокомпонентної домішки у фільтраційній течії і осаді, адсорбованому на зернах завантаження, на умовних поверхнях розрізу із використанням умов:

$$\begin{cases} C_j|_{ALMD} = C_j|_{BLMC}, C'_j|_{ALMD} = C'_j|_{BLMC}, \\ C_j|_{ADD,A_*} = C_j|_{BCC,B_*}, C'_j|_{ADD,A_*} = C'_j|_{BCC,B_*} \quad (j = \overline{1,m}), \\ \begin{cases} U_j|_{ALMD} = U_j|_{BLMC}, U'_j|_{ALMD} = U'_j|_{BLMC}, \\ U_j|_{ADD,A_*} = U_j|_{BCC,B_*}, U'_j|_{ADD,A_*} = U'_j|_{BCC,B_*} \quad (j = \overline{1,m}). \end{cases} \end{cases}$$

V. РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ ТА ВИСНОВКИ

За умови, що конвективні складові масоперенесення й десорбція переважають над вкладом дифузії й адсорбції, алгоритм числово-асимптотичного наближення розв'язку відповідної нелінійної сингулярно-збуреної крайової задачі для модельної області конусоподібної форми, обмеженої двома еквіпотенціальними поверхнями і поверхнею течії та розділеної деякими заданими еквіпотенціальними поверхнями на кілька підобластей, отримується аналогічно [4]. Запропонована модель аналогічно [5, 6] для заданої сталої швидкості фільтрації дозволяє шляхом проведення комп'ютерних експериментів спрогнозувати зміну характеристик кусково-однорідних пористих завантажень швидких багатошарових фільтрів конусоподібної форми у процесі їх зворотньої промивки, визначити оптимальні варіанти використання сорбційної ємності фільтруючих матеріалів, дослідити збільшення тривалості роботи швидких фільтрів за рахунок вибору їх форми і висоти шарів та скоротити до мінімуму час, необхідний для їх очищення.

LITERATURE REFERENCES

- [1] Орлов В. О. Водоочисні фільтри із зернистою засипкою. – Рівне : НУВГП, 2005. – 163 с.
- [2] Hendricks D. W. Fundamentals of water treatment unit processes : physical, chemical, and biological. – Boca Raton : CRC Press, 2011. – 883 p.
- [3] Бомба А. Я., Сафоник А. П. Моделювання нелінійно-збурених процесів очищення рідин від багатокомпонентних забруднень : монографія. – Рівне: НУВГП, 2017. – 296 с.
- [4] Klimjuk Ju. Je. Prediction of changes in the characteristics of filter materials in rapid cone-shaped waterpurifying filters // Innovative solutions in modern science. – No. 8 (27). – Dubai, 2018. – P. 72–84. doi: 10.26886/2414-634X.8(27)2018.5
- [5] Бомба А. Я., Климюк Ю. Є. Прогнозування оптимального використання фільтруючих матеріалів у швидких багатошарових фільтрах із кусково-однорідними пористими завантаженнями // Журнал обчислювальної та прикладної математики : наук. журн. Київ. нац. ун-т ім. Тараса Шевченка. – Вип. 1 (124). – Київ: ТВіМС, 2017. – С. 3–14.
- [6] Бомба А. Я., Климюк Ю. Є. Прогнозування зміни характеристик кусково-однорідних пористих завантажень швидких багатошарових фільтрів // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – № 27 (1303). – С. 8–15

Визначення Параметрів Керованих Процесів Вибуху Методами Квазіконформних Відображень

Андрій Бомба

Кафедра інформатики та прикладної математики
Рівненський державний гуманітарний університет
Рівне, Україна
abomba@ukr.net

Катерина Малаш

Кафедра інформатики та прикладної математики
Рівненський державний гуманітарний університет
Рівне, Україна
katemalash@gmail.com

Determination of the Controlled Explosion Processes Parameters with Quasiconformal Mappings Methods

Andrii Bomba

Informatics and Applied Mathematics Department
Rivne State Humanitarian University
Rivne, Ukraine
abomba@ukr.net

Kateryna Malash

Informatics and Applied Mathematics Department
Rivne State Humanitarian University
Rivne, Ukraine
katemalash@gmail.com

Анотація—У рамках рідинної моделі розв'язується задача на визначення вибухової сили (квазіпотенціалу) та положення заряду заданої форми і розміру, необхідного для утворення вирви максимально можливого розміру за умови необхідності збереження цілісності трьох доколишніх об'єктів. Автоматично визначено межі розділу вирви, впресованої та незбуреної ділянок ґрунту, утворених вибухом

Abstract— Explosive processes are widely used at the present stage of production development which determines the need to study their impact on the environment.

The method for solving the problem of determining the explosive power (quasipotential) and position of a charge of a given shape and size required for the formation of the maximum possible size crater provided that the integrity of the three neighboring objects is preserved based on the use of the quasiconformal mappings method and the alternate parameterization of the characteristics of the explosive process and environments is developed. The boundaries of the section of the crater, pressed and unperturbed soils formed in the environment as a result of the explosion are automatically determined.

The numerical experiments carried out on the basis of the corresponding algorithm confirm the expediency of its application for solving the problem

Ключові слова—вибухові процеси, квазіконформні відображення, математичне моделювання, ідентифікація параметрів

Keywords— explosion processes, quasiconformal mappings, mathematical modelling, parameter identification

I. ВСТУП

На сучасному етапі свого розвитку народне господарство усе частіше використовує верхні шари земної кори. Це спричинено збільшенням кількості підземних та напівпідземних споруд, утворенням підземної транспортної інфраструктури, видобутком корисних копалин з важкодосяжних їх покладів. Для проведення усіх вище наведених робіт спільною є необхідність утворення великих порожнин. Наявні методики, які для цього застосовуються, потребують багато часу та, відповідно, коштів, що зумовлює потребу у розробці нових та удосконаленні існуючих методик з метою пришвидшення та здешевлення утворення порожнин.

Однією з таких методик є використання вибухових речовин для подрібнення твердої породи та утворення порожнин [2], [10]. Проте, оскільки некоректний розрахунок технологічних параметрів процесу вибуху може призвести до катастрофічних наслідків, вкрай важливим є його превентивне математичне моделювання.

II. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА МЕТА РОБОТИ

Для дослідження вибухових процесів на сьогоднішній день використовується ряд моделей, найпоширеніші з яких – лінійно-пружна, пружно-пластична, в'язко-пружна, тверда, твердо-рідинна та рідинна [8 - 13], [15], [16].

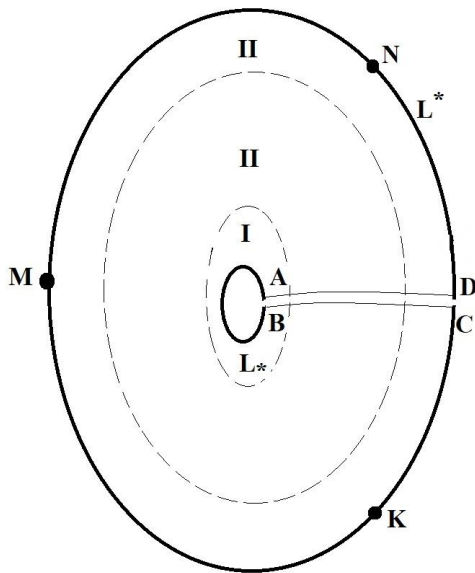
У роботах [4], [5] на основі рідинної моделі визначаються межі вирви, впресованої та незбуреної ділянок ґрунту, що утворюються у результаті вибуху. У роботі [6] визначається оптимальне положення заряду, що дозволяє утворити вирву максимально можливого розміру за умови збереження цілісності двох ближніх об'єктів.

Метою даного дослідження є визначення оптимальної вибухової сили (квазіпотенціалу) та положення заряду відомої форми, необхідного для утворення вирви максимального розміру при умові непорушності трьох заданих об'єктів.

III. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

У середовищі, де має відбутися вибух, відомі деякі три точки – К, М та N- які повинні залишитися у незбуреній зоні після вибуху (вони характеризують положення об'єктів, які повинні залишитися неушкодженими). Також відома форма та розміри заряду, що використовується для вибуху. Необхідно визначити оптимальну вибухову силу та місце закладки заряду, щоб у результаті його вибуху утворилася вирва максимально можливого розміру з одночасним збереженням цілісності заданих точками К, М та N об'єктів (Рис. 1).

Рис. 1. Схематичне зображення середовища



Ідея розв'язування задачі подібна до описаної у [6]. У середовищі, де планується вибух, розглядаємо деяку початкову область G_z ($z = x + iy$). Початково заряд розміщуємо рівновіддалено від заданих точок К, М та N (середина заряду повинна збігатися з центром описаного навколо цих точок кола). Контур заряду нам відомий: $L_* = \{z : f_*(x, y) = 0\} = \{x + iy : x = x_*(t), y = y_*(t), \alpha_* < t < \beta_*\}$. Задаємо $\varphi|_{L_*} = \varphi_* = 0$, $\varphi|_{L_*^*} = \varphi_*^* = \varphi_0^*$,

$-\infty < \varphi_* < \varphi_0^* < +\infty$. Граничні значення потенціалів задаємо так, щоб вони не значно відрізнялися.

Процес руху частинок середовища описується рівнянням руху $\vec{v} = k \text{grad} \varphi$ та рівнянням нерозривності $\text{div} \vec{v} = 0$, де $\vec{v} = (v_x(x, y), v_y(x, y))$ - швидкість руху частинки, $\varphi = \varphi(x, y)$ - квазіпотенціал силового поля, утвореного вибухом, $k = k(|\text{grad} \varphi|) = k(I)$ - коефіцієнт проникності середовища, який характеризує здатність його частинок підніматися. При розв'язуванні задачі враховуватимемо наявність зворотнього впливу характеристик середовища та процесу вибуху [7], уточнюючи даний коефіцієнт:

$$k = k_0 + \frac{1}{2} \beta (I - I^*) \left((I - I^0) + |I - I^0| \right). \quad (1)$$

Тут $I = \sqrt{\varphi_x^2 + \varphi_y^2}$, I^0, I^* - критичні значення градієнта, на основі яких визначаються лінії розділу вирви, впресованої та незбуреної ділянок ґрунту; параметр β характеризує зміну проникності середовища (він визначається експериментально). Початкове положення зовнішнього контуру розглядуваної області задається у вигляді $L_s^* = \{z : f^*(x, y) = 0\} = \{x + iy : x = x_s^*(t), y = y_s^*(t), \alpha^* < t < \beta^*\}$. У процесі розв'язування задачі його положення уточнюватиметься, як описано у [4].

Розв'язуватимемо задачу числовими методами квазіконформних відображень та поетапної параметризації характеристик середовища та процесу [1], [3], [14]. Вводимо комплексно спряжену до $\varphi = \varphi(x, y)$ функцію $\psi = \psi(x, y)$ та утворюємо умовний розріз області G_z вздовж однієї (форма кої буде уточнюватися в процесі розв'язування задачі) з ліній течії (як показано на Рис. 1). Отримуємо задачу на квазіконформне відображення $\omega = \omega(z) = \varphi(x, y) + i\psi(x, y)$ утвореної однозв'язної області G_z^0 на відповідну прямокутну область квазікомплексного потенціалу $G_\omega = \{\omega = \varphi + i\psi : \varphi_* < \varphi < \varphi^*, 0 < \psi < Q\}$ з невідомим параметром Q .

$$\kappa(|\text{grad} \varphi|) \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad (x, y) \in G_z^0 \quad (2)$$

$$\kappa(|\text{grad} \varphi|) \frac{\partial \varphi}{\partial y} = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$$

$$\varphi|_{L_*} = \varphi_*, \quad \varphi|_{L_*^*} = \varphi_*^*, \quad \psi|_{AD} = 0,$$

$$\psi|_{BC} = Q = \iint_{L_*} -v_y dx + v_x dy.$$

Аналогічно до [3] перейдемо до відповідної зворотньої задачі на квазіконформне відображення $z = z(\omega) = x(\varphi, \psi) + iy(\varphi, \psi)$ області G_ω на G_z^0 з метою

знаходження дійсної $x = x(\varphi, \psi)$ та уявної $y = y(\varphi, \psi)$ частин рівняння характеристичної функції лінії течії з невідомими лініями розділу та невідомого значення параметра Q . При цьому умови типу Коші-Рімана та рівняння контурів області набувають вигляду:

$$\begin{aligned} \kappa \left(\frac{1}{J} \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial \psi}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \psi}\right)^2} \right) \frac{\partial y}{\partial \psi} &= \frac{\partial x}{\partial \varphi}, \\ \kappa \left(\frac{1}{J} \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial \psi}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \psi}\right)^2} \right) \frac{\partial x}{\partial \psi} &= -\frac{\partial y}{\partial \varphi}, \\ (\varphi, \psi) \in G_\omega, \quad J &= x_\varphi y_\psi - x_\psi y_\varphi, \\ f_*(x(\varphi_*, \psi), y(\varphi_*, \psi)) &= 0, \quad \varphi_* \leq \varphi \leq \varphi_0^*, \\ f_s^*(x(\varphi_0^*, \psi), y(\varphi_0^*, \psi)) &= 0, \quad 0 \leq \psi \leq Q, \end{aligned} \quad (3)$$

а також з'являються умови «спряження» на лінії введеного фіктивного розрізу [3]:

$$x(\varphi, 0) = x(\varphi, Q), \quad y(\varphi, 0) = y(\varphi, Q), \quad \varphi_* < \varphi < \varphi_0^*, \quad (5)$$

З умов (3) приходимо до наступних рівнянь типу Лапласа:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{1}{\kappa} \frac{\partial x}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial \psi} \left(\kappa \frac{\partial x}{\partial \psi} \right) &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{1}{\kappa} \frac{\partial y}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial \psi} \left(\kappa \frac{\partial y}{\partial \psi} \right) &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Алгоритм числового розв'язування задачі будуємо, як описано, наприклад, у [3], [5].

IV. ВСТАНОВЛЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПОЛОЖЕННЯ ТА ВИБУХОВОЇ СИЛИ ЗАРЯДУ

У результаті числових розрахунків для початкової області G_z отримуємо зовнішню межу області L_{s1}^* та границі розділу вирви (на Рис. 1 зображено I), впресованої (II) та незбуреної (III) ділянок ґрунту. Перевіряємо положення точок К, М та N відносно контура L_{s1}^* за наступним алгоритмом:

- 1) Якщо усі три точки належать контуру, то задача розв'язана, і значення потенціала φ_0^* є шуканим (проте, ймовірність такого співпадіння є досить низькою).
- 2) Якщо одна з точок (наприклад, N) належить контуру, тоді визначаємо положення відносно контура інших двох точок (К та М). Якщо обидві знаходяться всередині контура, знаходимо відстані від них до контура (позначимо їх l_K та l_M , відповідно) і повертаємося до початку розв'язування задачі з уточненим положенням контура заряду L_* шляхом зміщення його у бік точки N на відстань $(l_K + l_M) / 2$. Якщо обидві точки – К та М – знаходяться поза

контуром L_{s1}^* , зміщуємо центр у напрямі від точки N. Якщо ж одна з точок (наприклад, М) знаходиться зовні контура L_{s1}^* , а інша (К) – всередині – зміщуємо центр заряду у бік точки М на відстань $l_M / 2$. Якщо дві точки (нехай це будуть N та М) знаходяться на контурі L_{s1}^* , визначаємо l_K та зміщуємо центр заряду на відстань $l_K / 2$ до точки К, якщо вона зовні контура L_{s1}^* , або від неї, якщо вона всередині. Повторюємо ці дії доти, доки усі три точки – К, М, і N – не опиняться на контурі. У цьому випадку задача є розв'язаною, ідентифіковані положення заряду, лінії розділу вирви, впресованої та незбуреної ділянок ґрунту є шуканими, а значення φ_0^* – шуканою величиною вибухової сили заряду.

- 3) Якщо усі три точки – К, N, і М – знаходяться зовні контура L_{s1}^* , тоді збільшуємо значення φ_0^* на деяку величину $\Delta\varphi_0 \ll \varphi_0^*$ і розв'язуємо задачу з уточненим значенням φ_0^* , після чого знову перевіряємо положення усіх трьох точок відносно зовнішнього контура. Якщо вони все ще зовні, повторюємо пункт 3 доти, доки хоча б одна з них не буде на контурі або всередині нього. Якщо усі три точки на контурі – задача розв'язана. Якщо одна або дві точки на контурі – переходимо до пункту 2). Якщо хоча б одна з точок зайшла за контур, зменшуємо значення φ_0^* на величину $\Delta\varphi_0 = \Delta\varphi_0 / 2$ і знову розв'язуємо задачу з уточненим значенням квазіпотенціалу. Повторюємо цю дію, доки одна з точок не буде на контурі. Тоді переходимо до пункту 2).

ВИСНОВКИ

У рамках рідинної моделі побудовано алгоритм числового розв'язування задачі на визначення оптимальної вибухової сили та місця положення заряду заданої форми за умови збереження трьох заданих довколишніх об'єктів з використанням методів квазіконформних відображень та поетапної фіксації характеристик середовища та процесу. У процесі розв'язування задачі визначено межі розділу вирви, впресованої та незбуреної ділянок ґрунту, що утворюються у результаті вибуху.

Проведені на основі розробленого алгоритму числові експерименти підтверджують доцільність його використання для розв'язування такого роду задач.

У перспективі – визначення оптимальної форми та розміру заряду, необхідного для утворення отвору заданої форми, дослідження використання більше, ніж одного заряду, врахування необхідності збереження цілісності більше, ніж трьох заданих об'єктів, відповідні просторові задачі.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Блейр Девід, Теорія інверсії та конформні відображення / Девід Блейр. – АМТ, 2000. – 118 с.

- [2] Бомба А. Я. Нелінійні математичні моделі процесів геогідродинаміки / А. Я. Бомба, В. М. Булавацький, В. В. Скопецький. – Київ : Наукова думка, 2007. – 308 с.
- [3] Бомба А.Я. Методи комплексного аналізу: монографія / А. Я. Бомба, С. С. Каштан, Д. О. Пригорницький, С. В. Ярошак. – Рівне : НУВГП, 2013. – 415 с.
- [4] Бомба А. Я. Моделювання вибухових процесів в анізотропному середовищі з ідентифікацією межі зони впливу / А. Я. Бомба, К. М. Малаш // Математичне та комп'ютерне моделювання. - Серія «Технічні науки». – Кам'янець-Подільський, КДПУБ 2018. - Вип. 18. С. 5 – 18.
- [5] Бомба А. Я. Моделювання процесу вибуху в анізотропному середовищі методами квазіконформних відображень / А. Я. Бомба, К. М. Малаш // Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського. – Кременчук, 2017. - Вип. 4 (105). – С. 28-33.
- [6] Бомба А. Я. Оптимізація параметрів керованих процесів вибуху методами комплексного аналізу / А. Я. Бомба, А. П. Сафоник, К. М. Малаш // Інформаційні технології, автоматизація, вимірювання в економіці та охороні навколишнього середовища. – Люблін, 2019. – Вип. 19 (1). – С. 29 – 32.
- [7] Бомба А. Я. Чисельне розв'язання нелінійних модельних крайових задач на квазіконформні відображення в умовах взаємовпливу градієнтів потенціалу та характеристик середовища / А. Я. Бомба, В. В. Скопецький, Д. О. Пригорницький // Вісник Київського університету. Серія: Фізико-математичні науки.- 2003.- Вип. 1. – С. 126-135.
- [8] Булавацький В. М. Некласичні математичні моделі тепло- та масопереносу / В. М. Булавацький, Ю. Г. Кривонос, В. В. Скопецький. – Київ: Наукова думка, 2005. – 408 с.
- [9] Булавацький В. М. Некоторые обратные задачи импульсно-гидродинамической теории взрыва на выброс / В. М. Булавацкий, И. А. Лучко // Исследования по крайвым задачам гидродинамики и теплофизики. – Киев, 1979. - С. 53-64.
- [10] Єфремов Е., Сучасні тенденції у використанні вибухових речовин на нерудних кар'єрах України / Е. Єфремов, Н. Савченко, І. Махоня, Ю. Чебенко, Є. Польська // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. – Кременчук, 2011. – Вип. 1 (7). – С. 37 – 45.
- [11] Ільїнський Н. Крайові задачі теорії вибуху / Н. Ільїнський, А. Поташов. – Казань: Вид-во Казанськ. ун-ту, 1986. – 476 с.
- [12] Коробійчук В. В. Дослідження способів мінімізації витрат на буріння і підривання блоків декоративного каменю / В. В. Коробійчук, Р. В. Соболевський, О. А. Зубченко // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – Серія «Технічні науки». – Житомир, 2006. – Вип. 4 (39). – С. 301 – 308.
- [13] Кравець В. Г. Фізичні процеси прикладної геодинаміки вибуху: монографія / В. Г. Кравець, В. В. Коробійчук, В. В. Бойко. – Житомир : ЖСТУ, 2015. – 408 с.
- [14] Нерлінг Джеймс. Математичні засоби у фізиці / Джеймс Нерлінг. – Маямі, 2008. – 208 с.
- [15] Пеев А. М. Аналіз існуючих моделей руйнування гірських порід за допомогою вибуху / А. М. Пеев, С. М. Мислицький, А. В. Воробйов // Наука і освіта. – Пжемишль, 2011. – Вип. 14 (45). – С. 40 -46.
- [16] Власов О. Про моделювання вибуху / О. Власов, С. Смирнов // Вибухова справа. – Москва : Недра, 1966, - Вип. 59. – С. 109 – 117.

Моделювання Конфліктних Ситуацій на Основі Методу Системної Динаміки

Юрій Штифурак
старший викладач
НТУУ “КПІ імені Ігоря
Сікорського”
Київ, Україна
yura.shtyfurak@gmail.com

Борис Бутвін
головний науковий співробітник
ЦНДІ ЗС України
Київ, Україна
butvin_bl@ukr.net

Олександр Сидоренко
аспірант
НТУУ “КПІ імені Ігоря
Сікорського”
Київ, Україна
Sidorenkoalv@gmail.com

Simulation of Conflict Situations on the Base of System Dynamics

Yuriy Shtyfurak
principal researcher
NTUU
Kyiv, Ukraine
yura.shtyfurak@gmail.com

Borys Butvin
principal researcher
ZNDI AF Ukraine
Kyiv, Ukraine
butvin_bl@ukr.net

Oleksandr Sidorenko
postgraduate
NTUU
Kyiv, Ukraine
Sidorenkoalv@gmail.com

Анотація—Розглядається загальний методичний підхід до моделювання конфліктних ситуацій на основі системної динаміки Форрестера.

Abstract—The general methodological approach to the modeling of conflict situations on the basis of Forrester's system dynamics is considered.

Ключові слова—конфліктна ситуація; моделювання конфліктних ситуацій; методичний підхід; системна динаміка Форрестера

Keywords—conflict situation, modeling of conflict situations, methodological approach, Forrester's system dynamics

Системно-динамічне моделювання складних систем є сукупністю принципів і методів аналізу динамічних керованих систем із зворотним зв'язком та їх застосування для вирішення виробничих, організаційних і соціально-економічних завдань. У системах підтримки ухвалення рішень застосування системної динаміки дає змогу об'єднати кілька функціональних просторів організації в одне ціле і забезпечити організаційну і кількісну основи для вироблення ефективнішої управлінської політики. Застосування системної динаміки у сфері озброєнь стало можливим завдяки таким досягненням, як:

1) Успіхи в проектуванні й аналізі систем управління із зворотним зв'язком.

2) Прогрес у методах комп'ютерного моделювання і розвитку обчислювальної техніки.

3) Накопичений досвід у моделюванні процесу ухвалення рішень.

На перше місце за своєю важливістю слід поставити усвідомлення необхідності розвитку динамічних інформаційних систем із зворотним зв'язком, які з'явилися вже після того, як подібні електромеханічні, а потім і електронні системи стали широко застосовуватися на практиці.

Іншим основним досягненням, що лягло в основу системної динаміки, є комп'ютерне моделювання. Уже багато років моделювання – найважливіший складник інженерного проектування. Застосування методів імітаційного моделювання в техніці, яке передувало створенню дослідних зразків, зумовило їхнє поширення на проблеми планування й управління в організаційних системах. З появою надійних і високопродуктивних персональних комп'ютерів моделювання складних організацій стало практичним завданням. Обмеження на розмірність і вид математичних моделей на сьогодні практично зняті.

Водночас разом із цими досягненнями прийшло глибше розуміння того, як організовано процес ухвалення рішень людиною. Розширення наших знань у цій сфері було спричинене потребами військових досліджень для автоматичного й автоматизованого управління зброєю. Успіх у зазначеній галузі переконав у тому, що людське мислення і дії доступні не лише ретельному вивченню, розумінню та аналізу, а й навіть поліпшенню.

Філософія системної динаміки ґрунтується на припущенні, що поведінка (чи історія розвитку в часі) організації переважно визначається її інформаційно-логічною структурою. Вона відбиває не лише фізичні й технологічні аспекти виробничих процесів, а й, що набагато важливіше, політику і традиції, які безпосередньо чи опосередковано визначають процес ухвалення рішень в організації. Така структурна схема містить джерела посилення, тимчасових затримок та інформаційних зворотних зв'язків, подібних тем, які є в складних інженерних системах.

Інший аспект філософії системної динаміки полягає в припущенні, що організацію ефективніше можна подати в термінах потоків, що лежать в її основі, ніж у термінах окремих функцій. Потіки людей, грошей, матеріалів, заявок і устаткування, а також інтегрованих потоків інформації можуть бути виявлені в усіх організаціях. Спрямованість на потокову структуру примушує аналітика природним чином долати внутрішньоорганізаційні межі.

Методологію системної динаміки побудовано так, щоб зробити застосовною на практиці філософію розвитку. Для цього було використано й модифіковано відомі методи подання поточкових діаграм, математичного й імітаційного моделювання. На основі схем сигнальних потоків, уживаних для аналізу електронних систем, розроблено причиново-наслідкові діаграми для візуального подання поточної ситуації. Як наступний крок для більшості системно-динамічних проектів було створено формальні поточкові діаграми, подані як системи диференціальних рівнянь. Як поточкові діаграми, так і системи рівнянь виражають управлінські зв'язки за допомогою двох категорій: накопичувачів і потоків. Накопичувачі є такими об'єктами реального світу, у яких зосереджуються деякі ресурси: знання (ідеї), фонди, джерела робочої сили тощо. Потіки – це активні компоненти системи: потоки зусиль (спроб), інформаційні потоки, витратні платежі та ін.

Якщо систему управління подати як мережу накопичувачів і потоків, то відповідна системно-динамічна модель може бути реалізована як комп'ютерна програма. Нині однією з найвдаліших програм, що реалізують основні ідеї системної динаміки Форестера, є програмне середовище AnyLogic [2].

Переваги системно-динамічного моделювання.

Системно-динамічний підхід починається із спроби зрозуміти ту систему причин, яка породила проблему і підтримує її. Для цього збирають необхідні дані з різних джерел, зокрема з літератури, від інформованих людей

(менеджерів, споживачів, конкурентів, експертів), і проводять спеціальні кількісні дослідження. Після того як елементарний аналіз причин проблеми зроблено, формальна модель вважається побудованою.

Отримане рішення подають у формі графіків і таблиць, які підлягають критичному аналізу. У результаті модель переглядається (змінюються параметри деяких вузлів мережі, додаються нові вузли, устанавлюються нові або змінюються зв'язки, що існували раніше, тощо), потім модель знову аналізується і так доти, доки вона достатньо не відповідатиме реальній ситуації. Після того як модель побудовано, у ній виділяються керовані параметри і вибираються такі значення цих параметрів, за яких проблема або знімається, або перестає бути критично важливою.

У процесі моделювання в людей поступово поглиблюється розуміння проблеми, проте їхня інтуїція щодо можливих наслідків пропонованих управлінських рішень часто виявляється менш надійною, ніж підхід, пов'язаний з ретельною побудовою математичної моделі. І це не так дивно, як може здатися на перший погляд. Системи управління містять іноді 100 і більше змінних, про які або відомо, що вони залежать від інших чинників якимось нелінійно, або можна припустити існування такої залежності. Поведінка таких систем виявляється настільки складною, що її розуміння лежить поза можливостями людської інтуїції. Комп'ютерне моделювання – один з найефективніших наявних нині засобів для підтримки й уточнення людської інтуїції. Хоч модель і не є абсолютно точним відтворенням реальності, її можна використати для ухвалення рішень, які будуть обґрунтованішими, ніж ті, які могла б прийняти людина. Цей гнучкий засіб посилює можливості людини, що використовує її для глибшого розуміння проблеми.

Переваги комп'ютерної моделі, сконструйованої та використаної для підтримки ухвалення рішень, полягають у такому:

1) Вона примушує особу, що приймає рішення, точніше й повніше формулювати словесні описи причин виникнення проблеми, які вона неминуче зберігає у своїй голові.

2) У процесі формальної побудови моделі аналітик розкриває і усуває численні внутрішні суперечності й сумніви, наявні в його припущеннях про модель.

3) У процесі застосування моделі стає можливим логічне "тестування". За допомогою моделі легко оцінити наслідки очікуваних рішень. Спостереження за поведінкою моделі сприяють появі нових гіпотез про структуру реального об'єкта.

4) Коли досягнуто прийняттого рівня надійності, стають можливими формальні експерименти з вироблення управлінської політики, що швидко розкривають вірогідні наслідки з різних управлінських альтернатив. На моделі легко можна досліджувати ситуації на зразок "що, якщо".

5) Формально операційна модель завершена завжди, але в змістовому сенсі ніколи не завершена до кінця. На відміну від численних методів планування, які зазвичай використовуються епізодично і час від часу (вони забезпечують підтримку рішення тільки у момент підготовки звіту, але не раніше і не пізніше), модель органічна й інтерактивна. Модель доступна будь-коли і дає засоби для кращого розуміння проблеми.

6) Аналіз стійкості моделі – це та сфера, обговорення якої підводить емпіричне дослідження до важливих питань. Якщо істинні значення багатьох параметрів

невідомі (це звичайне явище в процесі корпоративного стратегічного планування), то перше, із чого слід почати дослідження, це аналіз поведінки моделі в разі зміни значень параметрів.

7) Операційна модель може слугувати засобом комунікації між людьми, які не брали участі в її побудові. У разі зміни управлінської політики і модельних параметрів та подальшого аналізу результатів цих змін ці люди можуть краще зрозуміти динаміку розвитку реальних систем.

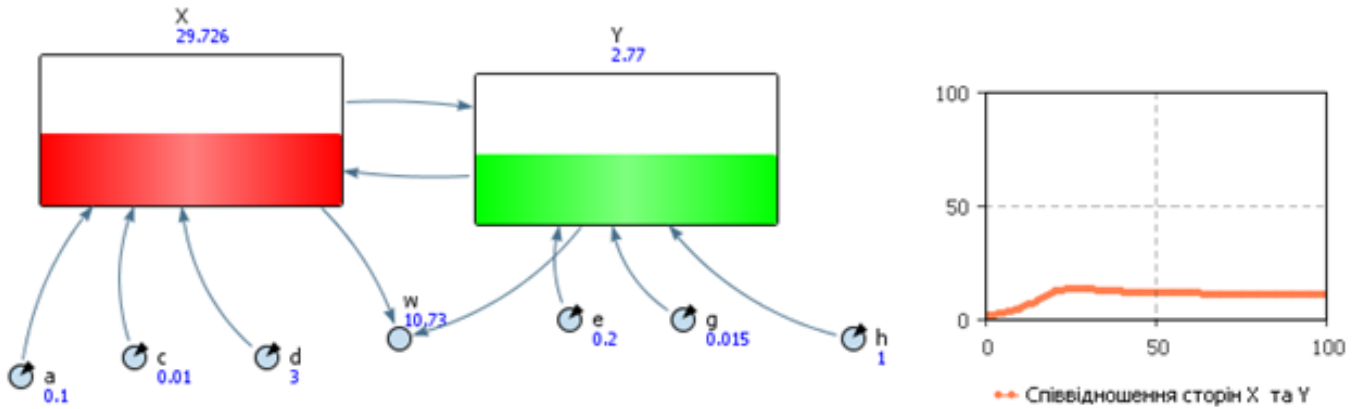


Рис. 2. Поточні втрати сторін X та Y і їхнє співвідношення в динаміці бойових дій

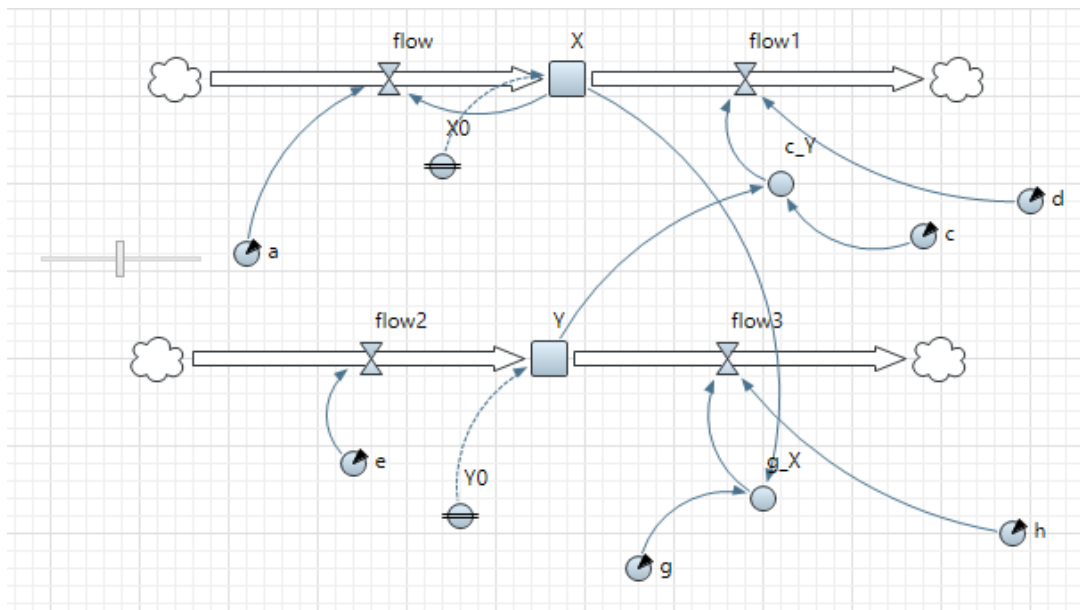


Рис. 3. Модель оцінки втрат сторін X та Y у відповідності до рівнянь Ланчестера у класичні нотації системної динаміки Д.Форестера

Системно-динамічне моделювання можна реалізувати у двох нотаціях:

1) У класичній постановці задачі на основі реалізації основних понять – потік, накопичувач та вентиль.

2) Довільна форма на основі диференціальних рівнянь.

Як приклад розглянемо класичну модель Ланчестера динаміки бойових дій [1].

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = ax + bxy + cy + d \\ \frac{dy}{dt} = ey + fyx + gx + h \end{cases}, \quad (1)$$

де:

a і e визначають швидкість небойових втрат;

b і f – швидкість втрат через дії на територіальних цілях;

c і g – втрати від дії супротивника на передовій;

d і h – резерви, що підходять (відходять).

Результат оцінювання поточних втрат сторін X та Y і їхнє співвідношення в постановці (1) у нотації вільної форми системно-динамічного моделювання в середовищі AnyLogic-7.02 наведено на рис. 1.

Побудову моделі Ланчестера [1] у середовищі AnyLogic-7.02 в класичній нотації Джея Форрестера [3] наведено на рис. 2.

Отже, метод системно-динамічного моделювання, реалізований у середовищі AnyLogic-7.02, дає змогу ефективно моделювати складні конфліктні ситуації на основі рівнянь Ланчестера.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Митюков Н. В. Классификация дифференциальных моделей конфликтных ситуаций / Н. В. Митюков, Р. А. Юргиков // Деструктивность человека: феноменология, динамика, коррекция : материалы 2-й региональной научн.-практ. конф. (Воткинск, 28 – 29 ноября 2003 г.). – Ижевск : Изд-во «Удмуртский университет», 2003. – С. 390 – 404.
- [2] Киселева М. В. Имитационное моделирование систем в среде AnyLogic: учеб.-метод. пособ. / М. В. Киселёва. – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2009. – 88 с.
- [3] Forrester, Jay Industrial Dynamics, 1958 Форрестер Дж. Основы кибернетики предприятия (индустриальная динамика) / пер. с англ., общая редакция Д.М. Гвишиани – М: Прогресс, 1971.- 340 с.

Інтелектуальна система управління мобільним роботом

Віталій Веретельник

кафедра інформаційних технологій
Черкаський національний університет ім. Богдана
Хмельницького
Черкаси, Україна
veretelnyk.vitaliy@gmail.com

Беседіна Світлана Валеріївна

кафедра інформаційних технологій
Черкаський національний університет ім. Богдана
Хмельницького
Черкаси, Україна
besedina_sv@ukr.net

Intelligent mobile robot control system

Vitalii Veretelnyk

Department of Information Technologies
them Bogdan Khmelnsky University
Cherkasy, Ukraine
veretelnyk.vitaliy@gmail.com

Besezdina Svetlana Valerievna

Department of Information Technologies
them Bogdan Khmelnsky University
Cherkasy, Ukraine
besedina_sv@ukr.net

Анотація — Досліджено і запропоновано інтелектуальне управління виконуючими механізмами мехатронних систем мобільних роботів. Автор визначає, що інтелектуальна система управління мобільним роботом – це гібридна система, яка є апаратною платформою Arduino Uno R3, яка керує сервоприводами, поворотними і виконуючими механізмами, передавальними парами мобільних роботів з застосуванням алгоритму Мамдані в системах нечіткої логіки (fuzzy logic). В якості моделі управління запропоновано інтелектуальну експертну систему на базі алгоритму Мамдані. Застосування алгоритму Мамдані дозволить математично формалізувати нечітку інформацію для побудови математичних моделей управління рухом, кутовими переміщеннями, подолання перешкоди на маршруті руху робота. В основі теорії управління лежить поняття безлічі елементів вхідних сигналів від ультразвукових та кутових датчиків переміщень, акселерометра, GPS - трекера що володіють загальною властивістю і, отже належать до ядра керованих сигналів з різними ступенями вхідних термів трикутних функцій.

Abstract — The intellectual control of the implementation of the mechanisms of mechatronic systems of mobile robots is investigated and proposed. The author states that the intelligent mobile robot management system is a hybrid system, which is the hardware platform of Arduino Uno, which manages servo drives, turning and performing mechanisms, mobile pairs of mobile robots using the Mamdani algorithm in fuzzy logic systems. As an administrative model, an intellectual expert system based on the Mamdani algorithm is proposed. The application of the Mamdani algorithm will allow mathematically formalize fuzzy information for constructing mathematical models of motion control, angular displacements, overcoming obstacles in the route of the robot movement. The basis of the control theory is the notion of a plurality of elements of the input signal from ultrasound and

angular displacement sensors, an accelerometer, a GPS tracker that has the general property of the transformation and, hence, belongs to the core of controlled signals with different degrees of input terms triangular functions.

Ключові слова — інтелектуальна система, мобільний робот, мехатронні системи мобільних роботів, гібридна система, нечітка логіка, алгоритм Мамдані, математичні моделі управління, безліч елементів вхідних сигналів, терми трикутних функцій

Keywords — intelligent system, mobile robot, mechatronic systems of mobile robots, hybrid system, fuzzy logic, Mamdani algorithm, mathematical control models, set of input signal elements, terms of triangular functions

I. ВСТУП

Ключовою тенденцією сучасної науки є складність досліджуваних об'єктів, якщо раніше дослідники могли аналізувати лише точно описувані явища і процеси з малим числом змінних, то з розвитком теоретичного знання та настання ери інформаційних технологій з'явилася можливість дослідження нового класу систем, які отримали загальну назву - складні технічні системи. [1].

В основу побудови систем автоматичного управління складними нелінійними погано формалізованими рухомими об'єктами часто застосовують пристрої управління, виконані на основі алгоритму Мамдані в системах нечіткої логіки (fuzzy logic).

Поняття нечіткої множини - ця спроба математичної формалізації нечіткої інформації для побудови математичних моделей. В основі цього поняття лежить уявлення про те, що складають дане безліч елементи, що володіють загальною властивістю, можуть володіти цією

властивістю в різного ступеня і, отже належати до даного безлічі з різним ступенем. При такому підході вислови на кшталт "такий-то елемент належить даній безлічі" втрачають сенс, оскільки необхідно вказати "наскільки сильно" або з яким ступенем конкретний елемент задовольняє властивостям даного безлічі.

II. ТЕОРЕТИЧНИЙ БАЗИС

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Методологією обґрунтування, розробкою та створенням інтелектуальних систем управління мобільними роботами займаються такі відомі вчені, як, Цюй Дуньюе., Д. В. Євстигнєєв., J. S. Albus., А. М. Меустел., А. В. Леоненков., В. О. Апостолук., О. С. Апостолук., Я. Е. Гжебовскій., Н. К. Шатохіна., М Januszka., М. Adamczyk., W Moczulski., P Bigaj., М. Т Trojnecki., J Bartoszek та ін.

Так в роботі Цюй Дуньюе «Управління мобільними роботами на основі нечітких моделей», розглянуто роботу типового колісного робота, на прикладі «MobileRobots» P3-DX. Мобільний робот являє собою триколісну платформу, забезпечену незалежними електродвигунами правого і лівого колеса. На платформі встановлено відеокамеру і ультразвук. Описана кінематична модель робота, але є суттєві недоліки, які зазначаються при формуванні бази знань і створенні моделей руху робота, а саме кількість вхідних змінних (елементів вхідних сигналів терми трикутних функцій) недостатні на основі чого є певні недоліки в обрахунках маршруту, прив'язки до певної місцевості (локації) і стійкості основної рухомої бази під час руху. Оскільки не враховано тах кількість вхідних сигналів може бути оброблена апаратною частиною робота, що являється базою обробки і перетворення сигналів від датчиків, тому ми не можемо гарантувати високу швидкість виконання операцій робота без помилок.

Саме тому було запропоновано сучасну апаратну платформу Arduino Uno R3 на базі мікроконтролера ATmega328 з вбудованим блоком виправлення помилок під час проходження сигналів від датчиків і виконуючих механізмів до мікроконтролера з використанням інтелектуальної системи управління роботом за допомогою алгоритму Мамдані в системах нечіткої логіки (fuzzy logic) з зворотнім зв'язком.

III. ТЕОРЕТИЧНИЙ БАЗИС. МЕТОДОЛОГІЯ СТВОРЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ МОБІЛЬНИМ РОБОТОМ

Основною метою роботи є узагальнене дослідження методології моделювання, проектування та створення інтелектуальної системи управління з використанням сучасної апаратної платформи Arduino Uno і алгоритму Мамдані в системах нечіткої логіки з поліпшеною надлишковістю вхідних сигналів керування від багатьох датчиків.

Відповідно до мети, в роботі поставлено і вирішено таке завдання.

- З'ясувати сутність елементів інтелектуальної системи управління мобільним роботом;

- Розробити структурну схему процесу інтелектуального управління мобільним роботом;
- Дослідити особливості функціонування апаратної платформи Arduino Uno R3 на базі мікроконтролера ATmega328;
- Дати визначення поняття «керуючий сигнал», «терми трикутних функцій приналежності», «дефазифікація»;
- Створити базу знань та моделі управління формування поведінки мобільного робота в умовах визначеності;
- Розробити математичний апарат методу управління формування поведінки мобільного робота в умовах визначеності.

Елементами інтелектуальної системи управління мобільним роботом є:

- платформа Arduino Uno R3 на базі мікроконтролера ATmega328 з вбудованим блоком виправлення помилок;
- підсистема ультразвукових датчиків, датчиків кутових переміщень, акселерометра, GPS – трекер;
- підсистема розподілення потужності (шим-контролер);
- мехатронна система (сервомотори, шагові двигуни і тд);
- початковий стан об'єкта;
- алгоритм управління (експертна система).

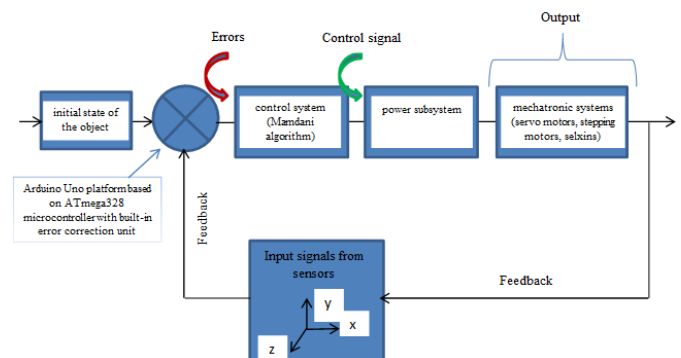


Рис. 1. Структурна схема інтелектуальної системи управління мобільним роботом

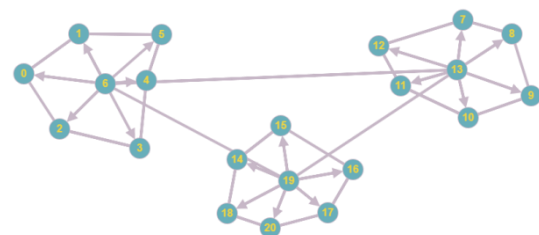


Рис. 2. Граф відстаней маршруту руху робота

Апаратна платформа Arduino Uno R3, використовують для підключення зовнішніх пристроїв і можуть працювати як в режимі виходу (INPUT), так і в режимі виходу (OUTPUT). Для кожного входу може бути підключений

вбудований резистор 20-50 кОм з допомогою виконання команд `pinMode()` в режимі `INPUT_PULLUP`. Допустимий ток на виході - 20 мА, не більше 40 мА в піці. Піни 0 і 1 - контакти UART (RX і TX відповідно). Піни с 10 по 13 - контакти SPI (SS, MOSI, MISO і SCK відповідно). Піни A4 і A5 - контакти I2C (SDA і SCL відповідно).

Цифрові I/O

Піни з номерами від 0 до 13 є цифровими. Це означає, що ви можете зчитувати і подавати на них тільки два види сигналів: HIGH і LOW. За допомогою ШІМ також можна використовувати цифрові порти для управління потужністю підключених пристроїв.

Аналогові I/O

Аналогові Піни Arduino Uno R3 призначені для підключення аналогових пристроїв і є входами для вбудованого аналого-цифрового перетворювача (АЦП), який в Arduino є десятизрядний. [2].

Пам'ять

У мікроконтролері ATmega328, використовуваному на платформах Arduino, існує три види пам'яті: [3].

Flash - пам'ять об'ємом 32 кБ. Це основне сховище для команд. Коли ви прошиває контролер своїм скетчем, він записується саме сюди. 2кб з даного пулу пам'яті відводиться на bootloadер- програму, яка займається ініціалізацією системи, завантаження через USB і запуску скетчу. [4].

Оперативна SRAM пам'ять об'ємом 2 кБ. Тут по-зазвичай зберігаються змінні і об'єкти, створювані в ході роботи програми. Пам'ять ця енерго-залежна, при виключенні живлення всі дані, зрозуміло, зітруться.

Незалежна пам'ять (EEPROM) обсягом 1кб. Тут можна зберігати дані, що не зітруться при виключенні контролера. Але процедура запису і зчитування EEPROM вимагає використання додаткової бібліотеки, яка доступна в Arduino IDE за замовчуванням. Також ніжно пам'ятати про обмеження циклів перезапису, властивих технології EEPROM.

Керуючим сигналом – називається управляючий імпульс високого рівня сигналу (high signal level), який надходить до мікроконтролера під час сканування низкою датчиків.

Аналоговий сигнал фільтрується і підсилюється, потім надходить до мікроконтролера з вбудованим АЦП і перетворюється в двійкову послідовність, після чого обробляється RISK процесором.

Відповідно вхідними сигналами є терми трикутних функцій які, являються вхідними змінними в алгоритмі Мамдані експертної системи, використовуючи надлишковість вхідних сигналів і вбудований в апаратну платформу блок виправлення помилок дає змогу системі отримувати високу продуктивність і виконувати операції мобільним роботом без помилок.

Термом (term) - називається будь який елемент термножини. В теорії нечітких множин терм формалізується нечіткою множиною за допомогою функції приналежності.

Дефазифікація (defuzzification) - називається процедура перетворення нечіткої множини в чітке число. В теорії нечітких множин процедура дефазифікації аналогічна знаходження характеристик положення (математичного очікування, моди, медіани) випадкових величин в теорії ймовірності. [5].

Найпростішим способом виконання процедури дефазифікації є вибір чіткого числа, відповідного максимуму функції приналежності. Однак придатність цього способу обмежується лише однокстремальними функціями належності. Для багатокстремального функцій приналежності в Fuzzy Logic Toolbox запрограмовані такі методи дефазифікації:

- Centroid - центр ваги;
- Bisector - медіана;
- LOM (Largest Of Maximums) - найбільший з максимумів;
- SOM (Smallest Of Maximums) - найменший з максимумів;
- Mom (Mean Of Maximums) - центр максимумів. [6].

Для проведення експерименту і створення належних умов поведінки системи ми побудували імітаційну модель управління формування поведінки мобільного робота в умовах визначеності за допомогою апарата нечіткої логіки (метод Мамдані) в середовищі Matlab.

У блоці параметрів нечіткої системи типу Mamdani задаються:

- меню And method дозволяє встановити реалізації логічної операції I: min - мінімум і prod – алгебраїчна сума;
- меню Or method дозволяє встановити реалізації логічної операції АБО: max - максимум і probor - алгебраїчна сума (max/min);
- меню Implication дозволяє встановити наступні методи імплікації логічних висновків в кожному з нечітких правил: min - мінімум і prod – алгебраїчної суми;
- меню Aggregation дозволяє встановити наступні реалізації операції об'єднання функцій належності вихідної змінної (агрегування): max - максимум, sum - обмежена сума і probor - алгебраїчна сума;
- меню Defuzzification дозволяє вибрати один з методів дефазифікації: centroid - центроїдного метод, bisector - метод медіани (метод центру площі), lom - метод найбільшого з максимумів, som - метод найменшого з максимумів і mom - метод центру максимумів. [7].

Задаємо в нашій нечіткій системі 7 входів і 1 вихід. Опишемо функції приналежності для кожного з входів (рис. 3-9).

Крок 1. Задамо функції належності змінної **The deviation is normal**. Для лінгвістичної оцінки цієї змінної будемо використовувати 5 термів з трикутними функціями належності, так як у нас є п'ять відхелень по нормалі руху робота. Для цього в меню Edit виберемо команду Add MFs ... В результаті з'явиться діалогове вікно вибору типу і кількості функцій приладдя. За замовчуванням це 5 термів (negative big; negative small; zero; positive small; positive big)

з трикутними функціями належності. Тому просто натискаємо <Enter>.

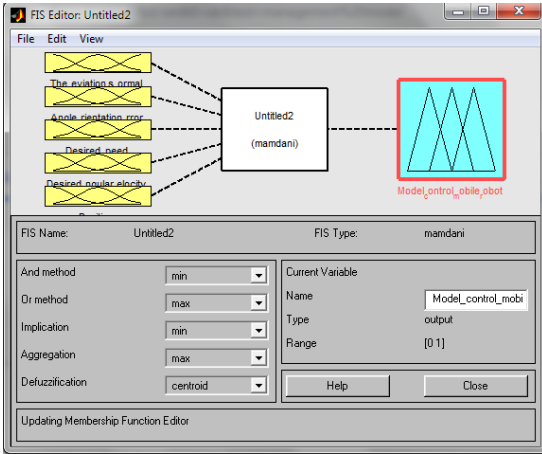


Рис. 3. Вікно нечіткої системи типу Мамдані

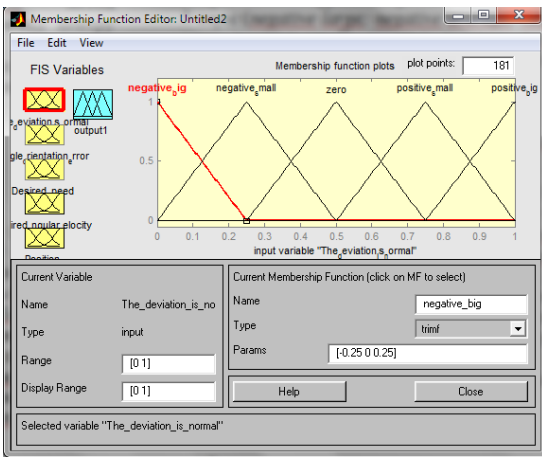


Рис. 4. Функції належності The deviation is normal

Крок 2. Аналогічно задаємо функції належності вхідної змінної **Angle orientation error**. Для лінгвістичної оцінки цієї змінної будемо використовувати 7 термів з трикутними функціями належності, так як у нас є низка помилок кутової орієнтації. Для цього в меню Edit виберемо команду Add MFs. В результаті з'явиться діалогове вікно вибору типу і кількості функцій приладдя. За замовчуванням це 7 термів (*negative large; negative average; negative small; zero; positive small; positive average; positive big*) з трикутними функціями належності. Тому просто натискаємо <Enter>

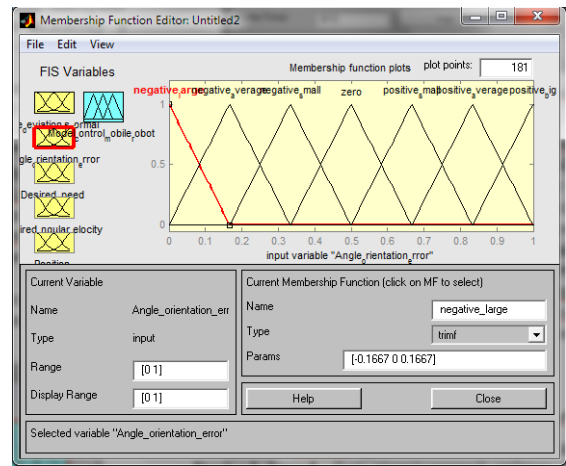


Рис. 5. Функції належності Angle orientation error

Крок 3. Задамо функції належності вхідної змінної **Desired Speed**. Для лінгвістичної оцінки цієї змінної будемо використовувати 3 терми з трикутними функціями належності, так як маємо тільки три очікувані швидкості. Для цього в меню Edit виберемо команду Add MFs ... В результаті з'явиться діалогове вікно вибору типу і кількості функцій приладдя. За замовчуванням це 4 терми (*zero; small; average big*) з трикутними функціями належності. Тому просто натискаємо <Enter>.

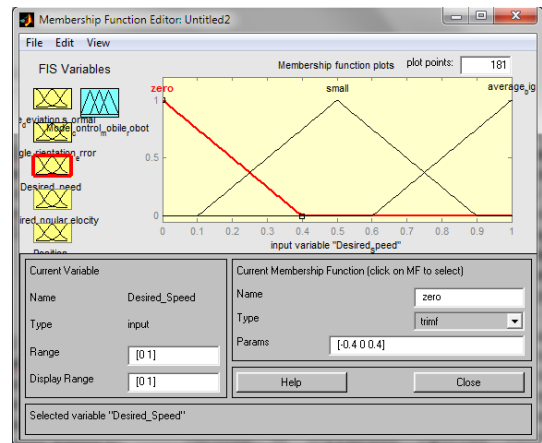


Рис. 6. Функції належності Desired Speed

Крок 4. Аналогічно задамо функції належності вхідної змінної **Desired angular velocity**. Для лінгвістичної оцінки цієї змінної будемо використовувати 7 термів з трикутними функціями належності так як ми введемо поняття бажана кутова швидкість. Для цього в меню Edit виберемо команду Add MFs. В результаті з'явиться діалогове вікно вибору типу і кількості функцій приладдя. За замовчуванням це 7 термів (*negative large; negative average; negative small; zero; positive small; positive average; positive big*) з трикутними функціями належності. Тому просто натискаємо <Enter>

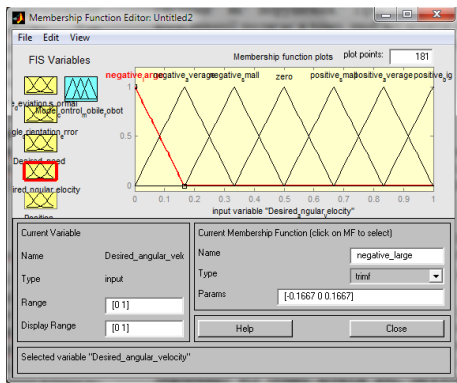


Рис. 7. Функції приналежності Desired angular velocity

Крок 5. Аналогічно задамо функції належності вхідної змінної **Position**. Для лінгвістичної оцінки цієї змінної будемо використовувати 3 терми з трикутними функціями належності, так як ми введемо поняття позиціонування координати приймача, вектора станів де x, y, z - координати, v_x, v_y, v_z - швидкості, a_x, a_y, a_z - прискорення. Для цього в меню Edit виберемо команду Add MFs ... В результаті з'явиться діалогове вікно вибору типу і кількості функцій приладдя. За замовчуванням це 3 терма (x, y, z) з трикутними функціями належності. Тому просто натискаємо <Enter>

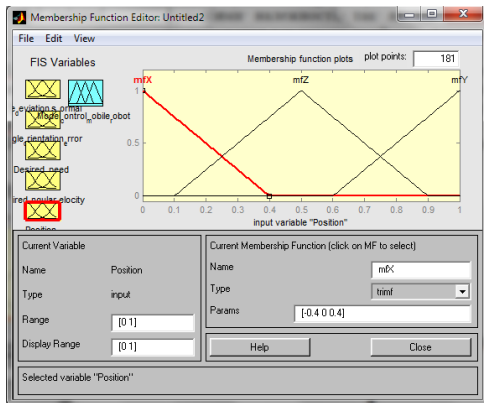


Рис. 8. Функції приналежності Position

Перейдемо до конструювання правил. Для цього виберемо меню **View / Edit rules**. Далі вводимо правила (рис. 9).

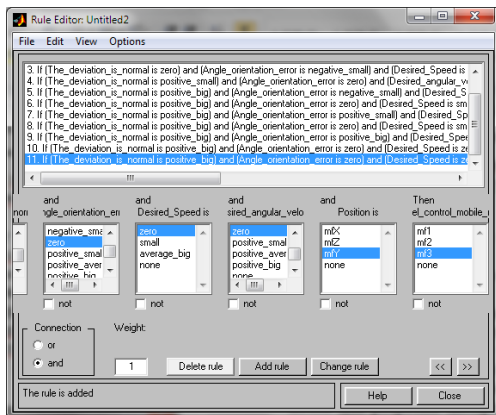


Рис. 9. Набір правил бази знань

Перевіряємо систему в дії. Відкриємо (через пункт меню View \ View rules) вікно перегляду правил і встановимо значення змінних: значення вхідної змінної «помилка кутової орієнтації» >1, бажана швидкість 5 км/год, бажана кутова швидкість 1,5 км/год, позиціонування по вектору станів місце розташування» оцінимо за допомогою координат.

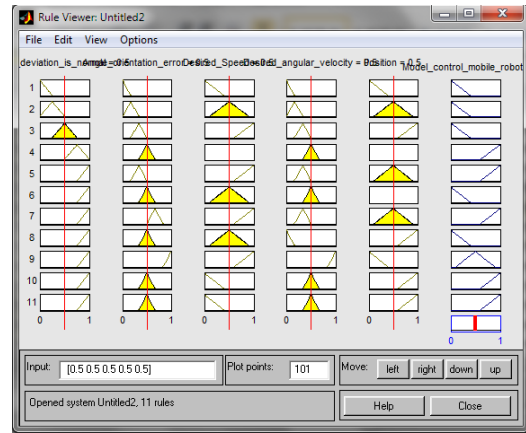


Рис. 10. Вікно перегляду правил

У нашій роботі ми зосередилися на побудові імітаційної моделі інтелектуального управління мобільним роботом.

Оскільки в нас є вже сформовані матриці відстаней відповідно до графу то можемо запропонувати наступні вирази координат:

$$x=A1+y=A2+z=A3+...+n=An \quad (1)$$

$$A_1 = \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ u_n \end{matrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$A_2 = \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ u_n \end{matrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$A_3 = \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ u_n \end{matrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$A_n = \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ u_n \end{matrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

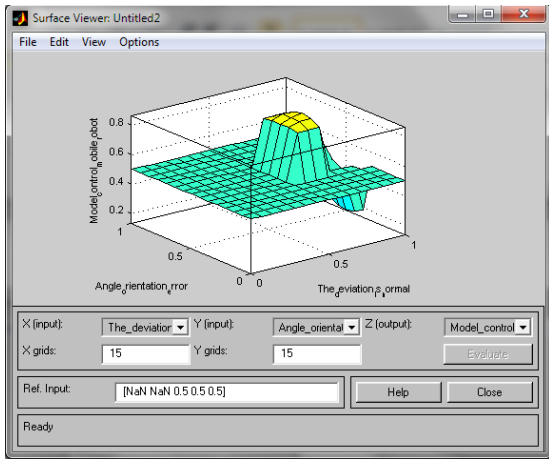


Рис. 11. Графічний вид залежності виходу системи від входу

Оскільки в умовах визначеності переміщення мобільного робота маршрут руху має вигляд графа, то будемо вважати, що матриці $A_1, A_2, A_3 \dots A_n$ це відстаней між вершинами графа f точок маршруту. Дані матриці дозволяють побачити проміжні вузли це є складові найкоротшого шляху. Оскільки у нас динамічний граф, вершини графа додаються і віднімаються. То застосування класичних методів управління рухом є дуже трудомістким процесом, що вимагає проведення значних розрахунків, що займає багато часу. При модифікації графа додавання чи віднімання нового елемента точки на маршруті доведеться перераховувати на що знадобиться багато часу.

Запропонований метод, заснований на методології використання нечіткої логіки і усуває недоліки алгоритму класичного підходу управління в умовах визначеності:

$$w^1 = \left\{ \begin{array}{l} \mu_{a_1^1}(u_1^-), \mu_{a_2^1}(u_2^-), \dots, \mu_{A_n^1}(u_n^-) \\ \max\{\mu_{a_1^2}(u_1^-), \mu_{a_2^2}(u_2^-), \dots, \mu_{A_n^2}(u_n^-)\} \\ \min\{\mu_{a_1^n}(u_1^-), \mu_{a_2^n}(u_2^-), \dots, \mu_{A_n^n}(u_n^-)\} \end{array} \right\} \quad (6)$$

$$w^2 = \left\{ \begin{array}{l} \mu_{a_1^1}(u_1^-), \mu_{a_2^1}(u_2^-), \dots, \mu_{A_n^1}(u_n^-) \\ \min\{\mu_{a_1^2}(u_1^-), \mu_{a_2^2}(u_2^-), \dots, \mu_{A_n^2}(u_n^-)\} \\ \max\{\mu_{a_1^n}(u_1^-), \mu_{a_2^n}(u_2^-), \dots, \mu_{A_n^n}(u_n^-)\} \end{array} \right\} \quad (7)$$

$$w^3 = \left\{ \begin{array}{l} \mu_{a_1^1}(u_1^-), \mu_{a_2^1}(u_2^-), \dots, \mu_{A_n^1}(u_n^-) \\ \max\{\mu_{a_1^2}(u_1^-), \mu_{a_2^2}(u_2^-), \dots, \mu_{A_n^2}(u_n^-)\} \\ \min\{\mu_{a_1^n}(u_1^-), \mu_{a_2^n}(u_2^-), \dots, \mu_{A_n^n}(u_n^-)\} \end{array} \right\} \quad (8)$$

$$w^n = \left\{ \begin{array}{l} \mu_{a_1^1}(u_1^-), \mu_{a_2^1}(u_2^-), \dots, \mu_{A_n^1}(u_n^-) \\ \dots \\ \mu_{a_1^{n+1}}(u_1^-), \mu_{a_2^{n+2}}(u_2^-), \dots, \mu_{A_n^{n+n}}(u_n^-) \\ \max\{\mu_{a_1^2}(u_1^-), \mu_{a_2^2}(u_2^-), \dots, \mu_{A_n^2}(u_n^-)\} \\ \min\{\mu_{a_1^n}(u_1^-), \mu_{a_2^n}(u_2^-), \dots, \mu_{A_n^n}(u_n^-)\} \end{array} \right\} \quad (9)$$

Вихідний сигнал модуля нечіткого виводу представляє собою нормалізовану суму окремих його виходів. [8].

$$\bar{y}w^{1,2,3\dots N} = \frac{\sum_{i=1}^{N1} w^1 + \sum_{i=1}^{N2} w^2 + \sum_{i=1}^{N3} w^3 + \dots + \sum_{i=1}^{Nn} w^n}{\sum_{k=1}^N w^k} \quad (10)$$

В скороченому вигляді базу правил можна записати так:

$$K^{(N1)} : IF(a_{11} \text{ is } \mu_{a_1^1} \text{ AND } a_{12} \text{ is } \mu_{a_2^1} \text{ AND } A_{1n} \text{ is } \mu_{A_n^1}) \quad (11)$$

$$K^{(N2)} : IF(a_{11} \text{ is } \mu_{a_1^1} \text{ AND } a_{12} \text{ is } \mu_{a_2^1} \text{ AND } A_{1n} \text{ is } \mu_{A_n^1}) \quad (12)$$

$$K^{(N3)} : IF(a_{11} \text{ is } \mu_{a_1^1} \text{ AND } a_{12} \text{ is } \mu_{a_2^1} \text{ AND } A_{1n} \text{ is } \mu_{A_n^1}) \quad (13)$$

$$K^{(Nn)} : IF(a_{n1} \text{ is } \mu_{a_1^n} \text{ AND } a_{n2} \text{ is } \mu_{a_2^n} \text{ AND } A_{nn} \text{ is } \mu_{A_n^n}) \quad (14)$$

ВИСНОВКИ

Досліджено і запропоновано інтелектуальне управління виконуючими механізмами мехатронних систем мобільних роботів. Автор визначає, що інтелектуальна система управління мобільним роботом – це гібридна система, яка є апаратною платформою Arduino Uno, яка керує сервоприводами, поворотними і виконуючими механізмами, передаточними парами мобільних роботів з застосуванням алгоритму Мамдані в системах нечіткої логіки (fuzzy logic).

Побудовано імітаційну модель експертної системи в умовах визначеності управління мобільним роботом на базі апаратної платформи Arduino Uno R3.

Розроблено математичний апарат для інтелектуальної системи управління мобільним роботом.

Основна перевага запропонованого методу – суттєве спрощення системи на відміну систем управління з жорсткою логікою, надійність управління роботом, а також гарантування високої швидкості виконання операцій робота без помилок.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Цюй Дуньюе Управління мобільним роботом на основі нечітких моделей // Сучасні проблеми науки та освіти. - 2007. - № 6-2.
- [2] Євстигнєєв Д. В. Апаратно-програмне забезпечення інтелектуальних мобільних роботів. Дисертаційна робота.
- [3] J. S. Albus and A. M. Meystel, Engineering of Mind: An Introduction to the Science of ... R. A. Brooks, "A robust layered control system for a mobile robot," IEEE .
- [4] Леоненков А. В., Нечітке моделювання в MATLAB і fuzzyTECH. // Санкт-Петербург: - «БХВ-Петербург», 2005.
- [5] Апостолок В. О. Апостолок О. С. Інтелектуальні системи керування Конспект лекцій НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка» 2007 85 с.
- [6] Гжебовській, Я. Е. Інтелектуальна система управління мобільним роботом на основі методу нечіткої логіки [Текст] / Я. Е. Гжебовській, Н. К. Шатохіна // Інтелектуальні системи в промисловості і освіті: тези доповідей Третьої міжнародної науково-практичної конференції, м. Суми, 2-4 листопада 2011 р. / Ред.кол.: А. С. Довбиш, О. А. Борисенко, С. П. Шаповалов. - Суми: СумДУ, 2011. - Т.2. - С. 53-54.
- [7] Januszka M., Adamczyk M. i Moczulski W. (2008): Nieholonomiczny autonomiczny robot mobilny do inspekcji obiektów technicznych. W: Problemy Robotyki, Tom 1, K. Tchoń i C. Zieliński (Red.). Tom 166 z Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Elektronika. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa: pp. 143–152.
- [8] Bigaj P., Trojnecki M. T. i Bartoszek J. (2010): Robot IBIS - realizacja ruchu w trybie teleoperacji i semiautonomii. W: Problemy Robotyki, K. Tchoń i C. Zieliński (Red.). Tom 175 z : Prace Naukowe Elektronika. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej: pp. 135–148.

Узагальнене Рівняння Дифузії з Просторово-Часовою Нелокальністю

Олександра Візнович
кафедра прикладної математики
Національний університет «Львівська політехніка»
Львів, Україна
Oleksandra.V.Viznovych@lpnu.ua

Generalized Diffusion Equation with Nonlocality of Space-Time

Oleksandra Viznovych
[dept. of Applied Mathematics](#)
National University Lviv Polytechnic
Lviv, Ukraine
[Oleksandra.V.Viznovych@lpnu.ua](#)

Анотація—Представлено загальний підхід для отримання узагальнених рівнянь дифузії у дробових похідних з використанням рівняння Ліувілля у дробових похідних для системи класичних частинок і нерівноважного статистичного оператора Зубарева (НСО).

Abstract—Presented a general approach for obtaining the generalized diffusion equations with fractional derivatives by using the Liouville equation with fractional derivatives for a system of classical particles and Zubarev's nonequilibrium statistical operator (NSO) method.

Ключові слова—нерівноважний статистичний оператор; дифузія; дробові похідні

Keywords—nonequilibrium statistical operator; diffusion; fractional derivatives

Для математичного моделювання процесів переносу у різних системах, зокрема з фрактальною структурою актуальними залишаються проблеми послідовного виведення рівнянь переносу (дифузії, гідродинаміки, кінетичних рівнянь) у дробових похідних. Якщо математичне моделювання дифузійних процесів у конденсованих системах в рамках статистики на основі ентропії Гіббса на даний час добре розроблені, то опис суб-, супердифузійних процесів у різних середовищах виходить за рамки статистики Гіббса і розглядається в узагальнених статистиках на основі ентропій Тсалліса, Рені та ін. З цієї точки зору важливою є розробка математичних методів моделювання дифузійних процесів у статистиці

Рені, для якої характерні степеневі закони для розподілів у часі. При дослідженні складних самоорганізаційних, фрактальних структур та процесів субдифузії у них необхідні нові математичні моделі та рівняння переносу. Вивчення та математичне моделювання нелінійних процесів у пористих середовищах залишаються актуальними у теоретичній і математичній фізиці як на кінетичному, так і на гідродинамічному рівні опису.

У руслі даних проблем, застосувавши метод нерівноважного статистичного оператора Зубарева [1], отримано нове немарковське рівняння дифузії частинок, виходячи із рівняння Ліувілля у дробових похідних запропонованого Тарасовим [2] для просторово-неоднорідної системи з фрактальною структурою.

Для цього розглянуто рівняння Ліувілля для нерівноважного статистичного оператора (нерівноважної функції розподілу) $\rho(x^N; t)$ з джерелом

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho(x^N; t) + iL_\alpha(t) \rho(x^N; t) = -\varepsilon(\rho(x^N; t) - \rho_{rel}(x^N; t)), \quad (1)$$

(де $\varepsilon \rightarrow +0$, після граничного термодинамічного переходу) у дробових похідних для класичної системи частинок, запропоноване Тарасовим [2] з оператором Ліувілля

$$iL_\alpha \rho(x^N; t) = \left(\sum_{j=1}^N D_{\bar{p}_j}^\alpha H(\bar{r}, \bar{p}) D_{\bar{r}_j}^\alpha - \sum_{j=1}^N D_{\bar{r}_j}^\alpha H(\bar{r}, \bar{p}) D_{\bar{p}_j}^\alpha \right) \rho(x^N; t),$$

де

$$D_x^\alpha f(x) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \int_0^x \frac{f^n(z)}{(x-z)^{\alpha+1-n}} dz$$

– дробова похідна Капуто, $n-1 < \alpha < n$,

$f^n(z) = \frac{d^n}{dz^n} f(z)$. Тут $H(\bar{r}, \bar{p})$ – гамільтоніан системи у

дробових похідних. Пропонується один із шляхів отримання узагальненого (немарковського) рівняння дифузії з використанням методу нерівноважного статистичного оператора Зубарева та принципу максимуму ентропії Рені, який базується на степеневих розподілах. Для математичного опису дифузійних процесів у класичних однокомпонентних системах основним параметром скороченого опису є нерівноважна густина числа частинок

$$\langle \hat{n}(\bar{r}) \rangle_\alpha^t = \hat{I}^\alpha(1, \dots, N) \hat{I}(1, \dots, N) \hat{n}(\bar{r}) \rho(x^N; t),$$

$\hat{n}(\bar{r}) = \sum_{j=1}^N \delta(\bar{r} - \bar{r}_j)$ – мікроскопічна густина числа

частинок. Тут для системи N частинок

$$\hat{I}^\alpha(1, \dots, N) = \hat{I}^\alpha(1), \dots, \hat{I}^\alpha(N), \hat{I}^\alpha(j) = \hat{I}^\alpha(\bar{r}_j) \hat{I}^\alpha(\bar{p}_j)$$

і означають операції інтегрування:

$$I^\alpha(x) f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) d\mu_\alpha(x), d\mu_\alpha(x) = \frac{|x|^\alpha}{\Gamma(\alpha)} dx.$$

Оператор $\hat{I}(1, \dots, N) = \hat{I}(1), \dots, \hat{I}(N)$ означає операцію:

$$\hat{I}(x_j) f(x_j) = \frac{1}{2} (f(\dots x'_j - x_j \dots) + f(\dots x'_j + x_j \dots)).$$

Відповідно до методу нерівноважного статистичного оператора релевантний статистичний оператор $\rho_{rel}(x^N; t')$ шукаємо із екстремуму функціоналу ентропії Рені при фіксованих значеннях $\langle \hat{n}(\bar{r}) \rangle_\alpha^t$ і збережені умови нормування

$$\hat{I}^\alpha(1, \dots, N) \hat{I}(1, \dots, N) \rho_{rel}(x^N; t') = 1.$$

В результаті отримуємо, що

$$\rho_{rel}(t) = \frac{1}{Z_R(t)} \times \left(I - \frac{q-1}{q} \beta \left(H - \int d\mu_\alpha(\bar{r}) \nu^*(\bar{r}; t) \hat{n}(\bar{r}) \right) \right)^{\frac{1}{q-1}}, \quad (2)$$

де

$$Z_R(t) = \hat{I}^\alpha(1, \dots, N) \hat{I}(1, \dots, N) \times \left(I - \frac{q-1}{q} \beta \left(H - \int d\mu_\alpha(\bar{r}) \nu^*(\bar{r}; t) \hat{n}(\bar{r}) \right) \right)^{\frac{1}{q-1}}$$

– статистична сума релевантного розподілу (2),

$$\nu^*(\bar{r}; t) = \frac{\nu(\bar{r}; t)}{I + \frac{q-1}{q} \int d\mu_\alpha(\bar{r}) \nu(\bar{r}; t) \langle \hat{n}(\bar{r}) \rangle_\alpha^t},$$

$\nu(\bar{r}; t)$ – нерівноважне значення хімічного потенціалу частинок, що визначається із умови самоузгодження: $\langle \hat{n}(\bar{r}) \rangle_\alpha^t = \langle \hat{n}(\bar{r}) \rangle_{\alpha, rel}^t$. У даному випадку $0 < q < 1$, q – параметр Рені. У цьому випадку нерівноважний статистичний оператор, як розв'язок рівняння (1) має вигляд:

$$\rho(t) = \rho_{rel}(t) + \int_{-\infty}^t e^{\beta(t-t')} T(t, t') \left\{ d\mu_\alpha(\bar{r}) \nu^*(\bar{r}; t) I_n(\bar{r}'; t') \right\} \rho_{rel}(t) dt' \quad (3)$$

де $I_n(\bar{r}; t) = (I - P(t)) \frac{1}{q} \Psi^{-1}(t) iL_N \hat{n}(\bar{r})$ – узагальнений потік, у якому функція

$$\Psi(t) = I - \frac{q-1}{q} \beta \left(H - \int d\mu_\alpha(\bar{r}) \nu^*(\bar{r}; t) \hat{n}(\bar{r}) \right),$$

$P(t)$ – узагальнений проєкційний оператор Морі, побудований на змінних $n(\bar{r})$. За допомогою нерівноважного статистичного оператора (3) для параметра скороченого опису отримано узагальнене рівняння (немарковське) q -дифузії у дробових похідних:

$$\frac{\partial}{\partial t} \langle \hat{n}(\bar{r}) \rangle_\alpha^t = \frac{\partial^\alpha}{\partial \bar{r}^\alpha} \cdot \int d\mu_\alpha(\bar{r}') \int_{-\infty}^t e^{\beta(t-t')} \quad (4)$$

$$D_q(\bar{r}, \bar{r}'; t, t') \cdot \frac{\partial^\alpha}{\partial \bar{r}'^\alpha} \beta \nu^*(\bar{r}'; t') dt',$$

де

$$D_q(\bar{r}, \bar{r}'; t, t') = \langle \hat{\nu}(\bar{r}) \rangle_\alpha^t T(t, t') \hat{\nu}(\bar{r}') \rangle_{\alpha, rel}^t = \hat{I}^\alpha(1, \dots, N) \hat{I}(1, \dots, N) \langle \hat{\nu}(\bar{r}) \rangle_\alpha^t T(t, t') \hat{\nu}(\bar{r}') \rho_{rel}(t) \quad (5)$$

– узагальнений коефіцієнт q - дифузії в статистиці Рені, у якому усереднення виконується із степеневим розподілом (2). Відповідно середні значення за релевантною функцією розподілу означаються наступним чином

$$\langle (\dots) \rangle_{\alpha, rel}^t = \hat{I}^\alpha(1, \dots, N) \hat{I}(1, \dots, N) (\dots) \rho_{rel}(x^N; t).$$

Тут $\hat{v}(\vec{r}) = \sum_{j=1}^N \vec{v}_j \delta(\vec{r} - \vec{r}_j)$ – мікроскопічна густина потоку

частинок системи. При $q = 1$ узагальнене рівняння q -дифузії в статистиці Рені переходить в узагальнене рівняння дифузії статистики Гіббса у дробових похідних. Коли ж $q = 1$ та $\alpha = 1$, то приходимо до узагальненого рівняння дифузії статистики Гіббса. У наближенні Маркова для узагальненого коефіцієнта дифузії у часі і просторовій однорідності:

$$D_q(\vec{r}, \vec{r}'; t, t') \approx D_q \delta(t - t') \delta(\vec{r} - \vec{r}'),$$

виключивши параметр $v^*(\vec{r}'; t')$ за допомогою умови самоузгодження, із (4) отримаємо рівняння дифузії у дробових похідних:

$$\frac{\partial}{\partial t} \langle \hat{n}(\vec{r}) \rangle_\alpha^t = D_q \frac{\partial^{2\alpha}}{\partial r^{2\alpha}} \langle \hat{n}(\vec{r}) \rangle_\alpha^t.$$

Узагальнене рівняння дифузії (4) враховує просторову нелокальність системи та ефекти пам'яті в узагальненому коефіцієнті дифузії частинок $D_q(\vec{r}, \vec{r}'; t, t')$ в статистиці Рені. Просторова фрактальність системи очевидно впливає на процеси переносу частинок, що може проявлятися як часова мультифрактальність із характерними часами релаксації. Для розкриття часової мультифрактальності в узагальненому рівнянні дифузії використаємо наступне наближення для узагальненого коефіцієнта дифузії частинок:

$$D_q(\vec{r}, \vec{r}'; t, t') = W_\alpha(t, t') \bar{D}_q(\vec{r}, \vec{r}'),$$

де $W_\alpha(t, t')$ можна означити як функцію пам'яті у часі. З врахуванням цього наближення рівняння (4), можна подати у вигляді

$$\frac{\partial}{\partial t} \langle \hat{n}(\vec{r}) \rangle_\alpha^t = \int_{-\infty}^t e^{\xi(t-t')} W_\alpha(t, t') \Psi(\vec{r}; t') dt', \quad (6)$$

де

$$\Psi(\vec{r}; t) = \frac{\partial^\alpha}{\partial \vec{r}^\alpha} \cdot \int d\mu_\alpha(\vec{r}') D_q(\vec{r}, \vec{r}') \cdot \frac{\partial^\alpha}{\partial \vec{r}'^\alpha} \beta v^*(\vec{r}'; t').$$

Застосовуючи перетворення Фур'є до рівняння (6), в результаті, у частотному зображенні отримаємо, що

$$i\omega \langle \hat{n}(\vec{r}) \rangle_\alpha^\omega = W_\alpha(\omega) \Psi(\vec{r}; \omega). \quad (7)$$

Ввівши час релаксації τ (який характеризує процеси переносу у системі), частотну залежність функції пам'яті подамо у вигляді [3,4]:

$$W_\alpha(\omega) = \frac{(i\omega)^{1-\xi}}{1 + i\omega\tau_\alpha}, 0 < \xi \leq 1.$$

Тоді рівняння (7) можна записати наступним чином:

$$(1 + i\omega\tau_\alpha) i\omega \langle \hat{n}(\vec{r}) \rangle_\alpha^\omega = (i\omega)^{1-\xi} \Psi(\vec{r}; \omega). \quad (8)$$

Далі використаємо перетворення Фур'є до дробових похідних від функцій [5]:

$$L({}_0 D_t^{1-\xi} f(t); i\omega) = (i\omega)^{1-\xi} L(f(t); i\omega).$$

З використанням перетворення Фур'є, зворотній перехід у рівнянні (8) до часової залежності дає узагальнене рівняння дифузії типу Кеттано з врахуванням просторово-часової фрактальності:

$$\tau_\alpha \frac{\partial^2}{\partial t^2} n_a(\vec{r}; t) + \frac{\partial}{\partial t} n_a(\vec{r}; t) = {}_0 D_t^{1-\xi} \sum_b \times \int d\mu_\alpha(\vec{r}') \frac{\partial^\alpha}{\partial \vec{r}'^\alpha} \cdot D_q^{ab}(\vec{r}, \vec{r}') \cdot \frac{\partial^\alpha}{\partial \vec{r}'^\alpha} \beta v_b^*(\vec{r}'; t) \quad (9)$$

При $q = 1$ із (9) отримуємо узагальнене рівняння типу Кеттано в статистиці Гіббса із просторово-часовою фрактальністю. Рівняння (9) містять суттєву просторову неоднорідність у $D_q(\vec{r}, \vec{r}')$. Якщо знехтувати просторовою неоднорідністю:

$$D_q(\vec{r}, \vec{r}') = \bar{D}_q \delta(\vec{r} - \vec{r}'),$$

то отримаємо:

$$\begin{aligned} \tau_\alpha \frac{\partial^2}{\partial t^2} n(\vec{r}; t) + \frac{\partial}{\partial t} n(\vec{r}; t) = \\ = {}_0 D_t^{1-\xi} \bar{D}_q \frac{\partial^{2\alpha}}{\partial \vec{r}^{2\alpha}} \beta v^*(\vec{r}; t) \end{aligned} \quad (10)$$

– рівняння дифузії типу Кеттано із просторово-часовою нелокальністю із сталим коефіцієнтом дифузії в статистиці

Рені. При $q = 1$ та при $\alpha = 1$ із рівняння (12) отримуємо рівняння дифузії типу Кеттано, що подано у роботі [6]

$$\tau_{\alpha} \frac{\partial^2}{\partial t^2} n(\vec{r}; t) + \frac{\partial}{\partial t} n(\vec{r}; t) = {}_0 D_t^{1-\xi} \bar{D} \frac{\partial^2}{\partial \vec{r}^2} \beta v_b^*(\vec{r}; t) \quad (11)$$

Розглянуто різні моделі частотної залежності для функцій пам'яті, які приводять до відомих результатів типу рівнянь дифузії у дробових похідних [6-10], а також їхніх узагальнень.

ВИСНОВКИ

Із застосуванням математичного апарату фрактального числення виведено узагальнене (немарковське) рівняння дифузії у дробових похідних на основі рівняння Ліувілля у дробових похідних, запропонованого Тарасовим в методі нерівноважного статистичного оператора. При $q = 1$ узагальнене рівняння дифузії в статистиці Рені переходить в узагальнене рівняння дифузії статистики Гіббса у дробових похідних. У випадку нехтування ефектами пам'яті та просторовою неоднорідністю і коли параметр Рені $q = 1$, то отримуємо відомі рівняння дифузії у дробових похідних із сталими коефіцієнтами дифузії. Шляхом моделювання функції пам'яті отримано узагальнене рівняння дифузії типу Кеттано з просторово-часовою нелокальністю для систем частнок, які при $q = 1$ та при $\alpha = 1$ переходять у відомі рівняння дифузії статистики Гіббса.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Kostrobij P., Markovych B., Viznovych O., Tokarchuk M. J. Math. Phys. – 2016. – Vol. 57, No. 9. – P. 093301.
- [2] Tarasov V. E. Fractional Dynamics: Applications of Fractional Calculus to Dynamics of Particles, Field and Media. Springer, New York, 2011.
- [3] Kostrobij P., Grygorchak I., Ivashchyshyn F., Markovych B., Viznovych O., Tokarchuk M. J. Phys. Chem. A. – 2018. – Vol. 122, No 16. – P. 4099.
- [4] Kostrobij P., Markovych B., Viznovych O., Tokarchuk M. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2019. – Vol. 514. – P. 63– 70.
- [5] Samko S. G., Kilbas A. A., Marichev O. I. Fractional Integrals and Derivatives: Theory and Applications 1 edition. Gordon and Breach Science Publishers, 1993.
- [6] Compte A., Metzler R. J. Physics A: Mathematical and General. – 1997. – Vol. 30, No. 21. – P. 7277.
- [7] Kosztolowicz T., Lewandowska K. D. J. Physics A: Mathematical and Theoretical. – 2009. – Vol. 42, No. 5. – P. 055004.
- [8] Nigmatullin R. R. Physica Status Solidi (b). – 1986. – Vol. 133, No. 1. – P. 425.
- [9] Qi H., Jiang X. Physica A. – 2011. – Vol. 390, No. 11. – P. 1876.
- [10] Sun H., Chen W., Li C., Chen Y. Physica A. – 2010. – Vol. 389, No. 14. – P. 2719.

До Оцінки Сталих Матеріалу Локально Градієнтної Пружності

Ольга Грицина

відділ математичних методів
обчислювального експерименту,
Центр математичного моделювання
Інституту прикладних проблем механіки і математики
ім. Я. С. Підстригача НАН України
Львів, Україна
hrytsyna.olha@gmail.com

Галина Мороз

відділ математичного моделювання
нерівноважних процесів,
Центр математичного моделювання
Інституту прикладних проблем механіки і математики
ім. Я. С. Підстригача НАН України
Львів, Україна
halynamoroz.ua@gmail.com

The Estimation of New Material Parameters of Local Gradient Elasticity

Olha Hrytsyna

department for mathematical methods
of computing experiment,
Center of Mathematical Modeling of Pidstryhach Institute
for Applied Problems of Mechanics and Mathematics,
National Academy of Sciences of Ukraine
Lviv, Ukraine
hrytsyna.olha@gmail.com

Halyna Moroz

department for mathematical modelling
of irreversible processes,
Center of Mathematical Modeling of Pidstryhach Institute
for Applied Problems of Mechanics and Mathematics,
National Academy of Sciences of Ukraine
Lviv, Ukraine
halynamoroz.ua@gmail.com

Анотація — З використанням співвідношень локально градієнтної пружності вивчено вплив вільної поверхні на приповерхневу неоднорідність полів у пружному півпросторі кубічносиметричного матеріалу. Одержані результати разом із кількісними значеннями поверхневого натягу, характерної віддалі та поверхневої енергії деформації використані для оцінки коефіцієнтів локально градієнтної теорії пружності.

Abstract — Based on relations of the local gradient theory of elasticity the effect of body surface on equilibrium state of the centrosymmetric cubic crystal half-space is studied. The obtained solution together with values of the surface tension, characteristic length, and surface energy of deformation are used for the estimation of new material parameters of the local gradient elasticity.

Ключові слова — локально градієнтна теорія; локальне зміщення маси; поверхневі напруження; поверхневий натяг; оцінка коефіцієнтів.

Keywords — local gradient theory; local mass displacement; surface stress; surface tension; estimation of material parameters.

I. ВСТУП

Пропонована робота має за мету оцінити порядок коефіцієнтів моделі локально градієнтної пружності [1]. Згадані коефіцієнти виникають у розкладі для вільної

енергії в результаті врахування у модельному описі локального зміщення маси та його взаємозв'язку з механічними полями. При побудові математичної моделі локально градієнтної механіки локальне зміщення маси пов'язується з потоками маси недифузійної та неконвективної природи, зумовленими перебудовою мікроструктури матеріалу фізично-малого елемента тіла.

II. ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАДАЧІ

Вивчимо вплив вільної поверхні на приповерхневу неоднорідність полів у пружному півпросторі. З цією метою розглянемо рівноважний стан вільного від зовнішнього силового навантаження півбезмежного тіла (область $x \geq 0$), яке є кристалом гранецентрованої кубічної структури. Вважаємо, що тіло контактує з вакуумом. Нехай осі Ox та Oz лежать на вільній поверхні $x=0$ півпростору, яка співпадає з кристалографічною гранню (100).

За базові функції приймаємо вектор переміщення $\mathbf{u} = (u(x), 0, 0)$ та модифікований хімічний потенціал $\tilde{\mu}'_{\pi} = \tilde{\mu}'_{\pi}(x)$. Виходячи з розв'язуючої системи рівнянь локально градієнтної пружності [1], для визначення рівноважного розподілу цих функцій в області тіла $x > 0$ маємо рівняння

$$\left(\bar{K} + \frac{4}{3}G\right) \frac{d^2u}{dx^2} - K \frac{\alpha_p}{d_p} \frac{d\tilde{\mu}'_\pi}{dx} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{d^2\tilde{\mu}'_\pi}{dx^2} - \lambda_\mu^2 \tilde{\mu}'_\pi = \lambda_\mu^2 \frac{K\alpha_p}{\rho_0} \frac{du}{dx}, \quad (2)$$

де

$$\lambda_\mu^2 = \frac{1}{d_p \chi_m}, \quad \bar{K} = K - \frac{K^2 \alpha_p^2}{\rho_0 d_p}. \quad (3)$$

Тут K — модуль об'ємного стиску за сталої густини наведеної маси; G — модуль зсуву; α_p — коефіцієнт об'ємного розширення, спричиненого локальним зміщенням маси; χ_m — коефіцієнт, який характеризує локальне зміщення маси, зумовлене градієнтом потенціалу μ'_π ; d_p — ізохоричний коефіцієнт залежності потенціалу μ'_π від питомої густини наведеної маси.

Для забезпечення єдиності розв'язку до системи рівнянь (1), (2) слід долучити крайові умови на поверхні півпростору:

$$\left(\bar{K} + \frac{4}{3}G\right) \frac{du}{dx} - K \frac{\alpha_p}{d_p} \tilde{\mu}'_\pi = 0, \quad (4)$$

$$\tilde{\mu}'_\pi = -\mu'_{\pi 0}, \quad \text{якщо } x = 0.$$

Перше зі співвідношень системи (4) відповідає умові відсутності на поверхні півпростору нормальних напружень ($\hat{\sigma} \cdot \mathbf{n} = 0$), а друге — рівності нулю абсолютного значення потенціалу μ'_π (оскільки тіло контактує з вакуумом, а $\mu'_{\pi v} = 0$).

III. Розв'язок задачі та його аналіз

Розв'язок системи диференціальних рівнянь (1), (2), що задовольняє крайовим умовам (4) та умові обмеженості полів на безмежності, має вигляд:

$$u(x) = \frac{\mu'_{\pi 0} K \alpha_p}{d_p \tilde{\lambda} \left(\bar{K} + \frac{4}{3}G\right)} e^{-\tilde{\lambda}x}, \quad (5)$$

$$\tilde{\mu}'_\pi(x) = -\mu'_{\pi 0} e^{-\tilde{\lambda}x}, \quad x \geq 0, \quad (6)$$

де

$$\tilde{\lambda}^2 = \lambda_\mu^2 (1 + M), \quad M = \frac{K^2 \alpha_p^2}{\rho_0 d_p} \left/ \left(K + \frac{4}{3}G - \frac{K^2 \alpha_p^2}{\rho_0 d_p} \right) \right. . \quad (7)$$

У міру віддалення від поверхні $x = 0$ тіла переміщення (5) та деформація

$$e_{xx}(x) = -\frac{\mu'_{\pi 0} K \alpha_p}{d_p \left(\bar{K} + \frac{4}{3}G\right)} e^{-\tilde{\lambda}x} \quad (8)$$

спадають згідно експоненціального закону зі сталою зникання $\tilde{\lambda}$. Отже, у результаті формування поверхні півпростору, внаслідок розриву зв'язків між атомами, розташованими на ній, поверхня деформується і зміщується:

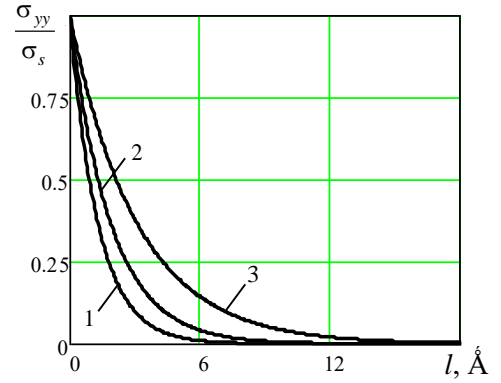


Рис. 1. Розподіл напружень в околі поверхні півпростору для різних матеріалів (криві 1–3 відповідають $l^* = 1.3 \text{ \AA}$, 1.89 \AA , 3.1 \AA)

$$e_{xx}(0) = -\frac{\mu'_{\pi 0} K \alpha_p}{\left(\bar{K} + \frac{4}{3}G\right) d_p},$$

$$u(0) = \frac{\mu'_{\pi 0} K \alpha_p (1 + M)}{d_p \tilde{\lambda} \left(\bar{K} + \frac{4}{3}G\right)} = \frac{\mu'_{\pi 0} K \alpha_p}{\left(K + \frac{4}{3}G\right)} \sqrt{\frac{\chi_m (1 + M)}{d_p}}. \quad (9)$$

Знаючи переміщення $u(0)$, модулі пружності K і G , а також параметри M та $\tilde{\lambda}$, на основі формули (9) можна визначити значення безрозмірного параметра $\nu \equiv \alpha_p \mu'_{\pi 0} / d_p$.

З використанням рівнянь стану [1] та формули (8), для ненульових компонент тензора напружень і вектора локального зміщення маси отримаємо

$$\sigma_{yy}(x) = \sigma_{zz}(x) \equiv \sigma(x) = \sigma_s e^{-\tilde{\lambda}x}, \quad (10)$$

$$\pi_m(x) = -\mu'_{\pi 0} \tilde{\lambda} \chi_m e^{-\tilde{\lambda}x}. \quad (11)$$

Тут σ_s — поверхневі напруження, означені виразом

$$\sigma_s = \frac{2GK\alpha_p\mu'_{\pi 0}(1+M)}{d_p(K+4G/3)}. \quad (12)$$

Напруження σ_{yy} і σ_{zz} досягають максимальних значень σ_s на поверхні $x = 0$ півпростору, далі, з віддаленням від неї, у вузькій приповерхневій області $0 < x < d$ вони стрімко спадають, прямуючи до нуля (рис. 1). На віддалі $x = \tilde{\lambda}^{-1}$ від поверхні деформація та напруження зменшуються в e раз, таким чином параметр $l^* = \tilde{\lambda}^{-1}$, що має розмірність довжини, є характерною віддаллю. Цю віддаль визначають експериментальними методами [2], методами дискретного аналізу [3], теорії динаміки ґратки [4–7] тощо. Зазначимо, що кристалам NaCl і KCl відповідають значення характерних віддалей $l^* = 1.3 \text{ \AA}$ й $l^* = 1.89 \text{ \AA}$ [5].

Ґрунтуючись на формулах (9) і (12), запишемо:

$$\sigma_s = 2Gu(0)/l^*.$$

Одержане співвідношення визначає поверхневі напруження через значення вектора переміщень на поверхні тіла,

а також модуль зсуву і характерну віддаль l_* . У кристалічному тілі такі переміщення складають 1–3 % міжатомної віддалі [4]. Приймаючи, що $u(0) \approx ak_a$, де a — віддаль між атомами в кристалі, а k_a — сталий коефіцієнт ($k_a = 10^{-2} \div 3 \cdot 10^{-2}$), надамо останньому співвідношенню вигляду

$$\sigma_s = 2Gak_a/l_* . \quad (13)$$

Записана формула дозволяє оцінити величину поверхневих напружень у твердих кристалічних тілах на основі відомих значень модуля зсуву G , параметра кристалічної ґратки a та характерної віддалі матеріалу l_* .

Поверхневий натяг у твердих тілах визначають тангенціальні зусилля [Н] у приповерхневому шарі, віднесені до одиниці довжини [м] [8]. Поверхневий натяг F_n^∞ [Н/м] у півпросторі визначають напруження σ_{yy} і σ_{zz} . Означимо F_n^∞ співвідношенням:

$$F_n^\infty = \int_0^d \sigma(x) dx . \quad (14)$$

За врахування формул (10) і (14) для поверхневого натягу у півпросторі одержимо співвідношення

$$F_n^\infty = \int_0^d \sigma_s e^{-\lambda x} dx = -\frac{1}{\lambda} \sigma_s e^{-\lambda x} \Big|_0^d = \sigma_s l_* . \quad (15)$$

Отже, поверхневий натяг у півбезмежному тілі з плоскою межею визначається поверхневими напруженнями σ_s та характерною віддаллю l_* .

З огляду на (12), формулі (15) надамо вигляду:

$$F_n^\infty = \frac{2GK\alpha_p l_* \mu'_{\pi 0}}{\left(K + \frac{4}{3}G - \frac{K^2 \alpha_p^2}{\rho_0 d_p} \right) d_p} . \quad (16)$$

Зважаючи на формули (15) і (13), отримаємо просту розрахункову формулу для обчислення поверхневого натягу у півпросторі

$$F_n^\infty = 2Gak_a .$$

Ця формула може бути корисною для оцінки величини поверхневого натягу у кристалічних тілах із плоскопаралельними межами (товстих шарах чи півбезмежних тілах із плоскою межею).

IV. ОЦІНКА ПОВЕРХНЕВИХ НАПРУЖЕНЬ І КОЕФІЦІЄНТІВ МОДЕЛІ

Виходячи зі співвідношення (15), на основі відомих значень поверхневого натягу F_n^∞ у півпросторі та характерної віддалі l_* можемо оцінити величину поверхневих напружень σ_s як відношення поверхневого натягу до характерної віддалі матеріалу: $\sigma_s = F_n^\infty / l_*$. Для кристалів NaCl та KCl маємо такі значення поверхневого натягу [9]:

$$F_n^\infty \Big|_{NaCl} = 0.147 \text{ Н/м}, F_n^\infty \Big|_{KCl} = 0.117 \text{ Н/м}.$$

Згідно [10] для калію хлориду маємо: $F_n^\infty \Big|_{KCl} = 0.221 \text{ Н/м}$.

Там же ж наведено інші значення поверхневого натягу, знайдені шляхом розколу кристала KCl вздовж площини (100): $F_n^\infty \Big|_{KCl} = 0.11 \text{ Н/м}$, а також за використання експериментальних даних щодо залежності діелектричної проникності матеріалу від товщини тонкої плівки: $F_n^\infty \Big|_{KCl} = 0.192 \text{ Н/м}$. Таким чином, на основі даних різних першоджерел, для калію хлориду маємо: $F_n^\infty \Big|_{KCl} = 0.11 \div 0.22 \text{ Н/м}$. Враховуючи значення характерної віддалі (див. табл.), маємо таку оцінку для поверхневих напружень у кристалах калію хлориду та натрію хлориду:

$$\begin{aligned} \sigma_s \Big|_{KCl} &= (0.7 \div 1.3) \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2 , \\ \sigma_s \Big|_{NaCl} &= (0.9 \div 2.0) \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2 . \end{aligned} \quad (17)$$

TABLE I. СТАЛІ МАТЕРІАЛУ ДЛЯ ГАЛОГЕНАТІВ ЛУЖНИХ МЕТАЛІВ

Речовина	Параметр ґратки, $a, 10^{-10}$ м	Характерна віддаль, $l_*, 10^{-10}$ м		Пружні коефіцієнти $C_{ij}, 10^{10}$ Па		
				C_{11}	C_{12}	C_{44}
	[11]	$l_* \approx \frac{a}{3.5}$ [3]	[5, 7]	[11]		
NaI	6.4728	1.85	—	3.02	0.88	0.74
NaCl	5.6402	1.61	1.3	4.94	1.29	1.26
KI	7.0655	2.02	—	2.76	0.45	0.37
KCl	6.2931	1.79	1.89	4.08	0.69	0.63

На основі формули (13) та значень параметрів для галогенатів лужних металів (див. табл.), одержимо таку оцінку для поверхневих напружень: $\sigma_s \Big|_{NaCl} = 1.97k_a \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$. Якщо прийняти $k_a = 10^{-2}$, то $\sigma_s \Big|_{NaCl} = 1.97 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$, що узгоджується з формулами (17), отриманими за використання даних експериментальних вимірювань.

Оцінимо коефіцієнти моделі, пов'язані з врахуванням впливу локального зміщення маси на механічні процеси.

З допомогою формул (3), (7) та (11) одержимо:

$$\pi_m(0) = -\mu'_{\pi 0} \sqrt{\chi_m(1+M)} / d_p .$$

Враховуючи це співвідношення та вираз (9), отримаємо таку формулу

$$K\alpha_p = -\left(K + \frac{4}{3}G \right) \frac{u(0)}{\pi_m(0)} .$$

Отже коефіцієнт об'ємного розширення α_p , спричиненого локальним зміщенням маси, визначається відношенням

переміщення поверхні $u(0)$ до поверхневого значення $\pi_m(0)$ питомого вектора локального зміщення маси.

У межах локально градієнтної теорії поверхнева енергія деформації визначається формулою [1]

$$U_\Sigma = -\frac{1}{2} \rho_0 \mu'_{\pi 0} \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\pi}_m \Big|_{\mathbf{r} \in (\Sigma)} .$$

Відтак, враховуючи (11), для обчислення поверхневої енергії деформації у півпросторі маємо вираз

$$U_\Sigma^\infty = -\frac{\rho_0}{2l_*} \mu'_{\pi 0}{}^2 \chi_m . \quad (18)$$

З огляду на співвідношення (16) і (18) та формули

$$\frac{K^2 \alpha_p^2}{\rho_0 d_p} = \frac{M}{(1+M)} \left(K + \frac{4}{3} G \right),$$

$$K + \frac{4}{3} G - \frac{K^2 \alpha_p^2}{\rho_0 d_p} = \left(K + \frac{4}{3} G \right) / (1+M),$$

знайдемо

$$M = -\left(K + \frac{4}{3} G \right) \frac{(F_H^\infty)^2}{8G^2 l_* U_\Sigma^\infty} . \quad (19)$$

Ця формула дозволяє оцінити знак і величину параметра M . Оскільки K, G й l_* додатновизначені величини, а $U_\Sigma^\infty < 0$, то $M > 0$. Для NaCl маємо [4, 12, 13]:

$$K|_{NaCl} = 3.15 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2, \quad G|_{NaCl} = 1.28 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2,$$

$$\rho_0|_{NaCl} = 2.214 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3, \quad U_\Sigma^\infty|_{NaCl} = -5.9 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/м}^2 .$$

(20)

Відтак, отримаємо: $M|_{NaCl} = 8 \cdot 10^{-4}$. Отже, безрозмірний параметр M , який характеризує зв'язаність процесів локального зміщення маси й деформування, для кристалів натрію хлориду є малим параметром.

Оцінимо порядок параметра χ_m [с²]. Виходячи із формули (18), запишемо

$$\chi_m = -\frac{2l_* U_\Sigma^\infty}{\rho_0 \mu'_{\pi 0}{}^2} . \quad (21)$$

Остання формула дозволяє обчислити параметр χ_m за відомими значеннями поверхневої енергії деформації U_Σ^∞ у тілі з плоскою межею, характерної віддалі l_* , густини матеріалу ρ_0 та потенціалу $\mu'_{\pi 0}$ у безмежному середовищі. Перші три перелічені характеристики доступні з літератури, а потенціал $\mu'_{\pi 0}$ потребує додаткового визначення. Врахувавши значення характеристик матеріалу (20), для натрію хлориду дістанемо: $\chi_m|_{NaCl} = 3.89 \cdot 10^{-15} / \mu'_{\pi 0}{}^2$ [с²]. Прийемо, що $\mu'_{\pi 0}$ є величиною порядку 10^4 (м²/с²), тоді $\chi_m = O(10^{-23})$ с².

Виходячи з формули

$$l_*^{-2} = \tilde{\lambda}^2 = (1+M)/d_p \chi_m ,$$

запишемо:

$$d_p = (1+M) l_*^2 / \chi_m .$$

Звідси, врахувавши, що $M = O(10^{-4})$, $\chi_m = O(10^{-23})$ [с²], $l_* = O(10^{-9})$ [м], маємо таку оцінку для коефіцієнта d_p : $d_p = O(10^5)$ [м²/с²].

Ґрунтуючись на співвідношеннях (18) та (16), для параметра α_p одержимо формулу:

$$\alpha_p = \rho_0 \mu'_{\pi 0} \left(\frac{K}{4G} + \frac{1}{3} \right) \frac{F_H^\infty}{K U_\Sigma^\infty} .$$

З огляду на наведені вище значення характеристик матеріалу, поверхневої енергії деформації та поверхневого натягу, отримаємо: $\alpha_p = O(10^{-3} \div 10^{-2})$. При цьому, відповідно до теореми про єдиність розв'язку лінійних задач локально градієнтної пружності [1], безрозмірний параметр α_p має також справджувати нерівність:

$$\alpha_p^2 < \rho_0 \frac{d_p}{K^2} \left(K - \frac{2}{3} G \right) .$$

Якщо прийняти, що $d_p = O(10^5)$, то для NaCl це відповідає $|\alpha_p| < 0.07$.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] О. Грицина, В. Кондрат, Термомеханіка конденсованих систем за урахування локального зміщення маси: І. Основи теорії. Львів: «Растр – 7», 2017.
- [2] L. N. Germer, A. U. Mac Rae, C. D. Hartman, “(110) Nickel surface”, *J. Appl. Phys.*, vol. 32, p. 2432–2439, 1961.
- [3] G. G. Benson, K. S. Yun, In: The solid-gas interface. Ed. E. A. Flood. New York: Dekker Inc., vol. 1, p. 203–269, 1967.
- [4] Ж. Можен, Механика электромагнитных сплошных сред. Москва: Мир, 1991.
- [5] A. Askar, P. C. Y. Lee, A. S. Cakmak, “The effect of surface curvature and discontinuity on the surface energy density and other induced fields in elastic dielectrics with polarization gradient”, *Int. J. Solids and Struct.*, vol. 7, issue 5, pp. 523–537, 1971.
- [6] R. D. Mindlin, “Second gradient of strain and surface-tension in linear elasticity”, *Int. J. Solids Struct.*, vol. 1, p. 417–438, 1965.
- [7] R. D. Mindlin, “Elasticity, piezoelectricity and crystal lattice dynamics”, *J. Elast.*, vol. 2, pp. 217–282, 1972.
- [8] Я. Е. Гегузин, Н. Н. Гончаренко, “Поверхностная энергия и процессы на поверхности твердых тел”, *Успехи физически наук*, Т. LXXVI, вып. 2, с. 283–328, 1962.
- [9] Н. Ю. Сдобняков, В. М. Самсонов, А. Н. Базулев, А. Н. Кульпин, “О поверхностном натяжении нанокристаллов различной природы”, *Конденсированные среды и межфазные границы*, Т. 9, № 3, с. 255–260, 2007.
- [10] В. М. Юров, Н. Х. Ибраев, С. А. Гученко, “Экспериментальное определение поверхностного натяжения наночастиц и нанопленок”, *Известия высших учебных заведений. Физика*, № 1/3, с. 334–338, 2011.
- [11] D. V. Sirdeshmukh, L. Sirdeshmukh, K. G. Subhadra, Micro- and macroproperties of solids: Thermal, mechanical and dielectric properties. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [12] Digest of literature on dielectrics 1971; ed. by P. P. Budenstein. Vol. 35, Washington: D. C., 1973.
- [13] R. D. Mindlin, “Polarization gradient in elastic dielectrics”, *Int. J. Solids Structures*, vol. 4, pp. 637–642, 1968.

Математичний Метод Чисельного Моделювання Гідродинамічних Процесів

Ярослав Іванчук
кафедра комп'ютерних наук
Вінницький національний технічний університет
Вінниця, Україна
ivanchuck@ukr.net

Mathematical Method of Numerical Simulation for Hydrodynamic Processes

Yaroslav Ivanchuk
dept. of Computer Science
Vinnytsia National Technical University
Vinnytsia, Ukraine
ivanchuck@ukr.net

Анотація—У роботі наведений чисельний метод моделювання, який застосовується при дослідженні динаміки суцільних в'язких слабостиснених рідин на основі системи рівнянь нерозривності і Нав'є-Стокса. У запропонованому методі використовується комплексний підхід використання чисельного розв'язку рівняння нерозривності методом кінцевих об'ємів, а для розв'язку рівняння Нав'є-Стокса метод розщеплення по фізичним факторам. У роботі показано, що метод кінцевих об'ємів, який застосовувався для опису течії як стисненої, так і нестиснених рідин володіє такими важливими перевагами, як наявність хороших консервативних властивостей і допущення дискретизації складних обчислювальних областей в більш прості, чим це дозволяє ізопараметричне кінцево-елементне формулювання задачі або введення узагальнених координат. У методі розщеплення по фізичним факторам вводиться складова, яка враховує штучну стисненість досліджуваної рідини, що дозволяє спочатку розрахувати проміжкове поле швидкостей, яке потім підправляється із врахуванням градієнта тиску. Різницева схема даного методу дозволяє розраховувати поле течії без використання значень вихору і тиску на твердій поверхні. Для підтвердження ефективності запропонованого методу, в CFD-програмі FlowVision були отримані розв'язки цілого ряду задач зовнішньої гідродинаміки, наприкладі обтікання циліндричної поверхні, які підтвердили стійкість отриманих результатів. Даний метод дозволяє проводити по єдиному алгоритму розрахунки обтікання плоских, осесиметричних і тривимірних тіл складної конфігурації потоком в'язкої слабостисненої рідини, а також внутрішніх течій в широкому діапазоні чисел Рейнольдса.

Abstract—This article presents a numerical simulation method that is used in the study of the dynamics of continuous viscous weakly compressible fluids based on the system of equations of continuity and Navier-Stokes. The proposed method uses an integrated approach using the numerical solution of the continuity equation by the finite-volume method, and for solving the Navier-Stokes equation, the splitting method is based on physical factors. The article shows that the finite volume method, which was used to describe the flow of both compressed and uncompressed liquids, has such important advantages. These are the presence of good conservative properties and the discretization assumptions of complex computational domains into simpler ones than isoparametric finite element formulation of the problem or the introduction of generalized coordinates. In the method of splitting according to physical factors, a component is introduced that takes into account the artificial low compressibility of the liquid under study, which makes it possible to first calculate the intermediate velocity field. It is then corrected for pressure gradients. To confirm the effectiveness of the proposed method, in the FlowVision CFD program, solutions were obtained for a number of problems in external hydrodynamics. They confirmed the sustainability of the results. This method allows one to compute the flow around flat, axisymmetric, and three-dimensional bodies of complex configuration with a flow of a viscous weakly compressible fluid, as well as internal flows in a wide range of Reynolds numbers using a single algorithm.

Ключові слова—рівняння Нав'є-Стокса; чисельне моделювання; алгоритм; тиск; швидкість; різницева схема

Keywords—Navier-Stokes equations; numerical simulation; algorithm; pressure; speed; difference scheme

I. ВСТУП

Сучасний етап розвитку нелінійної механіки характеризується широким і глибоким використанням самих тонких ефектів; вона все більше взаємодіє з іншими областями науки і техніки. Однією із характерних рис сучасних досліджень є математизація фізичного пізнання, інтенсивне застосування методів математичного моделювання в різних галузях науки і техніки. Поява сучасних потужних комп'ютерних систем (КС) [1] значно підвищило інтерес до різних чисельних методів і алгоритмів, реалізація яких межує із проведенням чисельного експерименту, який відображає процес отримання результатів при чисельному моделюванні. Потреба у такому підході до розв'язку задач математичної фізики диктується все більш ускладнюючими запитами практики, а також зв'язана із спробою створення більш раціональних загальних теоретичних моделей для вивчення складних фізичних явищ.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Однією із сучасних актуальних наукових проблем в гідромеханіці є опис руху в'язкої слабостисненої рідини, яка описується рівняннями нерозривності і Нав'є-Стокса [2]. Сюди відносяться задачі руху рідини при ламінарному і турбулентному обтіканні тіл кінцевих розмірів; течії в зоні сліду і областях зриву потоку, в шарах змішування; в пограничних шарах у поверхні тіла тощо [3]. Поява сучасних потужних КС надало новий імпульс цим дослідженням, що дозволило отримати кількісні результати при розв'язку практично важливих задач про рух реальної рідини при помірних числах Рейнольдса. Нелінійність рівнянь Нав'є-Стокса і наявність малих параметрів при старших похідних в них створюють серйозні труднощі, як при аналітичному дослідженні так і при чисельному інтегруванні цих рівнянь за допомогою КС. Таким чином, проблема побудови чисельних алгоритмів для розв'язку системи рівнянь нерозривності і Нав'є-Стокса з високою точністю (особливо в багатомірному випадку) залишається на сьогодні актуальною задачею.

Метою даної роботи є створення загальної ефективної чисельної методики для розв'язку багатомірної системи рівнянь нерозривності і Нав'є-Стокса при помірних числах Рейнольдса, здатної досить точно описати локальні властивості течій.

III. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Реальний гідродинамічний процес може бути описаний системою диференціальних рівнянь в частинних похідних, яка складається із рівняння нерозривності [2, 3] і рівняння Нав'є-Стокса [4].

Для розв'язку рівняння нерозривності [5] використаємо метод кінцевих об'ємів. Представимо рівняння нерозривності невстановленого руху рідини у загальному вигляді для площини Oxy :

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{F}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{G}}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

де $\bar{q} = \bar{\rho}$ – густина рідини, $\bar{F} = \bar{\rho} \bar{u}_x$ – компонента швидкості рідини по вісі x , $\bar{G} = \bar{\rho} \bar{u}_y$ – компонента швидкості рідини по вісі y .

Застосовуючи метод підобластей [8] до рівняння (1) в середині кінцевого об'єму, що показаний на рисунку 1, отримуємо:

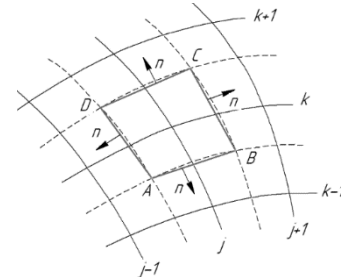


Рис. 1. Схема двомірного кінцевого об'єму

Застосовуйте центрування рівняння з використанням табуляції по центру в стилі.

$$\int_{ABCD} 1 \left(\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{F}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{G}}{\partial t} \right) dx dy = 0 \quad (2)$$

Одним із приблизних представлень рівняння (2) може бути вираз [1, 3]:

$$\frac{d}{dt} (\Lambda q_{j,k}) + \sum_{AB}^{DA} (F \Delta y - G \Delta x) = 0, \quad (3)$$

де Λ – площа чотирикутника $ABCD$, показаного на рисунку 1, причому $q_{j,k}$ є величина, яка зв'язана із середнім значенням q в середині чотирикутника.

Якщо загальна сітка є однорідною і її лінії співпадають із лініями постійних x і y , тоді рівняння (3) приймає вигляд:

$$\frac{d}{dt} q_{j,k} + \frac{F_{j,k} + F_{j+1,k}}{2 \Delta x} + \frac{G_{j,k+1} + G_{j,k-1}}{2 \Delta y} = 0, \quad (4)$$

що співпадає із апроксимацією, отриманою при представленні просторових кривих похідних в (1) за допомогою центральних різниць.

Розглянемо рівняння Нав'є-Стокса в природних змінних:

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + (\bar{V} \nabla) \bar{V} = -\nabla p + \nu \Delta \bar{V}, \quad \nabla \bar{V} = 0, \quad (5)$$

де ν – кінематична в'язкість досліджуваної рідини.

Для рішення проблеми із розрахунком поля тиску необхідно в рівняння нерозривності ввести член, який відповідає за штучну стисливість, а саме: $(\partial / \partial t)(p + V^2 / 2)$. У результаті ми отримуємо модифіковану систему рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + (\bar{V} \nabla) \bar{V} = -\nabla p + \nu \Delta \bar{V}; \\ \frac{\partial \left(p + \frac{V}{2} \right)}{\partial t} + \nabla V = 0, \end{cases} \quad (6)$$

для розв'язку якої використаємо метод розщеплення по фізичним факторам.

Введемо наступні позначення: $\nabla \times \bar{V} = \omega$, $\nabla \bar{V} = D$, $\nabla \bar{V} = \tilde{D}$. Нехай у деякий момент часу $t_n = n\tau$ (τ – крок по часу, n – число кроків) відомі поля швидкості \bar{V} і тиску p рідини. Тоді схему визначення невідомих функцій в момент часу $t_{n+1} = (n+1)\tau$ можна представити у вигляді триетапної схеми розщеплення:

Етап I:

$$\frac{\bar{V} - \bar{V}^n}{\tau} = -(\bar{V}^n \nabla) \bar{V}^n + \nu \Delta \bar{V}^n. \quad (7)$$

Етап II:

$$\Delta p = -\frac{\tilde{D}}{\tau}, \text{ так як } D^{n+1} = 0. \quad (8)$$

Етап III:

$$\frac{\bar{V} - \bar{V}^n}{\tau} = -\nabla p. \quad (9)$$

Рівняння (9) отримуємо шляхом взяття дивергенції від обох частин рівності (7) із урахуванням рівняння нерозривності (умова соленоїдності [3] $\text{div} \bar{V}^{n+1} = 0$).

Для випадку декартової системи координат і рівномірної сітки (рис. 2) двовірна різницева схема має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{V}y_{i+1/2,j} - Vy_{i+1/2,j}^n}{\tau} &= \frac{(Vy_{i,j}^n)^2 - (Vy_{i+1,j}^n)^2}{h_1} + \\ &+ \frac{(Vy_y V_x)^n_{i+1/2,j-1/2} - (Vy_y V_x)^n_{i+1/2,j+1/2}}{h_2} - \\ &- \frac{\nu}{\Delta y} \left[\left(\frac{Vx_{i+1,j+1/2}^n - Vx_{i,j+1/2}^n}{h_1} - \frac{Vy_{i+1/2,j+1}^n - Vy_{i+1/2,j}^n}{h_2} \right) - \right. \\ &\left. - \left(\frac{Vx_{i+1,j-1/2}^n - Vx_{i,j-1/2}^n}{h_1} - \frac{Vy_{i+1/2,j}^n - Vy_{i+1/2,j-1}^n}{h_2} \right) \right]; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{V}x_{i,j+1/2} - Vx_{i,j+1/2}^n}{\tau} &= \frac{(Vx_{i,j}^n)^2 - (Vx_{i,j+1}^n)^2}{h_2} + \\ &+ \frac{(Vy_y V_x)^n_{i-1/2,j+1/2} - (Vy_y V_x)^n_{i+1/2,j+1/2}}{h_1} + \\ &+ \frac{\nu}{h_1} \left[\left(\frac{Vx_{i+1,j+1/2}^n - Vx_{i,j+1/2}^n}{h_1} - \frac{Vy_{i+1/2,j+1}^n - Vy_{i+1/2,j}^n}{h_2} \right) - \right. \\ &\left. - \left(\frac{Vx_{i,j+1/2}^n - Vx_{i-1,j+1/2}^n}{h_1} - \frac{Vy_{i-1/2,j+1}^n - Vy_{i-1/2,j}^n}{h_2} \right) \right]; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \frac{p_{i+1,j} - 2p_{i,j} + p_{i-1,j}}{h_1^2} + \frac{p_{i,j+1} - 2p_{i,j} + p_{i,j-1}}{h_2^2} = \frac{D_{i,j}}{\tau}, \\ D_{i,j}^{n+1} = 0, \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} Vy_{i+1/2,j}^{n+1} = \tilde{V}y_{i+1/2,j} - \frac{\tau}{h_1} (p_{i+1,j} - p_{i,j}), \\ Vx_{i,j+1/2}^{n+1} = \tilde{V}x_{i,j+1/2} - \frac{\tau}{h_2} (p_{i,j+1} - p_{i,j}). \end{cases} \quad (13)$$

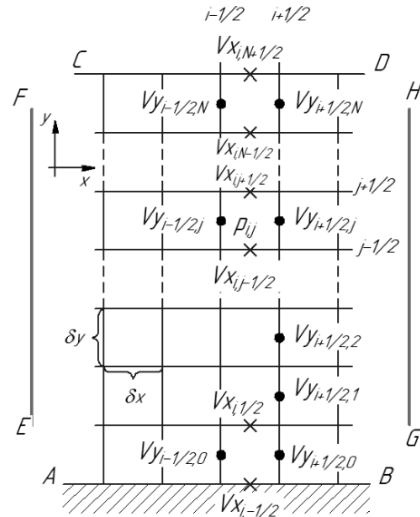


Рис. 2. Схема сіткового шаблону для метода розщеплення (двовірний випадок)

Схема (10)–(13) легко апроксимує рівняння (7)–(9) із другим порядком точності по просторовим змінним. Похибка апроксимації порядку $O(\tau, h^2)$, де $h = \max(\Delta x, \Delta y)$, де $h_1 = \Delta x$, $h_2 = \Delta y$.

Суттєвим моментом запропонованого метода є вибір граничних умов. Із-за наявності задач обтікання тіл кінцевих розмірів потоком в'язкої нестисненої рідини, можна виділити два основних типи граничних умов: умова на твердій поверхні і умова на лінії, достатньо віддаленій від обтікаючого тіла. Тобто, граничні умови на твердій поверхні (див. рис. 2):

$$\begin{cases} V_{x_{i,j-1/2}}^n = 0; & \text{(умова непротікання)} \\ V_{y_{i+1/2,j-1/2}}^n = 0, & \text{(умова прилипання)} \end{cases} \quad (14)$$

із останнього випливає:

$$\tilde{V}_{y_{i+1/2,0}} = \frac{V_{y_{i+1/2,0}}^n}{2} + \frac{V_{y_{i+1/2,1}}^n}{6} + O(h_2^3). \quad (15)$$

Стационарний розв'язок системи рівнянь (10)–(13) отримуємо в результаті повторення вказаних етапів до виконання наступного критерію встановлення:

$$\max_{i,j} |V_{y_{i+1/2,j}}^{n+k} - V_{y_{i+1/2,j}}^n| \leq \varepsilon. \quad (16)$$

За допомогою описаного методу в CFD-програмі FlowVision [6, 7], на потужностях КС Інститута кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України, були отримані розв'язки цілого ряду задач зовнішньої гідродинаміки [2, 3]. Розглянемо деякі результати розв'язку задачі для поперечного обтікання кругового циліндра радіуса $a=1$ м, вісь якого перпендикулярна вектору швидкості набігаючого потоку U_∞ на 250000 розрахункових комірках. Картини течії для різних чисел Рейнольдса ($Re=2aU_\infty/\nu$) представлені на рисунку 3.

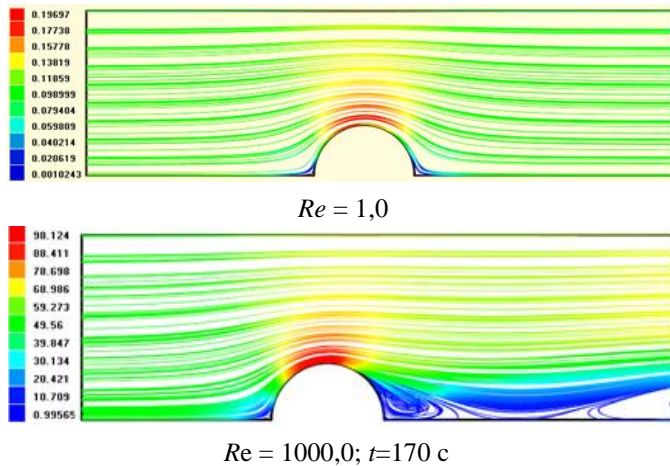


Рис. 3. Схема обтікання циліндру (лінії току) при різних числах Рейнольдса

В останньому випадку ($Re=1000,0; t=170$ с) (див. рис. 3) спостерігається нестационарна картина течії (має місце визначений ріст застійної зони і в деякий момент часу відбувається).

На рисунку 4 представлені результати розрахунку даним методом (криві 1) в порівнянні із результатами, отриманими за допомогою методу спільної блочної релаксації [4] (криві 2).

Отримані результати показали високу збіжність результатів розрахунку на кутах до 60° і на кутах біля 180° для розподілу тиску (див. рис 4, а) і вихору (див. рис 4, б) течії рідини по поверхні циліндру при $Re=50$.

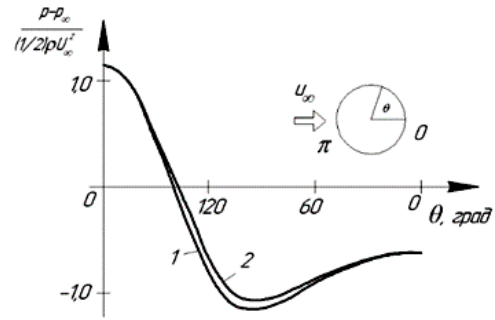


Рис. 4. Діаграма розподілу тиску по поверхні циліндру при $Re=50$: 1 – розрахунок вищевказаним методом; 2 – розрахунок методом [1]

ВИСНОВКИ

Запропонований метод чисельного моделювання гідродинамічних процесів має певні сильні сторони в порівнянні із відомими чисельними методами [1-4], де різницеві представлення виконання умови прилипання приводить, із необхідністю, до визначення граничного значення вихору на твердій поверхні тіла, наслідком чого є відсутність балансу сил на твердій поверхні.

Різницева схема даного методу дозволяє розраховувати поле течії без використання значень вихору і тиску на твердій поверхні. Результати проведених розрахунків, а також пробні розрахунки тривимірних течій, виконані із використанням даного підходу, свідчать про його ефективність.

Також даний метод дозволяє проводити по єдиному алгоритму розрахунки обтікання плоских, осесиметричних і тривимірних тіл складної конфігурації потоком в'язкої слабостисненої рідини, а також внутрішніх течій в широкому діапазоні чисел Рейнольдса.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] F. H. Harlow, J. E. "Welch Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface" in *Phys. Fluids*, 1965. vol. 8, n.12. pp. 2182 – 2189.
- [2] A. A. Amsden, F. H. Harlow, The SMAC method. Los Alamos Scientific Lab., Rept. NLA-4370. Los Alamos, 1970.
- [3] C. R. Easton, "Homogeneous boundary conditions for pressure in MAC method" in *J. Comput. Phys.* 1972. vol. 9, n. 2. pp. 375-379.
- [4] F. Menter, M. Kuntz, R. Langtry, "Ten years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model" in *Turbulence, Heat and Mass Transfer 4*, Begell House, Inc., 8 p.
- [5] R. D. Iskovych–Lototsky, Y. V. Ivanchuk, Y. P. Veselovsky, "Simulation of working processes in the pyrolysis plant for waste recycling" in *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies. Engineering technological systems*. 2016. Vol. 1, № 8 (79). pp. 11–20. doi: 10.15587/1729-4061.2016.59419.
- [6] R. D. Iskovych–Lototsky, O. V. Zelinska, Y. V. Ivanchuk, N. R. Veselovska, "Development of the evaluation model of technological parameters of shaping workpieces from powder materials" in *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies. Engineering technological systems*. 2017. Vol. 1, № 1(85). pp. 9–17. doi: 10.15587/1729-4061.2017.59418.
- [7] Rostislav D. Iskovych–Lototsky, Yaroslav V. Ivanchuk, Natalia R. Veselovska, Wojciech Surtel, Samat Sundetov. "Automatic system for modeling vibro-impact unloading bulk cargo on vehicles" in *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, 2018, 1080860 (1 October 2018). doi: 10.1117/12.2501526.

Адаптивний Метод Ідентифікації Моделей у Вигляді Інтегральних Рядів Вольтерри

Віталій Іванюк, Володимир Федорчук
кафедра інформатики
Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка
Кам'янець-Подільський, Україна
wivanyuk@gmail.com, fedvolod@gmail.com

Adaptive Method for Identification of Models in the Form of Volterra Integral Series

Vitalii Ivaniuk, Volodymyr Fedorchuk
Department of Informatics
Kamianets-Podilskyi National Ivan Ohienko University
Kamianets-Podilskyi, Ukraine
wivanyuk@gmail.com, fedvolod@gmail.com

Анотація—Стаття присвячена задачі ідентифікації моделей нелінійних динамічних систем, представлених у формі інтегральних рядів Вольтерри. Запропоновано адаптивний метод ідентифікації моделей нелінійних динамічних систем, який дозволяє отримувати моделі у вигляді рядів Вольтерри із збереженням адекватності, але кількість необхідних експериментів для побудови ядер приблизно на порядок менша у порівнянні з традиційними підходами. Запропонований метод може ефективно застосовуватись стосовно динамічних систем, які під час перехідного процесу виходять на усталений режим роботи.

Abstract—The article is devoted to the problem of identifying models the nonlinear dynamic systems, presented in the form of Volterra integral series. When applying the traditional approach of identifying Volterra kernels, the key problems are the difficulty of solving the incorrect inverse problem of constructing Volterra kernels by the known reactions of the system to test actions and conducting the whole set of necessary experiments. Since to build an adequate model, it is necessary to carry out more than k to the $n-1$ degree of experiments, where n is the number of the core of the integral series, k is the number of discretization points in time. A lot of numbers experiments in many cases makes it impossible to use the Volterra series for studying the nonlinear dynamical systems. An adaptive method for identifying models the nonlinear dynamic systems is proposed, which allows obtaining models in the form of Volterra series with preservation of adequacy, but the number of necessary experiments to build nuclei is approximately an order of magnitude smaller. The proposed method is based on the fact that the responses of a nonlinear system to time-shifted step input effects are the same, if you do not take into account their

time shift. This approach has a significant economic effect, since it allows to reduce the time and financial costs of conducting the natural experiments. The proposed method is considered on a particular case - the identification of a second-degree inhomogeneous Volterra integral operator; moreover, the results can be extended to cases for the highest degree Volterra operators. The conducted model experiments showed that the effect of reducing the number of experiments is observed for models of systems with both lumped and distributed parameters. The proposed method can be effectively applied to dynamic systems that, during the transition process, go into steady state operation.

Ключові слова—ідентифікація нелінійних динамічних систем, ряди Вольтерри, адаптивний метод ідентифікації.

Keywords—identification of nonlinear dynamical systems, Volterra series, adaptive identification method.

I. ВСТУП

Універсальним підходом до побудови математичних моделей нелінійних динамічних систем типу «чорного ящика» є представлення відгуку системи на зовнішній вплив у вигляді інтегро-степеневого ряду Вольтерри [1, 2, 3]:

$$y(t) = \sum_{m=1}^n \int_0^t \dots \int_0^t K_m(s_1, \dots, s_m) \prod_{i=1}^m x(t-s_i) ds_i, \quad t \in [0, T], \quad (1)$$

де $x(t), y(t)$ – відповідно вхідний і вихідний сигнали об'єкта, n – деяке натуральне число, T – час перехідного процесу, $K_m(s_1, \dots, s_m)$ – ядра Вольтерри, причому $K_1(s)$ визначає лінійну складову динамічної системи.

Однією із основних проблем застосування рядів Вольтерри при дослідженні нелінійних динамічних систем є їх ідентифікація. Розв'язання даної задачі шляхом застосування детермінованих сигналів приводить до необхідності розв'язання типової оберненої задачі – чисельного диференціювання експериментальних залежностей:

$$K_1(t_1) = \frac{1}{A} \frac{df(t_1)}{dt_1}, \quad K_2(t_1, t_2) = \frac{1}{2A^2} \frac{\partial^2 f_2(t_1, t_2)}{\partial t_1 \partial t_2}, \dots \quad (2)$$

де $f_1(t), f_2(t_1, t_2), \dots$ – реєстровані реакції на ступінчасті вхідні впливи відповідно до методу ідентифікації ядер Вольтерри розглянутому в [1, 4].

Основна складність при застосуванні даного підходу полягає в необхідності проведення більше k^{n-1} експериментів для знаходження n -го ядра ряду, де k – кількість точок дискретизації за часом: $k = T/h + 1$ (T – тривалість перехідного процесу, h – крок дискретизації). Для знаходження ядра лінійної частини моделі необхідно провести один експеримент, для побудови ядра другого порядку – $2k + 1$ експериментів, тривимірного ядра – $2k^2 + 4k + 1$ експериментів. Наприклад, при $k = 101$ ($T = 10, h = 0,1$), кількість експериментів для побудови двовимірного ядра буде рівною $2k + 1 = 203$, для тривимірного – $2k^2 + 4k + 1 = 20807$.

Тобто, значна кількість експериментів унеможливує в багатьох випадках застосування методу рядів Вольтерри для дослідження нелінійних динамічних систем.

II. АДАПТИВНИЙ МЕТОД

Для зменшення кількості експериментів пропонується адаптивний метод ідентифікації рядів Вольтерри шляхом ефективного планування експериментів. Суть даного методу, який базується на методі ідентифікації ядер Вольтерри при детермінованих впливах [4], розглянемо на прикладі ідентифікації однорідного інтегрального оператора Вольтерри другого степеня.

При реєстрації результатів експериментів формується квадратна матриця F . Кожен стовпець якої відповідно до розбиття за часом з кроком h , відображає результат i -го експерименту, який проводиться при вхідних впливах $x_1(t) = 1(t)$ і $x_2(t) = 1(t - T_{2,i})$, де $T_{2,i}$ ($i = \overline{1, n}$) елемент вектора $T_2 = [0 : h : T]$, який визначає величину зміщення в часі ступінчастого сигналу. Згідно алгоритму побудови ядра для однорідного регулярного оператора другого степеня в матрицю заносяться результати експериментів, які враховують тільки вплив нелінійності, без врахування

лінійних складових [1]. Це приводить до того, що матриця буде мати вигляд нижньотрикутної.

Вплив нелінійності на результат різних експериментів в межах заданої похибки є однаковий, але зміщений у часі, відповідно до зміщення ступінчастого вхідного сигналу. Тобто, результати, які подані у стовпцях, наприклад, i та j , $f_{i,i}, f_{i+1,i}, f_{i+2,i}, \dots$ та $f_{j,j}, f_{j+1,j}, f_{j+2,j}, \dots$ повинні задовольняти умову

$$\|f_i, f_j\| = \sqrt{\sum_g \left(\frac{d^2 f_{i+g,i}}{dt^2} - \frac{d^2 f_{j+g,j}}{dt^2} \right)^2} \leq \varepsilon. \quad (3)$$

Якщо стовпці i та j експериментів задовольняють (3), можна припустити, що результати експериментів від $i+1$ до $j-1$ будуть однаковими у визначеному розумінні, тобто, будуть відрізнятися один від одного в межах заданої похибки ε . Тому експерименти з $i+1$ по $j-1$ можна не проводити, а матрицю заповнити, використавши сплайн інтерполяцію окремо по кожній діагоналі матриці:

$$\begin{matrix} \boxed{f_{i,i}}, f_{i+1,i+1}, f_{i+2,i+2}, \dots, f_{j-2,j-2}, f_{j-1,j-1}, \boxed{f_{j,j}}, \\ \boxed{f_{i+1,i}}, f_{i+2,i+1}, f_{i+3,i+2}, \dots, f_{j-1,j-2}, f_{j,j-1}, \boxed{f_{j+1,j}}, \\ \dots \end{matrix}$$

Проведення експериментів починається із визначення першого ($i = 1$) та останнього ($j = n$) стовпців. Отримані результати оцінюються на основі умови (3). Якщо умова не виконується, тоді проводяться експерименти для заповнення стовпця $\left[\frac{i+j}{2} \right]$. Далі, аналогічно, розглядаються стовпці i та $\left[\frac{i+j}{2} \right]$, а також $\left[\frac{i+j}{2} \right]$ та j , тобто на основі дихотомічного підходу проводяться всі експерименти, які не задовольняють умові (3).

В результаті проведених експериментів отримується матриця із нульовими стовпцями, оскільки не всі експерименти проводились. Після цього застосовується метод сплайн інтерполяції по кожній діагоналі матриці для покриття всієї визначеної множини експериментів. На завершення, провівши подвійне диференціювання відповідно до формули (2), отримуємо двовимірне ядро оператора Вольтерри.

III. МОДЕЛЬНІ ЕКСПЕРИМЕНТИ

Ефективність наведеного підходу досліджено на модельних експериментах. Розглянемо випадок, коли нелінійна динамічна система описується неоднорідним інтегральним оператором Вольтерри другого степеня. Дана система може мати вигляд, представлений на рис. 1. На структурній схемі $A(x(t))$ – лінійна складова, $F(u(t))$ – нелінійна складова. В якості лінійної частини розглянемо різні типові ланки. Для об'єктів із зосередженими параметрами – інерційну та коливальну. Для об'єктів із

розподіленими параметрами – напівінтегральну, напівінерційну та ланку затухання (або напівзапізнення). Математичний опис нелінійної частини має вигляд: $F(u(t)) = au + bu^2$ ($a, b \in R$). При таких умовах макромодель системи матиме вигляд:

$$y(t) = \int_0^t K_1(s)x(t-s)ds + \int_0^t \int_0^t K_2(s_1, s_2)x(t-s_1)x(t-s_2)ds_1ds_2. \quad (4)$$

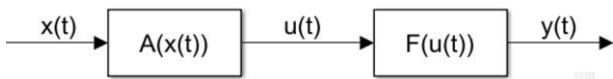


Рис. 1. Структурна схема моделі нелінійного динамічного об’єкта

В таблиці 1 наведено кількість проведених експериментів для ідентифікації двовимірного ядра Вольтерри моделі (4) традиційним та адаптивним методами, коли лінійна частина визначається різними типовими ланками. Експерименти проводились при $T = 10$, $h = 0,1$, $\varepsilon = 0,01$, $a = 1$, $b = 1$.

TABLE I. Кількість експериментів для побудови ядра однорідного інтегрального оператора Вольтерри другого степення

№ з/п	Тип ланки для лінійної складової моделі	Кількість експериментів	
		Традиційний метод	Адаптивний метод
1	Інерційна ланка $\left(\frac{1}{1+p}\right)$	203	7
2	Колівальна ланка $\left(\frac{1}{1+p+p^2}\right)$	203	7
3	Напівінерційна $\left(\frac{1}{1+\sqrt{p}}\right)$	203	7
4	Напівзапізнення $\left(e^{-\sqrt{p}}\right)$	203	7
5	Напівінтегральна $\left(\frac{1}{\sqrt{p}}\right)$	203	59

Якість отриманих моделей досліджено на основі аналізу результатів обчислювальних експериментів. Розглянемо два типові випадки: перший випадок – застосування адаптивного методу для побудови двовимірного ядра Вольтерри дозволило скоротити кількість експериментів із 203 до 7, другий – із 203 до 59 експериментів.

У першому випадку розглядаються системи, які під час перехідного процесу виходять на усталений режим роботи. На рис. 2 та рис. 4 наводяться перехідні характеристики для моделей, які отримані за допомогою традиційного та адаптивного методу, а також точне значення перехідної характеристики для моделей із колівальною та напівінерційною ланками в лінійній частині. Відносні

похибки перехідних характеристик наведено на рис. 3 та рис. 5.

У другому випадку використовується модель із напівінтегральною ланкою. На рис. 6 наведено перехідні характеристики, отримані з використанням моделей, які побудовані традиційним та адаптивним методом. На рис. 7 наведено відносні похибки для отриманих перехідних характеристик.

Отримані результати показують, що застосування традиційного та адаптивного підходів дозволяють будувати моделі однакового рівня адекватності, оскільки перехідні характеристики отримані із використанням даних моделей практично співпадають.

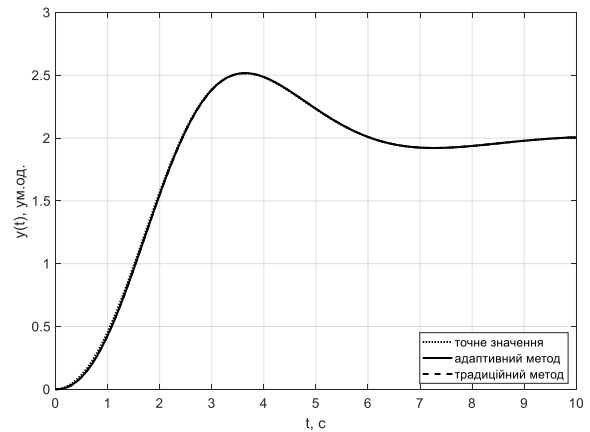


Рис. 2. Перехідні характеристики моделі із колівальною ланкою

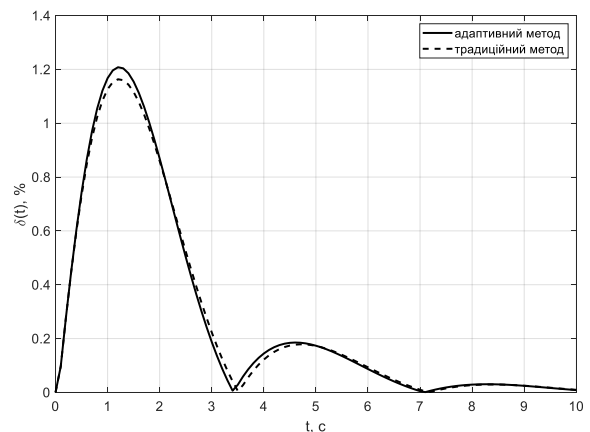


Рис. 3. Відносні похибки перехідних характеристик моделі із колівальною ланкою

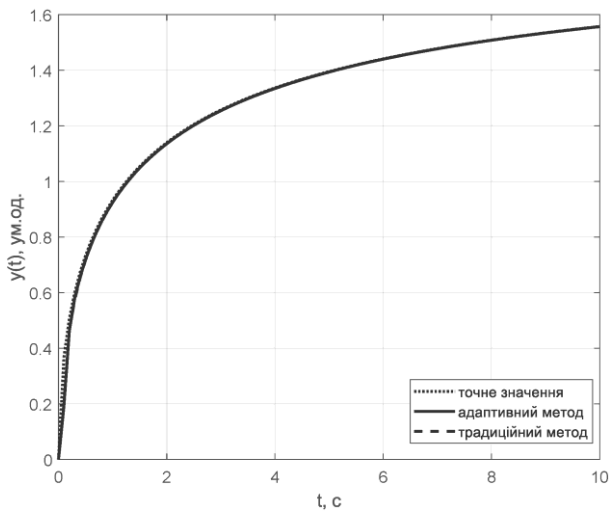


Рис. 4. Перехідні характеристики моделі із напівінтегральною ланкою

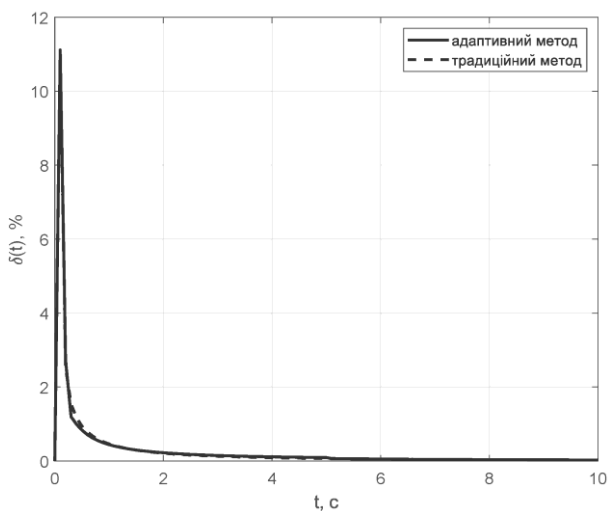


Рис. 5. Відносні похибки перехідних характеристик моделі із напівінтегральною ланкою

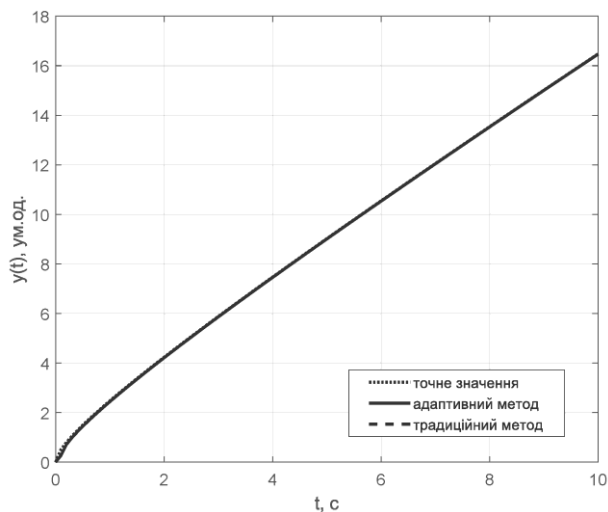


Рис. 6. Перехідні характеристики моделі із напівінтегральною ланкою

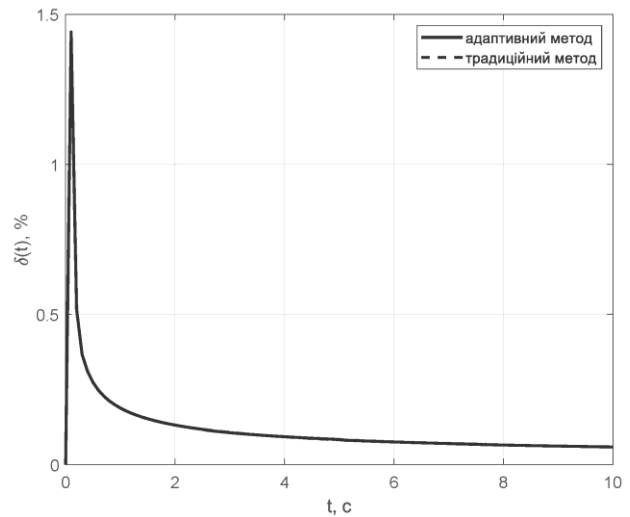


Рис. 7. Відносні похибки перехідних характеристик моделі із напівінтегральною ланкою

IV. ВИСНОВКИ

Проведенні дослідження щодо оцінки методу стосувались випадку, коли моделі мають вигляд однорідного інтегрального оператора Вольтерри другого степеня. Аналогічні міркування можна поширити і на випадки моделей з ядрами Вольтерри вищих порядків. Ефект скорочення кількості експериментів спостерігається на моделях, як із зосередженими, так і з розподіленими параметрами. Запропонований метод показав високу ефективність при ідентифікації моделей нелінійних систем, які під час перехідного процесу виходять на усталений режим роботи.

Отже, запропонований адаптивний метод ідентифікації нелінійних динамічних моделей дозволяє отримувати моделі у вигляді рядів інтегро-степеневих Вольтерри із збереженням адекватності моделі, але кількість необхідних експериментів для побудови ядер скорочується приблизно на порядок. Запропонований підхід дозволяє значно скоротити часові та фінансові затрати на проведення натурних експериментів.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] К. А. Пупков, В. И. Капалин, А. С. Ющенко, "Функциональные ряды в теории нелинейных систем". Москва : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1976. 448 с.
- [2] Д. Н. Сидоров "Методы анализа интегральных динамических моделей: теория и приложения". Иркутск. Издательство ИГУ, 2013. 293 с.
- [3] O. Nelles "Nonlinear System Identification: From Classical Approaches to Neural Networks". Springer Verlag, 2001.
- [4] В.А. Іванюк, В.В. Понеділок, В.А. Гришук, "Комп'ютерна реалізація детермінованого способу ідентифікації інтегральних моделей нелінійних динамічних об'єктів", *Математичне та комп'ютерне моделювання*. Серія: Технічні науки : зб. наук. праць. Кам'янець-Подільський : Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2014. Вип. 10. С. 59-67.

Математична Модель Фазової Динаміки Внутрішньошлуночкового Тиску з Урахуванням Основних Факторів Скорочувальної Діяльності Міокарда

Олена Кірік

Інститут прикладного системного аналізу
КПІ імені Ігоря Сікорського
Київ, Україна
okirik@ukr.net

Алла Яковлева

Інститут прикладного системного аналізу
КПІ імені Ігоря Сікорського
Київ, Україна
aliakovleva@ukr.net

Mathematical Model of the Phase Dynamics of Intraventricular Pressure, Taking into Account the Main Factors of Myocardial Contractile Activity

Olena Kirik

Institute for Applied Systems Analysis
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Kyiv, Ukraine
okirik@ukr.net

Alla Yakovleva

Institute for Applied Systems Analysis
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Kyiv, Ukraine
aliakovleva@ukr.net

Анотація—Розроблено системний підхід до математичного моделювання насосної функції серця, що забезпечує кровообіг організму людини. Аналіз моделі підтвердив можливість відображення з її допомогою фундаментальних фізіологічних властивостей серця. Модель є теоретичною основою оптимізації процесів корекції функціонального стану пацієнта.

Abstract—A systematic approach to mathematical modeling of the pumping function of the heart has been developed, which ensures the blood circulation of the human body. Analysis of the model confirmed the ability to display with it the fundamental physiological properties of the heart. The model is the theoretical basis for optimizing the patient's functional state correction processes.

Ключові слова—математичне моделювання серцевої діяльності; внутрішньошлуночковий тиск; насосна функція міокарда; системний кровообіг; нелінійна динамічна система.

Keywords—mathematical modeling of cardiac activity; intraventricular pressure; myocardial pumping function; systemic blood flow; nonlinear dynamic system.

I. ВСТУП

У зв'язку з великою розповсюдженістю та високою смертністю ішемічна хвороба серця посідає важливе місце у клінічній медицині. Одним з основних наслідків цієї хвороби є пригнічення насосної функції серця з наступним порушенням системного кровообігу.

Дослідженням скорочувальної діяльності міокарда, його насосної функції завжди займалися фахівці в галузі теоретичної та практичної кардіології, але все більшого значення в цій галузі набувають математичне моделювання та методи системного аналізу. Незважаючи на велику кількість робіт присвячених цій тематиці [1-7], цікавість до моделей, що поєднують досягнення теорії з практикою, залишається високою. Частіш за все роботи мають загальнотеоретичний характер, приклади клінічного застосування моделей поки що поодинокі.

Мета цієї роботи – дослідити, наскільки математична модель дозволяє відтворити основні інтегральні характеристики серця для оцінки функціонального стану за

даним вимірів внутрішньошлуночкового тиску та його оцінки неінвазивним методом.

II. ПОБУДОВА МОДЕЛІ

A. Опис математичної моделі та її біофізична інтерпретація

Запропонований підхід базується на представленні серцевої функції як нелінійної динамічної системи, що формалізує діяльність шлуночків серця згідно фазової структури серцевого циклу. Основні особливості запропонованої моделі:

В основу моделі покладено диференціальне рівняння зі змінною структурою та імпульсними корекціями. В моделі відображено періодичність серцевої діяльності та впливу попереднього серцевого циклу на наступний.

Індексом моделі є величина внутрішньошлуночкового тиску. Це дозволяє, надати фізичну інтерпретацію силам та факторам, які здійснюють вплив на скорочувальну діяльність, та використовувати апекс-кардіограму (реєстрація серцевого поштовху визначає механокардіограму - апекс-кардіограму), яку отримуємо неінвазивними методами в цілях діагностики. Залежність об'єм-тиск є не просто функціональною, а представлена у вигляді диференційного співвідношення, що достатньо адекватно відображає фізику процесу.

За допомогою моделі відтворено ефект Боудіча, феномен Анрепа, закон Франка-Старлінга [8,9].

Диференціальне рівняння, що описує зміну тиску p крові у лівому шлуночку є таким:

$$\ddot{x} + a_i(x - p_{0i})^2 x - b_i \dot{x} + c_i x = 0, \quad (1)$$

де $x = p - p_c$; $p: [0, \infty) \rightarrow R$;

$a_i, b_i, c_i, p_{0i}, p_c$ - певні константи, $i = 1, 2$.

Диференціальне рівняння (1), що описує зміну p , обрано з таких міркувань: по-перше, воно є одним із найбільш простих рівнянь динаміки, для розв'язання яких характерне чергування швидкого та повільного руху, по-друге, це рівняння 2-го порядку, що дозволяє в подальшому на основі другого закону Ньютона дати фізичну інтерпретацію констант цього рівняння.

Представляємо кожне з рівнянь (1) у вигляді системи двох рівнянь першого порядку:

$$\begin{cases} \dot{x} + \frac{a_i}{3}(x - p_{0i})^3 - b_i x - c_i y = 0, \\ \dot{y} = -x. \end{cases} \quad i = 1, 2. \quad (2)$$

Рівняння ізокліни $\dot{x} = 0$ для системи (2) буде мати вигляд

$$y = \frac{1}{c_i} \left[\frac{a_i}{3}(x - p_{0i})^3 - b_i x \right], \quad i = 1, 2. \quad (3)$$

Рух фазової точки $(x(t), y(t))$ згідно системи (2) при $i = 1$ або $i = 2$ описано в [10].

Наведемо фізіологічну інтерпретацію рівняння (1).

Діаметром шлуночка $l(t)$ в момент часу t будемо називати діаметр кулі мінімального розміру, що містить об'єм, який дорівнює шлуночку. Величина $l(t)$ змінюється згідно з таким законом [11]:

$$l = k_1(H - H_0)$$

де $H(t)$ – напруга в момент часу t ; k_1, H_0 – константи.

За законом Лапласа

$$p - p_c = \frac{H - H_0}{l_c},$$

де l_c – середнє значення $l(t)$ за час серцевого циклу T .

Має місце залежність $\ddot{l} = -kx$, $k = k_1 * l_c$, оскільки тиск та напруга як сили направлені в різні сторони.

Формула (3) дозволяє дати інтерпретацію співвідношенню (1).

Продиференціювавши двічі рівняння

$$l + \int_0^t (-k) \frac{a_i}{3}(x - p_{0i})^3 dr - b_i \dot{l} + c_i(l - l_c) = 0 \quad (4)$$

та підставивши у нього \ddot{l} за формулою, отримаємо рівняння (1).

Зазначимо, що

$$\frac{a_i}{3} \int_0^t \frac{a_i}{3}(x - p_{0i})^3 dt \approx -k \int_0^t a_i p_{0i}^2 x dt = a_i p_{0i}^2 \dot{l}. \quad (5)$$

Розглянемо інтерпретацію коефіцієнтів рівняння (1) a_i, b_i, c_i, p_{0i} враховуючи (4) та (5). Помножимо рівність (4) на m , де m – маса ударного об'єму крові. Це дозволить проінтерпретувати члени рівняння (5) як сили, під впливом яких відбувається скорочення та розслаблення серця. Маємо

$$ml + \int_0^t (-k) \frac{1}{3} m a_i (x - p_{0i})^3 dt - m b_i \dot{l} + m c_i (l - l_c) = 0. \quad (6)$$

Із формули (4) випливає, що другий член рівняння (5) описує силу в'язкого тертя, яка під час систоли перешкоджає проникненню крові в аорту. Ця сила є результатом дії двох факторів. Один із них пов'язаний з аортальним тиском (протитиском) та характеризується коефіцієнтом p_{0i} , а другий, що відповідає коефіцієнту a_i перешкоджає розтягненню аорти. Під час діастолі перший фактор, що характеризується коефіцієнтом p_{02} , пов'язаний з венозним тиском, що наповнює шлуночок, а другий, що

відповідає коефіцієнту a_2 , перешкоджає розтягненню серцевого м'язу. Зазначимо, що $p_{01} > 0$, $p_{02} < 0$, $a_i < 0$, $i = 1, 2$.

При сталому русі, коли система здійснює коливання, її енергія повинна залишатися незмінною. При цьому частина енергії дисипує силою тертя, тому система неперервно повинна заповнювати енергію від джерела зовнішньої сили для підтримки незатухаючих коливань. Така сила повинна бути пропорційною i [12]. Роль коефіцієнта пропорційності відіграє константа $b_i > 0$, $i = 1, 2$. Таким чином, третій член рівняння представляє собою силу, що підвищує скорочувальну діяльність міокарда та забезпечує ритмічність його роботи. Четвертий член $mc_i(l-l_c)$ рівняння (6) описує закон, аналогічний закону Гука для механічних систем, де коефіцієнт $c_i > 0$, $i = 1, 2$, та характеризує жорсткість міокарда. В фазі систоли модель інтерпретує цей закон як закон Франка-Старлінга, згідно з яким сила серцевого скорочення пропорційна довжині розтягнення серцевого м'язу.

В. Обґрунтування фізіологічності моделі

Для обґрунтування фізіологічності моделі фіксуються всі константи моделі, окрім однієї, та доводиться, що зміна нефіксованої константи, що відповідає одному із факторів, які впливають на скорочувальну активність, адекватно відображає зміни в організмі.

Для дослідження впливу константи b на скорочувальну діяльність розглянемо фазу систоли. Фіксуємо всі коефіцієнти, окрім b_i . Дослідження показують, що з ростом коефіцієнтів b_1 та b_2 зменшується тривалість серцевого циклу $T_s + T_d$, отже зростає частота серцевих скорочень.

Розглянемо тепер залежність ударного об'єму V від величини активуючих факторів. Оцінимо роботу A , витрачену на викид крові в аорту, а також рух точки $(x(t), y(t))$. Величину $y(t)$ можна інтерпретувати як швидкість зміни діаметру l . Згідно моделі максимальна по модулю швидкість зміни l дорівнює $|y_*|$, а мінімальна $-|y_a|$. Оцінивши кінетичну енергію руху, робимо висновок, що робота пропорційна $y_*^2 - y_a^2$.

Середня сила, під впливом якої змінюється l ,

$$x_c = \frac{x_* + x_s}{2}.$$

Звідси ударний об'єм приблизно можна представити у вигляді

$$V = k_V V_0, V_0 = \frac{y_*^2 - y_a^2}{x_* + x_s}, \quad (7)$$

де k_V – коефіцієнт пропорційності.

Функція $V(b_1)$ спочатку зростає, досягає певного максимуму, а потім має тенденцію до спадання.

Ці залежності показують, що запропонована модель відображає ефект Боудича, оскільки з ростом частоти серцевих скорочень зменшується $T(b_1)$, що обов'язково тягне за собою збільшення b_1 . З ростом b_1 зростає $V(b_1)$ та збільшується сила скорочення (пропорційна x_c).

При дослідженні ударного об'єму V розглядається період систоли. Оскільки той самий об'єм (при стаціонарній роботі серця) повинен надійти під час діастоли, то можна отримати певні співвідношення між коефіцієнтами, які характеризують систолу та діастолу.

Для дослідження залежності ударного об'єму V від коефіцієнту жорсткості c_i , $i = 1, 2$, розглянемо взаємозв'язок між діастолічним наповненням V та тиском p в порожнині шлуночка описується рівнянням [2]

$$p = \frac{1}{c_2}(V - U), \quad V \geq U,$$

де U – ненапружений об'єм шлуночка; c_2 – його діастолічне розтягнення. Відповідно до визначення коефіцієнта жорсткості $c = \frac{1}{c_2}$. Із формули (6) видно, що

при постійному p із зменшенням c_2 , а отже, з ростом c , зменшується об'єм крові, яка надходить в шлуночок під час діастоли. При стаціонарному режимі цей же об'єм буде витіснений під час систоли. В запропонованій моделі ця закономірність зберігається.

Відомо, що із зростанням середнього артеріального тиску після закінчення перехідних процесів для того, щоб ударний об'єм залишився незмінним, серце повинно виконувати більшу роботу [13].

Розглянемо поведінку величини $\frac{V}{T}$ при зростанні c_1 . Як і раніше, для компенсації зменшення роботи необхідно збільшити параметр b_1 . Із визначення y_a та y_* випливає, що при цьому повинна збільшуватись $|y_a|$ та $|y_*|$, а тому $\frac{V}{T}$. При цьому T буде зменшуватись. При великих T зростає об'ємна швидкість

$$W = \frac{V}{T + T' + T_D} = \frac{V}{T} \cdot \frac{T}{T + T' + T_D} \quad (8)$$

із ростом c_1 . При подальшому зростанні перший співмножник в (8) обмежений, а другий – прямує до нуля. Це свідчить про наявність певного оптимального c_1 на інтервалі нормального функціонування серця.

Зазначимо компенсаторні властивості зміни x_a та x_s . Із зміною x_a різниця $x_s - x_a$ стає більшою, що призводить до того, що випадок «пластилінового серця» настає при менших c_1 . Із збільшенням x_s при інших фіксованих параметрах ударний об'єм зростає. Випадок «кам'яного серця» буде виникати при великих c_1 .

Із формули (8) зрозуміло, що із збільшенням p_{01} зростає x_s , а отже і середній тиск. Тому феномен Анрепа можна пояснити, досліджуючи залежність V від p_{01} . Як зазначалось раніше, робота A пропорційна різниці $y_*^2 - y_a^2$. Звідси випливає, що при

$$p_{01}^s = x_s - \sqrt{\frac{b_1}{a}}, \quad A(p_{01}) = 0.$$

Точка p_{01}^s є точкою мінімуму функції $A(p_{01})$, тому на певному інтервалі

$$p_* \leq p_{01} \leq x_s - \sqrt{\frac{b_1}{a_1}} \quad (9)$$

функція $A(p_{01})$ спадає із ростом p_{01} . Зазначимо, що для будь-якого $p_{01} \in [p_*, x_s - \sqrt{\frac{b_1}{a_1}}]$ справедливі всі попередні міркування, тобто має місце явище Боудича.

Зафіксуємо певне p_{01}^0 із інтервалу (9) та нехай $A_0 = A(p_{01}^0)$. Із вибору інтервалу випливає, що при $p_{01}^1 > p_{01}^0$ робота A_1 , що відповідає цьому p_{01}^1 , буде менше A_0 . Щоб компенсувати це зменшення, треба збільшити коефіцієнт b_1 . Існує таке $\bar{p} < x_s - \sqrt{\frac{b_1}{a_1}}$, що для всіх $p_{01}^1 \in [p_{01}^0, \bar{p}]$ при певному b_1 відповідна йому робота буде дорівнювати A_0 . Але оскільки із збільшенням p_{01} та b_1 збільшується x_c , то із формули (9) видно, що V при цьому буде зменшуватись через сталість роботи.

Зазначимо, що при $p_{01}^1 > \bar{p}$ не можна за допомогою b_1 компенсувати зменшення роботи, тому ударний об'єм буде зменшуватись.

Коефіцієнти a_i , ($i=1,2$) характеризують силу типу «сила тертя», тобто силу, яка перешкоджає руху крові, отже, з її збільшенням повинні погіршуватись певні фізіологічні параметри. Покажемо це на прикладі змін об'ємної швидкості W .

Із вищесказаного випливає, що

$$\frac{V}{T} = \frac{A}{x_c T} = \frac{A}{x_c \cdot \frac{y_a - y_*}{x_c}}.$$

Як бачимо із (8), при великих T можна вважати, що W пропорційна $\frac{V}{T}$. Із залежності y_* та y_a від a_1 випливає, що $\frac{V}{T}$, а тому і W , зменшується з ростом a_1 .

ВИСНОВКИ

У запропонованій моделі динаміки внутрішньо шлуночкового тиску сконцентровано основні фактори та сили, що здійснюють вплив на скорочувальну діяльність серця. Цей підхід корелюється з роботами, які є прикладом геометричного підходу до моделювання за допомогою диференціальних рівнянь.

Застосування математичного моделювання та системного підходу в фізіології добре погоджується з основною метою фізіології як науки. В рамках цієї роботи – це визначення загальних принципів функціонування та кількісного опису насосної функції серця як теоретичної основи оптимізації функціонального стану та процесів його корекції.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] В.М. Хаютин, Физиология сердечного выброса. – К.: Наук. думка, 1970. – 230 с
- [2] Теоретические исследования физиологических систем. Математическое моделирование / Под общ. ред. Н.М. Амосова. К.: Наук. думка, 1977. – 246 с.
- [3] В.А. Лишук, Е.В. Мосткова Система закономерностей сердца // Клин. физиология кровообращения. – 2006. – № 1. – С. 16–21.
- [4] О.В. Баум, В.И. Волошин, Л.А. Попов Биологические модели электрической активности сердца // Биофизика. 2006. Т. 51, № 6. С.1069-1086.
- [5] A. Quarteroni, T. Lassila, S. Rossi, R. Ruiz-Baier. Integrated Heart—Coupling multiscale and multiphysics models for the simulation of the cardiac function. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2017;314:345–407. doi: [10.1016/j.cma.2016.05.031](https://doi.org/10.1016/j.cma.2016.05.031)
- [6] K. Cardona, J. Gómez, J. Ferrero, J. Saiz, Rajamani S, Belardinelli L, et al. Simulation study of the electrophysiological mechanisms for heart failure phenotype. In: Computing in Cardiology, 2011. IEEE; 2011. p. 461–464.
- [7] J.F. Gomez, K. Cardona, L. Martinez, J. Saiz, B. Trenor, Electrophysiological and structural remodeling in heart failure modulate arrhythmogenesis. 2D simulation study. PloS one. 2014; 9(7):e103273 doi: [10.1371/journal.pone.0103273](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0103273) [PMC free article] [PubMed]
- [8] В.Л. Картман, В.В. Парин, Сердечный выброс // физиология кровообращения, физиология сердца. – Л.: Наука, 1980. – 118 с.
- [9] Anew automatically controlled electric TAH / M. Arabia, C. Franconi, M. Guerrisi et al. // Trans. Amer. Soc. Artif. Jnt Organs. – 1980. – 26. – P. 60-65.
- [10] Д. Эрроусмит, К. Плейс, Обыкновенные дифференциальные уравнения. – М.: Мир, 1986. – 243 с.
- [11] Биомеханика сердечной мышцы / Под общ. ред. Г.Р. Иваницкого. – М.: Наука, 1981. – 325 с.
- [12] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, Механика. – М.: Наука, 1965. – 203 с.
- [13] Физиология кровообращения. Физиология сердца. Сер. «Руководство по физиологии». – Л.: Наука, 1980. – 548 с.

Програмна Реалізація Алгоритму Системи Визначення Концентрації Органічних Включень Методом Пульсуючого Меніска

Олександр Малько

Кафедра прикладної математики
Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу
Івано-Франківськ, Україна
malko.pochta@gmail.com

Анастасія Малько

Товариство з обмеженою відповідальністю «СЛОТ»
Івано-Франківськ, Україна
malko.pochta@gmail.com

Software Implementation of the System for Determining the Concentration of Organic Inclusions by the Method of Pulsating Meniscus Algorithm

Oleksandr Malko

dept. of of Mathematical Methods in Engineering
Iv.-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
Ivano-Frankivsk, Ukraine
malko.pochta@gmail.com

Anastasia Malko

Limited Liability Company «SLOT»
Ivano-Frankivsk, Ukraine
malko.pochta@gmail.com

Анотація — Наведені реалізація алгоритму функціонування системи вимірювання динамічного поверхневого натягу на предмет контролю органіки у природній і питній водах у графічному програмному середовищі LabView

Abstract — The implementation of the algorithm of functioning of the system of measuring the dynamic surface tension on the subject of control of organic matter in natural and drinking water in the graphical software environment LabView

Ключові слова — рідинний меніск, капілярна поверхня, гістерезис, пульсація, поверхневий натяг, інформаційний канал, алгоритм, система

Keywords— liquid meniscus, capillary surface, hysteresis, pulsation, surface tension, information channel, algorithm, system

I. ВСТУП

Поверхнево-активні властивості мають більшість органічних сполук (поверхнево-активні речовини - ПАВ): спирти, кислоти, аміни, гідроперекиси, кетони, ефіри, солі карбонових кислот та ін [1]. Таким чином, інформація про вміст у воді ПАВ може також служити інтегральною оцінкою ступеня її чистоти на предмет органічних включень.

Найбільш поширеними на теперішній час є методи, засновані на аналізі форми краплі або бульбашки, практично не мають обмежень за часом контролю процесу адсорбції, що дає можливість визначення концентрацій

органічних включень. Однак даний метод має ряд істотних недоліків: вплив випаровування рідини на зміну обсягу меніска бульбашки при тривалому процесі дослідження; неможливість оперативного контролю концентрації органіки; неможливість використання в автоматизованих системах контролю.

За результатами математичного моделювання процесу пульсації рідинного меніска в околиці максимального тиску в системі замкнутої щодо кількості газової фази [2] запропоновано новий метод визначення динамічного поверхневого натягу (ПН) за виміряним тиску в пульсуючому меніску. Структура системи контролю органіки у природній і питній водах, та загальний алгоритм її функціонування наведені у роботі [3].

II. ОПИС ПРОЦЕСУ ПУЛЬСАЦІЇ МЕНІСКА

Сутність методу полягає в тому, що шляхом прямого і зворотного подачі газу у газовий пухирець, реалізується процес пульсації меніска в околиці максимального тиску, значення якого однозначно визначає поверхневий натяг на кожному циклі. Ефект полягає в тому, що бульбашка при кожному циклі не зривається після проходження максимального тиску, а переходить в новий стійкий стан рівноваги, тобто процес адсорбції ПАВ здійснюється не безперервно на одну і ту ж поверхню розділу фаз.

На рис.1 наведено фрагмент залежності об'єму газового меніска V від зміни об'єму системи подачі газу ΔV з вираженим вигином і відповідна їй візуалізація положень

об'єму меніска для , що пояснює процес гістерезису. При витискуванні газу об'єм меніска зростає у напрямі 1-2. У точці 2 відбувається перехід 2-3, тобто стрибкоподібне зростання об'єму меніска. Наступна подача газу приводить до росту меніска у напрямі 3-4. Зворотній хід поршня від точки 4 відбувається по шляху 4-3-5. У точці 5 відбувається різке зменшення об'єму меніска по напрямку 5-6. При подальшому зменшенні об'єму системи (втягування газу) процес йде по шляху 6-1. При циклічному процесі витискування – втягування відбувається виражений ефект гістерезису по всіх характеристиках меніска (об'єму, тиску, площі поверхні тощо). Причому амплітуда петлі гістерезису залежить від радіуса вимірювального капіляра, початкового об'єму системи подачі і ПН досліджуваної рідини.

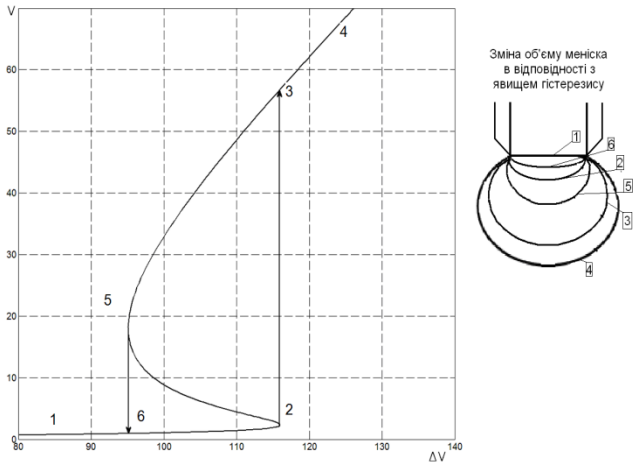


Рис. 1. Гістерезис зміни об'єму бульбашки від об'єму витискування і втягування поршнем (приріст 1-2-3-4, спад 4-3-5-6-1)

На рис. 2 представлено результати моделювання процесу пульсації меніска при рівномірному зростанні ΔV до максимально можливого значення, з наступним рівномірним падінням до нуля. Точками 1, 2, 3, 4, 5, 6 позначено відповідні положення згідно рис. 1.

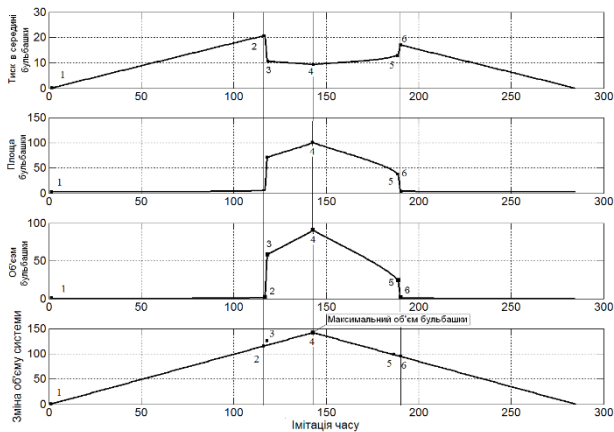


Рис. 2. Процес пульсації бульбашки при рівномірному зростанні ΔV від нуля до максимально можливого значення, з наступним рівномірним спаданням до нуля

На рис. 3 представлено результати моделювання циклічного процесу пульсації меніска, де в режимі витискування після проходження максимального тиску і

його стрибкоподібного падіння (точки 2–3) здійснюється реверс (витискування – втягування), і в режимі втягування при стрибкоподібному зростанні тиску (точки 5–6) здійснюється реверс (втягування – витискування). Точками 1, 2, 3, 5, 6 позначено відповідно положення згідно рис. 1.

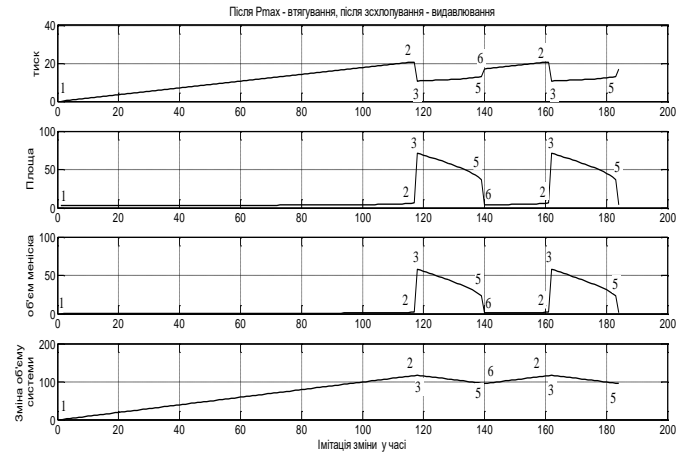


Рис. 3 Процес пульсації з реверсами в моменти стрибкоподібної зміни тиску в меніску

III. ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КАНАЛ ПЕРЕТВОРЕННЯ ДАНИХ

Для проведення аналізу перетворення інформації в процесі вимірювання доцільно виділити інформаційно-вимірювальний канал перетворення даних.

Умовно, систему автоматичного контролю (рис.4) можна розбити на дві основні підсистеми:

- підсистему автоматичного управління процесом контролю і реєстрації даних;
- підсистему перетворення і обробки даних (інформаційно-вимірювальний канал).

В інформаційному плані, для функціонування підсистеми управління необхідна текуча інформація зміни вимірювальної величини – тиску у газовій бульбашці, а для підсистеми перетворення і обробки даних інформаційні тільки значення в момент максимального тиску у газовій бульбашці.

Виходячи з структурної схеми системи [а] можна сформулювати інформаційно-вимірювальний канал перетворення даних від значень інформаційних тисків до значення поверхневого натягу (рис. 4), де:

- $P_{\text{компл}}$ – тиск гідростатичного компенсатора;
- $P_{\text{кап}}$ – тиск у вимірювальному капілярі;
- K_d – коефіцієнт перетворення давача тиску;
- $K_{\text{п}}$ – коефіцієнт перетворення АЦП;
- f_{σ} – функція залежності ПН від максимальному

тиску у газовій бульбашці.

IV. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ

Послідовність операцій алгоритму програми є наступною [5].

1) На початку функціонування програми необхідно задати основні параметри, які визначають критерії виконання керуючих функцій алгоритму. Їх значення обумовлені апріорною інформацією про область зміни динамічного ПН досліджуваного розчину ПАР. До даних параметрів слід віднести: приблизний час досягнення рівноважного ПН, радіус вимірювального капіляра, що обумовлює чутливість вимірювань, наявність шумів сигналу вимірювань і т. п. Завдання параметрів може здійснюватися: введенням з клавіатури або зчитуватися з файлу, який попередньо введено у програмний модуль. В даному випадку задаються наступні параметри:

- dP_v – значення критерію досягнення максимального тиску у бульбашці в процесі зростання її об'єму, який визначає мінімальну величину стрибкоподібного спаду тиску після проходження максимуму (перехід 2–3, рис.1);
- dP_n – значення критерію досягнення моменту стрибкоподібного спадання об'єму бульбашки в процесі зменшення її об'єму, який визначає мінімальну величину стрибкоподібного зростання тиску (перехід 5–6, рис.1);
- n – значення зсуву номерів у послідовності вимірювань ПН для визначення умови досягнення рівноважного поверхневого натягу;
- s – значення критерію досягнення рівноважного поверхневого натягу, який визначає максимальну різницю значень у послідовності вимірювань ПН з різницею номерів n .

2) Здійснюється обнулення лічильника кількості циклів вимірювання – k і значення попереднього виміру P_1 у послідовності P_1, P_2 – вимірів надлишкового тиску у рідинному меніску, з метою коректності їх подальшого порівняння.

3) Процес вимірювання починається з команди на витискування бульбашки, що реалізується поданням імпульсу логічної одиниці на відповідний цифровий вихід блоку збору даних NI USB–6009.

4) На кожному такті здійснюється вимірювання тиску у рідинному меніску P_2 , що реалізується усередненням вибірки з п'яти послідовних вимірів.

5) Результати вимірювання тиску P_2 , за бажанням користувача, відображаються на моніторі у вигляді осцилограми розгорнутої в часі.

6) Після кожного наступного вимірювання тиску P_2 здійснюється порівняння з попереднім значенням P_1 , у разі стрибкоподібного спадання тиску на величину більше ніж dP_v (досягнення максимального тиску), процес видавлювання бульбашки припиняється, у протилежному випадку, після переприсвоєння послідовності вимірів P_1, P_2 , процес витискування продовжується (перехід до п.3).4

7) При досягненні максимального тиску фіксується його значення P_{max} , проводиться переприсвоєння значень послідовності вимірів P_1, P_2 , та здійснюється операція декрементування лічильника k .

8) За отриманим значенням P_{max} здійснюється розрахунок поверхневого натягу σ побудовані для конкретного радіуса вимірювального капіляра.

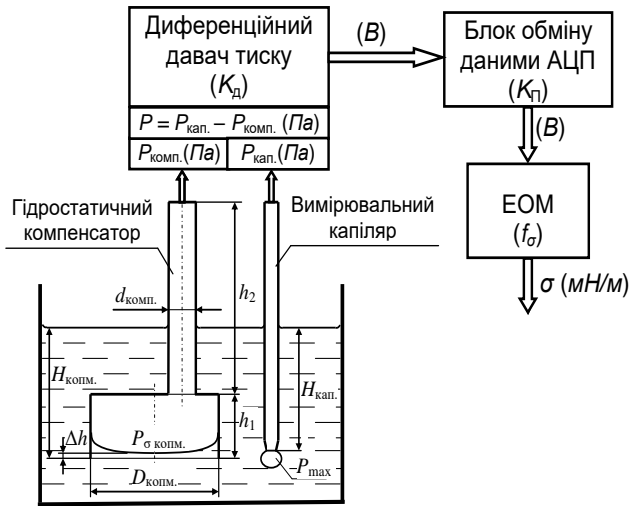


Рис. 4 Інформаційно-вимірювальний канал перетворення даних

Тиск зі сторони вимірювального капіляру формується максимальним тиском у бульбашці P_{max} і тиском обумовленим глибиною занурення торця капіляру у рідину H_{kap} , тобто: $P_{kap} = P_{max} + \Delta \rho g H_{kap}$, де $\Delta \rho$ - різниця густин рідини і газу, а g - гравітаційна стала.

Тиск з сторони гідро компенсатора формується капілярним тиском $P_{\sigma \text{ комп.}}$, обумовленим кривизною поверхні розділу фаз у компенсаторі; тиском обумовленим глибиною занурення торця компенсатора у рідину $H_{\text{комп.}}$ і тиском обумовленим підняттям рідини в компенсаторі за рахунок стиснення повітря Δh :

$$P_{\text{комп.}} = P_{\sigma \text{ комп.}} + \Delta \rho g H_{\text{комп.}} - \Delta \rho g \Delta h. \quad (1)$$

Диференційний давач тиску формує сигнал пропорційний різниці тисків в плечах $P = P_{\text{кап.}} - P_{\text{комп.}}$:

$$P = (P_{\text{max}} - P_{\sigma \text{ комп.}}) + \Delta \rho g (\Delta H_{\text{кап.}} - \Delta h). \quad (2)$$

де $\Delta H = H_{\text{кап.}} - H_{\text{комп.}}$.

Фактично результуючий тиск P формується двома чинниками:

- поверхневим натягом $P_{\sigma} = (P_{\text{max}} - P_{\sigma \text{ комп.}})$,
- гідростатичним тиском $P_h = \Delta \rho g (\Delta H_{\text{кап.}} - \Delta h)$,

звідки $P = P_{\sigma} + P_h$.

Виходячи з послідовності перетворення інформації у інформаційно-вимірювальному каналі (рис.4), де диференціальний давач тиску формує сигнал пропорційний P і враховуючи коефіцієнти перетворення інформації можна отримати функцію перетворення приладу

$$\sigma = f \left(\left(\frac{P_{\sigma}}{\Delta \rho g r} + \frac{(\Delta H_{\text{кап.}} - \Delta h)}{r} \right) K K_d K_n \right) \Delta \rho g r^2,$$

де r - радіус вимірювального капіляра, а K - коефіцієнт калібрування, який забезпечує умову $K K_d K_n = 1$, і задається в процесі калібрування.

9) Результати обчислень значення ПН σ виводяться на монітор у вигляді осцилограми розгорнутої в часі t , за бажанням користувача, записуються у файл для можливості наступної обробки.

10) Здійснюється оцінка на можливість перевірки досягнення рівноважного стану – кількість проведених послідовних вимірів ПН k повинна бути більша від n .

11) При виконанні попередньої умови п.10 здійснюється порівняння значень двох вимірів ПН σ у послідовності вимірювань ПН з різницею номерів n .

12) Якщо неможливо зробити перевірку досягнення рівноважного стану ($k < n+1$), або стан рівноважного поверхневого натягу є не досягнутий, то подається команда на втягування бульбашки, що реалізується поданням імпульсу логічної одиниці на відповідний цифровий вихід блоку збору даних NI USB-6009.

13) Аналогічно як в п.4 проводиться вимірювання тиску у бульбашці P_2 , що реалізується усередненням вибірки з п'яти послідовних вимірів.

14) Після кожного вимірювання тиску P_2 здійснюється порівняння з попереднім значенням P_1 , у разі стрибкоподібного зростання тиску на величину більше ніж dP_n (стрибкоподібне зменшення об'єму бульбашки) процес втягування бульбашки припиняється, і проводиться перехід до режиму витискування (перехід до п.3).

15) У протилежному випадку, після переприсвоєння послідовності вимірювань P_1 , P_2 процес втягування продовжується (перехід до п.12).

16) Якщо модуль різниці цих вимірювань є меншим значення критерію досягнення рівноважного поверхневого натягу s , то вважається, що досягнуто стан рівноважного поверхневого натягу.

17) За отриманою динамічною характеристикою $\sigma(t)$ розраховується концентрація ПАР.

18) Процес вимірювання закінчено.

Для полегшення роботи оператора з приладом і програмою було розроблено зручний інтерфейс (рис.5). На екран монітора інформація виводиться графічно, у вигляді сигналу значення поверхневого натягу в часі, а керування роботою вимірювальної установки здійснюється за допомогою віртуальних клавіш. Розроблена програма може працювати у двох режимах: «ручному» і «автоматичному».

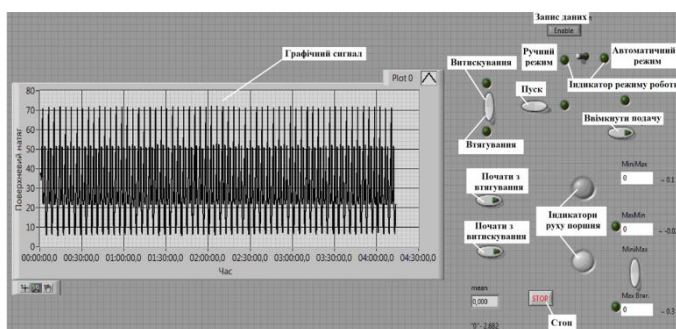


Рис. 5 Інтерфейс програми керування процесом вимірювання і обробки даних

Віртуальна складова приладу виконана за допомогою графічного програмного забезпечення [4], то замість коду в ньому використовується візуальні складові. Графічні зображення тексту програми показано на рис. 6.

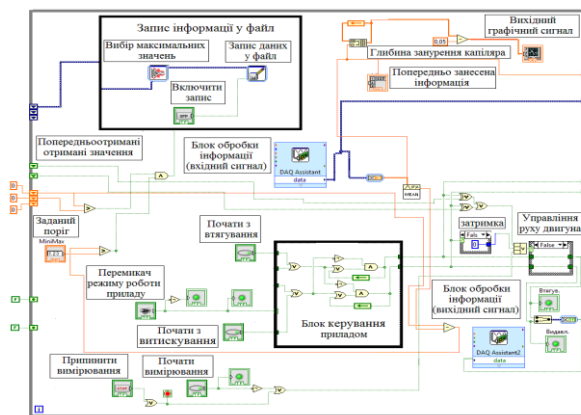


Рис. 6 Графічне відображення програми при автоматичному режимі

ВИСНОВКИ

На основі визначеного алгоритму функціонування системи вимірювання динамічного поверхневого натягу на предмет контролю органіки у природній і питній водах розроблена і апробована графічна програма у середовищі LabVIEW. Апробація програми проведена на реальній системі за допомогою багатofункціонального пристрою введення-виведення USB 6009

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] В. Б. Файнерман, В. Я. Уманський, Б. С. Горелік, Д. О. Ластков, О. Г. Козаков, О контроле содержания органических соединений в питьевой и природной воде методом межфазной тензиометрии. - Вестн. гиг. епид. – 2006. – Т. 10, № 1. – С. 181 - 185.
- [2] О. Г. Малько, А. О. Малько, Математичне моделювання процесу пульсації рідинного мениска в околі максимального тиску: 6-та Міжнародна науково-практична конференція ІТКІ - 15, Прикарпатський національний університет, Івано-Франківськ, 2015. – С. 214 – 216.
- [3] О. Г. Малько, А. О. Малько, Система оперативного контролю органіки у природній і питній водах. : 8-ма Міжнародна науково-практична конференція ІТКІ - 17, Прикарпатський національний університет, Івано-Франківськ, 2015. – С. 426-429.
- [4] Магда Ю. С. LabVIEW: практический курс для инженеров и разработчиков. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 208 с.
- [5] Покращення Математичних Моделей Застосуванням Принципу Редукції

Покращення Математичних Моделей Застосування Принципу Редукції

Матвійчук Я.М.

Національний університет «Львівська політехніка»

Львів, Україна

matv@ua.fm

Improvement of Mathematical Models by Applying the Reduction Principle

Yaroslav Matviychuk

National University "Lviv Polytechnic"

Lviv, Ukraine

matv@ua.fm

Анотація—Викладено принцип редукції структури математичної моделі за результатами ідентифікацій. Показано приклади редукції моделі у вигляді нейронної мережі та моделей у вигляді систем диференціальних рівнянь.

Abstract—The identification of the mathematical model is reversed problem, and therefore incorrect. Often the cause of incorrectness is unnecessary model's elements and parameters for known identification problem.

Reduction principle of the mathematical models is proposed. The principle is to identify and remove within the model the parameters (elements) with maximal relative deviations caused by small perturbations. The result is the correct identification problem.

An example for neural network model of economical system is demonstrated. Among the 276 parameters of neural network 35% is removed according to the reduction principle. The consistent deletion of the 'excess' elements of the mathematical model improves the accuracy and stability of the identification problem. The reduction of the network reduce error of approximation on 16 times.

Mathematical models in the form of ordinary differential equations through reduction can reproduce complex experimental dependencies and serve as a tool for studying and predicting the behavior of real systems. Modelling examples of the currency exchange rate and the impact of the Sun on the terrestrial seismic is confirmed.

Ключові слова—математична модель, редукція, ідентифікація, некоректність, нейронна мережа, системи звичайних диференціальних рівнянь.

Keywords—mathematical model, reduction, neural network, incorrectness, ODE.

I. ВСТУП

Математичне моделювання є базовим у людському пізнанні. Покращення якості математичного моделювання сприяє адекватному зображенню та вивченню навколишнього світу.

Ідентифікація математичних моделей є оберненою некоректною задачею [1]. Часто причиною некоректності є надлишковість моделі, тобто наявність елементів моделі, непотрібних для даної задачі ідентифікації.

Пропонується принцип, за яким можна виявляти та видаляти зайві елементи моделі, або нарощувати модель лише необхідними елементами. Якість моделей при цьому покращується.

II. ПРИНЦИП РЕДУКЦІЇ

Допустимо, що для модельованого об'єкта апіорі відома точна математична модель з вектором параметрів $p = (p_1, \dots, p_n)$. Параметри моделі обчислює деяка процедура параметричної ідентифікації. Нехай нульове значення параметра означає відсутність елемента. Нехай також розв'язок задачі ідентифікації вектор p неперервно залежить від умов задачі в деякому околі цих умов.

Ускладнимо математичну модель, що означає появу надлишкових параметрів у векторі $p = (p_1, \dots, p_n, p_{n+1}, \dots, p_m)$. Тоді для "зайвих" параметрів p_{n+1}, \dots, p_m процедура ідентифікації обчислить майже нульові значення (в межах точності обрахунків):

$$p_i \approx 0; \quad i = n + 1, \dots, m. \quad (1)$$

Але тільки за ознакою (1) не можна визначити і видалити "зайві" параметри, бо серед значень "незайвих" параметрів

p_1, \dots, p_n можуть бути близькі до машинного нуля, але безумовно суттєві.

Введемо до умов задачі ідентифікації невеликі збурення $disturb$ в межах вказаного вище околу неперервності розв'язку. Вектор параметрів p' , обчислений процедурою ідентифікації для збуреної задачі, відрізняється від вектора p незбуреної задачі. Для кожного параметра обчислимо модулі відносних відхилень за формулою

$$\delta_i = abs((p'_i - p_i) / p_i); \quad i = 1, \dots, m. \quad (2)$$

Для "незайвих" параметрів внаслідок неперервної залежності параметрів від збурень відхилення ($p'_i - p_i$) прямує до нуля, якщо збурення прямує до нуля. Відповідна ситуація є для відносних відхилень:

$$\delta_i \rightarrow 0; \quad i = 1, \dots, n, \quad \text{if } disturb \rightarrow 0. \quad (3)$$

Навпаки, для "зайвих" параметрів внаслідок (1) відносні відхилення (2) прямує до одиниці для ненульових збурень в межах околу неперервності:

$$\delta_i \rightarrow 1; \quad i = n + 1, \dots, m, \quad \text{if } disturb \neq 0. \quad (4)$$

Критерії (3) і (4) отримані для точної моделі. Поширимо їх на довільні математичні моделі.

В загальному випадку "зайві" параметри виявляють себе значно більшими відносними відхиленнями (2) порівняно з "незайвими" параметрами. Послідовне видалення відповідних "зайвих" елементів математичної моделі регуляризує задачу ідентифікації, тобто покращує її точність та стійкість. Численні приклади підтверджують цей висновок [2].

Замість видалення зайвих елементів моделі (редукції) можна нарощувати модель, але кожний новий елемент перевіряти за критеріями (3) і (4) (індукція).

Розглянемо приклади застосування принципу редукції.

III. ТЕСТОВА РЕКОНСТРУКЦІЯ АТРАКТОРА ЛОРЕНЦА

Класичні рівняння атрактора Лоренца (5) є зручні для тестової перевірки принципу редукції, тому що допускають аналітичне перетворення в еквівалентну форму (6), зручну для нашої ідентифікації [2].

$$\begin{aligned} x'_1 &= 10x_2 - 10x_1; \\ x'_2 &= 40x_1 - x_2 - x_1x_3; \\ x'_3 &= -8/3 \cdot x_3 + x_1x_2. \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} y'_1 &= y_2; \\ y'_2 &= y_3; \end{aligned} \quad (6)$$

$$y'_3 = 1040y_1 - \frac{88}{3}y_2 - \frac{41}{3}y_3 + 11\frac{y_2^2}{y_1} + \frac{y_2y_3}{y_1} - y_1^2y_2 - 10y_1^3;$$

де $y_1 = x_1$.

Отже, маючи дискретний сигнал y_1 , треба обчислити три похідні цього сигналу і розв'язати ідентифікаційну задачу (7).

$$\min_{\bar{a}, \bar{b}} \sum_{m=1}^M \left(y'_{3m} - \sum_{i,j,k=0}^4 a_{ijk} y_{1m}^i y_{2m}^j y_{3m}^k - \sum_{i,j,k=0}^4 b_{ijk} y_{1m}^i y_{2m}^j y_{3m}^k y_{1m}^{-1} \right)^2. \quad (7)$$

Очевидно, з усіх 50 поліноміальних коефіцієнтів задачі (7) для точної моделі (6) потрібні лише 7 коефіцієнтів. Решта коефіцієнтів є зайвими.

Оскільки значення коефіцієнтів точної моделі відомі, зручно перевірити застосування принципу редукції.

Дискретний сигнал $y_1=x_1$ обчислено чисельним інтегруванням рівнянь (5) за методом Рунге-Кутта з кроком 0.02 сек. від 0 сек. до 34 сек. На отриманій множині точок збудований інтерполяційний сплайн п'ятого степеня та аналітично обробовані його три похідні. Числові значення сплайна та його похідних утворили масиви даних $y_{1m}, y_{2m}, y_{3m}, y'_{3m}, (m=1, \dots, 1701)$, для задачі ідентифікації (7).

Далі була застосована поелементна редукція масивів коефіцієнтів a_{ijk}, b_{ijk} , згідно принципу редукції. До значень y'_{3m} додавались збурення відносною величиною 10^{-5} , обчислювались відносні відхилення δ_i згідно (2) та послідовно видалялись елементи з найбільшим δ_i .

Критерій завершення редукції – утворення компактної множини залишкових відносних відхилень. Ознака компактної множини така: кількість елементів з відносними відхиленнями, що більші та менші середнього значення залишкової області, повинна співпасти.

В процесі редукції обчислювались величина області відносних відхилень $\max(\delta_i) - \min(\delta_i)$, а також середня відносна похибка обчислення коефіцієнтів моделі (6).

Після 43 кроків редукції залишились 7 коефіцієнтів точної моделі з середньою відносною похибкою відтворення 0.0016. На рис. 1 показано зміну відносної похибки відтворення із зростанням номеру кроку редукції.

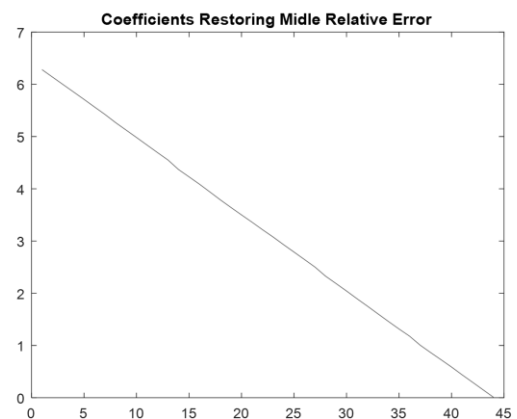


Рис. 1. Зміна відносної похибки відтворення коефіцієнтів моделі (6) в процесі редукції

Залежність розмірів області відносних відхилень від кроку редукції показано на рис. 2. Той же графік у

збільшеному масштабі – на рис. 3. Добре видно процес формування компактної області.

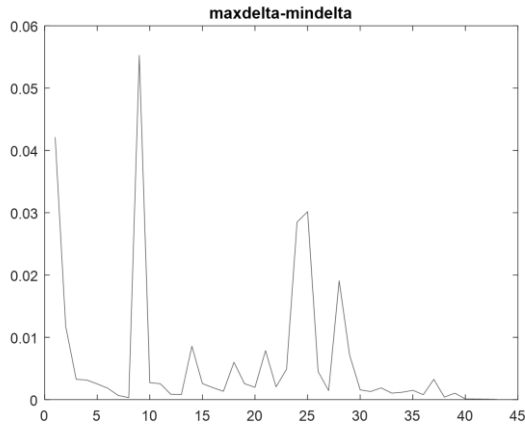


Рис. 2. Зміна розміру області відносних відхилень в процесі редукції

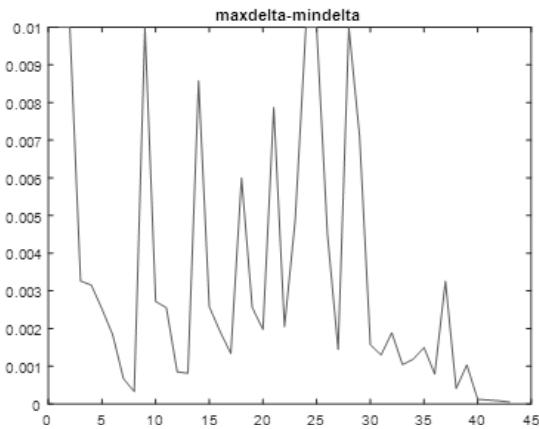


Рис. 3. Графік на рис. 2 у збільшеному масштабі

На моделі Лоренца була також перевірена процедура нарощування (індукції) моделі.

Для цього обчислено відносні відхилення (2) для всіх 50 коефіцієнтів. Далі, починаючи з трьох коефіцієнтів з найменшими відносними відхиленнями, послідовно вводились до моделі коефіцієнти з найменшими відносними відхиленнями серед решти коефіцієнтів. Критерієм припинення індукції є утворення компактної області відносних відхилень через 4 кроки.

IV. РЕДУКЦІЯ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

Принцип редукції вже багато років застосовується для регуляризації математичних моделей у вигляді систем звичайних диференціальних рівнянь [2]. Розглянемо приклад застосування редукції нейронної мережі, яка апроксимує економічну систему доходностей акцій, облігацій та відсоткової ставки за депозитами на основі часових рядів макроекономічних показників та показників фондового ринку [3].

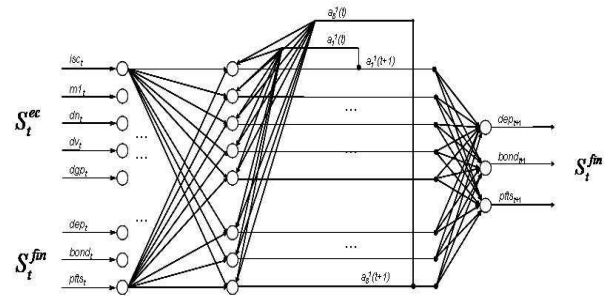
На вхід мережі подаються 8 економічних показників: індекс споживчих цін; грошова маса; доходи населення;

державні видатки; внутрішній валовий продукт; середньозважена ставка за депозитами; індекс облігацій kpbonds; індекс першої фондової торгівельної системи.

Вихідними даними є доходності середньозваженої ставки депозитів, індексу облігацій, індексу першої фондової торгівельної системи.

За цими даними методом back propagation навчається тришарова нейронна мережа з 12 нейронами у прихованому шарі. Функція активації – сигмоїд з $\alpha=0.5$. Змінними параметрами є 276 передач між нейронами. Критерій апроксимації – середньоквадратичне значення похибки відтворення вихідних даних.

Структура мережі показана на рис.4.



$$\mathbf{a}^1(t+1) = f(\mathbf{IW} \cdot (\mathbf{S}_t^{ec}, \mathbf{S}_t^{fn}) + \mathbf{DW} \cdot \mathbf{a}^1(t) + \mathbf{b}^1) \quad t = \overline{0, T-1}, \quad \mathbf{a}^1(0) = 0.$$

$$\mathbf{S}_{t+1}^{fn} = g(\mathbf{LW} \cdot \mathbf{a}^1(t+1) + \mathbf{b}^2),$$

Ітераційна редукція мережі полягає у почерговому видаленні зв'язків з найбільшими відносними похибками δ_i згідно з наведеним вище принципом. Графік залежності середньоквадратичної похибки апроксимації вихідної змінної від номеру ітерації показано на рис.5.

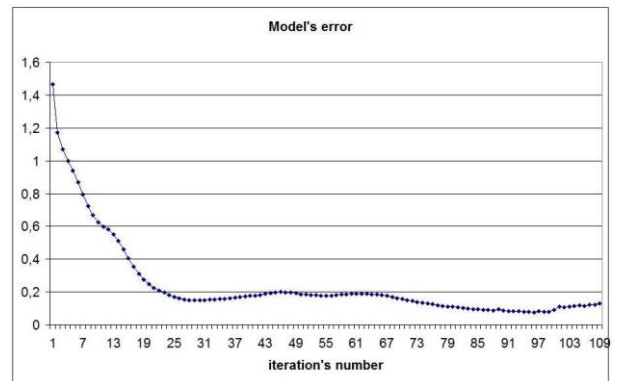


Рис.5. Зменшення похибки апроксимації з редукцією нейронної мережі

Найменше значення похибки 0.09 на ітерації 99 (видалено 35% зв'язків). Редукція мережі зменшила похибку у 16 раз.

На рис.6 і рис.7 показано зміни діапазону значень відносних похибок δ_i від номеру ітерації. Відносні похибки в редукованій мережі зібрані в компактну групу.

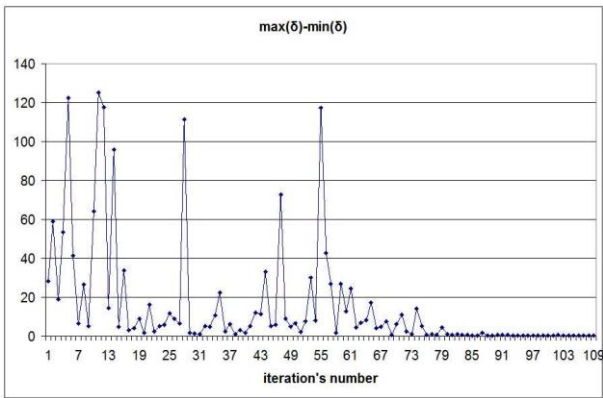


Рис.6. Зменшення діапазону відносних похибок з редукцією нейронної мережі

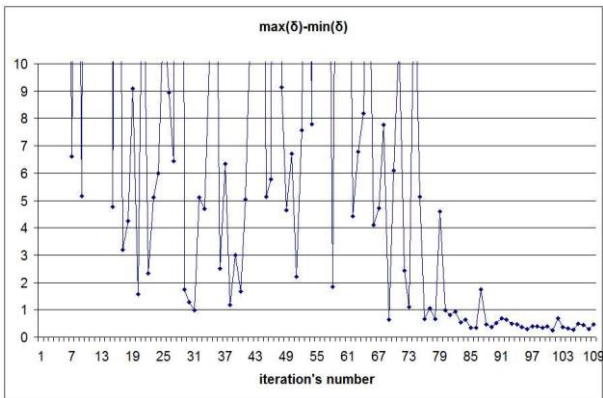


Рис.7. Графік рис.6 у збільшеному масштабі

V. МОДЕЛЬ КУРСУ ВАЛЮТ

Об'єктом моделювання є соціально-економічна система з одним вихідним параметром – курсом валюти [4].

Відомо, що як завгодно складну систему можна описати за будь-якою змінною стану. Треба лише скласти адекватну математичну модель. Нехай такою змінною стану буде курс гривні відносно долара на протязі 1998 року.

Щоденні значення курсу розглядаються як послідовність значень деякої величини, яку генерує система з невідомою внутрішньою будовою. Якщо вдасться повторити з достатньою точністю послідовність цих експериментальних значень з допомогою математичної моделі, тоді така модель матиме прогностичну цінність.

Отже, курс валюти задано дискретною послідовністю:

$$y(k), \quad k = \overline{1, K}, \quad (9)$$

де $y(k)$ – значення курсу в k -тий день, K – кількість днів.

Послідовність (9) використаємо для побудови математичної моделі третього порядку з нелінійною поліноміальною функцією

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= y_2; \\ \dot{y}_2 &= y_3; \\ \dot{y}_3 &= \sum_{i_1, i_2, i_3=0}^3 c_{i_1 i_2 i_3} y_1^{i_1} y_2^{i_2} y_3^{i_3}; \end{aligned} \quad (10)$$

де $y_1 = y$.

Ідентифікація моделі (10) зводиться до обчислення 3-х похідних дискретно заданого процесу (9) і розв'язку задачі мінімізації відносно вектора коефіцієнтів c :

$$\min_c \left(\sum_{k=1}^K (\dot{y}_3(k) - \sum_{i_1, i_2, i_3=0}^3 c_{i_1 i_2 i_3} y_1^{i_1}(k) y_2^{i_2}(k) y_3^{i_3}(k))^2 \right). \quad (11)$$

Похідні надійно обчислено ковзним інтерполюючим поліномом п'ятого степеня, а задача (11) є лінійною відносно вектора c . Однак прямий розв'язок задачі (11) для послідовності (9) не дає бажаного результату внаслідок суттєвої некоректності. Тому замість задачі (11) розв'язувалась регуляризована за Тіхоновим задача

$$\min_c \left(\sum_{k=1}^K (\dot{y}_3(k) - \sum_{i_1, i_2, i_3=0}^3 c_{i_1 i_2 i_3} y_1^{i_1}(k) y_2^{i_2}(k) y_3^{i_3}(k))^2 + \alpha \sum_{i_1, i_2, i_3=0}^3 c_{i_1 i_2 i_3}^2 \right),$$

де параметр α підбирався емпірично.

Але тільки регуляризації за Тіхоновим виявилось недостатньо. Лише редукція вектора коефіцієнтів та ретельний підбір параметра α дозволили отримати достатню точність відтворення курсу гривні. Найкращі результати отримано редукцією полінома з 20 до 7 елементів.

На рис. 8 показано світлішим кольором залежність курсу гривні до долара США за 70 днів 1998 року в околі дефолту. Темнішим кольором зображено розв'язок моделі (10) і його продовження ще на 30 днів. В нижній частині показано зміну абсолютної похибки відтворення.

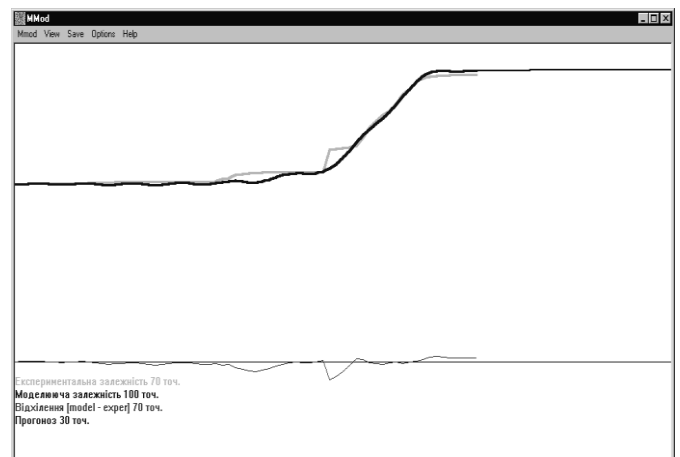


Рис. 8. Моделювання впливу Сонця на сейсміку Землі

Одна з актуальних задач гео-геологічних взаємодій – це моделювання впливу Сонця на сейсміку Землі та інтенсивність приповерхневого інфразвуку [5].

Отже, треба збудувати динамічну модель, що пов'яже інтенсивність сонячного вітру $s(k)$ на протязі k -го дня, усереднену добову земну сейсмічну активність $g(k)$ та усереднену добову інтенсивність приповерхневого інфразвуку $z(k)$, зареєстровані на протязі m днів:

$$s(k); g(k); z(k); k=1, \dots, m \quad (12)$$

Очевидно, змінна $s(k)$ буде вхідним сигналом моделі, а змінні $g(k)$ і $z(k)$ – її вихідними сигналами, причому $z(k)$ залежить від $g(k)$.

Модель обрано у вигляді системи звичайних диференціальних рівнянь (13), де аргументи багатовимірних степеневих поліномів $P_s(\cdot)$, $P_g(\cdot)$ і $P_z(\cdot)$ підібрані з апріорних міркувань.

$$\begin{aligned} \dot{s}_i &= s_{i+1}; (i = \overline{0,4}); \\ \dot{s}_5 &= P_s(s_0, s_1, s_2, s_3, s_4, s_5); \\ \dot{g}_i &= g_{i+1}; (i = \overline{0,4}); \\ \dot{g}_5 &= P_g(s_4, s_5, g_0, g_1, g_2, g_3, g_4, g_5); \\ \dot{z}_i &= z_{i+1}; (i = \overline{0,4}); \\ \dot{z}_5 &= P_z(s_4, s_5, g_4, g_5, z_0, z_1, z_2, z_3, z_4, z_5); \end{aligned} \quad (13)$$

Загальний порядок моделі – 18. Ідентифікація коефіцієнтів поліномів полягає у розв'язанні трьох задач, аналогічних (11), із застосуванням регуляризації за Тихоновим і редукції поліномів:

$$\begin{cases} \min_{c_s} \left(\sum_{k=1}^m [\dot{s}_5(k) - P_s(s_0(k), \dots, s_5(k))]^2 \right); \\ \min_{c_g} \left(\sum_{k=1}^m [\dot{g}_5(k) - P_g(s_4(k), s_5(k), g_0(k), \dots, g_5(k))]^2 \right); \\ \min_{c_z} \left(\sum_{k=1}^m [\dot{z}_5(k) - P_z(s_4(k), s_5(k), g_4(k), g_5(k), z_0(k), \dots, z_5(k))]^2 \right), \end{cases}$$

де: c_s, c_g, c_z – коефіцієнти багатовимірних степеневих поліномів $P_s(\cdot), P_g(\cdot), P_z(\cdot)$.

Графіки розв'язків $s_0(t), g_0(t), z_0(t)$ моделі (13), ідентифікованої за експериментальними вимірюваннями $s(k), g(k), z(k)$ за 1999 рік, зображено на рис. 9.

Отримана модель має високу точність відтворення експериментальних величин. Так, відносна середньоквадратична похибка наближення $s(k)$ моделі (13), побудованої для 119 - 197 днів 1999 року, становить $2.11 \cdot 10^{-4}$. Це дає практичний інструмент прогнозування активності модельованих гео-геліогенних величин.

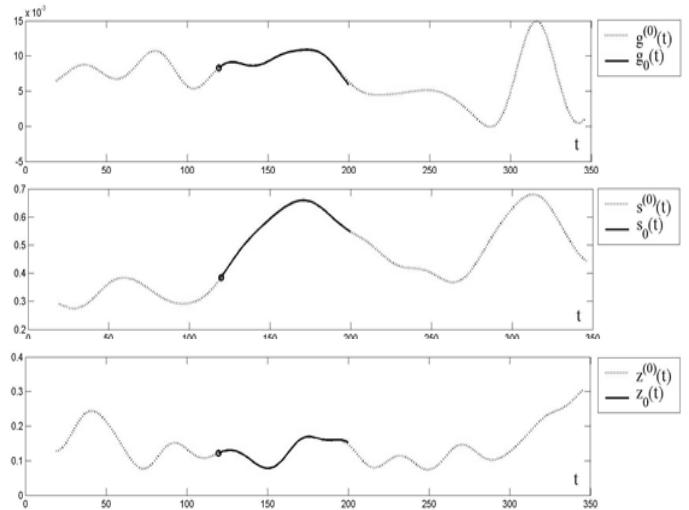


Рис. 9. Часові залежності сонячної активності, сейсміки та інфразвуку. Експериментальні залежності зображено світлішими лініями, а розв'язки моделі (13) – темнішими.

VII. ВИСНОВКИ

Викладений принцип редукції математичних моделей є загальним, простим і новим.

Застосування для нейронної мережі є простішим інших методів редукції нейронних мереж [3,6,7] і не залежить від методу навчання мережі. Наведений приклад демонструє ефективні регуляризуючі властивості принципу редукції для математичних моделей у вигляді нейронних мереж.

Математичні моделі у вигляді звичайних диференціальних рівнянь завдяки редукції можуть відтворювати складні експериментальні залежності і слугувати інструментом вивчення і прогнозування поведінки реальних систем.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] A.N. Tikhonov and V.Y. Arsenin, Solutions of Ill-Posed Problems, New York, USA: Wiley, 1977.
- [2] Я.М. Матвійчук. Математичне макромодельовання динамічних систем: теорія та практика. / Видавн. центр ЛНУ ім.І.Франка, 2000. – 215с. <http://ena.lp.edu.ua:8080/handle/ntb/22710>
- [3] Y. Matviychuk, O. Karchevska, Increasing the Correctness of Mathematical Models by Novel Reduction Principle, Proceeding of the 16th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering, Lviv, Ukraine, September 2-5, 2015. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7333351/>
- [4] Я. Матвійчук, В. Паучок, Прогнозування курсу валют методом макромодельовання. // Банківська справа, № 5-6, 2004. С.73-78.
- [5] Я.М. Матвійчук, В.К. Паучок, Макромоделі гео-геліогенних величин, ідентифіковані за експериментальними даними // *Модельовання-2008*. Сб. трудов конф. Киев, 14-16 мая 2008. – Т.1. – С. 114-118.
- [6] A. Gorban, Neural Network Training, USSR-USA: «Параграф», 1990. (Russian)
- [7] Yann LeCun, J. S. Denker, S. Solla, R. E. Howard and L. D. Jackel, Optimal Brain Damage, Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS 1989), 2. Morgan Kaufman, Denver, CO, 1990.

Математичне Моделювання Процесів Міграції Домішкової Речовини в Двофазних Армованих Тілах Випадкової Структури

Сергій Ментинський

Кафедра обчислювальної математики і програмування
Інститут прикладної математики
та фундаментальних наук

Національний університет “Львівська політехніка”
відділ математичного моделювання нерівноважних процесів
Центр математичного моделювання

Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України
Львів, Україна

Serhii.M.Mentynskiy@lpnu.ua

Mathematical Modelling the Processes of Admixture Migration in Two-Phase Reinforced Bodies of Random Structure

Serhii Mentynskiy

Department of Computational Mathematics and Programming
Institute of Applied Mathematics and Fundamental Sciences
Lviv Polytechnic National University

Department of mathematical modeling of nonequilibrium processes

Centre of Mathematical Modelling of Y. S. Pidstryhach Institute of Applied Problems of Mechanics and Mathematics of the
National Academy of Sciences of Ukraine

Lviv, Ukraine

Serhii.M.Mentynskiy@lpnu.ua

Анотація—У роботі досліджено процес масоперенесення домішки у двофазному напівпросторі з волокнистими включеннями однакового діаметру. Сформульовано контактну-крайову задачу дифузії за рівномірного розподілу волокон в тілі. Отримано інтегро-диференціальне рівняння для знаходження випадкового поля концентрації домішкової речовини, розв’язок якого отриманий ітеруванням у вигляді інтегрального ряду Неймана. Після усереднення за ансамблем конфігурацій фаз одержано розрахункову формулу для знаходження усередненої концентрації домішки в армованому півпросторі.

Abstract—In the work the process of admixture mass transfer is investigated in a two-phase semispace with fibrous inclusions of the same diameter. The initial-boundary value problem of diffusion under uniform distribution of fibres in the body is formulated. An integro-differential equation for finding the random field of admixture concentration is obtained and by the

iteration method its solution is built in the form of Neumann series. After the procedure of averaging over the ensemble of phases configurations the calculating formula is obtained for finding the averaged admixture concentration in the reinforced semispace.

Ключові слова—дифузія; контактну-крайова задача; армоване тіло з волокнистими включеннями; випадкове поле концентрації домішки; усереднення за ансамблем конфігурації фаз

Keywords—diffusion; initial-boundary value problem; reinforced body with fibrous inclusions; random field of admixture concentration; averaging over the ensemble of phases

I. ВСТУП

У виробництві сучасних вузлів і агрегатів різноманітних технічних пристроїв широко використовуються армовані матеріали двох типів: тонкі пластини, які навантажуються і

армовані у своїй площині, а також подовжені тіла, армовані вздовж подовжуючого напрямку нерозтяжними волокнами, які навантажуються в площинах, перпендикулярних до осі видовження [1]. Наприклад, у виробництві ракетних твердопаливних двигунів використовуються армовані пластмаси, які можна розділити на дві групи – армовані пластмаси на основі скла та кремнеземних волокон (рис. 1) та на основі вуглеграфітових тканин [2]. В умовах зовнішніх впливів поведінка таких матеріалів має низку специфічних особливостей, тому експлуатація таких агрегатів вимагає прогнозування властивостей матеріалу, пов'язаних з розподілами температурних та дифузійних полів за різних умов внутрішнього міжфазного контакту, зовнішніх впливів та можливих просторових реалізацій структури. Таке прогнозування є складним з огляду на багатофазну структуру згаданих матеріалів, для яких, зазвичай, є невідомими дані про конкретне просторове розташування окремих фаз, і найчастіше реалізується за рахунок достатньої інформації про їх дольовий вміст та основні фізичні властивості.

Поряд з методами гомогенізації неоднорідної структури тіла [3], які, наприклад, використовують як малий параметр відношення розмірів неоднорідностей до відстані істотної зміни досліджуваних полів, в останні роки були розвинуті підходи, що спираються на апарат теорії узагальнених функцій та усереднення за ансамблем допустимих просторових реалізацій розташування фаз [4]. В даній роботі на основі застосування підходу з [4] будується математична модель масоперенесення домішкових речовин в армованих півпросторах випадкової структури, базуючись на формулюванні контактної-крайової задачі дифузії з явним врахуванням стохастичності розташування границь контакту фаз.

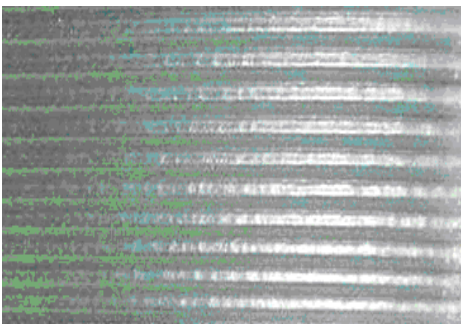


Рис. 1. Фотографія армованого скла [5].

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Вважаємо, що волокна-включення мають однаковий діаметр, а густина і коефіцієнт дифузії є сталими в межах кожної з фаз, причому на границі фаз вони можуть суттєво відрізнятися. Точна геометрична конфігурація фаз в області тіла є невідомою і заданий рівномірний розподіл включень (рис. 2).

Для визначення концентрацій $c_j(\vec{r}, t)$ домішкової речовини в області кожної з фаз Ω_j ($j = 0, 1$) використано рівняння дифузії

$$\rho_j \frac{\partial c_j(\vec{r}, t)}{\partial t} = d_j \left[\frac{\partial^2 c_j(\vec{r}, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_j(\vec{r}, t)}{\partial z^2} \right], \vec{r} = (x, y) \in \Omega_j, \quad (1)$$

де $t \in [0, \tau]$, $\tau < \infty$ - час, ρ_j – густина матеріалу фази Ω_j , d_j – кінетичний коефіцієнт переносу домішки у цій фазі.

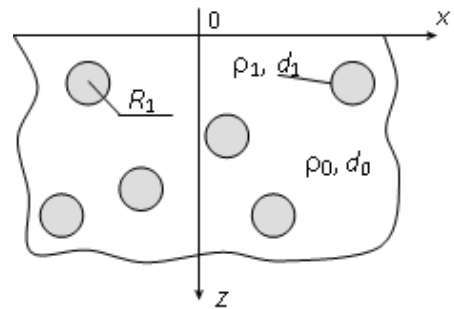


Рис. 2. Двофазна волокниста структури армованого тіла

На функцію концентрації накладено наступні крайові умови:

$$c_0(\vec{r}, t)|_{t=0} = c_1(\vec{r}, t)|_{t=0} = 0, \quad c_0(\vec{r}, t)|_{z=0} = c_* = const,$$

$$c_0(\vec{r}, t)|_{z \rightarrow +\infty} = c_1(\vec{r}, t)|_{z \rightarrow +\infty} = 0,$$

$$c_0(\vec{r}, t)|_{x \rightarrow \pm\infty} \leq K, \quad c_1(\vec{r}, t)|_{x \rightarrow \pm\infty} \leq K, \quad K < \infty \quad (2)$$

та умови неідеального контакту:

$$k_0 c_0(\vec{r}, t)|_{\vec{r} \in \Gamma_{-0}} = k_1 c_1(\vec{r}, t)|_{\vec{r} \in \Gamma_{+0}}, \quad (3)$$

$$\rho_0 d_0 \vec{\nabla} c_0(\vec{r}, t)|_{\vec{r} \in \Gamma_{-0}} = \rho_1 d_1 \vec{\nabla} c_1(\vec{r}, t)|_{\vec{r} \in \Gamma_{+0}}, \quad (4)$$

де k_j – коефіцієнт концентраційної залежності хімічного потенціалу у фазі Ω_j ($j = 0, 1$); $\Gamma = \bigcup_{i=1}^{n_1} \Gamma_{i1}$ - межа контакту областей Ω_0 та Ω_1 (Γ_{ij} – межа i -ї однозв'язної області Ω_{ij} j -ї фази).

III. ІНТЕГРО-ДИФЕРЕНЦІАЛЬНЕ РІВНЯННЯ ДЛЯ ЗНАХОДЖЕННЯ ВИПАДКОВОГО ПОЛЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ДОМІШКИ

Контактно-крайова задача (1)-(4) за допомогою апарату узагальнених функцій зведена до рівняння масоперенесення в усьому тілі:

$$L(\vec{r}, t)c(\vec{r}, t) = 0, \quad (5)$$

де оператор має вигляд

$$L(\vec{r}, t) = \sum_{j=0}^1 \sum_{i=1}^{n_j} \eta_{ij}(\vec{r}) \left\{ \rho_j \frac{\partial}{\partial t} \right\} - \\ - \sum_{j=0}^1 \sum_{i=1}^{n_j} \oint_{\Gamma_{ij}} [d(\vec{r})]_{\Gamma_{ij}} [\vec{\nabla}]_{\Gamma_{ij}} \delta(\vec{r} - \vec{r}_{\Gamma_{ij}}) d\Gamma_{ij} - \\ - \sum_{j=0}^1 \sum_{i=1}^{n_j} \eta_{ij}(\vec{r}) \{d_j \Delta\} - \sum_{j=0}^1 \sum_{i=1}^{n_j} \oint_{\Gamma_{ij}} [d(\vec{r})]_{\Gamma_{ij}} [\cdot]_{\Gamma_{ij}} \vec{\nabla} \delta(\vec{r} - \vec{r}_{\Gamma_{ij}}) d\Gamma_{ij},$$

у якому явно враховано стрибки функції концентрації та її похідної на границях контакту фаз, за рахунок запровадження випадкової функції структури [4]:

$$\eta_{ij}(\vec{r}) = \begin{cases} 1, \text{ при } \vec{r} \in \Omega_{ij}, \\ 0, \text{ при } \vec{r} \notin \Omega_{ij}, \end{cases} \quad (6)$$

для якої виконується умова суцільності тіла $\sum_{i=1}^{n_0} \eta_{i0} + \sum_{i=1}^{n_1} \eta_{i1} = 1$.

Додавши і віднявши у лівій частині рівняння (5) детермінований оператор з кінетичним коефіцієнтом дифузії d_0 , що є характеристикою матриці

$$L_0(\vec{r}, t) = \rho_0 \frac{\partial}{\partial t} - d_0 \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right], \quad (7)$$

означений на усьому часовому проміжку $t \in [0, \tau)$, ($\tau < +\infty$) і в усьому півпросторі $\vec{r} \in \Omega = (-\infty; +\infty) \times [0, \infty)$, який з врахуванням (7) можна записати у вигляді

$$L_0(\vec{r}, t) = \sum_{j=0}^1 \sum_{i=1}^{n_j} \rho_0 \eta_{ij}(\vec{r}) \frac{\partial}{\partial t} - \sum_{j=0}^1 \sum_{i=1}^{n_j} d_0 \eta_{ij}(\vec{r}) \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right].$$

отримаємо рівняння

$$(L(\vec{r}, t) + L_0(\vec{r}, t) - L_0(\vec{r}, t))c(\vec{r}, t) = 0. \quad (8)$$

Подавши (8) у вигляді

$$L_0(\vec{r}, t)c(\vec{r}, t) = L_s(\vec{r}, t)c(\vec{r}, t), \quad (9)$$

де

$$L_s(\vec{r}, t) = L_0(\vec{r}, t) - L(\vec{r}, t) = \sum_{i=1}^{n_1} (\rho_0 - \rho_1) \eta_{i1}(\vec{r}) \frac{\partial}{\partial t} - \\ - \sum_{i=1}^{n_1} (d_0 - d_1) \eta_{i1}(\vec{r}) \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] - \\ - \sum_{j=0}^1 \sum_{i=1}^{n_j} \oint_{\Gamma_{ij}} [d(\vec{r})]_{\Gamma_{ij}} [\vec{\nabla}]_{\Gamma_{ij}} \delta(\vec{r} - \vec{r}_{\Gamma_{ij}}) d\Gamma_{ij} - \\ - \sum_{j=0}^1 \sum_{i=1}^{n_j} \oint_{\Gamma_{ij}} [d(\vec{r})]_{\Gamma_{ij}} [\cdot]_{\Gamma_{ij}} \vec{\nabla} \delta(\vec{r} - \vec{r}_{\Gamma_{ij}}) d\Gamma_{ij},$$

та вважаючи праву частину рівняння (9) джерелом, подамо розв'язок крайової задачі (9), (2) у вигляді суми розв'язку відповідної однорідної задачі та згортки функції Гріна з джерелом. Одержимо еквівалентне інтегро-диференціальне рівняння у вигляді

$$c(\vec{r}, t) = c^{(0)}(\vec{r}, t) + \int_0^t \int \int_{(V)} G(\vec{r}, \vec{r}', t, t') L_s(\vec{r}', t') c(\vec{r}', t') d\vec{r}' dt', \quad (10)$$

де $c^{(0)}(\vec{r}, t)$ – розв'язок однорідного рівняння $L_0(\vec{r}, t)c^{(0)}(\vec{r}, t) = 0$ з крайовими умовами (2), тут $L_0(\vec{r}, t)$ – детермінований оператор рівняння дифузії з коефіцієнтами матриці; $L_s(\vec{r}, t) = L_0(\vec{r}, t) - L(\vec{r}, t)$.

IV. ФОРМУЛИ ДЛЯ ЗНАХОДЖЕННЯ ВИПАДКОВОГО ПОЛЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ

Розв'язок інтегро-диференціального рівняння (10) подано у вигляді інтегрального ряду Неймана:

$$c(\vec{r}, t) = c^{(0)}(z, t) + \int_0^t \int \int_{(V)} G(\vec{r}, \vec{r}', t, t') L_s(\vec{r}', t') c^{(0)}(\vec{r}', t') d\vec{r}' dt' + \\ + \int_0^t \int \int_{(V)} G(\vec{r}, \vec{r}', t, t') L_s(\vec{r}', t') \times \\ \times \int_0^{t'} \int \int_{(V)} G(\vec{r}', \vec{r}'', t', t'') L_s(\vec{r}'', t'') c^{(0)}(\vec{r}'', t'') d\vec{r}'' dt'' d\vec{r}' dt' + \\ + \int_0^t \int \int_{(V)} G(\vec{r}, \vec{r}', t, t') L_s(\vec{r}', t') \int_0^{t'} \int \int_{(V)} G(\vec{r}', \vec{r}'', t', t'') L_s(\vec{r}'', t'') \times \\ \times \int_0^{t''} \int \int_{(V)} G(\vec{r}'', \vec{r}''', t'', t''') L_s(\vec{r}''', t''') c(\vec{r}'', t'') d\vec{r}''' dt''' d\vec{r}'' dt'' + \dots$$

Отриманий ряд зручний для дослідження процесу дифузії в неоднорідних тілах з огляду на фізичну інтерпретацію його членів. Перший його доданок задає концентрацію домішки в однорідному тілі з характеристиками базової фракції. Другий член цього ряду описує збурення поля концентрації у випадку внесення в однорідне тіло одного окремого волокна включення, третій відповідає за парний взаємовплив волокон включення і т. д. Враховуючи таку фізичну інтерпретацію, для знаходження усередненого поля концентрації домішки обмежуємося першими двома членами ряду побудованого Неймана:

$$c(\vec{r}, t) \approx c^{(0)}(z, t) + \int_0^t \int \int_{(V)} G(\vec{r}, \vec{r}', t, t') L_s(\vec{r}', t') c^{(0)}(\vec{r}', t') d\vec{r}' dt'. \quad (11)$$

Враховуючи, що при дії оператора $L_s(\vec{r}, t)$ з (9) на концентрацію $c^{(0)}(\vec{r}, t)$ домішки в однорідному середовищі, доданок, що містить множник $[c^{(0)}(\vec{r}, t)]$ перетворюється в 0 через неперервність функції $c^{(0)}(\vec{r}, t)$, із (11) отримаємо:

$$c(\vec{r}, t) \approx c^{(0)}(z, t) + \int_0^t \iint_{(V)} G(\vec{r}, \vec{r}', t, t') \left[(\rho_0 - \rho_1) \frac{\partial c^{(0)}}{\partial t'} - (d_0 - d_1) \frac{\partial^2 c^{(0)}}{\partial z'^2} \sum_{i=1}^{n_i} \eta_{ij}(\vec{r}') d\vec{r}' + (d_0 - d_1) \times \right. \\ \left. \times \iint_{(V)} G(\vec{r}, \vec{r}', t, t') \sum_{i=1}^{n_i} \frac{\partial c^{(0)}}{\partial z'} \oint_{\Gamma_{ij}} \delta(\vec{r} - \vec{r}_{i1}) d\Gamma_{i1} d\vec{r}' \right] dt' \quad (12)$$

Усереднення випадкового поля концентрації домішкової речовини, описаного співвідношенням (12) проводимо за ансамблем конфігурацій фаз, вважаючи розподіл включень рівномірним в області тіла з густиною розподілу $\frac{1}{V}$, та враховуючи, що $\langle c^{(0)}(z, t) \rangle_{conf} = c^{(0)}(z, t)$, а для функції η_{ij} з (6) має місце рівність:

$$\eta_{ij}(\vec{r}') = \begin{cases} 1, n_{pu} \vec{r}' \in (V_i^{(1)}), \\ 0, n_{pu} \vec{r}' \notin (V_i^{(1)}), \end{cases} = \\ = \begin{cases} 1, n_{pu} |\vec{r}' - \vec{r}_{i1}| \in [0; R_1], \\ 0, n_{pu} |\vec{r}' - \vec{r}_{i1}| \notin [0; R_1], \end{cases} = \eta_{ij}(|\vec{r}' - \vec{r}_{i1}|),$$

де \vec{r}_{i1} – радіус-вектор центра включення $(V_i^{(1)})$, а R_1 – радіус волокон включень.

Середнє за ансамблем конфігурації фаз значення випадкового поля концентрації домішкової речовини отримано у вигляді:

$$\langle c(\vec{r}, t) \rangle_{conf} = c^{(0)}(z, t) + \int_0^{t+\infty} \int_{-\infty}^t v_1 \left[\int_0^{2R_1} G \left[\bar{\rho} \frac{\partial c^{(0)}}{\partial t'} - \bar{d} \frac{\partial^2 c^{(0)}}{\partial z'^2} \right] \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{z'}{R_1} - 1 \right)^2 dz' + \int_{2R_1}^{+\infty} G \left[\bar{\rho} \frac{\partial c^{(0)}}{\partial t'} - \bar{d} \frac{\partial^2 c^{(0)}}{\partial z'^2} \right] dz' + \right. \\ \left. + \frac{2\bar{d}}{R_1} \lim_{x \rightarrow +0} \int_x^{\infty} G \frac{\partial c^{(0)}}{\partial z'} dz' \right] dx' dt', \quad (13)$$

де $\bar{\rho} = \rho_0 - \rho_1$, $\bar{d} = d_0 - d_1$.

Підставивши отриманий застосуванням обернених перетворення Фур'є за просторовими змінними для функції Гріна вираз та враховуючи, що

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left\{ -\frac{\rho_0 (x-x')^2}{4d_0(t-t')} \right\} dx' = \begin{cases} x-x' = w & dx' = -dw \\ x' \rightarrow -\infty, w \rightarrow +\infty & x' \rightarrow +\infty, w \rightarrow -\infty \end{cases} = \\ = \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left\{ -\frac{\rho_0 w^2}{4d_0(t-t')} \right\} dw = \sqrt{\frac{4d_0(t-t')\pi}{\rho_0}}, \text{ після інтегрування}$$

за змінною z' отримаємо формулу:

$$\langle c(\vec{r}, t) \rangle_{conf} = c_* \operatorname{erfc} \left\{ \frac{z\sqrt{\rho_0}}{2\sqrt{d_0 t}} \right\} + \frac{c_* v_1 (\rho_0 d_1 - \rho_1 d_0) \pi \sqrt{\pi}}{\rho_0 t^2} \times \\ \times \exp \left\{ -\frac{\rho_0 z^2}{4d_0 t} \right\} \left(\frac{z\sqrt{\rho_0 t}}{4d_0 \sqrt{d_0}} + \frac{d_0}{R_1^2 \rho_0^2 t \sqrt{\pi}} \int_0^t \sqrt{t'^3 (t-t')^5} \times \right. \\ \left. \times \left\{ \frac{(b^3 + 2a^2 b(3-2R_1 b) - 8a^4 R_1) \sqrt{\pi}}{2a} \operatorname{erf} \left(2aR_1 - \frac{b}{2a} \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{(b^3 + 2a^2 b(3+2R_1 b) + 8a^4 R_1) \sqrt{\pi}}{2a} \operatorname{erf} \left(2aR_1 + \frac{b}{2a} \right) - \right. \right. \\ \left. \left. - 8R_1 a^2 b \exp \left\{ -\left(\frac{b}{2a} \right)^2 \right\} + (b^2 + 4a^2) \operatorname{sh}(-2R_1 b) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \exp \left\{ -\left(4a^2 R_1^2 + \frac{b^2}{4a^2} \right) \right\} \right\} - \left(\frac{4aR_1 \sqrt{\pi} (b^2 + 2a^2) \sqrt{t'^3 (t-t')^5}}{1} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{R_1^3 \sqrt{\pi} \rho_0^5 t^5}{2(\rho_0 d_1 - \rho_1 d_0) \sqrt{d_0^3}} \right) \operatorname{erf} \left(\frac{b}{2a} \right) \right] dt'. \quad (14)$$

де $a^2 = \frac{\rho_0 t}{4d_0 t'(t-t')}$, $b = \frac{\rho_0 z}{2d_0(t-t')}$.

Отримання аналітичних розв'язків контактної-крайової задачі дифузії в армованому волокнистому напівпросторі дозволяє не тільки проводити кількісний та якісний аналіз концентрацій домішок, а й знаходити їхні потоки маси та визначати кількість речовин, що за певний проміжок часу пройшли через одиницю площі деякої поверхні.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Немировский Ю.В. Плоские задачи теории пластичности армированных сред / Ю. В. Немировский // Прочность и долговечность конструкций. – Киев: Наукова думка, 1980. – С. 56-63.
- [2] Фахрутдинов И.Х. Ракетные двигатели твердого топлива / И. Х. Фахрутдинов. – М.: Машиностроение, 1981. – 223 с.
- [3] Хорошун Л.П. Термоупругость двухкомпонентных смесей / Л.П. Хорошун., Н. С. Солтанов. – К: Наук. думка, 1984. – 112 с.
- [4] Чапля С.Я. Математичне моделювання дифузійних процесів у випадкових і регулярних структурах / С. Я. Чапля, О. Ю. Чернуха. – К: Наук. думка, 2009. – 302 с.
- [5] http://moszkerkala.ru/new/96/Armirovannoe_steklo

Системний Підхід до Оцінювання Стану Закладу Вищої Освіти

Борис Мокін, Олена Слободянюк, Ольга Войцеховська
кафедра системного аналізу, комп'ютерного моніторингу та інженерної графіки
Вінниця, Україна
borys.mokin@gmail.com, olenas8@gmail.com, olgav1085@gmail.com

System Approach to Evaluation of the Higher Education Institution Status

Borys Mokin, Olena Slobodianiuk, Olga Voytsehovska
dept. of System Analysis, Computer Monitoring and Engineering Graphics
Vinnytsia, Ukraine
borys.mokin@gmail.com, olenas8@gmail.com, olgav1085@gmail.com

Анотація—Показано, що оцінювання стану закладів вищої освіти в публікаціях у наукових журналах та монографіях в основному спрямовані на виявлення залежностей певних координат стану цих закладів, яким надано статус критеріальних, від однієї чи кількох інших координат, яким надано статус керувальних чи збудуючих, в умовах ігнорування впливу багатьох інших його координат та, як правило, без врахування змін цих керувальних чи збудуючих координат у часі, тобто, з використанням описових чи математичних моделей цих залежностей в просторі автоматів Мура, що приводить до надання переваги статичним характеристикам оцінювання стану цих закладів та ігнорування їх динамічних характеристик. Для подолання цього недоліку досліджень стану закладу вищої освіти в доповіді запропоновано використовувати системний підхід як ідеологію і системний аналіз як метод та визначено усі складові цих процесів на перших двох етапах застосування методу, тобто, заклад вищої освіти виділено як об'єкт дослідження із навколишнього середовища і сформовано усі точки їх контактів, в яких визначено 15 впливів навколишнього середовища на заклад вищої освіти та 12 впливів закладу вищої освіти на навколишнє середовище. Показано, як будувати математичні моделі оцінювання стану закладу вищої освіти в просторі автоматів Мілі, тобто, з використанням залежностей, в яких усі змінні є функціями часу. В якості критеріїв запропоновано використати імідж закладу вищої освіти та затрати, що забезпечують його функціонування, перший із яких необхідно максимізувати, а другий – мінімізувати, використовуючи максимінну або мінімаксу стратегії.

Abstract—The paper shows that evaluation of higher education institutions status in publications in scientific journals and monographs is mainly targeted at revealing dependencies of particular coordinates of status of these institutions, which have been granted a status of criterion, from one or several other coordinates, which have been granted a status of managing or exciting, in conditions ignoring the influence of many other its

coordinates and, as a rule, without taking into account the changes in these managing or exciting coordinates in time, that is, using descriptive or mathematical models of these dependencies in the space of Moore machine, leading to a preference for static characteristics for evaluating the status of these facilities and ignoring their dynamic characteristics. To overcome this drawback of research on the higher education institution status, the report suggests using the system approach as ideology and system analysis as a method and identifying all the components of these processes in the first two stages of the method application, that is, a higher education institution is distinguished as an object of research from environment and all the points of their contacts have been formed, in which 15 environmental impacts on higher education institutions and 12 influences of the higher education institution on environment are identified. It is shown how to construct mathematical models for evaluating the higher education institution status in the space of Mealy machines, that is, using dependencies in which all variables are time functions. As a criterion, it is proposed to use the higher education institution image and the costs that ensure its functioning, the former of which is to be maximized, and the latter is to minimize using maximin or minimax strategies.

Ключові слова—заклад вищої освіти; системний підхід; математична модель; автомат Мура; автомат Мілі; критерій оцінки; імідж; затрати; максимінна стратегія; мінімаксу стратегія.

Keywords—higher education institution; system approach; mathematical model; Moore machine; Mealy machine; evaluation criterion; image; cost, maximin strategy; minimax strategy.

I. ВСТУП

Задачам оцінювання стану закладів вищої освіти (ЗВО) науковцями, як вітчизняними так і закордонними, приділялось багато уваги в усі часи. Тож і публікацій з результатами розв'язання цих задач теж уже є чимало. Беруть участь в розв'язанні цих задач і науковці

Вінницького національного технічного університету (ВНТУ) в рамках програм досліджень університетської науково-дослідної лабораторії проблем вищої школи (НДЛ ПВШ), спільної з Національною академією педагогічних наук України (НАПНУ).

Кілька публікацій, які містять в собі результати досліджень, виконаних науковцями ВНТУ за планами НДЛ ПВШ, у вигляді монографій та наукових статей за останні 10 років, для прикладу, приведені у «Списку використаної літератури».

Аналізуючи ці публікації, бачимо, що роботи [1], [2], [3] присвячені фінансовому забезпеченню ЗВО, робота [4] присвячена стимулюванню професорсько-викладацького складу ЗВО до підвищення наукового рівня, роботи [5], [6] присвячені ролі методичного забезпечення навчального процесу, роботи [7], [8] присвячені моделюванню процедур організації навчального процесу та засвоєння знань, тобто, кожна із цих публікацій висвітлює дослідження за окремою темою, метою якої було вивчення тих чи інших характеристик стану ЗВО, і, як правило, без оцінювання їх взаємного впливу.

Аналогічну картину можна спостерігати, аналізуючи і численні публікації інших науковців в сотнях наукових журналів та монографій з педагогічних та суміжних з ними наук, наприклад, в монографії [9], в якій здійснено спробу використати для дослідження процесів у ЗВО ідеологію теорії катастроф.

Але, як показано, наприклад, в роботі [1], вивчення окремих характеристик стану ЗВО, як і намагання покращити ці окремо взяті характеристики без врахування взаємного впливу на них інших характеристик стану ЗВО, дуже часто не відповідає реальності. А тому для оцінювання стану такої складної системи, якою є ЗВО, необхідно використовувати системний підхід, згідно з ідеологією якого, викладеною, наприклад, в роботі [1], необхідно під час оцінювання стану складної системи одночасно враховувати усі його основні характеристики та їх взаємний вплив. Адаптації ідеології цього підходу для оцінювання стану ЗВО і присвячена ця наша доповідь.

II. ВІКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Викладення результатів дослідження ми почнемо з того, що, спираючись на роботу [1], нагадаємо, що алгоритм методу теоретичного дослідження складної системи, який прийнято називати системним аналізом, включає в себе 5 етапів, а саме: 1) постановка задачі, формулювання мети і завдань дослідження та критеріїв оцінювання його результатів; 2) виокремлення об'єкта дослідження із навколишнього середовища, визначення точок, ліній чи поверхонь їх контактів та формування множини змінних, що характеризують процеси в об'єкті і контактні сигнали, та множини їх обмежень; 3) синтез та ідентифікація математичних моделей процесів в об'єкті дослідження та моделей сигналів, якими обмінюються об'єкт дослідження з навколишнім середовищем; 4) дослідження процесів в об'єкті з використанням синтезованих математичних моделей, критеріїв та обмежень; 5) оптимізація процесів у випадку виявлення при їх дослідженні відхилення якихось

характеристик чи параметрів від тих значень, що приводять до критеріальних оптимумів чи виводять за межі обмежень.

Оскільки наша доповідь присвячується лише питанню адаптації ідеології системного підходу для оцінювання стану ЗВО, то в ній ми обмежимося розглядом лише перших двох етапів системного аналізу цього стану.

Постановку задачі нашого дослідження та його мету відповідно до вимог першого етапу системного аналізу ми уже сформулювали вище, тож одразу перейдемо до вибору критеріїв оцінки результатів, в якості яких ми пропонуємо використати імідж ЗВО та затрати для ні його функціонування. Обидва ці критерії є інтегральним і перший із них вимагає максимізації, а другий мінімізації, тобто, при розв'язанні поставленої задачі стратегія може бути або максимінною, або мінімаксною.

Другий етап системного аналізу оцінювання стану ЗВО починається з виділення ЗВО як об'єкта дослідження (ОД) із навколишнього середовища (НС) та визначення точок їх контакту, яких, як легко бачити з рис. 1, налічується 27.

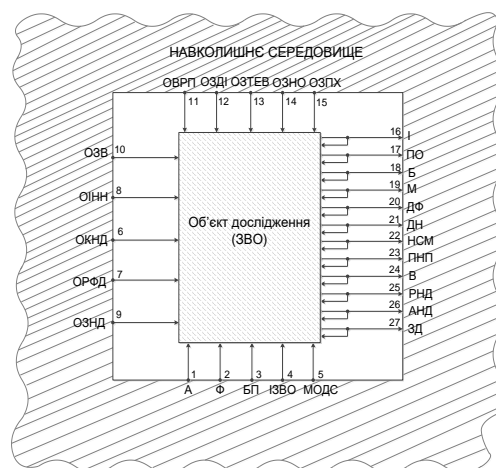


Рис. 1. Геометрична інтерпретація виділення ЗВО як ОД з НС та ідентифікація точок їх взаємодії

На рис. 1: А – абітурієнти, Ф – фінанси, БП – бази практики, ІЗВО – інші ЗВО згідно з договорами про співпрацю, МОДС – міжнародні організації, з якими є договори про співпрацю, ОКНД – організації, що генерують керівні та нормативні документи, ОРФД – організації, що здійснюють ревізію фінансової діяльності, ОІНН – організації, що здійснюють інспекцію навчальної і наукової діяльності, ОЗНД – організації, що замовляють наукові дослідження, ОЗВ – організації, що замовляють або беруть на роботу випускників, ОВРП – організації, що вводять нові або ремонтують існуючі площі, ОЗДІ – організації, що забезпечують новими джерелами інформації, ОЗТЕВ – організації, що забезпечують теплом, електроенергією та водою, ОЗНО – організації, що забезпечують новим обладнанням, ОЗПХ – організації забезпечення харчами студентів і життєздатності обладнання, І – імідж ЗВО, ПО – профорієнтація за межами ЗВО, Б – бакалаври, М – магістри, ДФ – доктори філософії, ДН – доктори наук, НСМ – наукові статті і монографії, ПНП

– підручники, навчальні посібники та інші навчальні матеріали, В – винаходи, РНД – результати наукових досліджень, АНД – апробація наукових досліджень, ЗД – звітні документи.

Направленість стрілок на рис.1 вказує на те, в яких контактних точках з 1-ої по 15-у НС здійснює вплив на ОД, а в яких - з 16-ї по 27-у ОД здійснює вплив на НС. Вважатимемо впливи НС на ОД вхідними сигналами і позначимо їх символами $x_i, i = 1, 2, \dots, 15$. Суть цих сигналів розкрита в таблиці 1.

TABLE I. ПЕРЕЛІК ТА ЗМІСТ ВХІДНИХ ВЕЛИЧИН

Символ вхідної величини	Зміст вхідної величини
x_1	Рівень шкільної підготовки абітурієнтів
x_2	Обсяг фінансування ЗВО
x_3	Рівень забезпеченості ЗВО базами практики
x_4	Рівень співпраці з іншими ЗВО
x_5	Рівень співпраці з міжнародними організаціями
x_6	Рівень відповідності функціонування ЗВО вимогам керівних та нормативних документів
x_7	Рівень відповідності функціонування ЗВО вимогам фінансового контролю та банківської системи
x_8	Рівень відповідності функціонування ЗВО вимогам органів інспекції якості підготовки фахівців
x_9	Обсяг наукових досліджень, що виконуються у ЗВО
x_{10}	Обсяг замовлення випускників ЗВО
x_{11}	Рівень відповідності площ для навчального і наукового процесів та підрозділів, що їх забезпечують, нормативним вимогам
x_{12}	Рівень забезпечення ЗВО джерелами інформації
x_{13}	Рівень забезпечення приміщень ЗВО тепловою та електричною енергією, водою та засобами водовідливу
x_{14}	Рівень забезпечення ЗВО сучасним лабораторним та комп'ютерним обладнанням
x_{15}	Рівень забезпечення ЗВО продуктами харчування, підтримки обладнання та приміщеннями санітарно-гігієнічного обслуговування

А впливи ОД на НС вважатимемо вихідними сигналами і позначимо їх символами $y_j, j = 16, 17, \dots, 27$. Суть цих сигналів розкрита в таблиці 2.

Із рис.1 витікає, що стрілки вихідних сигналів мають і зворотні відгалуження, спрямовані назад до ОД, що надає їм одночасно і статус додаткових вхідних. Наприклад, вихідний сигнал y_{18} , що характеризує компетентність бакалаврів, окрім впливу на НС завдяки частині бакалаврів, які після закінчення ЗВО одразу йдуть працювати, здійснює вплив і на ОД, оскільки від нього залежить і вихідний сигнал y_{19} , який характеризує компетентність тієї частини випускників ЗВО, які випускаються з нього магістрами.

При формальному підході до синтезу математичних моделей, що зв'язують сигнали $x_i, i = 1, 2, \dots, 15$ нашого ОД з його вихідними сигналами $y_j, j = 16, 17, \dots, 27$, наприклад, для y_{24} – це

$$y_{24} = f(x_2, x_4, x_9, x_{12}, x_{14}, y_{19}, y_{20}, y_{21}, y_{22}, y_{24}, y_{25}, y_{26}), \quad (1)$$

складається хибне уявлення, що маємо справу з автоматом Мура [10], який кожному набору значень вхідних сигналів ставить у відповідність конкретне числове значення вихідної величини, задане у той же момент часу, тобто, з автоматом, що не має пам'яті. Саме такий підхід і має місце як у більшості публікацій у педагогічних наукових журналах, так і практично в усіх дискусіях у соціальній мережі Facebook з питань якості підготовки фахівців у ЗВО, в яких фактор пам'яті, до уваги не береться, а здійснюється прив'язка до якихось конкретизованих значень цих параметрів, наприклад, розглядається залежність якості підготовки бакалаврів від балу ЗНО абітурієнтів чи кількості годин, що відводиться на ту чи іншу навчальну дисципліну, або від кількості публікацій викладача цієї дисципліни в наукометричних базах.

TABLE II. ПЕРЕЛІК ТА ЗМІСТ ВИХІДНИХ ВЕЛИЧИН

Символ вихідної величини	Зміст вихідної величини
y_{16}	Імідж ЗВО за матеріалами ЗМІ та зовнішніх організацій
y_{17}	Рівень профорієнтації спеціальностей ЗВО його працівниками
y_{18}	Рівень компетентності бакалаврів, підготовлених у ЗВО
y_{19}	Рівень компетентності магістрів, підготовлених у ЗВО
y_{20}	Рівень компетентності докторів філософії, підготовлених у ЗВО
y_{21}	Рівень компетентності докторів наук, підготовлених у ЗВО
y_{22}	Науковий рівень статей і монографій, опублікованих працівниками ЗВО
y_{23}	Ступінь відповідності сучасним вимогам підручників, навчальних посібників та методичних розробок, що створені працівниками ЗВО
y_{24}	Ступінь відповідності світовому рівню винаходів, створених працівниками ЗВО
y_{25}	Ступінь задоволеності результатами наукових досліджень, виконаних працівниками ЗВО, їх замовників
y_{26}	Рівень апробації результатів наукових досліджень, виконаних працівниками ЗВО
y_{27}	Рівень доступності усіх звітних матеріалів про функціонування ЗВО для його працівників, ЗМІ та контролюючих органів

Але, якщо подивитись на приведену в нашій доповіді структурну схему ЗВО, то легко переконатись у тому, що в ній міститься багато підрозділів, які вносять суттєві затримки в навчальний та науковий процеси, а тому математичні моделі, що зв'язують вхідні і вихідні сигнали в цьому ОД, обов'язково повинні містити в собі координату часу t , тобто, замість використання узагальненої моделі, що має вигляд (1), необхідно синтезувати конкретні математичні моделі зв'язку між цими ж сигналами, виходячи з узагальненої математичної моделі

$$y_{24} = f(x_2, x_4, x_9, x_{12}, x_{14}, y_{19}, y_{20}, y_{21}, y_{22}, y_{24}, y_{25}, y_{26}, t), \quad (2)$$

що містить в собі час і переводить наш ОД в клас автоматів Мілі [10], які кожному набору вхідних сигналів ставлять у відповідність певні набори змінних стану, визначених для цікавого нам моменту часу, і уже на розширеній множині вхідних сигналів та змінних стану визначають значення вихідних сигналів.

А для оцінювання ролі студентів, які є основними суб'єктами навчального процесу, та їх стосунків з викладачами в нашій доповіді приведена розгорнута структурна схема узагальненого структурного блоку, що характеризує навчально-науковий процес (НПП). Із цієї структурної схеми НПП ще більш прозоро проступає необхідність системного аналізу оцінювання стану ЗВО на основі ідеології автоматів Мілі, доповненої іншими ідеологемами, обумовленими іншими факторами, як то затримками в часі проходження вхідних сигналів та втратою частини інформації в процесі її засвоєння студентом та в проміжках часу між черговим її сприйняттям. І саме на основі цієї ідеології та відповідних ідеологем необхідно на третьому етапі системного аналізу синтезувати необхідну для реалізації цього методу дослідження множину математичних моделей, котрі зв'язуватимуть між собою вхідні сигнали нашого ОД з його змінними стану, які у взаємодії формуватимуть вихідні сигнали, якими наш ОД збудує НС. І, як показано в роботах [1], [2], для синтезу цих математичних моделей необхідно використовувати і диференціальні рівняння, і інтегральні, і різницеві, і регресійні, і операторні перетворення Лапласа, Фур'є та z-перетворення, і набліжені методи розв'язання нелінійних рівнянь різних класів, і ймовірностну інтерпретацію кривих забування інформації, і синергетичне підсилення процесів засвоєння знань, і теорію лінгвістичної змінної та нечіткі бази знань в разі відсутності кількісних вимірів інформації, і теорію катастроф, як це показано для окремих складових процесу оцінювання стану ЗВО в роботі [9], і нейронні та нейронечіткі мережі, як це використано в роботі [11] для моделювання процесів за відсутності можливостей кількісного оцінювання частини їх параметрів, і теорію секвенцій, викладену в роботі [10] та застосовану для спрощення процедури моделювання автоматів Мілі.

Але синтезом та ідентифікацією математичних моделей, які реалізуються на третьому етапі системного аналізу з використанням математичного апарату, згаданого вище, та оцінюванням стану ЗВО з використанням цих моделей і обмежень на змінні, множина яких задається нормативними документами, і здійснюється на четвертому етапі системного аналізу, ми будемо займатись уже в наступній нашій публікації, а дану доповідь, аби не переобтяжувати її, на цьому і завершимо.

ВИСНОВКИ

В роботі показано, що оцінювання стану закладів вищої освіти і по-сьогодні в основному спрямовані на виявлення залежностей якості підготовки фахівців у цих закладах від однієї чи кількох координат цього процесу в умовах ігнорування впливу багатьох інших його координат, а у переважній більшості і без врахування їх змін у часі, тобто, з використанням математичних моделей цих залежностей в просторі автоматів Мура. Також запропоновано для

оцінювання стану закладів вищої освіти використовувати системний підхід як ідеологію і системний аналіз як метод та визначено усі складові цих процесів на перших двох етапах застосування методу, в результаті чого склад вищої освіти виділено як об'єкт дослідження із навколишнього середовища і сформовано усі точки, в яких цей об'єкт дослідження здійснює контакти з навколишнім середовищем, та здійснена їх конкретизація. Показано, що для того, щоб математичні моделі процесів функціонування закладів вищої освіти представляли ці процеси в просторі автоматів Мілі, їх необхідно синтезувати з використанням рівнянь і операторів, одним із ключових параметрів в яких виступає час; запропоновано в якості критеріїв оцінки результатів використати такі інтегральні критерії як імідж закладу вищої освіти та затрати, необхідні для забезпечення його функціонування, перший із яких вимагає максимізації, а другий вимагає мінімізації, тобто, при розв'язанні поставленої задачі з їх використанням стратегія може бути або максиміальною, або мінімальною.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Б. І. Мокін, та О. Б. Мокін, *Методологія та організація наукових досліджень: навчальний посібник, 2-е видання, змін. та доп.* ВНТУ, Вінниця, 2015 [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://mokin.com.ua/pedagogical/posibn/6504.html#WODckWe_4fU.
- [2] Б. І. Мокін, В. Б. Мокін, та О. Б. Мокін, *Математичні методи ідентифікації динамічних систем: навчальний посібник.* МОН України, ВНТУ. – Вінниця: ВНТУ. – 2010.
- [3] Н. С. Гончарук, Ю. В. Мокіна, та Б. І. Мокін, *Математичні моделі для прогнозування та управління процесами надходження грошових коштів від платних послуг вищих навчальних закладів.* Вінниця, Україна: ВНТУ, 2015.
- [4] Ю. В. Мокіна, та Б. І. Мокін, *Математичні моделі в системах управління ефективністю діяльності професорсько-викладацького складу вищих навчальних закладів.* Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008.
- [5] Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, О. М. Мензул, та В. М. Мізерний, «Математична модель прогнозу рівня кваліфікації, яку отримає кожний студент в результаті освоєння робітничої професії. Частина 1: формалізація, структурізація і параметризація задачі.» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №5, с. 125-129. 2012.
- [6] О. В. Слободянюк, В. Б. Мокін, та Б. І. Мокін, *Формування вмінь студентів з інженерної і комп'ютерної графіки в умовах дистанційного навчання.* Вінниця, Україна: ВНТУ, 2016.
- [7] Б. І. Мокін, Ю. В. Мокіна, та А. В. Пислярова, «Структура синергетичної взаємодії викладачів і студентів університету на рівні кафедр і академічних груп.» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №4, с. 102-109. 2009.
- [8] Б. І. Мокін, та О. Б. Мокін, «Підвищення ступеня адекватності моделі процесу забування знань.» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №4, с. 116-121. 2013.
- [9] Л. М. Приснякова, *Системный анализ поведения личности.* Днепропетровск, Украина: Издатель Овсянников Ю.С., 2007.
- [10] В. Н. Захаров, *Автоматы с распределенной памятью.* М., Россия: Энергия. 1975.
- [11] Ю. И. Митюшкин, Б. И. Мокин, и А. П. Ротштейн, *Soft Computing: идентификация закономерностей нечеткими базами знаний: монография.* Винница, Украина: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2002.

Ієрархічна Самоподібна Модель Перерозподілу Влади у Сучасному Суспільстві

Микола Моргун
кафедра прикладної математики та інформатики
Черкаський Національний Університет ім. Б. Хмельницького
Черкаси, Україна
mykolamorhun4edu@gmail.com

Hierarchical Self-similar Model of Power Redistribution in Modern Society

Mykola Morhun
dept. of Applied Mathematics and Computer Science
Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy
Cherkasy, Ukraine
mykolamorhun4edu@gmail.com

Анотація—Пропонується самоподібна модель сучасного суспільства для прогнозування перерозподілу влади в результаті виборів. Наведений алгоритм роботи моделі для подальшого комп'ютерного аналізу.

Abstract—Model of power redistribution between political forces by election has been developed. The model is hierarchical and self-similar. Algorithm of computer implementation of the model is given.

Ключові слова—модель, влада, вибори, суспільство

Keywords—model, power, elections, society

I. ВСТУП

В наш час все більше уваги приділяється питанням пов'язаним із суспільними процесами. І це не дивно, адже такі знання дозволяють прогнозувати подальший розвиток і реакцію суспільства на той чи інший фактор. Складно знайти сферу для якої така інформація не була б вагомим. А для того, щоб передбачити подальший розвиток подій, спочатку необхідно побудувати модель, яка б відображала цей розвиток. У другій половині ХХ століття почали з'являтися моделі, завданням яких було описати суспільство чи процеси у ньому. Більшість з них описують взаємозв'язки компонентів або подають їх у вигляді діаграм [1-2]. Суттєві корективи у методи моделювання були внесені у зв'язку з розвитком комп'ютерної техніки, що дозволяло обробляти все більші об'єми даних. На даний час важливим є не тільки знання взаємозв'язків між компонентами, але й можливість розрахунку їх подальшого розвитку, де, звісно, не обійтися без комп'ютерного моделювання, що в свою чергу означає необхідність

переходу від описових та діаграмних моделей до більш формальних, які можуть бути переведені на мову алгоритмів та оброблені за допомогою комп'ютера.

Досить відомою у сфері математичного моделювання пов'язаного з владою є модель “влада-суспільство” [3] А. П. Михайлова, яка, мабуть, стала класичною і отримала багато варіацій та доповнень від різних авторів [4-5].

Модель “влада-суспільство” приділяє більше уваги зміні кількості влади у вертикалі, а також взаємодія із громадянським суспільством не є обмеженою, тобто немає ліміту на кількість влади, яка передається до/від владних структур. Моделі [6-7] використовують клітинний автомат, але вони є значно обмеженими через використання квадратного поля та перпендикулярної сітки.

II. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Існування в суспільстві вносить деякі обмеження у життя людини, її поведінку, реакції на різні чинники. У суспільстві кожен повинен підпорядковуватися правилам, які встановлені у цьому суспільстві, або ж непокоря останнім викличе реакцію з боку суспільства і потягне за собою наслідки для індивіда чи групи людей. Це спричинено тим, що суспільство має деяку владу над людиною. Якщо ж розглянути людину поза суспільством, вона вільна від будь яких обмежень які вносить суспільство, тобто повністю віддається своїй волі. Влада суспільства черпається з його членів, тобто при створенні будь-якого суспільства кожен його учасник надає частину своєї влади цьому суспільству, а деяка частина влади залишається у кожного індивіда (не обов'язково однаково). З розвитком суспільства кількість влади, якою володіє кожен індивід

може змінюватися. Цей процес може бути ініційований як самими людьми так і владними структурами, але важливою особливістю цієї зміни є те, що вона відбувається стрибкоподібно при створенні суспільства, виборах, революціях, зміні устрою та/чи законів. Розглянемо приклад. Якщо владні структури в суспільстві приймають і впроваджують рішення які викликають незадоволення у значної частини суспільства це знижує довіру суспільства до керуючої частини, але не змінює розподілу влади. Останній же відбувається на виборах (і тоді члени суспільства віддають свою владу іншій політичній силі) або ж становище стає настільки критичним, що цей перерозподіл відбувається достроково.

Під час проведення виборів до конкретного індивіда повертається не вся його влада, а лише її частина (вибори не можуть змінити усе в державі: устрій, закони тощо), яку він знову зобов'язаний віддати тій чи іншій політичній силі. На виборах, окремий індивід намагається віддати частину своєї влади тому лідеру чи політичній силі, яка пропонує план дій, що найбільше збігається з поглядами самого виборця. Якщо таких не існує, то або індивід віддасть свою частину влади випадковій політичній силі, або проігнорує самі вибори і тоді його частина влади буде пропорційно розділена між усіма кандидатами. Тобто для того щоб передбачити якій політичній силі надасть свою владу виборець необхідно передбачити його погляди. Для побудови моделі пропонується ввести систему поглядів людини як набір числових значень в межах від -1 до 1 (рис. 1), яка відобразить ставлення індивіда до суспільно важливих питань.

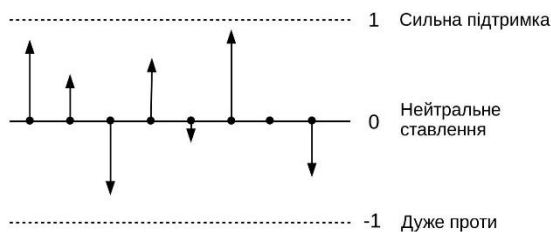


Рис. 1. Приклад системи поглядів індивіда

При обміні поглядами необхідно враховувати їх різницю. Якщо один індивід має досить сильне переконання щодо деякого питання, а позиція іншого близька до нейтральної, то, з великою ймовірністю, після їх взаємодії ставлення другого буде суттєво змінено в бік позиції першого. У випадку обміну думками по питанню на яке в усіх учасників немає сильної позиції, вплив буде незначний.

Для відображення структури та ієрархії суспільства в моделі, розділимо суспільство на рівні та структурні одиниці в них. Покладемо, що структурна одиниця містить в собі групу одиниць нижчого рівня (за винятком найнижчого), та має зв'язки як у своїй вертикалі так і у горизонталі, причому зв'язки між рівнями можуть проходити лише в рамках вертикалі об'єкта на рівень вище та нижче. Аналізуючи місце та зв'язки об'єкта у загальній системі вищеописаних рівнів можна побачити, що вони однакові для різних рівнів, тобто запропонована модель є самоподібною (рис. 2). Крім того, кожне суспільство може

перебувати у зв'язках з іншими, подібними собі, структурами, що вписується в загальну картину моделі.

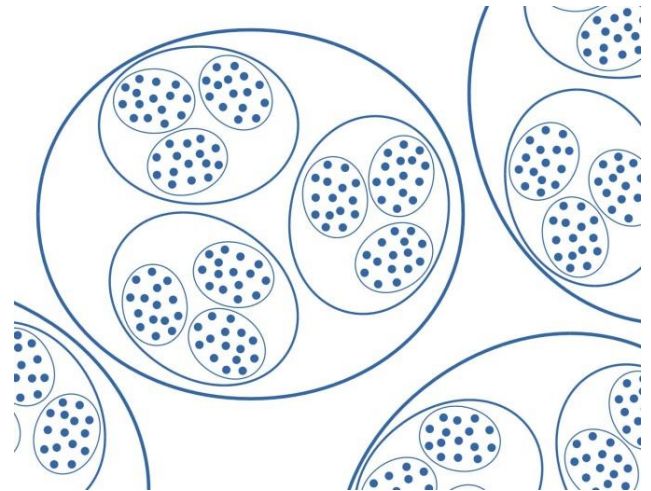


Рис. 2. Структура моделі

Означимо основні частини структурної одиниці. Як зазначалося вище, вона має зв'язки з собі подібними і з вищою одиницею, а це значить що, представляючи нижчі рівні, вона проводить зовнішню політику. Зв'язки зі своїми складовими є її внутрішньою політикою.

Підсумуємо:

- Суспільство має багаторівневу структуру.
- Будова структурної одиниці однакова для всіх рівнів (самоподібна).
- Об'єктом найменшого рівня є людина, обмежень на кількість рівнів немає.
- Структурна одиниця може взаємодіяти з іншими об'єктами на своєму рівні та на ± 1 рівень у своїй піраміді.
- Структурна одиниця проводить зовнішню і внутрішню політику:
 - В межах зовнішньої вона комунікує з одиницями свого рівня, які належать до тієї самої вищої структурної одиниці, а також із нею самою.
 - В межах внутрішньої політики комунікує з своїми складовими.
 - Винятком є людина (перший рівень) в якій відсутня внутрішня політика, а також найвищий рівень, зовнішня політика якого або відсутня (якщо суспільство ізольоване), або зводиться до комунікації з собі подібними.
- Владу людині не надають вона їй надана апіорі.
- Якщо людина є членом суспільства вона віддає частину своєї влади суспільству (керівництву суспільства). Якщо рівень один — суспільство відсутнє і влада індивіда не віддається на рівень

вище, а залишається в нього самого, тобто він є одинаком.

- Перерозподіл влади відбувається періодично, стрибком, під час перевиборів або революцій.
- При виборах частина наданої влади суспільству індивідом повертається знову до нього і він зобов'язаний її віддати одній з політичних сил яка обирається. У випадку ігнорування виборів його влада розподіляється пропорційно між усіма кандидатами.
- Виборець віддає свою владу тій політичній силі, система поглядів якої найбільше збігається з його системою поглядів, або ж ігнорує вибори, якщо всі політичні сили мають систему поглядів досить розбіжну з його особистою.

Опис алгоритму моделі

Введемо деякі спрощення:

- Немає нестатку в матеріальному плані. Матеріальних благ вистачає на всіх і на все.
- Громадяни поосібно не перевищують своєї влади.
- Влада прислухається до думки громадян.
- Кандидати на виборах чесно проголошують свої плани та намагаються їх дотримуватися.

Ініціалізація моделі:

- Визначимо структуру суспільства: кількість рівнів та складові кожного з них.
- Для кожної групи, введемо відстані між її членами. Як одне з найпростіших наближень, можна використати циклічні індекси.
- Задаємо питання системи поглядів.
- Визначаємо кількість політичних сил та їх погляди.

Взаємодія між об'єктами в суспільстві (кількість ітерацій пропорційна часу до дня виборів):

Етап перший: взаємодія між об'єктами однакових рівнів.

- Проводимо обмін поглядами між членами кожної групи. Ймовірність взаємодії залежить від відстані між об'єктами. Для розрахунку ймовірностей пропонується взяти розподіл Гауса. Причому спочатку відбувається взаємодія з ближчими об'єктами, а потім із більш віддаленими.

Якщо ж взаємодія відбувається, то вона проходить в обох напрямках і відбувається наступним чином:

Якщо один об'єкт діє на інший, то взаємодія відбувається по кількох питаннях, які є найбільш вагомими для нього, тобто мають найбільше значення погляду по модулю. При взаємодії по конкретному погляду використовуємо наступну формулу впливу:

$$\inf_{x \rightarrow y} luence = \frac{I}{2} |x_{p_i} - y_{p_i}| \cdot k_{inf I} \quad (1)$$

де x_{p_i} та y_{p_i} – значення і-го погляду для об'єкта x

та y відповідно, $k_{inf I} = \frac{\cos(\pi \cdot y_{p_i}) + I}{2} \cdot \Delta$, де Δ – максимально можлива зміна погляду за ітерацію.

- Проводимо взаємодію між об'єктами одного рівня, які не знаходяться в одній групі. Для цього випадковим чином обираємо деяку кількість пар об'єктів, та проводимо взаємодію між ними як було описано вище.

Етап другий: взаємодія між об'єктами сусідніх рівнів.

- Складові об'єкта діють системою поглядів сформованою як середнє арифметичне їх поглядів на цей об'єкт за формулою (1).
- Взаємодія із складовими нижчого рівня проводиться з кожним об'єктом без виключення. Вплив відбувається за формулою (1).

Етап третій: вплив ЗМІ.

- Вплив відбувається односторонньо.
- Для кожної політичної сили вибираємо об'єкт другого або вищого рівня і діємо з деякою ймовірністю на всі елементи в середині вибраного об'єкта за формулою (1).
- Для політичної сили, яка знаходиться при владі береться найвищий об'єкт.

Процес виборів:

Для кожного виборця знаходимо найближчу політичну силу. Відстань розраховуємо за формулою:

$$d(x, y) = \sum_i^{n_p} \begin{cases} \text{sgn}(x_{p_i}) + \text{sgn}(y_{p_i}) \geq I, |x_{p_i} - y_{p_i}| \\ \text{sgn}(x_{p_i}) + \text{sgn}(y_{p_i}) = 0, |x_{p_i} - 2y_{p_i}| \end{cases}$$

де n_p – кількість значень у системі поглядів, sgn – сигнум функція, x_{p_i} та y_{p_i} – значення і-го погляду для виборця та політичної сили відповідно.

Якщо відстань не перевищує деякого порогового значення, зараховуємо голос цій політичній силі.

Роздуми щодо комп'ютерної реалізації моделі

Вище наведена модель була розроблена з урахуванням подальшого комп'ютерного моделювання і аналізу результатів, що робить її більш привабливою та затребуваною. Модель може бути використана для спроби прогнозування результатів виборів у сучасному суспільстві.

Більшість вхідних даних можна взяти з статистичних звітів (наприклад кількість виборців та структуру рівнів) та

соціологічних опитувань (питання, які найбільш важливі для суспільства в даний момент).

Для зручної обробки даних, структуру суспільства можна представити у вигляді дерева, кожним елементом якого є структурна одиниця з наступними характеристиками:

- рівень у загальній ієрархії
- система поглядів структурної одиниці
- список структурних одиниць, які включаються в дану

Для того щоб виконати деяку обробку поточних даних моделі, пропонується обходити дерево з використанням рекурсії. Це є оптимальним методом для такого типу дерев: глибина рекурсії є невеликою (так як на практиці кількість рівнів є незначною), а також алгоритм роботи програми читається і розуміється доволі легко в порівнянні з ітеративним обходом.

Оскільки в моделі присутні маніпуляції з структурними одиницями одного і того ж рівня які не належать до однієї і тієї ж одиниці вищого рівня, а також враховуючи можливість нерівномірного розподілу об'єктів між одиницями вищого рівня, можна створити додаткову структуру для спрощеного доступу до даних: масив, в якому індекс відповідає рівню, а значення є списком посилань на всі елементи цього рівня (рис. 3).

Також варто зазначити, що початкові дані для моделі в більшості випадків необхідно буде генерувати відповідно до отриманих статистичних даних. В деяких випадках, винятком може бути, хіба що, структура.

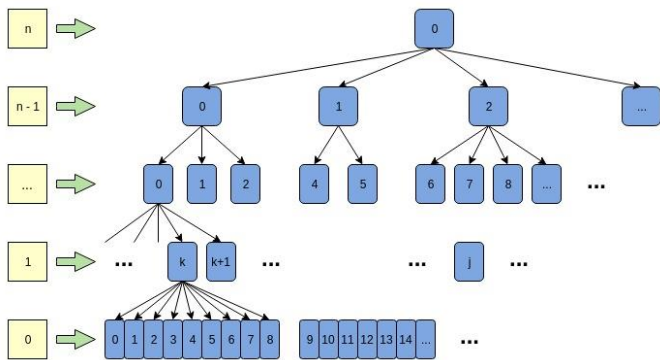


Рис. 3. Варіант структури представлення даних у реалізації моделі

ВИСНОВКИ

Запропонована ієрархічна самоподібна модель сучасного суспільства для прогнозування перерозподілу влади у ньому між політичними силами під час виборів. Модель має покроковий опис алгоритму, що робить досить простим завдання її комп'ютерної реалізації та дозволить проводити чисельні експерименти з нею за допомогою комп'ютера.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

[1] D. Easton An Approach to the Analysis of Political Systems // Political System and Change. Princeton, N. J., 1986. P. 24.

[2] Gabriel A. Almond, The Political of Developing Areas / Gabriel A. Almond and James Coleman, Princeton, NJ.: Princeton University Press, 1960. P. 7.

[3] А.П. Михайлов, Моделирование системы «власть-общество». — М.: Физмат-лит, 2006. - 144 с.

[4] М.Г. Дмитриев, А.А. Павлов, А.П. Петров, Модель «власть-общество-экономика» для случая слабокоррупцированной дискретной иерархии, Матем. моделирование, 2012, том 24, номер 2, 120–128

[5] М.Г. Дмитриев, Д.А. Макаров, А.А. Павлов, М.В. Кафарова Стабилизация в нелинейной модели «власть – общество – экономика». // Математическое моделирование и информатика социальных процессов, 2016, 18. с. 54-67

[6] А.П. Петров, М.Е. Степанцов, Дискретная распределенная модификация модели «власть–общество» на основе клеточного автомата // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2014. No 100. 19 с.

[7] М.Е. Степанцов, моделирование системы «власть-общество-экономика» на основе клеточного автомата // Компьютерные исследования и моделирование, 2016, т. 8, № 3, с. 561-572

Біортогональні Многочлени в Прикладних Задачах

Ярослав П'янило

Відділ математичних методів обчислювального експерименту Центру математичного моделювання Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України
Львів, Україна
danylo794@gmail.com

Валентина Собко

Відділ математичних методів обчислювального експерименту Центру математичного моделювання Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України
Львів, Україна
olebra31@gmail.com

Biorthogonal Polynomial in Applied Problems

Yaroslav Pyanylo

Department for Mathematical Methods of Computing
Experiment in Center of Mathematical Modeling
of Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics
and Mathematics, National Academy of Sciences of Ukraine
Lviv, Ukraine
danylo794@gmail.com

Valentyna Sobko

Department for Mathematical Methods of Computing
Experiment in Center of Mathematical Modeling
of Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics
and Mathematics, National Academy of Sciences of Ukraine
Lviv, Ukraine
olebra31@gmail.com

Анотація—В праці на базі біортогональних поліномів запропоновано метод розв'язування задач математичної фізики, зокрема для знаходження розподілу тиску у воді в пластах підземних сховищ газу. Досліджено спосіб розв'язування задачі методом розділення змінних в базисі біортогональних поліномів. Отримані результати апробовано на модельній задачі.

Abstract— The method of solving problems of mathematical physics, in particular for finding the pressure distribution in water in the reservoirs of underground gas storage, is proposed in this article on the basis of the biorthogonal polynomial. The method of solving the problem by means of the separation of variables in the base of biorthogonal polynomials is investigated. The results of calculation are presented in the form of tables.

Ключові слова—спектральні методи, математична модель, розподіл тиску, біортогональні та квазіортогональні поліноми

Key words: spectral methods, mathematical model, pressure distribution, biorthogonal and quasi-orthogonal polynomials.

I. ВСТУП

Початково-крайові задачі масопереносу, особливо задачі газової динаміки і фільтрації газу в пористих середовищах, як правило, забезпечені початковими і крайовими даними в нерегулярних точках з невисокою точністю. Це приводить до потреби розробки таких схем їх розв'язування, які узгоджуються з існуючими експериментальними даними. При розв'язуванні таких задач на основі перетворення Лапласа приходимо до

зображень, обернення яких неможливе в аналітичному вигляді. Основою для розв'язування відповідних задач математичної фізики є спектральне подання функцій, що входять в математичну модель, та початкових і крайових умов у відповідних ортогональних базисах.

В літературі відома значна кількість математичних моделей процесу руху газу в трубопроводах різного ступеню точності та адекватності [1,2,3]. Значно менше відомо моделей, на базі яких побудовані практично використовувані програмні комплекси вирішення практичних задач. Як правило, при моделюванні вирішувались прогнозовані або балансові задачі. Значно менше приділено увазі побудові математичних моделей з метою керування процесом транспорту газу.

У зв'язку із зростанням вартості енергетичних ресурсів, значної зношеності технологічних об'єктів ГТС виникає необхідність у вирішенні нових задач, які були неактуальними раніше. Це стосується, зокрема, незворотних втрат газу вздовж траси транспортування, врахування процесу дифузії та розчинності газу в пластах підземних сховищ при його зберіганні тощо.

Очевидно, що врахування такого роду процесів вимагає значного уточнення та додаткової адаптації відповідних математичних моделей. У свою чергу, уточнення математичних моделей вимагає уточнення існуючих або побудову нових методів вирішення сформульованих відповідних задач математичної фізики. Відзначимо деякі з додаткових вимог.

1. Очевидно, що вирішення крайових задач базується на заміряних дискретних даних. У зв'язку з пониженням тиску в ГТС змінюються і вхідні дані (зокрема, зменшується різниця між сусідніми замірами). З проведених досліджень відомо, що основною похибкою при вирішенні задач такого типу є похибка у вхідних даних. Використання числових методів (зокрема різницевих) пов'язане дискретизацією і втратою значних цифр, що приводить до збільшення похибки в кінцевих результатах. У зв'язку з цим необхідно вдосконалювати методи вирішення крайових задач.

2. Аналіз даних замірів параметрів процесу руху газу показує, що є наявними значні незворотні втрати вздовж траси. Тому виникає задача виявлення величини витоків газу та їх місце знаходження. Кореляційний аналіз між величинами витоків газу, вхідними даними та величинами об'ємів транспортування показує, що використовувані методи не дозволяють вирішення цієї задачі.

3. Особливе місце при транспортуванні газу, особливо в зимовий період, мають підземні сховища газу. Відомо, що в пластах майже кожного ПСГ є наявною вода. Оскільки в пластах ПСГ тиски є значними, то певна кількість газу дифундує та розчиняється у воді. До цього часу цей процес досліджувався мало. Однак виникає задача оцінки величини об'ємів розчиненого та дифундованого газу. Очевидно, що при вирішенні цієї задачі не можуть бути використані заміряні дані, так як їх отримати нереально. Тому вони визначаються опосередковано, через інші заміряні дані, з невисокою точністю. Далі, в процесах відбирання або закачування газу тиск змінюється в незначних межах (порядку декількох десятків атмосфери за добу). Вище сказане вказує на необхідність достатньо точних методів вирішення задач такого типу.

Відзначимо, що основним способом є застосування числових методів в ітераційному процесі [4]. При цьому на різних етапах застосовується процедура лінеаризації. Для вирішення згаданих вище задач необхідно застосовувати аналітичні або асимптотичні методи. Найбільш вживаними є застосування методів розділення змінних або інтегральних перетворень. Однак вони є некоректними за Тихоновим. Застосування асимптотичних методів вимагає, по-перше, вибір малого параметру, і, по-друге, складністю знаходження асимптотичного розкладу [7].

Одним із підходів до вирішення згаданих проблем є застосування методу розділення змінних у базисі біортогональних функцій [5,6]. Нагадаємо, що однією з позитивних сторін цього методу є те, що якщо ряд по одній системі функцій є повільно збіжний, то по іншій – швидкозбіжний. Біортогональну систему функцій побудовано на базі многочленів Чебишева. Вони є ортогональними на проміжку [-1,1]. На цьому ж проміжку побудовані і біортогональні системи функцій. Технологічні об'єкти ГТС мають довільні скінченні розміри в просторових координатах. У зв'язку з цим відповідні задачі математичної фізики, які описують процес масопереносу, необхідно звести до проміжку біортогональності лінійною заміною. Як відомо, лінійна заміна координат не змінює типу рівнянь

До основних проблем застосування існуючих методів розв'язування прикладних задач масопереносу можна віднести:

- відсутність аналітичного подання вхідних даних, які часто відомі тільки в нерегулярних точках з невисокою точністю (зокрема задачі масопереносу та фільтрації газу в підземних сховищах), це обмежує застосування числових методів до розв'язування певного класу задач, зокрема виявлення витоків газу;
- необхідність забезпечення адаптації математичних моделей до реальних фізичних процесів на основі розв'язування обернених задач з використанням апріорної інформації;
- необхідність забезпечення в певних випадках високої точності кінцевого результату в довільних точках як за часом, так і за координатами;
- оскільки задачі такого класу є некоректними і їх необхідно регуляризувати, а способів регуляризації є, в основному, два (побудова регуляризуючого оператора, яка зводиться до необхідності ітераційного розв'язування рівняння Абеля та неявна регуляризація, яка полягає в утриманні малої кількості доданків в ортогональних розкладах), то на практиці можна використовувати тільки неявну регуляризацію. Останнє вимагає побудову та застосування швидкозбіжних рядів в крайових задачах.

Модель 1. Модель процесу руху газу в трубопроводі.

Рух газу в трубопроводі, що знаходиться в ґрунті, при відповідних початково-крайових умовах в нестационарному неізотермічному режимі описується нелінійною взаємозв'язаною системою диференціальних рівнянь в частинних похідних

$$\begin{cases} \frac{\partial p(y,t)}{\partial y} + \frac{\partial \omega(y,t)}{\partial t} + c_3 p(y,t) = -c_4, \\ \frac{\partial \omega(y,t)}{\partial y} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial p(y,t)}{\partial t} = 0. \end{cases}$$

Граничні та початкові умови залаються у вигляді

$$q_0(t) = q_{0n} + (q_0 - q_{0n})e^{-\gamma_0 t}; \quad q_l(t) = q_{ln} + (q_l - q_{ln})e^{-\gamma_l t}$$

та

$$p(y,0) = \sqrt{p_0^2 - \frac{\chi z R T}{D} \left(\frac{\rho_s q_s}{s_0} \right)^2} y$$

Розв'язок задачі знайдено наближено-аналітичним методом, який полягає в тому, що шуканий розв'язок за координатою подається у вигляді ряду за біортогональними многочленами, а для знаходження коефіцієнтів, що залежать від часу, отримуються звичайні диференціальні рівняння

$$\omega_n(x,t) = e^{-\frac{lc_3 2x-l}{4} \frac{n+2}{l}} \sum_{i=1}^{n+2} V_i^{n+i} \left(\frac{2x-l}{l} \right) G_i(t),$$

$$p_n(x,t) = -\frac{2c^2}{l} e^{-\frac{lc_3 2x-l}{4} \frac{n+2}{l}} \sum_{i=1}^{n+2} \left(-\frac{lc_3}{4} V_i^{n+i} \left(\frac{2x-l}{l} \right) + \right.$$

$$\left. + U^{n-i} (-1)^i \left(\frac{2x-l}{l} \right) \right) \int_0^t G_i(t) dt + p(x,0),$$

де $G_i(t)$ - розв'язки системи, яка складається з n неоднорідних лінійних рівнянь другого порядку з сталими коефіцієнтами,

Наближений методом відрізняється від наближено-аналітичного тим, що у вигляді шуканий розв'язок подається у вигляді подвійного ряду за координатою і часом

$$\tilde{\omega}_n(x,t) = e^{-\frac{lc_3 2x-l}{4c_0} \frac{n+2}{l}} \sum_{i=1}^{n+2} V_i^{n+i} \left(\frac{2x-l}{l} \right) \sum_{j=0}^s q_{ij} L_j(t),$$

$$\tilde{p}_n(x,t) = -\frac{2c^2}{l} e^{-\frac{lc_3 2x-l}{4c_0} \frac{n+2}{l}} \sum_{i=1}^{n+2} \left(-\frac{lc_3}{4c_0} V_i^{n+i} \left(\frac{2x-l}{l} \right) + \right.$$

$$\left. + U^{n-i} (-1)^i \left(\frac{2x-l}{l} \right) \right) \sum_{j=0}^s q_{ij} [L_j(t) - L_{j+1}(t)] + p(x,0).$$

Результати обчислень подані в таблицях 1 та 2.

TABLE I. ЗНАЧЕННЯ ТИСКУ ЗА РІЗНИХ ЗНАЧЕНЬ ЧАСУ t , КООРДИНАТИ x ТА n (t У СЕКУНДАХ)

t	$x = 10000$	$x = 30000$	$x = 60000$	$x = 90000$
	$n = 2, 20(2)$	$n = 2, 20(2)$	$n = 2, 20(2)$	$n = 2, 20(2)$
0	68.93	66.74	63.31	59.68
600	68.92	66.73	63.30	59.68
3600	68.83	66.64	63.22	59.60
4200	68.82	66.63	63.21	59.59
6000	68.80	66.62	63.20	59.58

Результати наближеного методу

TABLE II. ЗНАЧЕННЯ МАСОВОЇ ВИТРАТИ ЗА РІЗНИХ ЗНАЧЕНЬ ЧАСУ t , КООРДИНАТИ x ТА $n = 10$ (t У ГОДИНАХ)

t	$x = 10000$	$x = 30000$	$x = 60000$	$x = 90000$
0	396.11	396.17	396.18	396.12
0.5	427.41	427.68	428.07	428.45
1.0	436.35	436.50	436.71	436.92
1.5	438.91	438.97	439.06	439.14
2.0	439.64	439.66	439.69	439.72
2.5	439.81	439.79	439.76	439.73
3.0	438.09	436.96	435.24	433.45
3.5	395.17	367.27	324.85	281.36

Модель 2. Знаходження розподілу тиску у воді.

Розглядається безмежний шар товщини l , $0 < y < l$. Значення тисків на границях рівні $\varphi_1(t)$ та $\varphi_2(t)$. Початковий тиск $f(x)$. Розрахунок розподілу тиску води $p(y,t)$ у плоскому безмежному середовищі товщини l визначається як розв'язок одновимірного рівняння фільтрації [2, 4]

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{kh}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g \right) \right] = 2\alpha m h \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1)$$

де k — проникність пласту, μ — динамічна в'язкість води, α — коефіцієнт водонасиченості, m — пористість пласту. Оскільки товщина пласту є незначною і вважається сталою, то рівняння (1) матиме вигляд

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 2\alpha m \frac{\partial p}{\partial t}. \quad (4)$$

Крайовими умовами будемо вважати наступні: на нижній границі шару тиск можна вважати сталим, рівним гідростатичному p_n води; на верхній границі значення тиску розраховується на основі гідравлічної ув'язки ГЗП — вибійна зона — ГВК [1, 2, 3] і також вважається сталим p_v .

Початковий розподіл тиску води у водяному шарі

$$p(y,0) = \rho g (h_0 + y), \quad 0 < y < l.$$

h_0 - висота стовпа води, який підтримує тиск у підшовній воді;

Розв'язок задачі знайдено наближено-аналітичним методом у вигляді

$$P_n(x, t) = \sum_{i=1}^{n+2} V_i^{n+i} \left(\frac{2x-l}{l} \right) \left(\frac{\bar{c}_{1+i}^{i+(-1)^{i+1}} \pi}{2^{2i+2} N_i^n} (\varphi_2 + (-1)^i \varphi_1) \times \right. \\ \left. \times \left(1 - \exp \left(-\frac{4k}{l^2 \lambda_{i+(-1)^{i+1}}^n} t \right) \right) + G_i(0) \exp \left(-\frac{4k}{l^2 \lambda_{i+(-1)^{i+1}}^n} t \right) \right)$$

Обчислювальний експеримент проводився на експериментальних даних: $k = 4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-2}$, $h_0 = 541 \text{ (м)}$, $\mu = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ (м}^2/\text{с)}$, $\alpha_g = 0,8$, $m = 0,28$, $g = 9,8 \text{ (м/с}^2)$, $p_0 = 6,864655 \text{ (МПа)}$, $\rho = 998 \text{ (кг/м}^3)$, $p_1 = 5,3936575 \text{ (МПа)}$

TABLE III. ЗНАЧЕННЯ ТИСКУ ВОДИ У БЕЗМЕЖНОМУ ШАРІ ТОВЩИНИ $l = 10 \text{ м}$ ЗА РІЗНИХ ЗНАЧЕНЬ ЧАСУ $t \text{ (год)}$ І КООРДИНАТИ $x \text{ (м)}$ ПРИ $n = 10$

t	$x=0$	$x=1$	$x=3$	$x=5$	$x=7$	$x=9$	$x=10$
72	70.	68.10	64.45	61.21	58.46	56.10	55.0
0	00	24	97	56	21	38	0
14	70.	68.45	65.36	62.33	59.36	56.45	55.0
40	00	02	97	90	97	02	0
21	70.	68.49	65.48	62.47	59.48	56.49	55.0
60	00	38	37	98	37	38	0
28	70.	68.49	65.49	62.49	59.49	56.49	55.0
80	00	92	80	75	80	92	0

Висновки.

Побудовано аналітично-наближені та наближені методи для вирішення задач математичної фізики у базисі біортогональних поліномів. Вивчено вплив параметрів методів, зокрема порядку часткової суми, розрядної сітки та похибки обчислення на точність отриманих розв'язків. На базі розробленого методу побудовано адаптивні алгоритми розрахунку режимних параметрів масопереносу в технологічних об'єктах ГТС. Зокрема, знайдений розподіл тиску у підшовній воді дає можливість оцінити кількість газу. Розчиненого у воді та швидкість підняття газоводяного контакту.

Однією з задач, яка вимагає знати розподіл тиску в довільних як завгодно близьких точках і в довільний час є визначення наявних витоків газу. Якщо витік газу моделювати звуваючим пристроєм, то масова витрата газу $\omega = \rho v$, яка проходить через звуження площею S визначається наступним чином

$$\omega = k_q S \sqrt{2k p_{z1} \rho_{z1} \left[(p_{z2}/p_{z1})^{\frac{2}{k}} - (p_{z2}/p_{z1})^{\frac{k+1}{k}} \right] / (k-1)},$$

де k_q – коефіцієнт врахування впливу багатьох факторів і відома емпірична формула його розрахунку, k – показникадіабати, p_{z1} , ρ_{z1} – тиск і густина газу справа, а p_{z2} – тиск зліва від звуваючого пристрою.

При фільтрації води чи газу у вертикальному напрямку маємо

$$v = -k (\partial p / \partial z + \rho g) / \mu,$$

де $p = p(x_1, x_2, x_3, t)$ – розподіл тиску в середовищі, ρ – густина флюїду, g – прискорення вільного падіння, k – коефіцієнт проникності середовища, μ – динамічна в'язкість флюїду.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Прутула Н.М., П'янило Я.Д., Прутула М.Г. Підземні сховища газу (математичні моделі та методи). — Львів: РАСТР-7, 2015.-266 с.
- [2] П'янило Я.Д., Ваєричук П.Г. Визначення швидкості руху газоводяного контакту в процесі роботи підземних сховищ газу. – 2013. – Вип.18. – С. 165–172.
- [3] Корнейчук Н. П. Точные константы в теории приближения. – М.: Наука, 1987. – 424с.
- [4] Ландош К. Практические методы прикладного анализа. – М.: Гос. изд-во. физ.- мат. лит., 1961. – 524 с.
- [5] П'янило Я. Д., Собко В. Г. Побудова та дослідження біортогональних поліномів на базі многочленів Чебишева // Прикл. проблеми мех. і мат. — 2013. — Вип. 11. — С. 135-141.
- [6] Я. П'янило, В. Собко Дослідження властивостей спектральних розкладів у базисах ортогональних, квазіортогональних і біортогональних поліномів // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. — 2014. — Вип. 19. — С. 146-156.
- [7] П'янило Я.Д. Проекційно-ітераційні методи розв'язування прямих та обернених задач переносу. – Львів: Сплاین, 2011. – 248 с.

Вибір Точок Спостереження в Задачах Ідентифікації Дефектів в Тонкостінній Системі

Наталія Гук

Кафедра комп'ютерних технологій
Дніпровський національний університет
імені О. Гончара
Дніпро, Україна

Наталія Степанова

Кафедра комп'ютерних технологій
Дніпровський національний університет
імені О. Гончара
Дніпро, Україна
nist66@gmail.com,

Selection of Observation Points in Problems of Identification of Defects in a Thin-Walled System

Natalia Guk

Department of Computer Technology
Dnipro National University named after O. Gonchar
Dnipro, Ukraine

Natalia Stepanova

Department of Computer Technology
Dnipro National University named after O. Gonchar
Dnipro, Ukraine
nist66@gmail.com,

Keywords—identification method, defects in a thin plate, inverse problem, finite element method, points of observation.

I. ВСТУП

Анотація—В роботі запропоновано підхід до вибору точок спостереження в задачах ідентифікації локальних дефектів в тонкій пластині в припущенні про існування найбільш інформативних даних про її деформування. Задача ідентифікації дефектів формулюється як обернена задача в умовно-коректній постановці. У якості характеристик напружено-деформованого стану системи розглядаються значення деформацій, що отримані при розв'язанні прямої задачі деформування системи з відомими параметрами. Для дискретизації невідомих функцій прямої та оберненої задач використовується метод скінченних елементів. Формулюється алгоритм вибору інформативних точок вимірювань. Наводяться результати процесу ідентифікації жорстких включень в пластині, які було отримано на основі рівномірної сітки спостережень та сітки, побудованої з використанням підходу що пропонується.

Abstract—The paper proposes an approach to the selection of points of observation in the problems of identifying local defects in a thin plate under the assumption of the existence of the most informative data about its deformation. The task of identifying defects is formulated as an inverse problem in conditionally correct formulation. The characteristics of the stress-strain state of the system consider the deformation values obtained when solving the direct problem of deforming the system with known parameters. For the discretization of unknown functions of direct and inverse tasks, the finite element method is used. The algorithm of the choice of informational points of measurement is formulated. The results of the process of identification of hard inclusions in the plate, which were obtained on the basis of a uniform observation grid and a grid constructed using the proposed approach, are presented.

Ключові слова—метод ідентифікації, дефекти у тонкій пластині, обернена задача, метод скінченних елементів, точки спостережень.

Для прогнозування ресурсу тонкостінних металевих конструкцій, які перебувають в процесі експлуатації під впливом зовнішніх чинників різної природи (механічні і температурні поля, локальні силові дії та ін.), особливе значення мають задачі виявлення в них дефектів у вигляді жорстких включень, тріщин. Наявність в системі подібних дефектів призводить до виникнення концентрації напружень, що може привести до руйнування. Для виявлення дефектів можуть бути застосовані як методи неруйнівного контролю, так і аналітичні методи, наприклад, метод обернених задач.

У роботах [1]-[3] запропоновано аналітичний підхід до ідентифікації дефектів в тонкій пластині, який базується на теорії обернених задач та методах умовної оптимізації. Даний підхід дозволяє визначити місце розташування дефектів та їх характеристики за результатами спостережень за напружено-деформованим станом тонкостінної системи в процесі експлуатації.

Напружено-деформований стан, який виникає в пластинчастої системі при наявності зосереджених збурень, є істотно неоднорідним і характеризується швидким зменшення рівня деформацій при віддаленні від місця розташування дефекту. Тому при розв'язанні задачі ідентифікації дефектів необхідно здійснювати вибір місця розташування точок спостереження, тобто вибирати оптимальні параметри сітки спостережень.

Після проведення численних експериментів було встановлено, що місце розташування і кількість точок спостереження істотно впливають на обумовленість оберненої задачі, а також на точність і регулярність її

розв'язку. Це пов'язано з тим, що кількість вузлів сітки спостережень визначає розмірність матриці оберненої задачі, значні розміри якої призводять до накопичення обчислювальної похибки. При істотному згущуванні сітки сформована матриця містить близькі за значеннями елементи, а, отже, стає можливим її виродження.

У даній роботі з метою вибору найбільш інформативних вимірювань було використано підхід, заснований на мінімізації дисперсії оцінки параметра по запланованим вимірам при збереженні її спроможності [4].

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Розглядається пластинчатая система, яка займає кінцеву область $\Omega = \{X \mid X = (\xi_1, \xi_2) \in R^2, -a \leq \xi_1 \leq a; -b \leq \xi_2 \leq b\}$ з границею Γ . Товщина пластини h , $h \ll a, b$. Пластина знаходиться під дією розподіленого навантаження q , яке прикладено нормально до поверхні пластини. У довільних місцях на поверхні пластини є дефекти, внаслідок чого властивості системи в цих точках змінюються стрибкоподібно. За результатами спостереження за значеннями вектора деформацій $\varepsilon_p^* = \{\varepsilon_{ij_p}^*\}, i, j = 1, 2$, які було вимірювано в кінцевому числі точок X_p , $p = \overline{1, P}$, потрібно визначити місця розташування дефектів та їх характеристики.

З використанням підходу, який запропоновано в [1], вектор-функція оберненої задачі $H(X) = \{H_n\}$, $n = \overline{1, N}$, що характеризує місця розташування дефектів в пластині, визначається з умови мінімуму функціоналу

$$h(U, H, \Psi) = J(U(X), H(X)) + \int_{\Omega} \varphi_0(X) \left(\sum_{n=1}^N H_n(X) - 1 \right) d\Omega + \sum_{p=1}^N \lambda_p \int_{\Omega} (\varepsilon_{ij_p}(H(X)) - \varepsilon_{ij_p}^*) d\Omega \quad (1)$$

де $J(U(X), H(X))$ – функціонал повної енергії пластини що деформується; $U(X) = \{u_1, u_2, w\}$ – вектор-функція переміщень точок пластини; $\Psi = (\varphi_0(X), \lambda)$, $\Psi \in \overline{\Psi}$; $\varphi_0(X)$ – дійсна функція, визначена на області Ω зі значеннями в гільбертовому просторі $L_{2\Omega}$; $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p\}$, $p = \overline{1, N}$ – N -мірний вектор дійсних чисел, $\lambda \in \overline{\Lambda}$, $\overline{\Lambda} = \left\{ \lambda, \lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p\}, p = \overline{1, N}, \lambda_l \in E_N, l = \overline{1, p} \right\}$; $\overline{\Psi} = \overline{\Lambda} \times L_{2\Omega}$.

Вектор-функція оберненої задачі $H(X) = \{H_n\}$, $n = \overline{1, N}$, подається у вигляді:

$$H_n(X) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } Y_n(U) + \varphi_0(X) + \lambda_n \varepsilon_{ij_n} > 0 \\ 1, & \text{якщо } Y_n(U) + \varphi_0(X) + \lambda_n \varepsilon_{ij_n} < 0 \end{cases}$$

$$\text{і } \text{mes}(X \in \Omega : Y_n(U) + \varphi_0(X) + \lambda_n \varepsilon_{ij_n} = 0) = 0,$$

де $Y_n(U)$ формується з доданків функціоналу повної енергії, які залежать від параметрів моделі $H(X)$.

Для розв'язання задачі ідентифікації дефектів в системі що розглядається з використанням методу скінченних елементів виконується дискретизація області Ω , яка займається пластиною. Для опису невідомих функцій прямої й оберненої задач вводяться такі сітки:

- сітка з вузлами $X_n = (\xi_{1n}, \xi_{2n})$, $n = \overline{1, N}$, для опису невідомих функцій прямої задачі;
- сітка з вузлами $X_p = (\xi_{1p}, \xi_{2p})$, $p = \overline{1, P}$, для опису координат точок вимірювань компонент вектора деформацій $\varepsilon_p^* = \varepsilon(X_p)$;
- сітка з вузлами $X_k = (\xi_{1k}, \xi_{2k})$, $k = \overline{1, K}$, для опису координат точок пластини, в яких розташовані дефекти. Всі вузли X_p , X_k , вибираються з числа X_n і знаходяться в середині області Ω .

Для розв'язання задачі ідентифікації необхідно здійснити вибір найбільш інформативних точок спостереження γ_p .

III. МЕТОД РОЗВ'ЯЗАННЯ

Для визначення відповідних точкам γ_p вузлів скінченно-елементної сітки X_p , $p = \overline{1, N}$, формулюється умова, аналогічна [5]:

$$J = \sum_r (H - H(\gamma_p))^r (H - H(\gamma_p)) \rightarrow \min, \quad (2)$$

де $H(\gamma_p)$ – вектор невідомих оберненої задачі, обчислений з використанням при побудові функціоналу-нев'язки інформативного вектора спостережень; H – вектор, який було визначено з використанням повного вектора спостережень (використовуються всі вузли сітки спостережень X_p , $p = \overline{1, N}$).

Для визначення інформативних компонент вектора спостережень ε_p^* пропонується подати вектор $\Delta(H) = \{\Delta_p\} = \{\varepsilon(X_p, H) - \varepsilon_p^*\}$, що визначає функціонал-нев'язку оберненої задачі, у вигляді двох незалежних векторів Δ^1 , Δ^2 розмірності $N_1 \times 1$, $N_2 \times 1$, відповідно $N_1 + N_2 = N$ (для визначеності будемо вважати, що компоненти вектора Δ^1 обчислені в інформативних точках спостережень γ_p).

Для формування векторів Δ^1 , Δ^2 вводяться функції належності u_p^r , $p = \overline{1, N}$, $r = 1, 2$ компонент вектора Δ векторам Δ^1 і Δ^2 у вигляді:

$$u_{p_1}^1(X) = \delta(X - X_{p_1}); p_1 \in I^1, \quad I^1 = \{p_1, \dots, p_{1N_1}\};$$

$$u_{p_2}^2(X) = \delta(X - X_{p_2}); p_2 \in I^2, \quad I^2 = \{p_{2N_1+1}, \dots, p_{2N}\};$$

$$I^1 \cap I^2 = \emptyset,$$

де $\delta(X - X_{p_r})$ – функція Дірака; N_1 – задана кількість ненульових компонент вектора Δ^1 .

Для опису векторів Δ^1 і Δ^2 використовується подання:

$$\Delta^1 = \int_{\Omega} D_1 \Delta d\Omega; \Delta^2 = \int_{\Omega} D_2 \Delta d\Omega,$$

де D_r , $r=1,2$ – матриці, що враховують належність компонент вектора Δ векторам Δ^1 і Δ^2 , і сформовані у вигляді:

$$[D]_{N \times N} = \text{diag}\{\delta(X - X_p)\}, p = \overline{1, N};$$

$$[D_1]_{M \times M} = \text{diag}\{u_{p_1}^1\}; [D_2]_{M \times M} = [D] - [D_1].$$

З урахуванням введених подань функціонал (2) в матричній формі матиме вигляд:

$$J_1(Q_1, Q_2) = \int_{\Omega} \left[Q_1 \ Q_2 \right] \begin{bmatrix} \Delta^1 \\ \Delta^2 \end{bmatrix} - \left[Q_1 \ 0 \right] \begin{bmatrix} \Delta^1 \\ 0 \end{bmatrix} \right)^T \times$$

$$\times \left(\begin{bmatrix} Q_1 \ Q_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta^1 \\ \Delta^2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Q_1 \ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta^1 \\ 0 \end{bmatrix} \right) d\Omega \rightarrow \min \quad (3)$$

де $Q_r = [Q_{mn} \cdot \delta(X)]$, $m = \overline{1, M}$, $n = \overline{1, N_r}$, $r = 1, 2$ – невідомі матриці. Вказані матриці дозволяють визначити розбиття вектора Δ на складові Δ^1 і Δ^2 .

Потрібно знайти вид матриць, що забезпечують мінімізацію функціоналу (3), при цьому за аналогією з [4], необхідно виконати умови незсуненості:

$$R_r Q_r - [I]_{N_r \times N_r} = [0]_{N_r \times N_r} \quad (4)$$

та інваріантності оцінювання:

$$R_k Q_r = [0]_{N_k \times N_r}; \quad k \neq r; \quad k, r = 1, 2, \quad (5)$$

де $[I]$ і $[0]$ – одинична і нульова матриці відповідної розмірності; $R_r = [R_r]_{M \times N_r}$ – матриці, які сформовано з ненульових елементів, матриць $[G]_{M \times N}^T \cdot [D_r]_{N \times N}$.

Умови (4), (5) приєднуються до функціоналу (3) з використанням множників Лагранжа $\bar{\psi}^T = \{\bar{\psi}_r\}$, $\bar{\eta}^T = \{\bar{\eta}_r\}$:

$$J_2(Q_1, Q_2, \bar{\psi}, \bar{\eta}) = J_1(Q_1, Q_2) +$$

$$+ \int_{\Omega} \sum_r \bar{\psi}_r g_r d\Omega + \int_{\Omega} \sum_r \bar{\eta}_r f_r d\Omega, \quad (6)$$

$$g_r = Q_r R_k; \quad f_r = I_r - Q_r R_r; \quad r \neq k; \quad r \leftrightarrow k; \quad r, k = 1, 2.$$

Оскільки функції u_p^r належності компонент вектора Δ векторам Δ^r , $r=1,2$ обмежені $u_p^r \in \{0,1\}$, $p = \overline{1, N_r}$, і множина U подається у вигляді $U = \{u_p^r\} = \{(u_1^r, u_2^r \dots u_{N_r}^r) \mid u_p^r \in \{0,1\}, p = \overline{1, N_r}\}$, функція

$L(u) = \sum_{p=1}^{N_r} J'_{2u_p} u_p^r$ досягає своєї нижньої грані на U в точці $\bar{u}^r = \{\bar{u}_1^r, \dots, \bar{u}_{N_r}^r\}$, де

$$\bar{u}_p^r = \frac{1}{2} [1 - \text{sign}(\psi_{kp}^T R_r^T Q_{kp} - Q_{kp}^T R_k \eta_{kp})]. \quad (7)$$

Таким чином, з (7) можна визначити належність p -ої компоненти вектора Δ , $p = \overline{1, N}$ вектору Δ^1 або Δ^2 . Матриці Q_1, Q_2 і множники Лагранжа ψ_{rp}, η_{rp} визначаються з необхідних умов оптимальності функціонала (6).

IV. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Запропонований підхід до вибору точок вимірювань оберненої задачі було застосовано при розв'язуванні задачі ідентифікації жорстких включень в тонкій пластині.

Розглядалася тонка сталевая пластина $2a \times 2b$, $a/b = 1$ товщини h , $a/h = 50$. Модуль Юнга матеріалу $E_0 = 2 \cdot 10^5$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0.3$. Пластина перебувала під дією нормальної розподіленого навантаження $q = 90$ МПа. На всіх краях пластини були реалізовані умови жорсткого защемлення.

Були розглянуті задачі ідентифікації у пластині двох включень різного розміру і групи дрібних включень (рис.1). Місцезнаходження і площа кожного з двох включень (рис.1 а) і області групи включень (рис.1 б) задані координатами лівих нижніх і правих верхніх кутів.

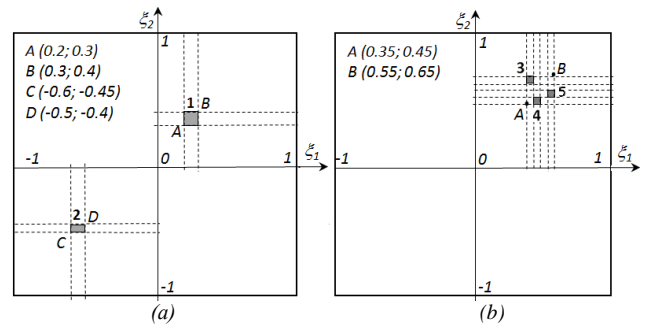


Рис. 1. Моделі пластин с включениями: (а) – модель с двумя включениями різного розміру; (б) – модель с групою включень

Виміряні значення ε_p^* визначалися з розв'язання прямої задачі з наступними пружними характеристиками включень: модуль Юнга $E^* = 1 \cdot 10^6$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0.3$.

Для аналізу впливу вибору сітки вимірів на характер та результати процедури визначення місць розташування включень та їх пружних властивостей виконано порівняння результатів ідентифікації включень у пластинчастій системі з використанням сітки, побудованої відповідно до умови (2) – сітка типу I, з результатами ідентифікації, які були отримані для рівномірної сітки – сітка типу II.

Вузли сітки типу I були розташовані нерівномірно і наближені до областей, в яких спостерігалася неоднорідність властивостей пластинчастої системи. Точки вимірювань сітки типу II обиралися в напрямках осей ξ_1, ξ_2 на інтервалі $[-0.8; 0.8]$ з кроком $h = 0.2$.

Кількість вузлів обох сіток була однаковою. Результати експерименту надані в таблиці I.

TABLE I. Порівняльний аналіз результатів ідентифікації включень при застосуванні в розрахунках різних сіток вимірів

Номери включень	Тип сітки	Визначення місцезнаходження включень: кількість ітерацій	Уточнення пружних характеристик	
			кількість ітерацій	похибка відновлення, %
1, 2	I	4	4	2.08
	II	6	6	2.21
3, 4, 5	I	5	7	2.37
	II	7	9	2.44

На рис. 2 з використанням логарифмічної шкали наведено результати, які характеризують залежність відносної похибки наближення значень деформацій $\varepsilon(X, H)$ в точках X_p , $p = \overline{1, P}$, до значень ε_p^* для деформівних систем з включеннями що розглядаються в залежності від кількості точок вимірювань. При побудові зазначених залежностей були використані рівномірно розподілені по поверхні пластини сітки вимірів.

Безперервна лінія відповідає результату ідентифікації включень 1 і 2, пунктирна - групи включень 3-5. Маркерами на кожній кривій показані значення, які було отримано з використанням запропонованої в роботі процедури вибору інформативних точок вимірювань для кожної з розглянутих задач ідентифікації.

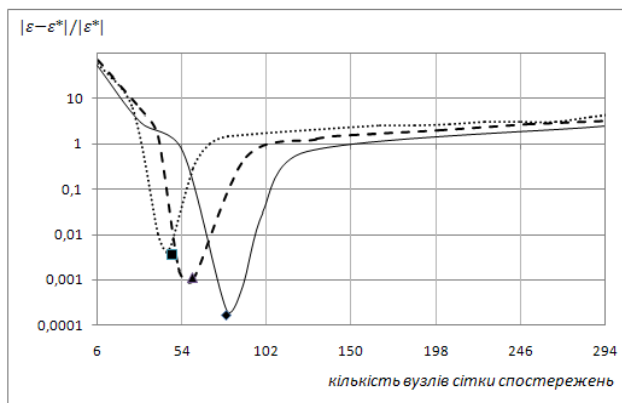


Рис. 2. Залежність відносної похибки наближення до спостережуваних значень від кількості точок спостереження

З аналізу наведених залежностей можна зробити висновок, що для розглянутих пластинчастих систем з включеннями існує область значень кількості вузлів сітки вимірювань (50-100 вузлів), в якій відносна похибка визначення $\varepsilon(X, H)$ за вісьмирами ε_p^* мінімальна. При цьому значення функціоналу оберненої задачі відповідають критеріям виходу з ітераційної процедури методу ідентифікації. Зі збільшенням кількості точок вимірювань спостерігається зростання відносної похибки, що пов'язано з погіршенням обумовленості матриці. Це призводить до більшої похибки відновлення невідомих функцій оберненої задачі.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

[1] Н.А. Гук, Идентификация геометрических параметров и упругих свойств жестких включений в тонкой пластине / Н.А. Гук, Н.И.

Степанова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – Том 2, № 7 (80), С.4-9.

[2] Н.А. Гук, Идентификация точечных силовых воздействий в тонкостенных системах / Н.А. Гук, Н.И. Степанова // «Проблемы численной механики и прочности конструкций». – Дн-ськ: Ліра. – 2015. – Вип. 24 - С. 58 - 72.
 [3] Н.А. Гук, Нелинейное деформирование сжато-изогнутой пластины с разрезом / Н.А. Гук, Н.И. Степанова // Вісник Запорізького національного університету. Сер.: «Фізико-математичні науки». - 2016. - №2. - С. 89-102.
 [4] Л. Льюнг, Идентификация систем. Теория пользователя / Л. Льюнг. – М.: Наука, 1991. – 431 с.
 [5] Н.И. Ободан, Декомпозиционный подход к решению обратных задач деформирования тонкостенных оболочек и пластин / Н.И. Ободан, Н.А. Гук // Вісник ДНУ, серія «Механіка». – Д.: изд. ДНУ. – 2009. – Т. 2 вип. 13, № 5. – С. 102-112.

Комбінаторика та Задачі Семантики

Тимофієва Н.К.

відділ комплексних досліджень інформаційних технологій
МННЦІТІС НАН та МОН України

Київ, Україна

TymNad@gmail.com

Combinatorics and Problems of Semantics

Tymofijeva N.K.

integrated research department of information technology
ISTCITS of NAS and MES of Ukraine

Kiev, Ukraine

TymNad@gmail.com

Анотація—Описано задачі штучного інтелекту, які можуть бути задачами із семантики. Це –розпізнавання мовлення, клінічна діагностика тощо. Показано, що вони зводяться до задач комбінаторної оптимізації, аргументом цільової функції в яких є комбінаторні конфігурації різних типів. Також в деяких задачах цього класу останні можуть бути і вхідними даними.

Abstract—The article describes the problems of artificial intelligence, which may also be problems of semantics. These are recognition problems (speech recognition, clinical diagnostics), translation of texts, comparison of texts to plagiarism, cryptography. For some problems, mathematical models are constructed using combinatorial optimization. The argument of the objective function in them is combinatorial configurations of different types. It is shown that the specified problems by the number of variables are divided into subproblems. Each of these subproblems is solved by independent algorithms that work as built-in procedures in the iterative mode. That is, for their solution, they need to develop hybrid algorithms. In some problems of this class combinatorial configurations can be not only the argument of the objective function, but also the input data.

The analysis of the specified problems for their belonging to semantics is carried out, some properties are revealed, by which the process of solving these problems is difficult to automate. That is, when establishing the essence of an object, they can easily be automated or such approaches have not yet been found. It is shown that speech recognition is performed by comparing the input signal with the reference without the analysis of the essence of the word or sentence. This problem refers to artificial intelligence, but it is not a problem semantic. The problems of recognition multidirectional speech, speech recognition of male, female and child voices relate to problems of semantics, because they examine the given object in the content. For these problems, approaches have been developed to automate the establishment of the essence. The problem of clinical diagnosis refers to artificial intelligence and to problems of semantics, since it involves the establishment of certain features of the disease, that is, the essence of the given object is established. For this problem, rules have been developed

for automatically installation its contents. The problem of comparing texts to plagiarism is a problem of semantics, but the process of establishing the essence of two texts can not always be automated. The problem of cryptography and decoding of forgotten scripts relate to semantics, but they are not always subject to automation.

Ключові слова—семантика, семантичний аналіз, розпізнавання мовлення, багатодикторне мовлення, клінічна діагностика

Keywords—Semantics, Semantic Analysis, Speech Recognition, Multidirectional speech, Clinical diagnosis

I. ВСТУП

Як відомо, семантика – наука, яка вивчає смисл слів, речення, а в інших науках – певні об'єкти з точки зору їхньої суті. Вона має місце в різних галузях: мовознавстві, комп'ютерних науках, зокрема і в штучному інтелекті. Як інструмент для її вивчення використовують семантичний аналіз, який встановлює значення об'єкта, що розглядається. Для побудови моделей задач цього класу використовують семантичне моделювання.

Як правило, до цього напрямку відносять проблеми, пов'язані з мовознавством. В штучному інтелекті розглядаються задачі, які потребують встановлення суті предмета, але способи до їхнього розв'язання не завжди дозволяють автоматизувати процес досягнення поставленої мети. Нижче виділимо задачі штучного інтелекту, які відносяться до семантики, та визначимо, чи існують способи автоматизувати процес їхнього розв'язання.

Оскільки багато задач цього класу моделюються з використанням комбінаторики та комбінаторної оптимізації, розглянемо комбінаторні конфігурації. Як показує практика, аргументом в цих задачах є різні типи вибірок як з повтореннями так і без повторень.

II. КОМБІНАТОРНІ КОНФІГУРАЦІЇ

Комбінаторною конфігурацією назвемо будь-яку сукупність елементів, яка утворюється з усіх або з деяких елементів заданої множини $A = \{a_1, \dots, a_n\}$ [1]. Позначимо її впорядкованою множиною $w^k = (w_1^k, \dots, w_{\eta^k}^k)$. Верхній індекс k ($k \in \{1, \dots, q\}$) в w^k – порядковий номер w^k в W , q – їхня кількість. Множину $A = \{a_1, \dots, a_n\}$ назвемо базовою. Під символом $w_i^k \in A$ розуміємо як окремі елементи, так і підмножини (блоки), $\eta^k \in \{1, \dots, n\}$ – кількість елементів у $w^k \in W$. Залежно від умови задачі η позначатимемо без індексу або з верхнім індексом η^k . Дві нетотожні комбінаторні конфігурації w^k та w^i назвемо ізоморфними, якщо $\eta^k = \eta^i$.

Як було оговорено, в прикладних задачах штучного інтелекту аргументом цільової функції виступають різні типи вибірок. З поняттям вибірки пов'язують як саму операцію виділення підмножин заданої множини, так і її результат: вибрану підмножину. В подальшому маємо на увазі друге поняття.

Нехай задано базову множину $A = \{a_1, \dots, a_n\}$. З неї одержимо η -вибірку. Число η називають об'ємом вибірки. В η -вибірках в залежності від умови задачі або ураховується порядок розташування в них елементів (тоді їх називають η -перестановками або η -розміщеннями) або не ураховують. У цьому випадку вони називаються η -сполученнями.

Отже існують такі типи вибірок: упорядковані та неупорядковані. Неупорядковані це – сполучення без повторень і сполучення з повтореннями. Упорядковані це – розміщення з повтореннями і розміщення без повторень. Множина будь-якого типу вибірок складається з підмножин ізоморфних вибірок. В задачах розпізнавання та синтезу мовленнєвих сигналів, клінічній діагностиці аргументом цільової функції є сполучення та розміщення без повторень.

Закономірність зміни значень цільової функції в задачах комбінаторної оптимізації залежить від упорядкування комбінаторних конфігурацій (аргументу) $w \in W$. Розглянемо структуру їхньої множини W . Підмножину $W_\eta \subset W$ назвемо підмножиною ізоморфних комбінаторних конфігурацій, якщо її елементи – ізоморфні комбінаторні конфігурації. Множина W складається з підмножин ізоморфних комбінаторних конфігурацій W_η . На підмножині W_η цільова функція змінюється так, як і на множині перестановок. Але на усій множині W вона змінюється однаково незалежно від структури вхідної інформації. В цьому разі виникає ситуація невизначеності, яка пов'язана із структурою аргументу цільової функції.

III. ЗАДАЧІ СЕМАНТИКИ В ШТУЧНОМУ ІНТЕЛЕКТІ

До задач із семантики відносяться розпізнавання мовлення, в яких встановлюється суть слова, речення чи зміст зв'язного тексту. Віднесемо до задач цього класу такі, в яких необхідно встановити суть об'єкта, наприклад за заданими ознаками необхідно визначити певне захворювання в клінічній діагностиці. Виділимо задачі штучного інтелекту, які можна віднести до семантики.

Розпізнавання мовлення – це процес автоматичної обробки мовленнєвого сигналу з метою визначення послідовності слів, яка передається цим сигналом. Вона полягає у знаходженні для вхідного сигналу найбільш правдоподібного еталону з усіх можливих еталонних сигналів [2]. Задача розпізнавання мовлення полягає у знаходженні для сигналу X найбільш правдоподібного еталону E_n з усіх можливих еталонних сигналів. Як видно з математичної моделі, наведеної у [2], задача розпізнавання мовлення досить природно розділяється на дві підзадачі: перебір еталонних сигналів і порівняння еталонного та вхідного сигналів. Оскільки тут має місце перебір варіантів, то вона відноситься до задач комбінаторної оптимізації.

Якщо побудувати математичну модель задачі розпізнавання як задачу комбінаторної оптимізації, то можна побачити, що вона розділяється на дві підзадачі:

а) порівняння еталонного та вхідного мовленнєвих сигналів, аргументом цільової функції в якій є розміщення без повторень;

б) пошук еталонного сигналу, який відповідає вхідному, аргументом цільової функції в якій є сполучення без повторень.

В задачі розпізнавання мовлення має місце порівняння еталону із вхідним сигналом для встановлення слова (речення) яке передає вхідний сигнал. Шляхом порівняння встановлюється дослівна їхня подібність без аналізу на смислове значення слів (речення).

Оскільки, при автоматичному розпізнаванні мовлення не встановлюється значення слова чи речення, то ця задача не відноситься до задач семантики.

Якщо при розпізнаванні мовлення встановлюється смисл слова (речення) то така задача є задачею із семантики, але вона складно піддається автоматизації.

Багатодикторне мовлення. Мовленнєві сигнали, що відповідають одному і тому ж слову, але вимовлені різними дикторами, відрізняються як частотою так і величиною амплітуди [2]. В цьому разі проводиться знаходження для вхідного сигналу найбільш правдоподібного еталону з усіх можливих еталонних сигналів. Але для розпізнавання необхідно проводити адаптацію до голосу нового диктора. Ця задача частково відноситься до семантичного аналізу, оскільки необхідно розпізнати індивідуальний голос. Подамо цю задачу з використанням мультимножин.

Мовленнєвий простір розглядаємо як згорнутий, який містить базову множину A (активні та пасивні органи творення мови), і правила, за якими комбінацією елементів

множини A творяться мовленнєві сигнали (розгорнутий мовленнєвий простір) [3]. Точками мовленнєвого простору є вибірка – розміщення з повтореннями з n елементів $a_s \in A$ по η , в якій урахується порядок елементів, $s, \eta \in \{1, \dots, n\}$. Одне і те ж слово, повторене кілька разів одним і тим же диктором або різними дикторами, відрізняється завдяки тому, що отримані розміщення з повтореннями містять різну кількість елементів. Звідси – нечіткість у вхідних даних. Отже, мовленнєвий сигнал, який є вхідною інформацією, описується комбінаторною конфігурацією (розміщення з повтореннями). Подамо його мультимножиною. Вона формально визначається як пара (A, m) де $m: A \rightarrow N$ функція з A в множину N натуральних чисел, тобто кожному елементу множини A відповідає певне натуральне число, яке називається кратністю цього елемента.

Мовленнєвий сигнал задамо послідовністю $f|_1^{\tilde{n}} = (f_1, f_2, \dots, f_{\tilde{n}})$, де f_j – значення амплітуди у відліку j сигналу. Проведемо його сегментацію на майже періодичні та неперіодичні відрізки. Поточний майже період розділимо на k відліків і опишемо мультимножиною, яку задамо основою $(f|_1^k, m)$, де k – величина, яка визначається експериментально і повинна бути однакою для будь-якого відрізка сигналу. В j -му відліку повинно бути лише одне значення f_j . Еталон, за яким встановлюється подібність майже періоду, моделюється аналогічно. Подібність визначаємо за виразом $|f_j - f_j'| \leq \varepsilon$ та $|m_j - m_j'| \leq \varepsilon'$, де f_j' – значення сигналу еталона у відліку j , m_j' – кратність елемента f_j' , ε , ε' – мінімальні величини, за якими встановлюється подібність вхідного і еталонного сигналів, визначаються експериментально.

Отже ця задача відноситься до семантики та піддається автоматизованому розпізнаванню голосу різних дикторів.

Розпізнавання дитячого, жіночого, чоловічого голосу. Задача розпізнавання дитячого, жіночого, чоловічого голосу проводиться шляхом аналізу сигналу на значення амплітуди, довжини періоду основного тону. Ця задача є розв'язною та піддається автоматизації, оскільки оговорені параметри можна описати достатньо строго. В цій задачі встановлюється суть предмету, тому її можна віднести до задач із семантики.

Задача клінічної діагностики. Побудуємо математичну модель задачі клінічної діагностики як задачу комбінаторної оптимізації [4]. Позначимо $\tilde{A} = \{\tilde{a}_1, \dots, \tilde{a}_n\}$ множину захворювань, описання яких знаходиться в бібліотеці (множина еталонів), де елемент $\tilde{a}_s \in \tilde{A}$, $s \in \{1, \dots, n^*\}$, відповідає певному захворюванню, якому поставлено у відповідність характерні ознаки $V^{(t)} = (v_1^{(t)}, v_2^{(t)}, \dots, v_{q_t}^{(t)})$, q_t – кількість ознак t -го захворювання. Вхідною інформацією в задачі клінічної діагностики є множина ознак $\tilde{V} = (\tilde{v}_1, \tilde{v}_2, \dots, \tilde{v}_{\tilde{q}})$, що описує

одне або кілька захворювань. Позначимо їх $\tilde{B} = \{\tilde{b}_1, \dots, \tilde{b}_{n^*}\}$, де $\tilde{b}_d \in \tilde{B}$ – захворювання, яке потрібно визначити, n^* – кількість можливих захворювань, а $q_t \neq \tilde{q}$ або $q_t = \tilde{q}$. Ознаки $\tilde{v}_r \in \tilde{V}$ вхідної інформації мають той же зміст, що і описані в еталоні ознаки $v_l^{(t)} \in V^{(t)}$, $r \in \{1, \dots, \tilde{q}\}$, $l \in \{1, \dots, q_t\}$.

Задача полягає у знаходженні для \tilde{B} із множиною ознак \tilde{V} найбільш правдоподібного одного або кількох еталонів із множини $\tilde{A} = \{\tilde{a}_1, \dots, \tilde{a}_n\}$, тобто за вхідними ознаками встановлюється одне або кілька захворювань $\tilde{b}_d \in \tilde{B}$. Ознаки в цій задачі відіграють роль критеріїв, за якими оцінюється її розв'язок. Як і в розпізнаванні мовленнєвих сигналів, для розв'язання цієї задачі необхідно провести пошук певного еталону в бібліотеці та порівняти його із вхідними ознаками.

Розглянемо задачу порівняння ознак еталону $V^{(t)} = (v_1^{(t)}, v_2^{(t)}, \dots, v_{q_t}^{(t)})$, які визначають t -е захворювання, та вхідних ознак $\tilde{V} = (\tilde{v}_1, \tilde{v}_2, \dots, \tilde{v}_{\tilde{q}})$, за якими необхідно встановити діагноз. Позначимо $u_l(v_s^{(t)}, \tilde{v}_r)$ елементарну міру подібності між елементами множин \tilde{V} та $V^{(t)}$. Вважаємо, що міри подібності між елементами $v_s^{(t)} \in V^{(t)}$ та $\tilde{v}_r \in \tilde{V}$ є вхідні дані. Їхні числові значення задамо скінченною послідовністю (комбінаторною функцією натурального аргументу, яка залежить від розміщення без повторень). Задача порівняння еталону та вхідних ознак полягає в знаходженні такого розміщення без повторення $w^* = (w_1^{j*}, \dots, w_{q_t}^{j*})$, для якого змодельовані цільові функції набувають максимального значення.

В задачі перебору еталонів $\tilde{A} = \{\tilde{a}_1, \dots, \tilde{a}_n\}$ як ваги між елементами $\tilde{a}_s \in \tilde{A}$ та вхідними даними \tilde{V} виступають значення інтегральних мір подібності, одержаних за заданими цільовими функціями при порівнянні ознак еталону та вхідних ознак.

Задача пошуку бібліотечного еталону, який відповідає вхідному, полягає у знаходженні такого сполучення без повторення, для якого значення часткових критеріїв, за якими оцінюється результат розв'язку, були б найбільшими.

Отже ця задача полягає у знаходженні для множини ознак, які характеризують захворювання пацієнта, найбільш правдоподібного одного або кількох еталонів із множини захворювань. Оскільки в цій задачі встановлюється суть об'єкту, то її віднесемо до задач із семантики.

Порівняння текстів на плагіат. Існуючі програмні засоби порівнюють однакові слова або фрази. Якщо текст збігається з оригіналом, то програми досить просто виявляють плагіат. Якщо суть (значення) тексту, що

аналізується, залишається той же, що і в оригіналі, але переданий іншими фразами (завуальована форма), то при виявленні плагіату необхідно проводити семантичний аналіз обох текстів. Ця задача відноситься до семантики, але існуючими підходами автоматизувати аналіз тексту на суть об'єкта досить складно.

Криптографія, дешифрування забутих писемностей тощо. Криптографія – наука про математичні методи забезпечення [конфіденційності](#), [цілісності](#) і [автентичності](#) інформації. Розвинулась з практичної потреби передавати важливі відомості найнадійнішим чином. Для [математичного](#) аналізу криптографія використовує інструментарій [абстрактної алгебри](#) та [теорії ймовірностей](#). Оскільки при розшифровці текстів необхідно визначати суть закодованого тексту, то ця задача є задачею семантики.

Дешифрування забутих писемностей розділяється на кілька етапів. На початковому об'єкт сприймається без визначення його суті. На другому етапі (розпізнавання) окремо сприймаються і аналізуються складові ознаки об'єкта і визначається суть виявленого об'єкта. Третій етап (інтерпретація) – заключний, найбільш складний етап дешифрування, під час якого аналізуються та узагальнюються кількісні та якісні ознаки. Ця задача є задачею семантики, але смислова сторона дешифрування не завжди піддається автоматизації.

Автоматичний переклад текстів з однієї мови на іншу [5]. Переклад текстів проводиться двома способами: дослівний і художній. В першому підході автоматично узгоджуються слова (речення) відповідно до правил мови, на яку здійснюється переклад. Тут реалізовано, в основному, синтаксис. Тому цей переклад є дослівний без аналізу його на суть і він піддається автоматизації, але не відповідає задачі із семантики. Зазвичай, переклад здійснений таким чином не є якісним. У другому підході для здійснення якісного перекладу необхідно проводити аналіз предмета на сутність. Але в цьому разі автоматизувати художній переклад текстів досить складно.

ВИСНОВКИ

Отже розглянуті задачі відносяться до штучного інтелекту. Але вони не завжди відносяться до семантики. Задачі, в яких проводиться аналіз предмета на сутність, складні для програмної реалізації. Тому не всі задачі цього класу можна розв'язувати автоматично. Для них характерна ситуація невизначеності, пов'язана з неповною вхідною та поточною інформацією, яку не завжди можна задати у вхідних даних чи бібліотеці еталонів.

Для деяких з розглянутих задач побудовано математичні моделі з використанням комбінаторної оптимізації. Аргументом цільової функції в них є комбінаторні конфігурації різних типів. За цією ознакою оговорені задачі розділяються на підзадачі. Кожна з них розв'язується незалежними алгоритмами, які працюють як вбудовані процедури в ітераційному режимі. В деяких задачах цього класу комбінаторні конфігурації можуть бути не лише аргументом цільової функції, а і вхідними даними.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Н.К. Тимофієва, Теоретико-числові методи розв'язання задач комбінаторної оптимізації. автореф. дис... докт. техн. наук: 01.05.02. Київ, 2007. 32 с
- [2] Т.К. Винцюк, Анализ, распознавание и интерпретация речевых сигналов. Киев: Наук. думка, 1987. 262 с.
- [3] Н.К. Тимофієва, Знакові комбінаторні простори та штучний інтелект. Штучний інтелект. 2015. № 1-2 (67-68). С.180 –189.
- [4] Н.К. Тимофієва, В.И. Гриценко, Аргумент цільової функції в задачі клінічної діагностики. УСиМ. 2012. № 3. С.3 – 14.
- [5] А.В. Анисимов, Компьютерная лингвистика для всех: Мифы. Алгоритмы. Язык Киев: Наук. думка, 1988. 223 с.

Комп'ютерне Моделювання Систем Контролю Технологічного Процесу

Вадим Яковенко

кафедра інформаційних систем та технологій
Університет митної справи та фінансів
Дніпро, Україна
yakovenko@ua.fm

Юлія Ульянівська

кафедра інформаційних систем та технологій
Університет митної справи та фінансів
Дніпро, Україна
yuliyauyv@gmail.com

Computer Simulation of Process Control System

Vadym Yakovenko

dept. of Information System and Technologies
University of Customs and Finance
Dnipro, Ukraine
yakovenko@ua.fm

Yuliia Ulianovska

dept. of Information System and Technologies
University of Customs and Finance
Dnipro, Ukraine
yuliyauyv@gmail.com

Анотація—У роботі показана актуальність розробки методів запобігання виникнення техногенних катастроф. Сформульовано математичний опис вражаючих факторів, що характеризують надзвичайні ситуації техногенного характеру, умов контролю технологічного процесу та стан об'єкту управління. За запропонованими формальними описами побудована автоматизована розподілена система контролю параметрів технологічного процесу та наведено її екранні форми.

Abstract—In the paper showed the relevance of the development of methods of technological disasters. A mathematical description of the enemy factors has been formed, to characterize the super-environmental situation of a technogenic character, the minds of the control of the technological process and the camp of management. The system for controlling the parameters of the technological process, induced by the screen shape, was prompted to automate the automated descriptions.

Ключові слова—чрезвичайна ситуація, математична модель вражаючих факторів, автоматизована система контролю

Keywords— emergency situation, mathematical model of enemy factors, automated control system

I. ВСТУП

В Україні існує високий рівень ризику виникнення надзвичайних ситуацій (НС), пов'язаних із аваріями з викидом або загрозою викиду небезпечних хімічних речовин. За даними 2016 року в Україні налічується функціонуючих 711 об'єктів, на яких зберігається або використовується у виробничій діяльності більше 285 тис. т небезпечних хімічних речовин, у тому числі: більше 3 тис. т хлору, 183 тис. т аміаку та близько 99 тис. т інших небезпечних хімікалій [1].

Аналіз стану техногенної безпеки в Україні, наданий Українським науково-дослідним інститутом цивільного захисту і наведений у [2], свідчить, що, не зважаючи на зусилля, спрямовані на недопущення виникнення надзвичайних ситуацій (НС) техногенного та природного характеру, проблема аварій та пожеж залишається актуальною, а рівень НС у порівнянні з попередніми роками за деякими категоріями підвищився (рис 1.).

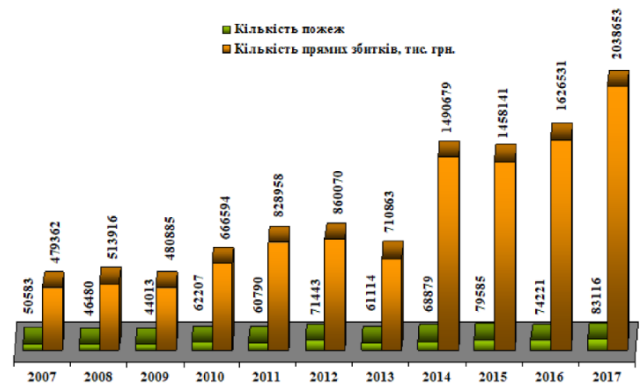


Рис. 1. Динаміка кількості пожеж і прямих збитків від них за 2007-2017 роки

Особливу небезпеку з можливими тяжкими наслідками та кількістю жертв становлять собою аварії з викидом у навколишнє середовище небезпечних хімічних речовин (НХР). Основними НХР, що використовуються на підприємствах є аміак, хлор та стирол. У 2017 зареєстровано 166 НС, серед яких 50 - техногенного характеру. Внаслідок НС загинуло 183 особи з них 37 дітей, та постраждали 1856 осіб (з них 861 дитина) [2].

Наведені данні свідчать, що питання попередження виникнення НС та вдосконалення алгоритмів організаційних дій, спрямованих на ліквідацію наслідків та збереження життя людей є актуальною проблемою.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ В ГАЛУЗІ ВИЯВЛЕННЯ ТА ПОПЕРЕДЖЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

Запобігання виникненню НС є комплексною науково-практичною проблемою. Серед комплексу задач які є складовою частиною зазначеної проблеми можна виділити наступні:

- аналіз досвіду попередніх надзвичайних ситуацій;
- прогнозування та моделювання аварійних ситуацій на кожному потенційно небезпечному об'єкті (ПНО);
- контроль та оцінка ліцензійних умов провадження діяльності та надання послуг, пов'язаних з небезпечними речовинами;
- формування та оцінка виробничих планів дій при настанні НС: аварійно-рятувальні роботи, евакуація тощо;
- розробка математичних моделей для моделювання та аналізу НС;
- розробка та впровадження інтелектуальних автоматизованих систем підтримки прийняття рішень в надзвичайних ситуаціях;
- розробка та впровадження ефективних систем реагування, моніторингу та оповіщення щодо настання НС;
- виконання заходів, спрямованих на запобігання аваріям у процесі виробництва та транспортування небезпечних речовин;
- навчання персоналу та населення діям в разі виникнення НС;
- аналіз та моделювання ризиків, пов'язаних з використанням небезпечних речовин.

Проблема запобігання НС та ліквідування наслідків техногенних катастроф має світовий характер. Директивою Європейського союзу SEVESO розроблено промислові плани дій в НС. У роботі [3] проводиться аналіз надійності таких планів дій. При цьому надійність визначається з точки зору спроможності механізму реагувати на погіршення умов. Аналіз планів дій в НС раніше здебільшого базувався головним чином на досвіді, отриманому з попередніх крупних аварій, що не дозволяв провести комплексний аналіз механізму реагування.

Прогнозування аварійних ситуацій або відмов систем повинно базуватись на відповідній моделі причинно-наслідкового зв'язку. Не зважаючи на те, що існують різні моделі, жодна з них не є загальноприйнятною [4]. Для виявлення взаємозв'язків та впливу прихованих факторів а також виявлення систематичних порушень були залучені експерти.

Здебільшого причиною виникнення НС є порушення технологічного процесу у тому числі і під впливом людського фактору. Необхідність у системах реагування визнана як керівниками галузей так і вченими різних країн, які займаються розробкою методологій та підходів для підвищення систем реагування. При розробці методологічних основ особлива увага приділяється навчанню персоналу [5].

У роботі [6] проведено моделювання основних людських факторів, які впливають на нещасні випадки, пов'язані з великою аварійністю. За останні два десятиліття декілька серйозних аварій в великомасштабних технологічних системах, які мали серйозні наслідки, були в основному пов'язані з людськими помилками. Однак подальші дослідження показали, що це не є основною причиною, оскільки аварії тому числі є наслідками проблем та труднощів роботи складних систем [7].

З попередніх катастрофічних ядерних аварій, таких як аварія на ЧАЕС та на Фукусимі, дослідники зробили висновки, що зовнішня небезпека, яка виходить за рамки проектних або людських помилок можуть привести до серйозних аварій та катастрофічним наслідкам, хоча і вважались дуже малоімовірними подіями і їм не варто приділяти багато уваги у відповідності до діючих правил безпеки [8]. Таким чином при моделюванні НС необхідно використовувати такі математичні моделі, які дають можливість враховувати усі фактори, які характеризують об'єкт управління і потенційно можуть спричинити НС.

Методи, що використовують дослідники аварій для аналізу або розслідування нещасних випадків, мають вирішальне значення для розуміння основних причин виникнення аварій. У якості моделі системного аналізу, зокрема, в авіаційних, морських, та залізничних перевозках гарні результати отримані з використанням моделей (STAMP) [9].

В Україні на підприємствах підвищеної небезпеки для раннього виявлення надзвичайних ситуацій та, у випадку їх виникнення, сповіщення людей, які знаходяться в зонах можливого ураження, впроваджуються автоматизовані системи (АС). У разі виявлення загрози або виникнення надзвичайної ситуації АС повинна автоматично здійснювати інформування про виявлену загрозу відповідальних осіб, на яких покладено виконання певних дій щодо недопущення виникнення НС або мінімізації негативних наслідків у разі її виникнення. Система раннього виявлення НС та оповіщення (СРВНСО) повинна виконувати такі функції [10]:

- Безперервно отримувати данні від джерел первинної інформації,
- Контролювати в реальному вимірі часу відповідність поточних (граничних) значень параметрів проектним режимам технологічного процесу об'єкта та (або) унормованим значенням параметрів джерел НС природного характеру,
- Інформувати працівників, відповідальних за функціонування технологічного обладнання, щодо

виявлених фактів досягнення докритичних та критичних значень параметрів, які контролюють,

- Інформувати посадових осіб, які відповідають за стан техногенної безпеки об'єкта, про факти досягнення критичних значень параметрами, які контролюють.

III. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Визначимо математичний опис кожного вражаючого фактору НС.

Нехай $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_p\}$ – множина ознак, значеннями яких задається НС.

Кожна y_i ознака, що описує НС може бути охарактеризована наступними показниками:

$w(y_i), w(y_i) \in [0; 1]$ - вражаючий впливу фактору y_i , при $w(y_i) = 0$ - має нульовий вражаючий вплив, при $w(y_i) = 1$ - фактор y_i має максимальний вплив на НС і його наявність свідчить про настання НС,

$v(y_i), v(y_i) \in [0; 1]$ - важливість фактору y_i для ідентифікації НС, $v(y_i) = 0$ - фактор може бути проігнорованим при ідентифікації але сам вплив фактору y_i на НС має місце, $v(y_i) = 1$ - максимальне значення для ідентифікації НС;

$int(y_i); int(y_i) \in [\underline{int}_i; \overline{int}_i]$ - інтенсивність y_i фактору, \underline{int}_i - мінімальне значення показника, \overline{int}_i - максимальне (критичне) значення показника,

$q_1(y_i), \dots, q_n(y_i)$ - інші параметри y_i фактору.

З урахуванням введених вище позначень математична модель y_i ознаки НС може бути записана у вигляді множини (1):

$$y_i = \{w(y_i), v(y_i), int(y_i), q_1(y_i), \dots, q_n(y_i)\} \quad (1)$$

Величини $w(y_i), v(y_i)$ визначаються експертами з урахування попереднього досвіду, $int(y_i)$ - визначається за допомогою датчиків, у тому числі газоаналізаторів, $\underline{int}_i, \overline{int}_i$ - як фіксовані показники на основі нормативних документів так і розраховуються за визначеними за встановленими методикам. Так, відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України [11] у разі коли найменша відстань від елементів потенційно небезпечного об'єкта до елементів селитебної території або промислових об'єктів не перевищує 500 метрів для небезпечних речовин 1 і 2 групи і 1000 метрів для небезпечних речовин 3 групи, пороговою масою вважається маса небезпечних речовин, визначається за формулою (2):

$$Q_{ir} = Q_i * (R_x / R_{\Pi})^2 \quad (2)$$

де Q_{ir} - порогова маса небезпечної речовини, Q_i - встановлений або розрахований згідно Порядку норматив порогової маси 2го класу, R_x - відстань від потенційно небезпечного об'єкта до межі найближчого елемента селитебної території або промислового об'єкта, R_{Π} -

гранична відстань від потенційно небезпечного об'єкта до найближчого промислового об'єкта або елемента селитебної території, починаючи з якої проводиться перерахунок нормативу порогової маси (для речовин 1 і 2 групи R дорівнює 500 метрів, для речовин 3 групи R дорівнює 1000 метрів).

У разі коли Q_{ir} менше 1 відсотка встановленого або розрахованого згідно порядку нормативу порогової маси 2 класу, порогова маса приймається рівною 1 відсотку незалежно від відстані потенційно небезпечного об'єкта до елементів селитебної території.

Розглянемо приклад для визначення вражаючого впливу y_i - аміаку. У цьому випадку $w(y_i)$ є функцією від $int(y_i)$, де між $w(y_i)$ та $int(y_i)$ існує пряма залежність: чим вище $int(y_i)$ тим вище $w(y_i)$, $v(y_i), int(y_i)$ визначається за допомогою датчиків-газоаналізаторів, $\underline{int}_i = 0$, \overline{int}_i - порогова (вибухонебезпечна) концентрація в повітрі від 15 до 28% (107...200 мг/л), $q_1(y_i)$ - порогова маса небезпечної речовини 1го класу 500г, порогова маса небезпечної речовини 2го класу 50 т., $q_3(y_i) = \{1, 8\}$ - категорії, до яких може бути віднесена речовина, $q_4(y_i) = \{1, 3\}$ - групи до яких може бути віднесена речовина, у групи небезпечні речовини об'єднуються за видами аварій, що можуть статися виходячи з властивостей небезпечних речовин, та за впливом уражаючих факторів цих аварій, $q_5(y_i) = 1$ - токсичність речовини ($q_5(y_i) = 1$ якщо речовина токсична і $q_5(y_i) = 0$ у протилежному випадку), $q_6(y_i) = 4$ клас безпеки, $q_7(y_i) \approx 0,45$ МПа (4,5 кгс/см²) максимальний тиск вибуху аміачно-повітряної суміші, $q_8(y_i) = 0,0028\%$ (0,02 мг/л) - гранично допустимий об'ємний вміст аміаку в повітрі дозволений у робочій зоні, $q_9(y_i) = 0,035\%$ (0,25 мг/л) - гранично допустимий об'ємний вміст аміаку в повітрі, що не викликає наслідків після перебування протягом 60 хв, $q_9(y_i) \in [0,05\%; 0,1\%]$ ([0,35 мг/л; 0,7 мг/л]) - гранично допустимий об'ємний вміст аміаку в повітрі небезпечний для життя, $q_{10}(y_i) = [0,21\%; 0,39\%]$ ([1,5 мг/л; 2,7 мг/л]) - гранично допустимий об'ємний вміст аміаку в повітрі, який викликає летальний наслідок при впливі протягом 30...60 хвилин.

Оскільки система моніторингу НС - це система реального часу, контроль параметрів НС може здійснюватись як дискретно так і в безперервному режимі. Запишемо умови контролю за допомогою виразу (3):

$$\forall t_i \square t_{i+1} \in [T_0, T_n]: HC(t_{i+1}) - HC(t_i) \leq k_{kr} \quad (3)$$

де t_i, t_{i+1} - контрольні точки вимірювання; $[T_0, T_n]$ - період контролю, $HC(t_{i+1}), HC(t_i)$ - стан ситуації в моменти часу t_{i+1}, t_i .

При цьому стан об'єкта управління $SO(t)$ в момент часу t має вигляд, заданий виразом (4):

$$\forall t \in [T_0; T_n], SO(t) = G(\Delta S(t/t_0), \{\hat{y}_i\}, f(t)) \quad (4)$$

де G - оператор опису стану об'єкта управління, $\Delta S(t/t_0)$ функція зміни стану об'єкта управління в момент часу t_i в порівнянні з початковим станом в момент часу t_0 , $\{\hat{y}_i\} \in Y$,

$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_p\}$ – множина ознак значеннями яких задається НС, $f_{SO}(t)$ – функція управління станом об'єкта.

Важливим етапом контролю технологічних процесів на ОПН відіграють автоматизовані системи контролю. На підприємствах для кожного технологічного процесу використовується своя АСУТП. Для контролю окремих вузлів технологічного процесу (ТП) використовують розподілені системи управління (PCY), задачею яких є моніторинг показників роботи вузлів та агрегатів ТП. На рис. 2 наведено приклад роботи локальної PCY яка фіксує зміну показників параметрів датчиків, порівнює їх з перед аварійним та аварійним значенням, будує діаграми змін та архівує данні для подальшого аналізу у випадку причин зупинки або порушень ТП. На практиці виникає необхідність в локальному контролі окремих показників ТП. Для вирішення цієї задачі пропонується локальна розподілена система контролю, яка повинна забезпечувати можливість модернізації і розвитку при збільшенні параметрів об'єкта автоматизації, і при необхідності зміни складу вимог до виконуваних функцій і видів забезпечення. В системі є можливість встановлення t_i t_{i+1} - контрольних точок вимірювання; T_0 , T_n - періоду вимірювання та інтервалу вимірювання. Користувач системи має можливість відслідковувати зміни параметру в реальному часі за вибраним параметром.

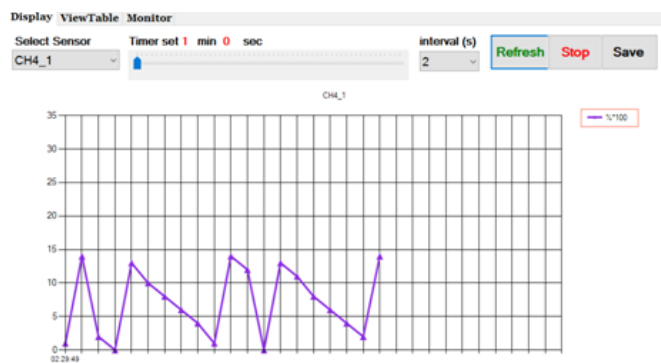


Рис. 2. Інтерфейс програми

Користувач може бачити у реальному часі показники усіх доступних датчиків та їх розташування на ділянці контролю. Якщо якийсь з датчиків вийде з ладу, то його показники не будуть відображатися, система видає попередження а сам ідентифікатор датчика стане чорного кольору. Якщо буде порушення, програма відреагує на це зміною кольору, при невеликому відхиленні від норми його колір зміниться на жовтий, а при великому відхиленні – на червоний.



Рис. 3. Показники усіх доступних датчиків та їх розташування на ділянці контролю

ВИСНОВКИ

У роботі проаналізована проблема попередження виникнення НС та вдосконалення алгоритмів ліквідації наслідків НС. Надано математичний опис ознак, якими задається НС. Проведене комп'ютерне моделювання системи контролю параметрів технологічного процесу автоматизованій системі.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Аналітичний огляд стану техногенної та природної безпеки в Україні за 2016 рік [Online]. Available: <http://undicz.dsns.gov.ua/ua/Analitichniy-oglyad-stanu-tehnogennoyi-ta-prirodnoyi-bezpeki-v-Ukrayini>.
- [2] Аналітичний огляд стану техногенної та природної безпеки в Україні за 2017 рік [Online]. Available: <http://undicz.dsns.gov.ua/ua/Analitichniy-oglyad-stanu-tehnogennoyi-ta-prirodnoyi-bezpeki-v-Ukrayini>.
- [3] G.-M. Karagiannis, E. Piatyszek, J.-M. Flaus, "Industrial emergency planning modeling: A first step toward a robustness analysis tool," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 245, pp. 921-931, Febr. 2019
- [4] E. Grant, P. M.Salmon, N.J. Stevens, N. Goode, G.J. Read, "Back to the future: What do accident causation models tell us about accident prediction?," *Safety Science*, vol.104, pp. 99-109, Apr. 2018.
- [5] F. Longo, L. Nicoletti, A. Padovano, "Emergency preparedness in industrial plants: A forward-looking solution based on industry 4.0 enabling technologies," *Computers in Industry*, vol.105, pp. 99-122, Feb. 2019.
- [6] A. Barkhordari, B. Malmir, M. Malakoutikhah, "An analysis of individual and social factors affecting occupational accidents," *Safety and Health at Work*, Jan 2019. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2093791118304189>
- [7] Naderpoura, S. Nazirbc, J. Lua, "The role of situation awareness in accidents of large-scale technological systems," *Process Safety and Environmental Protection*, vol.97, pp. 13-24, Sept. 2015
- [8] B. Nie, M. Ni, J. Liu, Z. Zhu, Z. Zhu, F. Li, "Insights into potential consequences of fusion hypothetical accident, lessons learnt from the former fission accidents," *Environmental Pollution*, vol.97, pp. 13-24, Sept. 2015.
- [9] Y. Gong, Y. Li, "STAMP-based causal analysis of China-Donghuang oil transportation pipeline leakage and explosion accident," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol.56, pp.402-413, Nov. 2018
- [10] О. Євдін, К. Блажчук (2014). Автоматизовані системи раннього виявлення загрози виникнення надзвичайних ситуацій та оповіщення населення: ДБН В.2.5.-76:2014. Київ: Мінеріон України. 38 с.
- [11] Про ідентифікацію та декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки. Кабінет Міністрів України. Постанова від 11.07.2002 № 956 [Online]. Available: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/shou/956-2002-%D0%BF/page>

Математичне Моделювання Стохастичних Дифузійних Процесів в Шаруватих Структурах з Урахуванням Стрибків Функції Концентрації на Границях Контакті

Ольга Чернуха, Юрій Білушак

Відділ математичного моделювання нерівноважних процесів

Центр математичного моделювання

Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України

кафедра обчислювальної математики і програмування

Національний університет "Львівська політехніка",

Львів, Україна

zaliznuchna6@gmail.com, byixx13@gmail.com

Mathematical Modeling of Stochastic Diffusion Processes in Stratified Structures with Account the Jumps of the Function of Concentration on the Contact Boundaries

Olha Chernukha, Yurii Bilushchak

Department of mathematical modeling of nonequilibrium processes

Centre of Mathematical Modelling of Y. S. Pidstryhach Institute of Applied Problems of Mechanics and Mathematics of the

National Academy of Sciences of Ukraine

Department of Computational Mathematics and Programming

Lviv Polytechnic National University

Lviv, Ukraine

zaliznuchna6@gmail.com, byixx13@gmail.com

Анотація—Робота присвячена математичному моделюванню процесів дифузії домішкової речовини у двофазній шаруватій смужі випадково неоднорідної структури з урахуванням стрибків функції концентрації та її похідної на границях контакту фаз. Подано нове представлення оператора рівняння масоперенесення для цілого тіла. Сформульовано еквівалентне інтегро-диференціальне рівняння, розв'язок якого побудований у вигляді інтегрального ряду Неймана. Усереднення отриманого розв'язку проведено за ансамблем конфігурацій фаз з рівномірною функцією розподілу. Показано, що розрахункова формула для усередненої концентрації за явного врахування її стрибків на міжфазних границях містить додатковий доданок. Встановлено, що на знак цього доданку впливають

відношення коефіцієнтів дифузії, концентраційної залежності хімічних потенціалів у різних фазах та їхній взаємозв'язок.

Abstract—The work is devoted to mathematical modeling of the admixture diffusion processes in a two-phase stratified strip of randomly nonhomogeneous structure taking into account jump discontinuities of the function of concentration as well as its derivative on interphases. Filed a new presentation of the operator of mass transfer equation for the whole bodies is proposed. The equivalent integrodifferential equation is formulated. Its solution is constructed in the form of Neumann series. Averaging the obtained solution is carried out over the ensemble of phase configurations with the function of uniform distribution. It is shown that the calculating formula for the averaged concentration with explicit account of its jump discontinuities on interphases is contained an

additional summand. It is established that the ratios of coefficients of diffusion, concentrative dependence of chemical potentials and their intercoupling influence on the additional summand.

Ключові слова—дифузія, домішкова речовина, випадково неоднорідна шарувата структура, рівномірний розподіл

Keywords—diffusion, admixture, randomly inhomogeneous stratified structure, uniform distribution

I. ВСТУП

Використання полі- та біметалів дозволяє істотно скоротити витрату високолегованих сталей, дефіцитних і дорогих кольорових металів, наприклад, *Cu*, *Cr*, *Mo*. При цьому для таких середовищ, як правило, є невідомими дані про конкретне просторове розташування окремих фаз, проте достатньо інформації про їхній дольовий вміст та основні фізико-хімічні властивості [1, 2].

Зазвичай для знаходження особливостей досліджуваних явищ використовують методи стохастичного усереднення, тобто обчислення середнього типу середнього значення $\langle c(\vec{r}, t) \rangle$ (\vec{r} – радіус вектор біжучої точки, t – час), просторово часової кореляційної функції $\langle c(\vec{r}, t)c(\vec{r}, t) \rangle$ і т.п., де через $\langle \dots \rangle$ – позначено усереднення за ансамблем реалізацій випадкових параметрів. Тоді якісні особливості окремих реалізацій згладжуються і отримані статистичні характеристики можуть суттєво відрізнятися від конкретної реалізації структури тіла. При цьому повна статистика містить всю інформацію про динамічну систему [2, 3].

Для випадків, коли процеси, які протікають у випадково неоднорідних тілах, не є ергодичними або квазіергодичними, був розроблений підхід [4], за яким стохастичне поле концентрації шукається у вигляді ряду Неймана, оскільки таке подання випадкових полів є зручним для проведення процедури усереднення за ансамблем допустимих просторових реалізацій структури тіла [4]. При цьому природнім чином скорочувались доданки, які безпосередньо описують величину стрибка випадкової функції концентрації на границях контакту. В даній роботі запропоновано інше представлення випадкового оператора збуреного рівняння дифузії, що дало можливість явно врахувати величину стрибків шуканої функції та її похідної на міжфазних границях.

II. ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Нехай домішкові частинки мігрують у шарі товщиною z_0 , який складається з підшарів двох типів (фаз). При цьому розташування цих підшарів є невідомим. Одна з можливих реалізацій структури багатошарового тіла, в якому дифундує домішкова речовина, подана на рис. 1. Вважаємо, що дифузійні властивості фаз (області Ω_0 і Ω_1), з яких складене тіло, можуть суттєво відрізнятися. Приймаємо, що фази в тілі розташовані за рівномірним розподілом [5] і об'ємна частка v_1 області Ω_1 є набагато меншою за об'ємну частку v_0 області Ω_0 , тобто $v_1 \ll v_0$.

Концентрація домішкових частинок $c_j(z, t)$ в області Ω_j визначається з рівняння дифузії

$$\rho_j \frac{\partial c_j(z, t)}{\partial t} = d_j \frac{\partial^2 c_j(z, t)}{\partial z^2}, \quad z \in \Omega_j = \bigcup_{i=1}^{n_j} \Omega_{ij},$$

$$t \in [0, \tau] \quad (\tau < \infty), \quad j = 0, 1, \quad (1)$$

де ρ_j – густина області Ω_j ; d_j – кінетичний коефіцієнт переносу в цій області, n_j – кількість підшарів фази j , Ω_{ij} – i -та однозв'язна область фази j , $i = \overline{1, n_j}$, $j = 0, 1$.

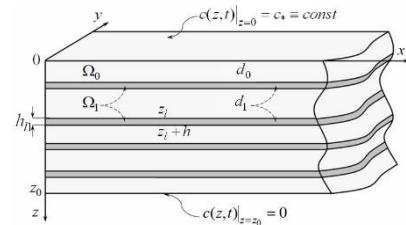


Рис. 1. Можлива реалізація структури багатошарового тіла

Приймаємо нульові початкові умови, а також, що на границі тіла $z=0$ підтримується постійне значення концентрації домішкової речовини c_* , а на нижній границі $z=z_0$ – вона дорівнює нулю, тобто

$$c_0(z, t)|_{t=0} = c_1(z, t)|_{t=0} = 0,$$

$$c_0(z, t)|_{z=0} = c_* \equiv const, \quad c_0(z, t)|_{z=z_0} = 0. \quad (2)$$

Тоді отримуємо умови неідеального контакту на концентрацію [6]:

$$k_0 c_0(z, t)|_{z=z_l-0} = k_1 c_1(z, t)|_{z=z_l+0};$$

$$\rho_0 d_0 \frac{\partial c_0}{\partial z} \Big|_{z=z_l-0} = \rho_1 d_1 \frac{\partial c_1}{\partial z} \Big|_{z=z_l+0}; \quad (5)$$

$$k_1 c_1|_{z=z_l+h_{l1}-0} = k_0 c_0|_{z=z_l+h_{l1}+0};$$

$$\rho_1 d_1 \frac{\partial c_1}{\partial z} \Big|_{z=z_l+h_{l1}-0} = \rho_0 d_0 \frac{\partial c_0}{\partial z} \Big|_{z=z_l+h_{l1}+0}, \quad (6)$$

де k_j – коефіцієнт концентраційної залежності хімічного потенціалу у фазі j [4], z_l – випадкова координата “верхньої” межі області Ω_{l1} (рис. 1), h_{l1} – товщина підшару Ω_{l1} .

Стрибки функції $c(z, t)$ на границях контактів (5)-(6) можна подати у вигляді

$$[c(z, t)]_{z=z_l} = \left(1 - \frac{k_0}{k_1}\right) c_0(z, t)|_{z=z_l-0}, \quad (7)$$

$$\left[\frac{\partial c(z,t)}{\partial z} \right]_{z=z_l} = \left(1 - \frac{\rho_0 d_0}{\rho_1 d_1} \right) \frac{\partial c_0}{\partial z} \Big|_{z=z_l-0}, \quad (8)$$

$$[c(z,t)]_{z=z_l+h_{l1}} = \left(\frac{k_0}{k_1} - 1 \right) c_0(z,t) \Big|_{z=z_l+h_{l1}+0}, \quad (9)$$

$$\left[\frac{\partial c(z,t)}{\partial z} \right]_{z=z_l+h_{l1}} = \left(\frac{\rho_0 d_0}{\rho_1 d_1} - 1 \right) \frac{\partial c_0}{\partial z} \Big|_{z=z_l+h_{l1}-0}, \quad (10)$$

де $[c(z,t)]_{z=z_l}$ – стрибок функції $c(z,t)$ в точці z_l ,

Значимо, що при такій постановці задачі випадковими величинами є границі контакту $z = z_l$ та $z = z_l + h_{l1}$, тобто межі областей Ω_0 та Ω_1 , які є внутрішніми для тіла. Це, в свою чергу, призводить до стохастичності поля концентрації домішкової речовини, яка мігрує в тілі.

III. РІВНЯННЯ МАСОПЕРЕНОСЕННЯ ДЛЯ УСЬОГО ТІЛА

Розв'язок сформульованої контактної-крайової задачі (1)–(4) будемо шукати у вигляді інтегрального ряду Неймана [7, 8]. Для цього введемо у розгляд випадкову функцію просторової координати $c(z,t)$, яка описує концентрацію в усьому тілі:

$$c_j(z,t) = \begin{cases} c_j(z,t) - \text{розв'язок рівняння (1), } z \in \Omega_j, j = \overline{0,1}; \\ \text{контактні умови (7),(8), } z = z_l; l = \overline{1, n_l}; \\ \text{контактні умови (9),(10), } z = z_l + h_{l1}; l = \overline{1, n_l}. \end{cases} \quad (11)$$

Підставимо випадкову концентрацію домішок $c(z,t)$ у вигляді (11) в рівняння балансу маси (за нехтування конвективної складової)

$$\rho(z) \frac{\partial c(z,t)}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{J}(z,t), \quad (12)$$

де $\vec{J}(z,t) = d(z) \vec{\nabla} c(z,t)$ – потік маси домішкової речовини. Тоді отримаємо

$$\begin{aligned} \rho(z) \frac{\partial c(z,t)}{\partial t} = & \left\{ d(z) \frac{\partial^2 c(z,t)}{\partial z^2} \right\}_{z \in \Omega_{ij}} + \\ & + 2 \sum_{l=1}^{n_l} \left([d(z)]_{z=z_l} \left[\frac{\partial c(z,t)}{\partial z} \right]_{z=z_l} \delta(z-z_l) + [d(z)]_{z=z_l+h_{l1}} \times \right. \\ & \times \left. \left[\frac{\partial c(z,t)}{\partial z} \right]_{z=z_l+h_{l1}} \delta(z-(z_l+h_{l1})) \right) + \sum_{l=1}^{n_l} \left([d(z)]_{z=z_l} [c(z,t)]_{z=z_l} \times \right. \\ & \times \delta'(z-z_l) + [d(z)]_{z=z_l+h_{l1}} [c(z,t)]_{z=z_l+h_{l1}} \delta'(z-(z_l+h_{l1})) \Big), \quad (13) \end{aligned}$$

де $\{\cdot\}_{z \in \Omega_{ij}}$ – області неперервності функції, $\delta(z)$ – дельта-функція Дірака, $\delta'(z)$ – похідна від дельта-функції Дірака, і коефіцієнти $\rho(z)$ і $d(z)$ означені у відкритих областях Ω_0 і Ω_1 .

IV. ІНТЕГРО-ДИФЕРЕНЦІАЛЬНЕ РІВНЯННЯ, ЕКВІВАЛЕНТНЕ ВИХІДНІЙ КРАЙОВІЙ ЗАДАЧІ

Введемо в розгляд випадкову функцію просторової координати («функцію структури») [8], яка задовольняє умову суцільності тіла:

$$\eta_{ij}(z) = \begin{cases} 1, z \in \Omega_{ij}; \\ 0, z \notin \Omega_{ij}, \end{cases} \quad \sum_{j,i} \eta_{ij}(z) = 1. \quad (14)$$

За такого подання отримаємо рівняння дифузії в операторному вигляді

$$L(z,t)c(z,t) = 0; \quad (14)$$

$$\begin{aligned} L(z,t) \equiv & \sum_{j=0}^1 \sum_{i=1}^{n_j} \rho_j \eta_{ij}(z) \frac{\partial}{\partial t} - \sum_{j=0}^1 \sum_{i=1}^{n_j} d_j \eta_{ij}(z) \left\{ \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right\} - 2(d_0 - d_1) \times \\ & \times \sum_{l=1}^{n_l} \left(\left[\frac{\partial}{\partial z} \right]_{z=z_l} \delta(z-z_l) - \left[\frac{\partial}{\partial z} \right]_{z=z_l+h_{l1}} \delta(z-(z_l+h_{l1})) \right) - \\ & - (d_0 - d_1) \sum_{l=1}^{n_l} \left(\left[\cdot \right]_{z=z_l} \delta'(z-z_l) - \left[\cdot \right]_{z=z_l+h_{l1}} \delta'(z-(z_l+h_{l1})) \right). \end{aligned}$$

У рівнянні (14) додамо і віднімемо детермінований оператор дифузії $L_0(z,t) = \rho_0 \partial / \partial t - d_0 \partial^2 / \partial z^2$, коефіцієнти якого є характеристиками матеріалу фази Ω_0 . Отже маємо

$$L_0(z,t)c(z,t) = L_s(z,t)c(z,t), \quad (15)$$

де позначено $L_s(z,t) = L_0(z,t) - L(z,t)$, а саме

$$\begin{aligned} L_s(z,t) = & (\rho_0 - \rho_1) \sum_{i=1}^{n_1} \eta_{i1}(z) \frac{\partial}{\partial t} + (d_0 - d_1) \sum_{i=1}^{n_1} \eta_{i1}(z) \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \\ & + 2(d_0 - d_1) \sum_{l=1}^{n_l} \left(\left(1 - \frac{\rho_0 d_0}{\rho_1 d_1} \right) \left[\frac{\partial}{\partial z} \right]_{z=z_l} \delta(z-z_l) - \left(\frac{\rho_0 d_0}{\rho_1 d_1} - 1 \right) \times \right. \\ & \times \left. \left[\frac{\partial}{\partial z} \right]_{z=z_l+h_{l1}} \delta(z-(z_l+h_{l1})) \right) - (d_0 - d_1) \sum_{l=1}^{n_l} \left(\left(1 - \frac{k_0}{k_1} \right) \cdot \left[\cdot \right]_{z=z_l} \delta'(z-z_l) - \right. \\ & \left. - \left(\frac{k_0}{k_1} - 1 \right) \cdot \left[\cdot \right]_{z=z_l+h_{l1}} \delta'(z-(z_l+h_{l1})) \right). \quad (16) \end{aligned}$$

Вважаємо праву частину рівняння (15) джерелом. Тоді розв'язок крайової задачі (15), (2) можна подати у вигляді:

$$c(z,t) = c_0(z,t) + \int_0^t \int_0^{z_0} G(z,z',t,t') L_s(z',t') c(z',t') dz' dt', \quad (17)$$

де $c_0(z,t)$ – розв'язок однорідного рівняння з умовами (2), тобто [7]

$$c_0(z,t) = c_* \left(1 - z/z_0 \right) - \frac{2}{z_0} \sum_{n=1}^{\infty} c_* e^{-d_0 y_n^2 t / \rho_0} \sin(y_n z) / y_n, \quad (18)$$

де $y_n = n\pi/z_0$; $G(z,z',t,t')$ – функція Гріна задачі (15), (2), а саме [9]

$$G(z, z', t, t') = \frac{2\theta(t-t')}{z_0\rho_0} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-d_0 y_n^2 (t-t')/\rho_0} \sin(y_n z) \sin(y_n z') . (19)$$

Таким чином ми побудували інтегро-диференціальне рівняння (17), еквівалентне вихідній контактній-крайовій задачі. Рівняння (17) з випадковим ядром є рівнянням Вольтерра II-го роду за часовою змінною і Гаммерштейна за просторовою.

Розв'язок інтегро-диференціального рівняння (15) шукаємо у вигляді ряду Неймана [10, 11], який будемо ітерувати співвідношення (15).

В результаті отримаємо

$$\begin{aligned} c(z, t) = & c_0(z, t) + \int_0^t \int_0^{z_0} G(z, z', t, t') L_s(z', t') c_0(z', t') dz' dt' + \\ & + \int_0^t \int_0^{z_0} G(z, z', t, t') L_s(z', t') \int_0^{t'} \int_0^{z_0} G(z', z'', t', t'') L_s(z'', t'') c_0(z'', t'') dz'' dt'' dz' dt' + \\ & + \int_0^t \int_0^{z_0} G(z, z', t, t') L_s(z', t') \int_0^{t'} \int_0^{z_0} G(z', z'', t', t'') L_s(z'', t'') \times \\ & \times \int_0^{t''} \int_0^{z_0} G(z'', z''', t'', t''') L_s(z''', t''') c_0(z''', t''') dz''' dt''' dz' dt' + \dots (20) \end{aligned}$$

Теорема. Якщо густини ρ_0, ρ_1 і коефіцієнти дифузії d_0, d_1 є обмеженими і $\rho_0 \neq 0, d_0 \neq 0$, то інтегральний ряд Неймана (20) є абсолютно і рівномірно збіжним.

V. УСЕРЕДНЕННЯ ПОЛЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ЗА АНСАМБЛЕМ КОНФІГУРАЦІЙ ФАЗ

Для знаходження середнього поля концентрації домішкової речовини обмежимося першими двома членами ряду (20), врахувавши властивості випадкової "функції структури" $\eta_{ij}(z)$, прийняли $h_{i1} = h, \forall i = 1, \dots, n_1, h$ - характерна (середня) товщина прошарків. Також підставляючи вирази для концентрації домішки в однорідному шарі (18) та функції Гріна (19), отримаємо розрахункову формулу для усередненого поля концентрації у випадково неоднорідній багатшаровій смугі за рівномірного розподілу фаз у тілі та явного врахування стрибків функції та її похідної на границях контакту:

$$\begin{aligned} \frac{\langle c(z, t) \rangle}{c_*} \approx & 1 - \frac{z}{z_0} - \frac{2}{z_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{y_n} e^{-d_0 y_n^2 t/\rho_0} \sin(y_n z) + \\ & + \frac{4v_1}{z_0^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\sin(y_n z) e^{-\frac{d_0 y_n^2 t}{\rho_0}} \left[\frac{d_0 R_n t}{8\rho_0 y_n} \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_0} \right) + \right. \right. \\ & \left. \left. + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} y_m \left(\frac{d_1}{d_0} - \frac{\rho_1}{\rho_0} \right) A_e \right] \right] + I_2(z, t); \quad (21) \end{aligned}$$

$$I_2(z, t) = \frac{4v_1}{hz_0^2\rho_0} K_d \left[\sum_{m=1}^{\infty} \sin(y_m z) (A_m + A_r) - \frac{2\rho_0}{d_0} \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_e \sin(y_m z) B_{nm} \right];$$

де $K_d = 2 - \frac{\rho_0 d_0}{\rho_1 d_1} - \frac{k_0}{k_1}$; $y_n = n\pi/z_0, y_m = m\pi/z_0$;

$$R_n = 1 - 4h + 2h^2 y_n^2 + 2(1 - 4hy_n) \sin(2y_n h) - \cos(2y_n h);$$

$$\begin{aligned} A_{mn} = & 2 \sin(h y_n) \sin(h y_m) / h + \\ & + \sin(h(y_n - y_m)) (2(y_n - y_m)^2 - 1) / (y_n - y_m) + \\ & + \sin(h(y_n + y_m)) (1 - 2(y_n + y_m)^2) / (y_n + y_m), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_m = & \rho_0 \left(1 - e^{-\frac{d_0 y_m^2 t}{\rho_0}} \right) \left(\frac{1}{y_m} (1 - \cos(y_m(z_0 - h)) - \right. \\ & \left. - \cos(y_m h) + \cos(y_m z_0)) - \frac{1}{2} (\sin(y_m(z_0 - h)) + \sin(y_m h)) \right) / d_0 y_m^2; \end{aligned}$$

$$A_r = e^{-\frac{d_0 y_m^2 t}{\rho_0}} (\cos(2y_m z_0) - \cos(2y_m h) - \cos(2y_m(z_0 - h)) + 1) / 2y_m;$$

$$A_e = \left(e^{-\frac{d_0 y_m^2 t}{\rho_0}} - e^{-\frac{d_0 y_n^2 t}{\rho_0}} \right) / (y_n^2 - y_m^2);$$

$$\begin{aligned} B_{nm} = & -\cos((y_n - y_m)(z_0 - h)) / 2(y_n - y_m) + y_n / (y_n^2 - y_m^2) + \\ & + \cos((y_n + y_m)(z_0 - h)) / 2(y_n + y_m) + \sin(y_m(z_0 - h)) \times \\ & \times \cos(y_n(z_0 - h)) - \cos((y_n - y_m)z_0) / 2(y_n - y_m) - \\ & - \cos((y_n + y_m)z_0) / 2(y_n + y_m) + \cos((y_n - y_m)h) / 2(y_n - y_m) - \\ & - \cos((y_n - y_m)h) / 2(y_n + y_m) + \sin(y_m h) \cos(y_n h). \end{aligned}$$

Ця формула відрізняється від аналогічної розрахункової формули задачі [12] з іншим представленням оператора L_s виникненням доданка I_2 . Причому цей доданок пропорційний коефіцієнту K_d , який містить відповідно відношення коефіцієнтів дифузії і концентраційної залежності хімічного потенціалу.

VI. ЧИСЛОВИЙ АНАЛІЗ УСЕРЕДНЕНОГО ПОЛЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ

Числові розрахунки проводились в безрозмірних змінних [7] $\tau = d_0 t / z_0, \xi = z / z_0$. На рис. 2 проілюстровано характерні розподіли усередненого за ансамблем конфігурацій фаз поля концентрації домішкової речовини, обчисленого за формулою (21), в різні моменти часу. При цьому за базові приймалися наступні значення коефіцієнтів $d_1/d_0 = 0,01; \rho_1/\rho_0 = 1,3; h = h/z_0 = 0,1; v_1 = 0,1; k_0 = 1; k_1 = 2$. На рис. 2 наведені розподіли усередненої концентрації в різні моменти безрозмірного часу $\tau = 0,01; 0,025; 0,05; 0,1; 0,5$ (криві 1-5) для об'ємної частки включень $v_1 = 0,2$ за явного врахування стрибків шуканої функції та її похідної на границях контакту, які відмічені суцільними лініями, та за іншого представлення оператора $L_s(z, t)$ [12], які описують відповідні штрихові лінії.

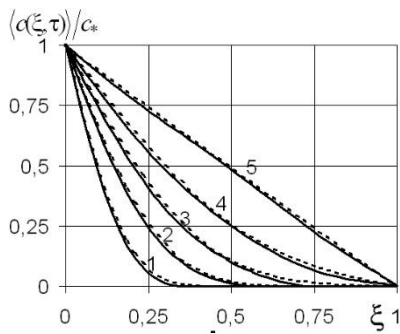


Рис. 2. Розподіли усередненої концентрації в різні моменти безрозмірного часу τ

Зазначимо, що поведінка функції $\langle c(\xi, \tau) \rangle / c_*$ є однаковою для різних представлень оператора $L_s(z, t)$, проте числові значення можуть суттєво відрізнятися. Найбільша відмінність між випадками з явним врахуванням стрибків шуканої функції та її похідної на границях контакту та без цього врахування спостерігається, коли відношення коефіцієнтів переносу у включенні та матриці є меншим одиниці і для середніх часів. Тоді як для випадків $d_1/d_0 > 1$ відмінність між значеннями концентрації є досить малою, а саме спостерігається у 3-4 значимій цифрі.

На рис. 3, 4 наведено розподіли функції $\langle I_2(\xi, \tau) \rangle$, яка є різницею між розв'язком (21) та отриманим раніше [12]. На рис. 3 проілюстровано поведінку функції $\langle I_2(\xi, \tau) \rangle$ для різних значень коефіцієнта концентраційної залежності хімічного потенціалу $k_1 = 1; 2; 5; 10; 25; 50$ (криві 1–6), коли $d_1/d_0 = 1,1$.

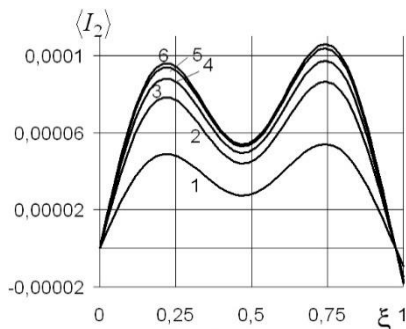


Рис. 3. Поведінка функції $\langle I_2(\xi, \tau) \rangle$ для різних значень k_1

На рис. 4 показаний вплив об'ємної частки включень $v_1 = 0,001; 0,01; 0,05; 0,1; 0,2$ (криві 1–5) на функцію $\langle I_2(\xi, \tau) \rangle$ для $d_1/d_0 = 0,01$.

Зазначимо, що функція $\langle I_2(\xi, \tau) \rangle$ має три екстремуми, а саме - два локальні максимуми і один локальний мінімум для додатніх значень $\langle I_2 \rangle$. Тоді як для $\langle I_2 \rangle < 0$ наявні два локальні мінімуми і один локальний максимум. Крім цього для всіх випадків, які ми досліджуємо, завжди величина другого локального максимуму або мінімуму завжди більша від першого.

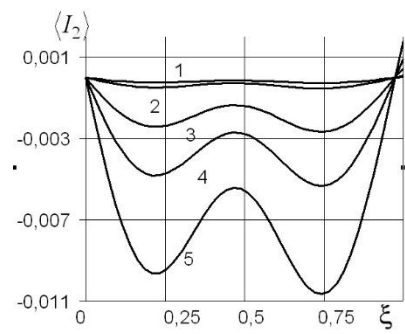


Рис. 4. Вплив об'ємної частки включень v_1 на $\langle I_2(\xi, \tau) \rangle$

Для приведенного коефіцієнта дифузії, більшого одиниці, зростання коефіцієнта k_1 веде до зростання функції $\langle I_2(\xi, \tau) \rangle$ на всьому проміжку (рис. 3).

Зауважимо, що збільшення відношення коефіцієнтів дифузії призводить до зростання значень функції $\langle I_2(\xi, \tau) \rangle$ та зміни її знаку починаючи від 1.1. Зі зростанням об'ємної частки включень на порядок абсолютні значення доданку усередненого поля концентрації, який виникає за рахунок явного врахування стрибків на міжфазних границях зростають в рази (рис. 4).

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] J.B. Keller, Flow in random porous media // Transport in Porous Media. – 2001. – **43**. – P. 395–406.
- [2] Y. Yang, D. Wang, J. Lin, D. Khan, G. Lin, J. Ma, Evolution of structure and fabrication of Cu/Fe multilayered composites by a repeated diffusion-rolling procedure // Materials & Design. – 2015. – **85**. – P. 635-639.
- [3] Л. Хорошун, Математические модели и методы механики стохастических композитных материалов // Прикл. механика. – 2000. – **36**, № 10. – С. 30-62.
- [4] С. Чапля, О. Чернуха, Математичне моделювання дифузійних процесів у випадкових і регулярних структурах. – Київ: Наук. думка, 2009. – 302 с.
- [5] В. Королюк, Н. Портенко, А. Скороход, А. Турбин, Справочник по теории вероятности и математической статистике. – М.: Наука, 1985. – 640 с.
- [6] М. Краснов, Интегральные уравнения. – М.: Наука, 1975. – 300 с.
- [7] А. Лыков Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1978. – 463с.
- [8] С. Рытов, Ю. Кравцов, В. Татарский. Введение в статистическую радиофизику. Ч. II Случайные поля. – М.: Наука, 1978. – 436 с.
- [9] А. Тихонов, А. Самарский, Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1972. – 735 с.
- [10] О. Чернуха, Ю. Білушак, А. Чучвара, Моделювання дифузійних процесів у стохастично неоднорідних шаруватих структурах. – Львів: Растр-7, 2016. – 262 с.
- [11] O.Y. Chernukha, Y.I. Bilushchak, Mathematical modeling of random concentration field and its second moments in a semispace with erlangian distribution of layered inclusions // Task Quarterly. – 2016. – Vol. 20, No. 3. – P.295-334.
- [12] Y. Chaplya, O. Chernukha, Y. Bilushchak, Contact initial boundary-value problem of the diffusion of admixture particles in a two-phase stochastically inhomogeneous stratified strip // J. of Mathematical Sciences. – 2012. – **183**, No 1. – P. 83-99.

Математичне Моделювання Процесу Домішкової Дифузії у Сильно Пористому Тілі за Випадкового Розташування Сферичних Пор

zaliznuchna6@gmail.com

Ольга Чернуха

Відділ математичного моделювання нерівноважних процесів

Центр математичного моделювання Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України Львів, Україна

кафедра обчислювальної математики і програмування Інститут прикладної математики та фундаментальних наук Національний університет "Львівська політехніка"

Анастасія Чучвара

Відділ математичного моделювання нерівноважних процесів

Центр математичного моделювання Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України Львів, Україна

davydoka@gmail.com

Mathematical Modelling the Admixture Diffusion Process in Highly Porous Body at Random Dispositions of Spherical Pores

zaliznuchna6@gmail.com

Olha Chernukha

Department of mathematical modeling of nonequilibrium processes

Centre of Mathematical Modelling of Y. S. Pidstryhach Institute of Applied Problems of Mechanics and Mathematics of the National Academy of Sciences of Ukraine

Department of Computational Mathematics and Programming Institute of Applied Mathematics and Fundamental Sciences Lviv Polytechnic National University Lviv, Ukraine

Anastasiia Chuchvara

Department of mathematical modeling of nonequilibrium processes

Centre of Mathematical Modelling of Y. S. Pidstryhach Institute of Applied Problems of Mechanics and Mathematics of the National Academy of Sciences of Ukraine

Lviv, Ukraine

davydoka@gmail.com

Анотація—Побудовано математичну модель дифузії домішкових частинок у пористому тілі зі сферичними випадково розташованими сферичними порами різних радіусів. Скелет тіла моделюється щільно упакованими кулями різних радіусів з можливістю введення декількох ефективних діаметрів. Сформульованій задачі поставлено у відповідність інтегро-диференціальне рівняння, розв'язок якого знайдено у вигляді ряду Неймана. Проведено аналіз залежності концентрації речовини від вхідних параметрів задачі.

Abstract—The mathematical model for diffusion of admixture substance in a porous body with spherical randomly disposed pores of different radii. The skeleton of the body is modeled by closely packed spheres of various radii with the possibility of

introducing several effective diameters. A new integro-differential equation, equivalent to the original initial-boundary value problem, is constructed, the solution of which is found in the form of Neumann series. It is carried out quantitative investigation of the admixture concentration depending on input data.

Ключові слова—математична модель, дифузія, пористе тіло, випадкова структура, щільна упаковка, ряд Неймана

Keywords—mathematical model, diffusion, porous body, random structure, close packing, Neumann series

I. ВСТУП

При математичному описі фізичних процесів, що протікають у пористих тілах, наприклад ґрунтах, середовища розглядають як двофазні, які складаються зі скелету і порового простору, який, у свою чергу, складається з однозв'язних елементів певної превалуючої форми – куль, циліндрів, тощо [1]. При цьому в реальних пористих середовищах розміри неоднорідностей (розміри пор або зерен) розподілені випадковим чином, причому можлива ситуація, коли густина розподілу пор за радіусами має декілька максимумів [2]. Крім цього скелет пористого середовища також може бути багатозв'язним – наприклад, являти собою різної щільності упаковки куль [3].

Дана робота присвячена математичному моделюванню дифузії домішкової речовини у пористому шарі у випадку співвимірних об'ємних часток фаз при дії постійного джерела маси на поверхні тіла.

II. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИФУЗІЇ У СИЛЬНО ПОРИСТОМУ ТІЛІ ЗІ СФЕРИЧНИМИ ПОРАМИ

Нехай домішкові частинки дифундують у сильно пористому тілі [4], який моделюємо як двофазний випадково неоднорідний шар товщини z_0 із великим числом кульових включень – сферичних пор (рис. 1). Вважаємо, що об'ємна частка жодної з фаз (скелету або пор) не є превалуючою, тобто в середовищі не можна виділити базову фазу. При цьому розглядаємо випадок рівномірного розподілу фаз в області тіла і приймаємо, що дифузійні характеристики є сталими в межах кожної з фаз. Також вважаємо, що пори повністю знаходяться в області тіла, відповідно на його зовнішніх поверхнях знаходиться одна з фаз – скелет.

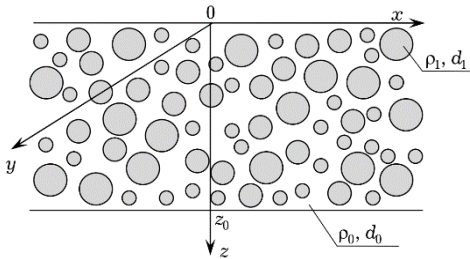


Рис. 1. Одна з можливих реалізацій структури пористого тіла

Процес масоперенесення домішки у такому тілі описується рівняннями дифузії для кожної фази k :

$$\rho_k \frac{\partial c_k(\vec{r}, t)}{\partial t} = d_k \left[\frac{\partial^2 c_k(\vec{r}, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_k(\vec{r}, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c_k(\vec{r}, t)}{\partial z^2} \right],$$

$$\vec{r} \in (V^{(k)}), \quad t \in [0; \tau] \quad (\tau < \infty), \quad k = \overline{0, 1}, \quad (1)$$

де $\vec{r} = (x, y, z)$ – радіус-вектор біжучої точки, $c_k(\vec{r}, t)$ – концентрація домішкової речовини у k -ій фазі, ρ_k – густина k -ої фази, d_k – кінетичний коефіцієнт переносу мігруючої речовини у k -ій фазі. Значимо, що тут $k=0$ відповідає скелету тіла, $k=1$ – його пористій компоненті, тобто $c_0(\vec{r}, t) = c_{\text{skeleton}}(\vec{r}, t)$, $c_1(\vec{r}, t) = c_{\text{pore}}(\vec{r}, t)$.

Нехай у початковий момент часу відсутня домішкова речовина в тілі

$$c_{\text{skeleton}}(\vec{r}, t)|_{t=0} = c_{\text{pore}}(\vec{r}, t)|_{t=0} = 0, \quad (2)$$

на верхній границі тіла $z=0$ підтримується стале значення концентрації домішкової речовини c_* , а на нижній границі $z=z_0$ вона дорівнює нулю:

$$c_{\text{skeleton}}(\vec{r}, t)|_{z=0} = c_* \equiv \text{const}, \quad c_{\text{skeleton}}(\vec{r}, t)|_{z=z_0} = 0,$$

$$c_k(\vec{r}, t)|_{x, y \rightarrow \pm\infty} \leq K < \infty \quad (k = \overline{0, 1}). \quad (3)$$

Приймаємо умови неідеального контакту [5, 6] для концентрації мігруючої речовини на границях скелет-пора

$$\kappa_0 c_{\text{skeleton}}(\vec{r}, t)|_{\vec{r} \in \Gamma-0} = \kappa_1 c_{\text{pore}}(\vec{r}, t)|_{\vec{r} \in \Gamma+0}, \quad (4)$$

$$\rho_0 d_0 \vec{\nabla} c_{\text{skeleton}}(\vec{r}, t)|_{\vec{r} \in \Gamma-0} = \rho_1 d_1 \vec{\nabla} c_{\text{pore}}(\vec{r}, t)|_{\vec{r} \in \Gamma+0} \quad (5)$$

та пора-скелет

$$\kappa_1 c_{\text{pore}}(\vec{r}, t)|_{\vec{r} \in \Gamma-0} = \kappa_0 c_{\text{skeleton}}(\vec{r}, t)|_{\vec{r} \in \Gamma+0}, \quad (6)$$

$$\rho_1 d_1 \vec{\nabla} c_{\text{pore}}(\vec{r}, t)|_{\vec{r} \in \Gamma-0} = \rho_0 d_0 \vec{\nabla} c_{\text{skeleton}}(\vec{r}, t)|_{\vec{r} \in \Gamma+0}, \quad (7)$$

де $\kappa_k = A\gamma_k$ ($k = \overline{0, 1}$), γ_k – коефіцієнт активності, Γ – границя фаз. у цьому випадку стрибки концентрації (4), (6) та її градієнта (5), (7) приймають однакові величини і відрізняються знаком.

Змоделюємо скелет тіла щільною упаковкою з куль m різного радіуса R_j ($j = \overline{1; m}$), виділяємо також $(N - m - 1)$ характерних радіусів пор R_j ($j = \overline{m+1; N}$) (рис. 2).

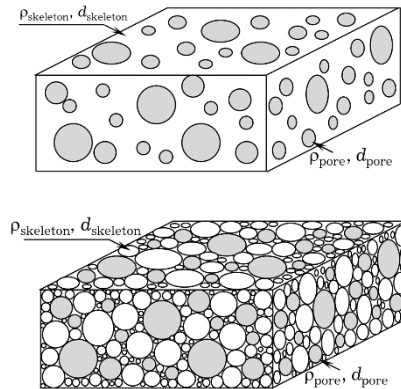


Рис. 2. Моделювання елемента пористого тіла щільною упаковкою куль

Припускаємо, що дві кулі пор можуть знаходитись як завгодно близько, але при цьому між ними залишається мінімальна кількість речовини скелету, тобто сферичні включення, що моделюють пори не можуть ретинатись. Куля, що належить скелету, може контактувати з іншими кулями скелету і/або з кулями пор, причому різних радіусів. Для спрощення приймаємо, що кулі усіх радіусів $j = \overline{1; N}$

як скелету, так і пор, розподілені в об'ємі за рівномірним розподілом. Розглядатимемо кулі різних (проте характерних) розмірів як різні фази.

Вважаємо, що для двофазного тіла індекси $j = \overline{1; m}$ відповідають скелету середовища ($k = 0$), а індекси $j = \overline{m+1; N}$ використано для позначення пористих включень ($k = 1$), тому можемо записати

$$d_{\text{skeleton}} = d_1 = \dots = d_m; \quad \rho_{\text{skeleton}} = \rho_1 = \dots = \rho_m, \quad (8)$$

$$d_{\text{pore}} = d_{m+1} = \dots = d_N; \quad \rho_{\text{pore}} = \rho_{m+1} = \dots = \rho_N. \quad (9)$$

Нехай однофазну область $(V_i^{(j)})$ займає i -а куля j -ої фази ($j = \overline{1; N}$, $i = \overline{1; n_j}$, n_j - число куль j -ої фази), тоді

$$\bigcup_{i=1}^{n_j} V_i^{(j)} = V_j; \quad \bigcup_{j=1}^N V_j = V,$$

де V - об'єм всього тіла.

Значимо, на границях куль, що моделюють скелет тіла ($j = \overline{1; m}$) і не контактують з кулями пор, стрибків концентрації і її похідної немає:

$$\begin{aligned} \kappa_0 c_i(\vec{r}, t) \Big|_{\vec{r} \in \Gamma_{-0}} &= \kappa_0 c_{i+1}(\vec{r}, t) \Big|_{\vec{r} \in \Gamma_{+0}} \quad (i = \overline{1; m-1}); \\ \rho_0 d_0 \vec{\nabla} c_i(\vec{r}, t) \Big|_{\vec{r} \in \Gamma_{-0}} &= \rho_0 d_0 \vec{\nabla} c_{i+1}(\vec{r}, t) \Big|_{\vec{r} \in \Gamma_{+0}} \quad (i = \overline{1; m-1}); \end{aligned}$$

ЗВІДКИ

$$c_i(\vec{r}, t) \Big|_{\vec{r} \in \Gamma_{-0}} = c_{i+1}(\vec{r}, t) \Big|_{\vec{r} \in \Gamma_{+0}},$$

$$\vec{\nabla} c_i(\vec{r}, t) \Big|_{\vec{r} \in \Gamma_{-0}} = \vec{\nabla} c_{i+1}(\vec{r}, t) \Big|_{\vec{r} \in \Gamma_{+0}} \quad (i = \overline{1; m-1}).$$

Аналогічно для куль, які відповідають порам ($j = \overline{m+1; N}$) і контактують тільки між собою, маємо:

$$c_i(\vec{r}, t) \Big|_{\vec{r} \in \Gamma_{-0}} = c_{i+1}(\vec{r}, t) \Big|_{\vec{r} \in \Gamma_{+0}},$$

$$\vec{\nabla} c_i(\vec{r}, t) \Big|_{\vec{r} \in \Gamma_{-0}} = \vec{\nabla} c_{i+1}(\vec{r}, t) \Big|_{\vec{r} \in \Gamma_{+0}} \quad (i = \overline{m+1; N-1}).$$

Тоді умови (4)-(7) можемо записати у загальному вигляді

$$\kappa_l c_l(\vec{r}, t) \Big|_{\vec{r} \in \Gamma_{p-0}} = \kappa_p c_p(\vec{r}, t) \Big|_{\vec{r} \in \Gamma_{p+0}}, \quad (10)$$

$$\rho_l d_l \vec{\nabla} c_l(\vec{r}, t) \Big|_{\vec{r} \in \Gamma_{p-0}} = \rho_p d_p \vec{\nabla} c_p(\vec{r}, t) \Big|_{\vec{r} \in \Gamma_{p+0}}, \quad (11)$$

$$\kappa_p c_p(\vec{r}, t) \Big|_{\vec{r} \in \Gamma_{p-0}} = \kappa_l c_l(\vec{r}, t) \Big|_{\vec{r} \in \Gamma_{p+0}}, \quad (12)$$

$$\rho_p d_p \vec{\nabla} c_p(\vec{r}, t) \Big|_{\vec{r} \in \Gamma_{p-0}} = \rho_l d_l \vec{\nabla} c_l(\vec{r}, t) \Big|_{\vec{r} \in \Gamma_{p+0}}. \quad (13)$$

Тут $l = \overline{1, m}$, $p = \overline{m+1, N}$, Γ_p - границя пори радіуса R_p

III. ПОБУДОВА РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧІ. ЧИСЛОВИЙ АНАЛІЗ

Вводимо в розгляд випадкову функцію просторових координат $c(\vec{r}, t)$, яка описує концентрацію в усьому тілі:

$$c(\vec{r}, t) = \begin{cases} c_j(\vec{r}, t), & \vec{r} \in (V_j), j = \overline{1, N} \\ \text{контактні умови (10)-(13)}, & \vec{r} \in \Gamma_p, p = \overline{m+1, N}. \end{cases}$$

І зведимо контактну задачу дифузії (1), (10)-(13) на основі рівняння балансу маси з використанням узагальнених функцій та враховуючи, що коефіцієнти задачі є сталими в межах кожної з фаз, до рівняння масоперенесення для тіла в цілому.

$$\begin{aligned} \rho(\vec{r}) \frac{\partial c(\vec{r}, t)}{\partial t} &= \{d(\vec{r})\} \{\Delta c(\vec{r}, t)\} + [d(\vec{r})]_{\Gamma_p} [\vec{\nabla} c(\vec{r}, t)]_{\Gamma_p} \delta(\vec{r} - \vec{r}_{\Gamma_p}) + \\ &+ [d(\vec{r})]_{\Gamma_p} [c(\vec{r}, t)]_{\Gamma_p} \vec{\nabla} \delta(\vec{r} - \vec{r}_{\Gamma_p}) + [d(\vec{r})]_{\Gamma_p} [c(\vec{r}, t)]_{\Gamma_p} \delta^2(\vec{r} - \vec{r}_{\Gamma_p}). \end{aligned}$$

Тут \vec{r}_{Γ_p} - радіус-вектор точок границі Γ_p ; $\{\dots\}$ - області неперервності функції, $[\dots]_{\Gamma_p}$ - стрибок функції на границі Γ_p ; $p = \overline{m+1, N}$.

Отриманій крайовій задачі ставимо у відповідність еквівалентне інтегро-диференціальне рівняння, розглядаючи випадкові неоднорідності структури як внутрішні джерела [7]:

$$c(\vec{r}, t) = c_a(\vec{r}, t) + \int_0^t \iiint_V G_a(\vec{r}, \vec{r}', t, t') L_s^a(\vec{r}', t') c(\vec{r}', t') d\vec{r}' dt'. \quad (14)$$

Тут $c_a(\vec{r}, t)$ - розв'язок однорідного рівняння з оператором $L_a(\vec{r}, t) = \rho_a \frac{\partial}{\partial t} - d_a \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ (де $\rho_a = \sum_{j=1}^N v_j \rho_j$;

$d_a = \sum_{j=1}^N v_j d_j$, v_j - об'ємна частка куль радіуса R_j) і крайовими умовами (2), (3); $G_a(\vec{r}, \vec{r}', t, t')$ - детермінована функція Гріна:

$$\begin{aligned} G_a(\vec{r}, \vec{r}', t, t') &= \frac{\pi \theta(t-t')}{2z_0 d_a (t-t')} e^{-\frac{\rho_a}{4d_a} \left(\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2}{t-t'} \right)} \times \\ &\times \sum_{s=1}^{\infty} e^{-\frac{d_a y_s^2 (t-t')}{\rho_a}} \sin(y_s z) \sin(y_s z'), \end{aligned}$$

де $y_q = q\pi/z_0$, $y_s = y_q|_{q=s}$, $\theta(t)$ - функція Хевісайда [8].

Розв'язок рівняння (14) шукаємо ітеруванням у вигляді ряду Неймана, приймаючи за нульове наближення розв'язку однорідної задачі дифузії з усередненими характеристиками. Тоді отримаємо

$$c(\vec{r}, t) \approx c_a(z, t) + \int_0^t \iiint_V G_a(\vec{r}, \vec{r}', t, t') \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{n_j} \left[(\rho_a - \rho_j) \frac{\partial c_a(z', t')}{\partial t'} - (d_a - d_j) \frac{\partial^2 c_a(z', t')}{\partial z'^2} \right] \eta_{ij}(\vec{r}') d\vec{r}' dt', \quad (15)$$

де $\eta_{ij}(\vec{r})$ - випадкова функція структури [9].

Вираз (15) усереднюємо за ансамблем конфігурацій фаз із рівномірною функцією розподілу. Одержимо

$$\begin{aligned} \langle c(\vec{r}, t) \rangle_{conf} = & c_a(z, t) + \sum_{j=1}^N v_j \int_0^t \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{2R_j} \left(\frac{z'}{R_j} - 1 \right)^3 G_a \times \\ & \times \left[(\rho_a - \rho_j) \frac{\partial c_a}{\partial t'} - (d_a - d_j) \frac{\partial^2 c_a}{\partial z'^2} \right] dz' + \\ & + \int_{2R_j}^{z_0} G \left[(\rho_a - \rho_j) \frac{\partial c_a}{\partial t'} - (d_a - d_j) \frac{\partial^2 c_a}{\partial z'^2} \right] dz' dy' dx' dt'. \end{aligned} \quad (16)$$

Розрахункову формулу для усередненого за ансамблем конфігурацій фаз поля концентрації отримуємо, підставляючи вирази для функції Гріна $G_a(\vec{r}, \vec{r}', t, t')$ та концентрації речовини в однорідному шарі з усередненими характеристиками у формулу (16):

$$\begin{aligned} \langle c(\vec{r}, t) \rangle_{conf} \approx & c_a(z, t) + \sum_{j=1}^N \frac{2c_s v_j \pi^2 K_{dp}^j}{\rho_a z_0^2} \sum_{s=1}^{\infty} \sin(y_s z) \times \\ & \times \left(A_s^j e^{-d_a y_s^2 t / \rho_a} + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq s}}^{\infty} A_{sq}^j \left[e^{-d_a y_s^2 t / \rho_a} - e^{-d_a y_q^2 t / \rho_a} \right] \right), \end{aligned} \quad (17)$$

де $K_{dp}^j = d_j - d_a \frac{\rho_j}{\rho_a}$; $y_{sq}^{\pm} = y_s \pm y_q$;

$$A_s^j = y_s \left\{ z_0 - 2R_j - B_c^j(2y_s) + \frac{\sin(4y_s R_j)}{2y_s} \right\};$$

$$A_{sq}^j = \frac{y_q \rho_a}{d_a (y_q^2 - y_s^2)} \left\{ B_c^j(y_{sq}^-) - B_c^j(y_{sq}^+) - \frac{\sin(2R_j y_{sq}^-)}{y_{sq}^-} + \frac{\sin(2R_j y_{sq}^+)}{y_{sq}^+} \right\};$$

$$B_c^j(\omega) = \frac{1}{R_j^3} \left[\frac{3}{\omega^2} \left(R_j^2 - \frac{2}{\omega^2} \right) (\cos(2R_j \omega) - 1) + \frac{R_j}{\omega} \left(R_j^2 - \frac{6}{\omega^2} \right) \sin(2R_j \omega) \right].$$

Кількісне дослідження масоперенесення домішкової речовини у пористому тілі за умови співвимірних об'ємних часток фаз виконувалось за розрахунковою формулою (17),

в якій точність обчислення рядів по s становить 10^{-7} , а по $q - 10^{-9}$.

На рис. 3а наведено розподіли концентрації частинок в пористому тілі для різних значень безрозмірного часу $\tau = 0,3; 0,35; 0,4; 0,5; 0,8$ (криві 1-5). Штрихові лінії (криві а) побудовані для однорідного тіла з усередненими по об'єму тіла характеристиками, суцільні лінії (криві б) відповідають функціям для усередненої за ансамблем конфігурацій фаз концентрації домішки. Прийнято $N=5$, $m=3$, тобто є 3 типи куль різного радіуса для моделювання упаковки скелету, та 2 типи куль різного радіуса для опису пористих включень. Вважаємо, що $R_1=0,01$ ($v_1=0,2$), $R_2=0,001$ ($v_2=0,3$), $R_3=0,0001$ ($v_3=0,1$), $R_4=0,001$ ($v_4=0,3$) та $R_5=0,0001$ ($v_5=0,1$). Нехай коефіцієнт дифузії домішки у скелеті становить $0,01$ (тобто $d_1=d_2=d_3=0,01$), а у порах $-1,5$ ($d_4=d_5=1,5$). Густини відповідних фаз прийнято $\rho_1=\rho_2=\rho_3=1,2$ та $\rho_4=\rho_5=0,5$. Тоді усереднені по об'єму тіла характеристики становлять $d_a=0,606$, $\rho_a=0,92$.

Рис. 3б показує поведінку функції $\langle c(\zeta, \tau) \rangle / c_*$ у різні моменти часу $\tau=0,11; 0,13; 0,15; 0,2$ (криві 1-4) при $d_1=d_2=d_3=5$, $d_4=d_5=0,05$. Тут $d_a=3,02$.

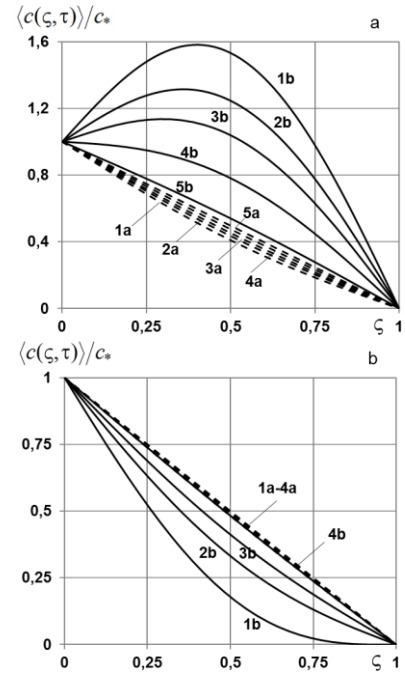


Рис. 3. Розподіли концентрації домішкової речовини у різні моменти часу: а) - для $d_1 < d_4$; б) - для $d_1 > d_4$

Зазначимо, що для коефіцієнтів дифузії домішкової речовини у скелеті менших, ніж у порах усереднені концентрації завжди більші за концентрацію домішки в тілі з усередненими характеристиками (рис. 3а), у протилежному випадку, значення функції $\langle c(\zeta, \tau) \rangle / c_*$ є меншим, ніж концентрація в однорідному тілі (рис. 3б). Збільшення часу

протікання процесу дифузії у пористому тілі для $d_1 < d_4$ призводить до зменшення усереднених концентрацій – для $\tau \leq 0,4$ усереднена концентрація може набувати в середині смуги значень більших, ніж концентрація домішки на верхній поверхні тіла c_* (криві 1b-3b, рис. 3а), для $\tau > 0,8$ концентрація виходить на усталений режим і відмінність між усередненою концентрацією, та концентрацією в однорідному тілі не перевищує 13% (криві 5, рис. 3а). У випадку $d_1 > d_4$ зі збільшенням τ усереднена концентрація домішкової речовини у пористому тілі навпаки зростає (рис. 3b), причому функція $\langle c(\zeta, \tau) \rangle / c_*$ виходить на стаціонарний режим при менших значеннях τ ($\tau > 0,2$). Концентрації в однорідному тілі з усередненими характеристиками при збільшенні часу протікання процесу дифузії також зростають (криві а, рис. 3). При цьому для $d_a = 0,606$ відмінності між концентраціями в різні моменти часу можуть сягати 33% (криві 1а, 5а, рис. 3а), тоді як для $d_a = 3,02$ – до 4% (криві 1а, 4а, рис. 3b).

На рис. 4а проілюстровано розподіли концентрації домішкової речовини у пористому тілі в момент часу $\tau = 0,4$ залежно від кількості характерних радіусів пор $N = 3; 4; 5; 6$ (криві 1-4), при цьому $m = 2; 2; 3; 3$, тобто серед пористих включень виділяють 1, 2, 2, 3 характерні радіуси відповідно. Для R_j та v_j прийнято наступні значення – при $N = 3$: $R_1 = 10^{-2}$ ($v_1 = 0,3$), $R_2 = 10^{-4}$ ($v_2 = 0,3$), $R_3 = 10^{-3}$ ($v_3 = 0,4$); при $N = 4$: $R_1 = 10^{-2}$ ($v_1 = 0,3$), $R_2 = 10^{-4}$ ($v_2 = 0,3$), $R_3 = 10^{-2}$ ($v_3 = 0,2$), $R_4 = 10^{-3}$ ($v_4 = 0,2$); при $N = 5$: $R_1 = 10^{-2}$ ($v_1 = 0,2$), $R_2 = 10^{-3}$ ($v_2 = 0,3$), $R_3 = 10^{-4}$ ($v_3 = 0,1$), $R_4 = 10^{-3}$ ($v_4 = 0,3$), $R_5 = 10^{-4}$ ($v_5 = 0,1$); при $N = 6$: $R_1 = 10^{-2}$ ($v_1 = 0,15$), $R_2 = 10^{-3}$ ($v_2 = 0,3$), $R_3 = 10^{-4}$ ($v_3 = 0,15$), $R_4 = 10^{-2}$ ($v_4 = 0,1$), $R_5 = 10^{-3}$ ($v_5 = 0,15$) та $R_6 = 10^{-5}$ ($v_6 = 0,15$). Зазначимо, що оскільки співвідношення об'ємних часток залишається незмінним ($v_{\text{скелет}} = 0,6$; $v_{\text{пор}} = 0,4$), то усереднені по об'єму тіла характеристики є однаковими для різних N ($d_a = 0,606$, $\rho_a = 0,92$), отже значення концентрації в однорідному тілі співпадають (штрихова лінія, рис. 3а). Крім того, чим більша кількість характерних радіусів пор N , тим менших значень набуває усереднена концентрація

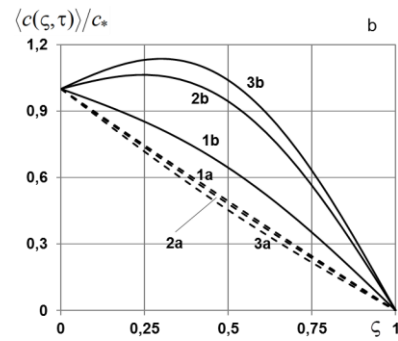
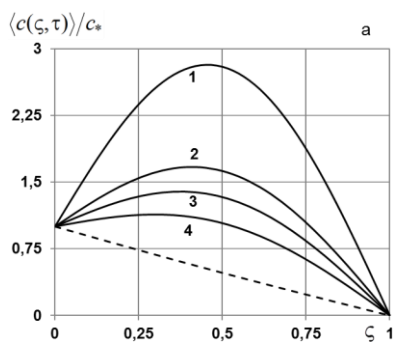


Рис. 4. Розподіли концентрації домішкової речовини: а) – для різних значень параметра N ; б) – для різних співвідношень об'ємних часток фаз

На рис. 4b наведено розподіли $\langle c(\zeta, \tau) \rangle / c_*$ залежно від співвідношень об'ємних часток фаз. Криві 1 відповідають $v_{\text{скелет}} = 0,4$; $v_{\text{пор}} = 0,6$; криві 2 – $v_{\text{скелет}} = 0,5$; $v_{\text{пор}} = 0,5$; криві 3 – $v_{\text{скелет}} = 0,6$; $v_{\text{пор}} = 0,4$. Усереднені характеристики становлять відповідно $d_a = 0,904$, $\rho_a = 0,78$ (криві 1а, рис. 4b), $d_a = 0,755$, $\rho_a = 0,85$ (криві 2а, рис. 4b) та $d_a = 0,606$, $\rho_a = 0,92$ (криві 3а, рис. 4b).

Зауважимо, що чим більша частка пористих включень у тілі (чим більша пористість структури), тим меншим є значення усередненої концентрації мігруючої речовини (криві б, рис. 4b), натомість концентрація домішки у однорідному середовищі з усередненими характеристиками є більшою (криві а, рис. 4b).

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] В.Н. Николаевский Механика пористых и трещиноватых сред, Москва, Недра, 1984, 323 с.
- [2] R. Bhattacharya, V.K. Gupta, G. Sposito On the stochastic foundations of the theory of water flow through unsaturated soil, Water Resources, 1976, 12 (3), P. 503-512.
- [3] О.Б. Ковалев Моделирование случайной упаковки насыпного слоя полидисперсных сферических частиц, Прикладная механика и техническая физика, 2014, 55, № 4, С. 184-192.
- [4] O.A. Plumb, S. Whitaker Diffusion, adsorption and dispersion in porous media: Small-scale averaging and local-volume averaging, Dynamics of Fluids in Hierarchical Porous Media, ed by J. N. Cushman, San Diego, Academic, 1990, P. 97-176.
- [5] Д. Гиббс Термодинамика. Статистическая физика, Москва, Наука, 1982, 584 с.
- [6] С.Я. Чапля, О.Ю. Чернуха Фізико-математичне моделювання дифузійних процесів у випадкових і регулярних структурах, Київ, Наукова думка, 2009, 302 с.
- [7] О.Ю. Чернуха, Ю.І. Білушак, А.Є. Чучвара Моделювання дифузійних процесів у стохастично неоднорідних структурах, Львів, Растр-7, 2016, 262 с.
- [8] Справочник по специальным функциям, Под ред. М. Абрамовица, И. Стиган, Москва, Мир, 1979, 830 с.
- [9] С.М. Рытов, Ю.А. Кравцов, В.И. Татарский Введение в статистическую радиофизику. Ч. II. Случайные поля, Москва, Наука, 1978, 464 с.

Problems of Calculations and Creation of Universal System of knowledge

Petro Trokhimchuck
Department of theoretical and mathematical physics,
Lesya Ukrayinka East European National University,
Voly av. 13, Lutsk, Ukraine, 43025
trope@yandex.ua

Проблеми Обчислень та Створення Універсальної Системи Знань

Петро Трохимчук
Кафедра теоретичної та математичної фізики
Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки
Пр. Волі 13, Луцьк, Україна, 43025
trope@yandex.ua

Abstract—Problem of calculation in modern science is discussed. Basic ways of its resolution are analyzed. This problem has global value must be connected with problem of measurement and creation universal system of knowledge. Polymetric analysis as variant of resolution of this problem is represented.

Анотація—Обговорюється проблема обчислень в сучасній науці. Аналізуються основні шляхи її розв'язання. Показано, що ця проблема повинна бути пов'язана з проблемою вимірювання та створення універсальної системи знань. Наведений поліметричний аналіз як варіант розв'язання цієї проблеми.

Keywords— calculation; universal system; synthesis; polymetric analysis; hybrid theory of systems.

Ключові слова—обчислення; універсальна система; синтез; поліметричний аналіз; гібридна теорія систем.

I. INTRODUCTION

Problem of calculation and creation of universal system of knowledge has long history [1, 2]. This problem is connected with development of science, culture and civilizations [1 – 9].

According to Errol E. Harris [10] modern science is polyphasic system.

Therefore in whole it is system complex problem. This problem is connected with procedure of measurement and concept of measure.

Full concept of measurement was represented by N. R. Campbell (basic and derivative measurements) [11]. This concept was realized in polymetric method with help including in element of measure with the qualitative and quantitative transformations. First is corresponded to derivative

measurements or dimensional analysis. Second is corresponded to basic measurements or arithmetization of procedure of measurement.

Basic element of each science is measure. Therefore we can create universal system of knowledge as theory of variable (polymetric) measure [1 – 3].

In whole this problem has three aspects: methodical, mathematical and generally scientifically. We represent this problem with help of various measures. Each science has own specific measure or set of measures. Therefore differentiation and classification of science and knowledge may be represented as classification of measures or in more general case as procedure of its creation and selection.

Differentiation of science is necessary process of its development but this development must be optimal and controlling. Therefore we must observe and represent this problem with system point of view.

It is corresponded to the basis of Cartesian concept may be represented as “ordering his thoughts to analyse the complex by dissecting it into its simpler parts” [1 – 3].

The problem of creation the universal system must be connected with problem of measurement and prognostication and in finite case with problem of calculations.

According to this idea the polymetric analysis (PA) was created.

II BASIC RESULTS

Polymetric analysis (PA) was created as alternative optimal concept to logical, formal and constructive conceptions of modern mathematics and theory of information [1 – 3].

This concept is based on the idea of triple minimum: mathematical, methodological and concrete scientific [1 – 3].

Basic elements of this theory and their bonds with other science are represented in Fig. 1 [1 – 3].

Basic elements of this synthesis is pure mathematical (functional numbers), applied scientific, including

mathematical, (generalizing mathematical transformations) and system (hybrid theory of systems) [1 – 3].

However, one of the main tasks of polymetric analysis is the problem of simplicity-complexity that arises when creating or solving a particular problem or science. It must be open system [1 – 3].

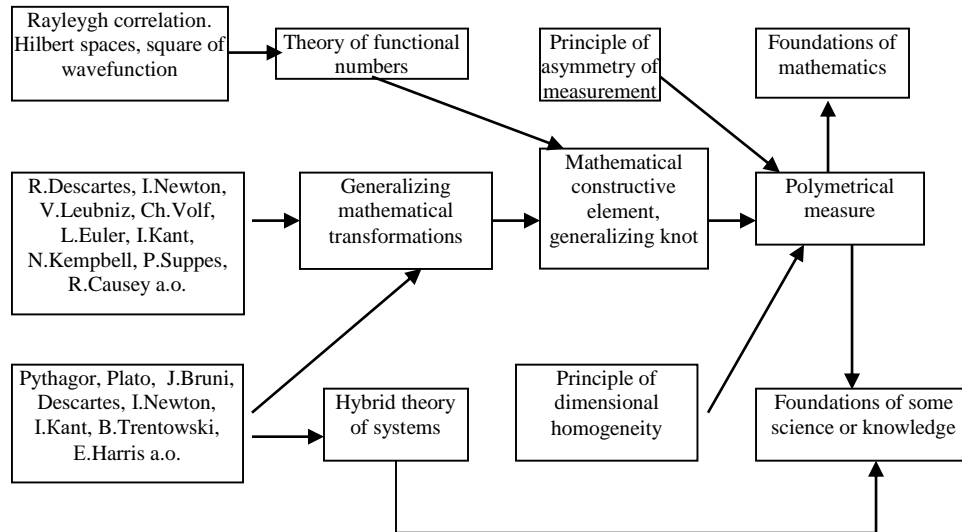


Fig. 1. Schema of polymetric method and its place in modern science [1 – 3].

However, one of the main tasks of polymetric analysis is the problem of simplicity-complexity that arises when creating or solving a particular problem or science. It must be open system [1 – 3].

The polymetric analysis may be represented as universal theory of synthesis in Cartesian sense. For resolution of this problem we must select basic notions and concepts, which are corresponded to PA. The universal simple value is unit symbol, but this symbol must be connected with calculation. Therefore it must be number. For the compositions of these symbols (numbers) in one system we must use system control and operations (mathematical operations or transformations). After this procedure we received the proper measure, which is corresponding system of knowledge and science.

Therefore the basic axiomatic of the polymetric analysis is was selected in the next form [1 – 3].

Definition 1. Mathematical construction is called set all possible elements, operations and transformations for resolution corresponding problem. The basic functional elements of this construction are called constructive elements.

Definition 2. The mathematical constructive elements $N_{x_{ij}}$ are called **the functional parameters**

$$N_{x_{ij}} = x_i \cdot \bar{x}_j, \quad (1)$$

where x_i, \bar{x}_j – the straight and opposite parameters, respectively; \cdot – respective mathematical operation.

Definition 3 . The mathematical constructive elements $N_{\varphi_{ij}}$ are called the **functional numbers**

$$N_{\varphi_{ij}} = \varphi_i \circ \bar{\varphi}_j. \quad (2)$$

Where $\varphi_i(x_1, \dots, x_n, \bar{x}_1, \dots, \bar{x}_m, \dots, N_{x_{ij}}, \dots)$, $\bar{\varphi}_j(x_1, \dots, x_n, \bar{x}_1, \dots, \bar{x}_m, \dots, N_{x_{ij}}, \dots)$ are the straight and opposite functions, respectively; \circ – respective mathematical operation.

Remark 1. Functions $\varphi_i, \bar{\varphi}_j$ may be have different nature: mathematical, linguistic and other.

Another example may be the orthogonal eigenfunctions of the Hermitian operator.

The theory of generalizing mathematical transformations is created for works on functional numbers [1 – 3].

Definition 4. Qualitative transformations on functional numbers $N_{\varphi_{ij}}$ (straight A_i and opposite \bar{A}_j) are called the next transformations. The straight qualitative transformations are reduced the dimension $N_{\varphi_{ij}}$ on i units for straight parameters, and the opposite qualitative transformations are reduced the dimension $N_{\varphi_{ij}}$ on j units for opposite parameters.

Definition 5. Quantitative (calculative) transformations on functional numbers $N_{\varphi_{ij}}$ (straight O_k and opposite \bar{O}_p) are called the next transformations. The straight calculative transformations are reduced $N_{\varphi_{ij}}$ or corresponding mathematical

constructive element on k units its measure. The opposite quantitative transformations are increased $N_{\varphi_{ij}}$ or corresponding mathematical constructive element on l units its measure, i.e.

$$O_k \overline{O}_l N_{\varphi_{ij}} = N_{\varphi_{ij}} - k \oplus l. \quad (3)$$

Definition 8. Left and right transformations are called transformations which act on left or right part of functional number respectively.

Definition 9. The maximal possible number corresponding transformations is called **the rang of this transformation**

$$\text{rang}(A_i \overline{A}_j N_{\varphi_{ij}}) = \max(i, j); \quad (4)$$

$$\text{rang}(O_k \overline{O}_p N_{\varphi_{ij}}) = \max(k, p). \quad (5)$$

Remark 2. The indexes i, j, k, p are called **the steps of the corresponding transformations**.

For this case we have finite number of generalizing transformations.

Basic elements of PA were called the generalizing mathematical elements or its various presentations – informative knots [1 – 3]. Generalizing mathematical element $\overset{stqo}{nmab} M_{ijkp}$ is the composition of functional numbers (generalizing quadratic forms, including complex numbers and functions) and generalizing mathematical transformations, which are acted on these functional numbers in whole or its elements [1 – 3]. Roughly speaking these elements are elements of functional matrixes.

This element $\overset{stqo}{nmab} M_{ijkp}$ may be represented in next form

$$\overset{stqo}{nmab} M_{ijkp} = A_i \overline{A}_j O_k \overline{O}_p A_s^r \overline{A}_t^r O_q^r \overline{O}_o^r A_n^l \overline{A}_m^l O_a^l \overline{O}_b^l N_{\varphi_{ij}}. \quad (6)$$

Where $N_{\varphi_{ij}}$ – functional number; $O_k, O_q^r, O_a^l, \overline{O}_p, \overline{O}_o^r, \overline{O}_b^l$; $A_i, A_s^r, A_n^l, \overline{A}_j, \overline{A}_t^r, \overline{A}_m^l$ are quantitative and qualitative transformations, straight and inverse (with tilde), (r) – right and (l) – left..

We have only 15 minimal types of mathematical transformations, only six are mathematical in classic sense [1 – 3].

Polyfunctional matrix, which is constructed on elements (6) is called informative lattice. For this case generalizing mathematical element was called knot of informative lattice [1 – 3]. Informative lattice is basic set of theory of informative calculations. This theory was constructed analogously to the analytical mechanics [1 – 3].

Basic elements of this theory are [1 – 3]:

1. Informative computability C is number of possible mathematical operations, which are required for the resolution of proper problem.

2. Technical informative computability $C_t = C \sum t_i$, where t_i – realization time of proper computation.

3. Generalizing technical informative computability $C_{t0} = k_{ac} C_t$, where k_{ac} – a coefficient of algorithmic complexity [1].

Basic principle of this theory is **the principle of optimal informative calculations** [1 – 3]: any algebraic, including

constructive, informative problem has optimal resolution for minimum informative computability C , technical informative computability C_t or generalizing technical informative computability C_{t0} .

For classification the computations on informative lattices hybrid theory of systems was created [1 – 3]. This theory allow to analyze proper system with point of view of its complexity,

The basic principles of hybrid theory of systems are next: 1) **the criterion of reciprocity**; 2) **the criterion of simplicity**.

The criterion of reciprocity is the principle of the creation the corresponding mathematical constructive system (informative lattice). The criterion of simplicity is the principle the optimization of this creation.

The basic axiomatic of hybrid theory of systems is represented below [1 – 3].

Definition 8. The set of functional numbers and generalizing transformations together with principles reciprocity and simplicity (informative lattice) is called **the hybrid theory of systems** (in more narrow sense the criterion of the reciprocity and principle of optimal informative calculations).

Criterion of the reciprocity for corresponding systems is signed the conservation in these systems the next categories:

- 1) the completeness;
- 2) the equilibrium;
- 3) the equality of the number epistemological equivalent known and unknown knotions.

Criterion of the simplicity for corresponding systems is signed the conservation in these systems the next categories:

- 1) the completeness;
- 2) the equilibrium;
- 3) the principle of the optimal calculative transformations.

For more full formalization the all famous regions of knowledge and science the **parameter of connectedness** σ_t was introduced. This parameter is meant the number of different bounds the one element of mathematical construction with other elements of this construction. For example, in classic mathematics $\sigma_t = 1$, in linguistics and semiotics $\sigma_t > 1$. The parameter of connectedness is the basic element for synthesis in one system of formalization the all famous regions of knowledge and science. It is one of the basic elements for creation the theory of functional logical automata too.

Thus we can receive next 10 types of hybrid systems [1 – 3]:

1. The system with conservation all positions the criteria of reciprocity and simplicity for all elements of mathematical construction ($N_{\varphi_{ij}}$ and transformations) is called the *simple system*.

2. The system with conservation the criterion of simplicity only for $N_{\varphi_{ij}}$ is called the *parametric simple system*.

Remark 4. Further in this classification reminder of criteria of reciprocity and simplicity is absented. It mean that these criteria for next types of hybrid systems are true.

3. The system with conservation the criterion of simplicity only for general mathematical transformations is called *functional simple system*.

4. The system with nonconservation the principle of optimal informative calculation and with $\sigma_i = 1$ is called the *semisimple system*.

5. The system with nonconservation the principle of optimal informative calculation only for $N_{\varphi_{ij}}$ and with $\sigma_i = 1$ is called the *parametric semisimple system*.

6. The system with nonconservation the principle of optimal informative calculation only for general mathematical transformations and with $\sigma_i = 1$ is called the *functional semisimple system*.

7. The system with nonconservation the principle of optimal informative calculation and with $\sigma_i \neq 1$ is called *complicated system*.

8. The system with nonconservation the principle of optimal informative calculation only for $N_{\varphi_{ij}}$ is called *parametric complicated system*.

9. The system with nonconservation the principle of optimal informative calculation only for general mathematical transformations and with $\sigma_i \neq 1$ is called *functional complicated system*.

10. The system with nonconservation the criteria of reciprocity and simplicity and with $\sigma_i \neq 1$ is called *absolute complicated system*.

With taking into account 15 basic types of generalized mathematical transformations we have 150 types of hybrid systems; practically 150 types of the formalization and modeling of knowledge and science.

Only first four types of hybrid systems may be considered as mathematical, last four types are not mathematically. Therefore HTS may be describing all possible system of knowledge. Problem of verbal and nonverbal systems of knowledge is controlled with help of types the mathematical transformations and parameter connectedness [1 – 3].

HTS allows classifying all possible knowledge by step simplicity – complexity. It may be used for the representation evolution of development of concrete science from complexity to simplicity.

PA may be represented as natural concept of foundation of mathematics. It may be represented as formalization Pythagorean phrase “Numbers rules of the World”, Plato concept of three types of numbers: arithmetical (pure mathematics); sensitive (applied mathematics) and ideal

(numerology), and variant resolution S. Beer problem in more widely sense [1 – 3].

It may be represented as third way of classification of knowledge alongside with mathematical (Euclidean line) and general scientific (Aristotelian line). Roughly speaking these two lines is united in one.

CONCLUSIONS

The problem of creation the universal system of analysis, synthesis and formalization of knowledge is analyzed.

We shown that this problem must be connected with problem of measurement, prognostication and calculation.

Basic notions of polymetric analysis as variant of resolution of this problem are represented.

Basic applications of PA for the resolution of some problems of modern science and knowledge, including further unification, are analyzed with point of its complexity.

PA may be represent as natural concept of foundations mathematics and foundation of science in Cartesian sense too are analyzed.

REFERENCES

- [1] P. P. Trokhimchuck, *Mathematical foundations of knowledge. Polymetrical doctrine*, 2nd ed. Lutsk: Vezha-Print, 2011 (In Ukrainian)
- [2] P. P. Trokhimchuck, *Polymetrical Analysis, History. Concepts. Applications*. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2018.
- [3] P. P. Trokhimchuck “Effective Computations and Foundations of Science”, *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, vol.5, is.10, 2017. – P. 162-171.
- [4] B. Russell. *A history of western philosophy*. Ney York a. o.: A Touchstone Book, 1972.
- [5] B. Russel. *Introduction to mathematical philosophy*. – London: Museum street, 1948.
- [6] G. W. Leibniz. *Studies of Universal Calculus*. In Gottfried Wilhelm Leibniz. Works in four volumes, volume 3. – Moscow: Mysl', 1984. v. 3. – P. 533-537. (In Russian)
- [7] I. Newton. *Mathematical Principles of Natural Philosophy*. Moscow: Nauka, 1989. (In Russian)
- [8] V. I. Arnold. What is mathematics? – Moscow: MTNMO, 2002. (In Russian)
- [9] L. de Broglie. “Thermodynamics of isolated point (Hidden thermodynamics of particles).” In: L. de Broglie. Collected papers, vol. 4. –Moscow, Print-Atel'e, 2014. P. 8 – 111. (In Russian)
- [10] E. E. Harris. Hypothesis and perception. – London: George Allen Unwin and N.-Y.: Humanities Press, 1970.
- [11] N. R. Campbell. *Physics: in elements*. Cambridge: University Press, 1920.

СЕКЦІЯ 8.

**Прикладні методи дослідження дискретно-неперервних
математичних моделей**

SECTION 8.

**Applied methods for continuous and discrete mathematical models
research**

Зсувне Пластичне Відшаровування Жорсткого Прямокутного Включення

Василь Кривень
кафедра математичних методів в інженерії
Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя
Тернопіль, Україна
kryvenv@gmail.com

Андрій Бойко
кафедра математичних методів в інженерії
Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя
Тернопіль, Україна
boyko.a111@gmail.com

Надія Крива
кафедра математичних методів в інженерії
Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя
Тернопіль, Україна
Nadja.Kryva@gmail.com

Наталя Блащак
кафедра математичних методів в інженерії
Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя
Тернопіль, Україна
nblashchak@gmail.com

Plastic Shear Exfoliation of Rigid Rectangular Inclusion

Vasyl Kryven
Department of Mathematical Methods in Engineering
Ternopil Ivan Puluj National Technical University
Ternopil, Ukraine
kryvenv@gmail.com

Andriy Boyko
Department of Mathematical Methods in Engineering
Ternopil Ivan Puluj National Technical University
Ternopil, Ukraine
boyko.a111@gmail.com

Nadia Kriva
Department of Mathematical Methods in Engineering
Ternopil Ivan Puluj National Technical University
Ternopil, Ukraine
Nadja.Kryva@gmail.com

Natalia Blashchak
Department of Mathematical Methods in Engineering
Ternopil Ivan Puluj National Technical University
Ternopil, Ukraine
nblashchak@gmail.com

Анотація — Розв'язано задачу про пластичне відшарування жорсткого прямокутного включення в ідеально пружно-пластичному середовищі навантаженому на нескінченності зсувними зусиллями паралельними до горизонтальних сторін включення. Приймалося, що пластичні деформації зосереджені на границі включення в шарах нульової товщини, які починаються від його вершин. Знайдено довжини шарів пластичності і величину пластичного відшарування як функції прикладеного навантаження..

Abstract — Plastic peeling of the rigid rectangle inclusion in the ideal elastoplastic environment stressed by the shift efforts parallel to the horizontal inclusion sides problem is solved. Plastic

deformation are adopted to be concentrate at the inclusion bounds in the zero width layers beginning from its tips. Plastic layers length and plastic peeling value (displacement rupture) at the inclusion tips are found a loading functions. It is shown that the total peeling of the horizontal inclusion sides occur under some loading and vertical sides don't peel.

Ключові слова—прямокутне включення, пластичне відшаровування, аналітичний розв'язок, конформне відображення

Keywords—rectangular inclusion, plastic exfoliation, analytical solution, conformal mapping

I. ВСТУП

Дослідження пластичних ефектів в околі концентраторів напружень – важлива проблема механіки. Її теоретичні дослідження стосуються насамперед тріщин (вирізів нульової товщини) [1] і безмежно тонких включень [2] – випадків коли можливе моделювання дефекту лінією розриву зміщення. Значно слабше представлено у літературі випадок включень і вирізів скінченної (ненульової) товщини [4, 5]. В роботі [3] для дослідження пластичних ефектів в околі вершини жорстких включень при антиплоскій деформації запропоновано модель пластичного відшарування за якою пластичні деформації вважаються локалізованими в тонких шарах вздовж границі пружна матриця – включення, які починаються із точок сингулярності поля пружних деформацій. Довжини шарів визначаються величиною прикладеного навантаження.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Дослідимо пластичне відшарування жорсткого прямокутного включення $|x| \leq a; |y| \leq b$ (рис.1), яке знаходиться в безмежному ідеально пружнопластичному

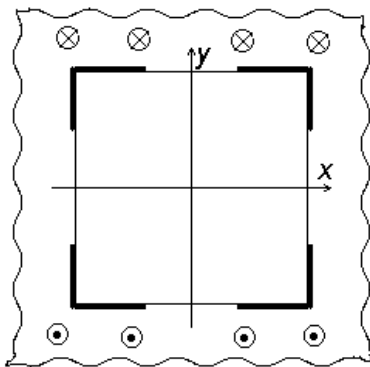


Рис. 1 Поперечний переріз тіла.

середовищі, коли саме середовище перебуває в стані антиплоскої деформації, спричиненому прикладеними у безмежно віддаленій точці зсувними зусиллями $\tau_{xz} = 0; \tau_{yz} = \tau_\infty$. Зони пластичного відшарування в околі кожної із вершин прямокутника складаються із двох горизонтальних та вертикальних смуг (рис.1), довжини яких як функції τ_∞ належить визначити. В результаті відшарування в смугах пластичності виникне розрив зміщення між точками середовища та включення, які спочатку (до прикладення навантаження) вважаємо ідеально зчепленими. Будемо також визначати максимальний розрив зміщення як функцію прикладеного навантаження τ_∞ .

Аналогічно як в роботах [4, 5] приведемо вище поставлену задачу до крайової задачі теорії функцій комплексної змінної $\xi = x + iy$ для аналітичної області

$$D = \{(x > a, y > 0) \cup (x > 0, y > b)\} \quad (\text{рис.2}) \quad \text{функції}$$

$$\tau(\xi) = \tau_{yz}(x, y) + i\tau_{xz}(x, y):$$

$$\begin{cases} \text{Im } \tau(\xi) = 0, & \xi = iy, & y > b; \\ \text{Im } \tau(\xi) = 0, & \xi = x + ib, & 0 < x < x_0, \quad (0 < x_0 \leq a); \\ |\tau(\xi)| = k, & \xi = x + ib, & x_0 \leq x \leq a; \\ |\tau(\xi)| = k, & \xi = a + iy, & y_0 \leq y \leq a, \quad (0 < y_0 \leq b); \\ \text{Re } \tau(\xi) = 0, & \xi = a + iy, & 0 < y < y_0; \\ \text{Im } \tau(\xi) = 0, & \xi = x, & x \geq a; \\ \lim_{\xi \rightarrow \infty} \tau(\xi) = \tau_\infty. \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{Im} \int_{x_0 + ib}^{a + iy_0} \tau(\xi) d\xi = 0, \quad x_0 \neq 0, \quad y_0 \neq 0. \quad (2)$$

де x_0, y_0 – координати кінців горизонтального і вертикального пластичних шарів, k – границя текучості матеріалу середовища при зсуві.

Приведемо фізичний зміст умов (1). Перша і шоста є умовами симетрії поля переміщення $w(x, y)$: парності відносно осі ординат і непарності відносно осі абсцис. Друга і п'ята виражають відсутність зміщень в точках границі середовища – включення, в яких не досягнуто пластичного стану. Третя і четверта – умова пластичності в точках пластичних шарів. Сьома – наслідок задання поля напружень в околі безмежно віддаленої точки.

Кінцеві точки пластичних шарів перебувають в ідеальному механічному контакті із жорстким включенням, тому їх відносне зміщення рівне нулю. Ця вимога, однак, не є наслідком четвертої та п'ятої рівностей із (1) які забезпечують відсутність переміщень окремо на частинах горизонтальної і вертикальної сторін прямокутника, охоплених зонами пластичності. Нульове зміщення кінцевих точок пластичних шарів забезпечує умова (2). Якщо при деякому навантаженні $\tau_\infty = \tau_\infty^{kp}$ $x_0 = 0$ або $y_0 = 0$, то для $\tau_\infty \geq \tau_\infty^{kp}$ умова (2) втрачає сенс, а довжина одного із шарів пластичності стає відомою.

Умовою пластичності є рівність $|\tau(\xi)| = k$. Тому $|\tau(\xi)|$ не може досягати рівня k ніде за винятком точок пластичних шарів і ніде не може перевищувати цього рівня.

III. ДОСЛІДЖЕННЯ І РОЗВ'ЯЗОК ЗАДАЧІ

Функція $\tau(\xi)$, що є аналітичною в області D – першому квадранті комплексної площини ξ без прямокутника $0 \leq x \leq a, 0 \leq y \leq b$, внаслідок умов (1) конформно відображає область D на область $G = \{\text{Re } \tau > 0, \text{Im } \tau > 0, |\tau| > k\}$ (рис. 2).

Оскільки на границях областей D і G існують рівно дві пари A і E точок, афікси яких апріорі відомі, то за теоремою Рімана існує однопараметрична множина

функцій $\tau(\xi)$, які реалізують потрібне відображення (рис. 2) і задовольняють умовам (1).

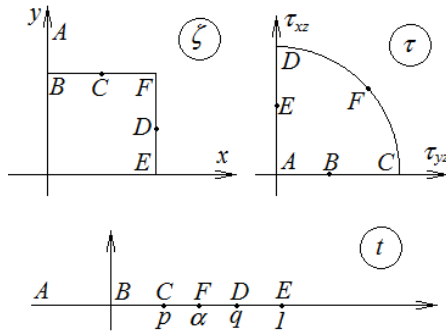


Рис. 1. Конформне відображення.

Далі покажемо, що відповідним вибором параметрів у функції $\tau(\xi)$ можна добитись виконання також умови (2).

Потрібне відображення будемо в параметричній формі шляхом уведення допоміжної комплексної площини t [3]:

$$\tau = \tau(t), \xi = \xi(t), (t \in \mathbb{H}) \quad (3)$$

так, щоб областям D і G відповідала верхня півплощина $H = \{\text{Im}t > 0\}$ (рис.2), де p, α, q, l – фікси точок C, P, D, E , а p, α, q – поки невідомі параметри.

За таких умов відображення $\xi(t)$ існує і єдине. Функцію $\xi(t)$ подамо інтегралом Крістофеля – Шварца:

$$\xi(t) = ib + \frac{a}{\alpha} \int_0^t \frac{\sqrt{\eta - \alpha}}{\sqrt{\eta(\eta - 1)}} d\eta, \quad (4)$$

де $f(t) = \sqrt{|\alpha - t|/|t(t - 1)|}$, $\alpha \in (0; 1)$ – дійсне число, що задовольняє рівнянню.

$$\int_{\alpha}^1 f(t) dt = \frac{b}{a} \int_0^{\alpha} f(t) dt. \quad (5)$$

Тут і далі під $\sqrt{\eta - c}$ (c – дійсне) розуміємо гілку аналітичної функції із розрізом по променю дійсної осі ($c, +\infty$), яка на верхньому березі розрізу приймає дійсні значення.

Тепер можна ввести параметр, вибір якого забезпечуватиме умову (2). Композицією елементарних відображень отримуємо:

$$\tau(t) = k \frac{\sqrt{1-p} \sqrt{t-q} - \sqrt{1-q} \sqrt{t-p}}{\sqrt{q-p} \sqrt{t-1}} \quad (6)$$

Якщо параметри $p \in (0, \alpha)$, $q \in (\alpha, 1)$ вибрати так, що

$$\tau_{\infty} = k \frac{\sqrt{1-p} - \sqrt{1-q}}{\sqrt{q-p}} \quad (7)$$

або

$$q = p \left(\frac{k^2 - \tau_{\infty}^2}{k^2 + \tau_{\infty}^2} \right)^2 + \frac{4k^2 \tau_{\infty}^2}{(k^2 + \tau_{\infty}^2)^2}, \quad (8)$$

то рівності (4), (6), (8) виражатимуть залежну від $p \in (0, \alpha)$ сім'ю функцій $\tau(\xi)$, кожна з яких задовольняє умовам (1) як тільки число α – корінь рівняння (5).

Оскільки $\tau(\xi)$ аналітична в області D , і $x_0 + iy_0 \in \bar{D}$, $a + iy_0 \in \bar{D}$, то в інтегралі (2) можна довільно вибрати шлях інтегрування $\Gamma \in \bar{D}$. Прийmemo, що Γ ламана CPD (шлях співпадає із смугами пластичності). Тоді із (2) одержимо:

$$g_1 = g_2 \quad (9)$$

$$\text{де } g_1 = \frac{1}{\mu} \int_p^{\alpha} \text{Im} \tau(t) |d\xi(t)|, g_2 = \frac{1}{\mu} \int_{\alpha}^q \text{Re} \tau(t) |d\xi(t)|.$$

Тут μ – модуль зсуву середовища, g_1, g_2 – прирости розриву зміщень кінцевих та початкових точок відповідно горизонтального і вертикального пластичних шарів. Із формул (4), (6) знаходимо

$$g_1 = K \int_p^{\alpha} \frac{\sqrt{(t-p)(\alpha-t)}}{\sqrt{t(1-t)}} dt, g_2 = K \int_{\alpha}^q \frac{\sqrt{(t-\alpha)(q-t)}}{\sqrt{t(1-t)}} dt, \quad (10)$$

де $K = k \sqrt{1-p} / \mu / \sqrt{q-p}$.

Рівності (7) – (9) є системою рівнянь для знаходження параметрів p і q для заданого τ_{∞} . При фіксованому p величина g_1 спадна, а g_2 зростаюча функція аргумента $q \in (\alpha, 1)$. Оскільки $g_1 = 0$ при $q = 1$ і $g_2 = 0$ при $q = \alpha$, то рівняння (7) – (9) мають єдиний розв'язок для всіх $p \in (0, \alpha)$. Оскільки $g_1 = 0$ при $q = 1$, то q ні за якого $0 < \tau_{\infty} < k$ не досягає значення 1, інакше не виконуватиметься умова (9). Це означає, що вертикальні смуги не зливаються при $\tau_{\infty} < k$. Горизонтальні смуги зливаються, якщо $p = 0$. Відповідне значення $q = q_{kp}$ знайдемо із (9):

$$\sqrt{1-q_{kp}} \int_0^{\alpha} \frac{\sqrt{(\alpha-t)}}{(1-t)} dt = \int_{\alpha}^{q_{kp}} \frac{\sqrt{(t-\alpha)(q_{kp}-t)}}{\sqrt{t(1-t)}} dt, \quad (11)$$

а навантаження із (7)

$$\tau_{\infty}^{kp} = k \frac{1 - \sqrt{1-q_{kp}}}{\sqrt{q_{kp}}} \quad (12)$$

τ_{∞}^{kp} є функцією тільки через α і, отже, визначається відношенням сторін прямокутника, $\tau_{\infty}^{kp} < k$.

Із формули (5) випливає, що $\alpha \rightarrow 0$, для дуже тонкого включення ($b/a \rightarrow \infty$) і $\alpha \rightarrow 1$ для дуже широкого $\alpha \rightarrow 1$. Тому із рівностей (11), (12) одержуємо, що $\tau_{\infty}^{kp} \rightarrow 0$ коли $b/a \rightarrow \infty$ і $\tau_{\infty}^{kp} \rightarrow k$ коли $b/a \rightarrow 0$.

Для $\tau_\infty \geq \tau_\infty^{kp}$ параметри

$$p = 0, q = 4k^2 \tau_\infty^2 / (k^2 + \tau_\infty^2)^2, \quad (13)$$

а довжини горизонтального d_1 і вертикального d_2 пластичних шарів визначаються формулами

$$d_1 = \frac{a}{\int_0^\alpha f(t) dt^p}, \quad d_2 = \frac{a}{\int_0^q f(t) dt^\alpha} \quad (14)$$

Таким чином визначення довжини шарів пластичного відшарування d_1, d_2 , величини відшарування у вершині включення для заданого навантаження τ_∞ зводиться до наступного. За заданим відношенням сторін прямокутника

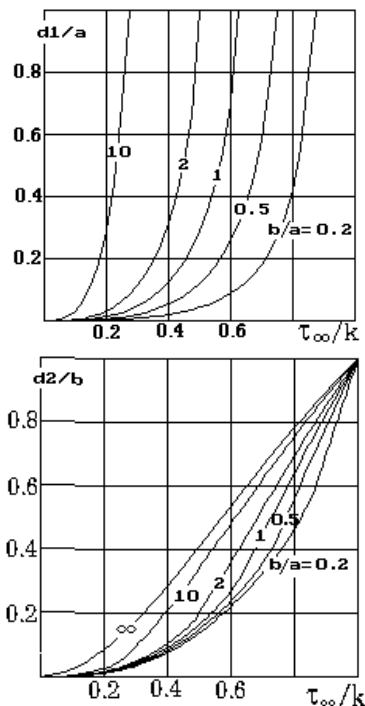


Рис. 2. Довжини пластичних шарів як функції величини прикладеного навантаження.

визначаємо α із рівняння (5), із (11), (12) знаходимо τ_∞^{kp} - навантаження при якому відбувається повне відшарування вздовж горизонтальних сторін. Якщо $\tau_\infty < \tau_\infty^{kp}$ знаходимо параметри p і q розв'язавши систему (8), (9) а коли $\tau_\infty \geq \tau_\infty^{kp}$ за формулами (13). Довжини шарів визначаємо згідно

формул (14), а величину відшарування по одній із формул (10).

Залежності довжини горизонтального шару d_1 , вертикального d_2 і у вершині прямокутника в залежності від величини навантаження τ_∞ наведені на рисунку 3.

Величина міжфазного відшарування у пластичних шарах є зростаючою функцією віддалі від його кінця. Максимальне значення розриву досягається у вершині включення як до повного відшарування горизонтальної сторони так і у її відшаруваному стані.

ВИСНОВКИ

Знайдено числово-аналітичний розв'язок задачі про пластичне відшарування жорсткого прямокутника. Визначені довжини шарів пластичного відшарування і максимального розриву зміщення, який досягається у вершині включення, як функції прикладеного навантаження. Показано, що при певному навантаженні $\tau_\infty = \tau_\infty^{kp} < k$ настане повне відшарування горизонтальної сторони, вертикальні сторони повністю не відшаровуються. τ_∞^{kp} залежить від b/a і тим менше, чим більше b/a . Для тонких включень довжина вертикального шару і розрив зміщення у вершині є близькими до відповідних величин знайдених для безмежно тонкого включення.

Сформульовано і доведено загальну властивість розв'язків пружно-пластичних задач: границя розв'язку пружно-пластичної задачі при $k \rightarrow \infty$ (границя текучості) співпадає із розв'язком пружної задачі.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Саврук М. П. Механіка руйнування та міцність матеріалів : довідн. посіб. / М.П. Саврук, А. Казберук ; за заг. ред. В. В. Панасюка ; Концентрація напружень у твердих тілах з вирізами. – Львів : СПОЛІОМ, 2012. - 384 с. (78).
- [2] Сулим Г.Т. Основи математичної теорії термопружної рівноваги деформівних твердих тіл з тонкими включеннями : монографія / Г.Т. Сулим. – Львів : Дослідно-видавничий центр НТШ, 2007. - 716 с.
- [3] Витвицкий П.М., Кривень В.А. Антиплоская упруго-пластическая деформация тела с жестким тонким включением // Докл. АН УССР. Сер.А. – 1979, №2. – С. 104-108
- [4] Кривень В.А. Пластичне відшарування жорсткого півбезмежного включення скінченної ширини під зсувним навантаженням за наявності міжфазних тріщин / В.А. Кривень, А.Р. Бойко // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. – 2014. – Вип. 19. - С. 84–92.
- [5] Kryven' V.A. Initial stage of plastic exfoliation of a rectangular inclusion under conditions of one-sided contact with a medium / V.A Kryven', V. B. Valyashek // Journal of Mathematical Sciences. – 2010. - Vol. 171, No. 4. – P. 107–116.

Кібер-фізичні Системи: Досягнення та Проблеми

Володимир Г. Скобелєв
відділ теорії цифрових автоматів
Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова
НАН України
Київ, Україна
skobelevg@gmail.com

Володимир В. Скобелєв
відділ теорії цифрових автоматів
Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова
НАН України
Київ, Україна
vvskobelev@incyb.kiev.ua

Cyber-physical Systems: Achievements and Problems

Volodymyr G. Skobelev
Digital Automata Theory Department
Glushkov Institute of Cybernetics of NAS of Ukraine
Kyiv, Ukraine
skobelevg@gmail.com

Volodymyr V. Skobelev
Digital Automata Theory Department
Glushkov Institute of Cybernetics of NAS of Ukraine
Kyiv, Ukraine
vvskobelev@incyb.kiev.ua

Анотація—Дана стаття містить короткий огляд сучасного стану досліджень у напрямку кібер-фізичних систем. Для таких систем розглянуто методи побудови їх уніфікованої архітектури, моделі та методи верифікації, забезпечення безпеки функціонування та захисту від зовнішніх атак, а також моделі та методи їх моніторингу та діагностування несправностей.

Abstract—The given paper is some short survey of the state of the art of researches in the area of cyber-physical systems. For these systems are considered methods for unified design of their architecture, models and methods of verification, ensuring safety and security, and also models and methods for their monitoring and diagnosis of faults.

Ключові слова—гібридні системи, архітектура, верифікація, безпека функціонування, захист від атак, моніторинг та діагностика несправностей

Keywords—hybrid systems, architecture, verification, safety, security, monitoring, diagnosis of faults

I. INTRODUCTION

Implementation of information technologies into numerous fields of mankind activity has led to use of cyber-physical systems (CPS), i.e. the ones that consist of computer networks and/or built-in controllers that control physical processes via feedbacks. This field of applications has begun to prove itself considerably since the end of the last century.

At present, CPS are used in military, transport, power, production and healthcare spheres, at the research of the space, in industrial internet of things, etc. Since all these domains are critical, CPS overwhelmingly is a safety-critical system, and

increased requirements to reliability and safety are imposed at its elaboration and operation.

The significance of CPS in the modern world is confirmed by the fact that the roadmaps for researches in the field of CPS have been developed in the USA [1] and in Europe [2]. Intensive researches in the field of CPS have resulted in the need to comprehend periodically what is reached at the present moment, and what trends are outlined for the next future. Serious attempts to give answers to these questions are, in particular, the surveys [3-7].

The need to use modern technologies for design of CPS and their support during all life cycle caused the development of the relevant mathematical models. This model called a hybrid automaton (HA) has been developed at the end of the last century [8]. Since then, in the development and the analysis of specific CPS, as a rule, appropriated models of HA are used. Only the researches devoted to the general structure of CPS or their applications in the specific applied area can be some exception.

It should be noted that for the last twenty years the theory of HA began to be formed, and in this theory, as at any other theory began to arise the set of problems not always having direct applications to the elaboration and analysis of CPS [9].

In what follows the main achievements and problems connected with CPS and HA are considered briefly.

II. CHALLENGES AND SOLUTIONS FOR CPS

The emergence of numerous CPS in specific areas has raised a natural question: what are these CPS and what problems are solved. Some attempts to answer this question have been made, at least, in areas of aviation [10], space research [11], industry [12], health-care [13], and Internet of Things [14].

One of the main problems at design of the CPS, as any other real system, is the choice of its architecture. Many efforts have been made to investigate this problem, and some its sub-problems.

A critical review of existing modeling techniques, programming languages, and design toolsets for hybrid systems has been presented in [15]. Also, comments and recommendations on how to create a standard interchange format and a standard representation language for hybrid systems that will enable better interaction between groups working on the design of embedded controllers based on hybrid system technology have been provided.

Based on the results of the analysis of typical architecture of Embedded Systems, some prototype architecture for CPS has been proposed in [16]. Reasonably convincing arguments are made in favor of the fact that this architecture captures the essential attributes of CPS and lead to identification of many research challenges.

Major challenges in the integration of cyber world with physical world and its applications have been analyzed in [17], and some architecture with several modules supporting the CPS has been proposed. Each of these modules has its own significance and can be applied to various applications.

Proceeding from the recent advances in the manufacturing industry, unified 5-level architecture as a guideline for implementation of CPS has been proposed in [18]. In this model, advanced information analytics is focused on enabling networked machines to operate much more efficiently, collaboratively and resiliently. It should be noted, that this trend is intended to transforming manufacturing industry to the next generation, namely Industry 4.0.

Some classification of the existing research in the area of CPS, based on their characteristics, and the analysis of the examples of CPS prototypes with the aim to identify future challenges has been presented in [19]. As the authors note, the main aim of this survey is to enable researchers and system designers to get insights into the working and applications of CPS, and motivate them to propose the novel solutions for making wide-scale adoption of CPS a tangible reality.

A survey of researches on the Internet of Things (IoT) has been presented in [20]. In this survey special attention is paid to the analysis of the existing publications, to the identification of current trends, and challenges that threaten IoT diffusion. Besides, some open research problems and future research trends have been outlined.

The concept of the wireless sensor network intended to smart home applications has been presented in [21]. The innovative characteristic of this network is related to its use for information transfer and routing of selected sensors that simultaneously serve as access points and network clients.

A survey of existing approaches to the design of home automation using Wifi has been presented in [22].

The need to create formal specifications at design of CPS has demanded elaboration of relevant means. It should be noted the following achievements in this area.

The Domain-Specific Language (DSL) that comes with fully-automated tool support and is tailored to interoperability

of CPS has been proposed in [23]. This language is intended to assist engineers in designing CPS, and consists of the tool support that includes: (i) interactive model description with input validation; (ii) the computation of possible operation modes of subsystems and parts; and, (iii) checking the adherence to requirements for various design alternatives and finding the Pareto optimal designs given these requirements.

Some hierarchical variant of hybrid logic has been proposed in [24]. The first order correspondence results have been studied and a Hennessy-Milner like theorem relating hierarchical bisimulation and modal equivalence has been proved. Combining hierarchical transition structures with the ability to refer to specific states at different levels, this logic seems suitable to express and verify properties of hierarchical transition systems.

A review and comparison of hybrid systems tools by highlighting their differences in terms of their underlying semantics, expressive power and mathematical mechanisms has been presented in [25]. The need a unifying approach to hybrid systems design has been outlined. As a step in this direction, we make A sketch for a semantic-aware interchange format, which would enable the use of joint techniques, make a formal comparison between different approaches possible, and facilitate exporting and importing design representations has been made.

One of the most actual problems for CPS is to ensure its safety and security. Many researches have been made to investigate this problem.

Analysis of the growing concerns for the security of CPS has been presented in [26]. The need to develop adversary models for CPS has been discussed, some new and fundamentally different problems in CPS as compared to traditional IT security have been identified, and some research directions for preventing, detecting, responding, surviving, and deterring computer attacks have been outlined.

The problem of the elaboration of the test platform for CPS has been investigated in [27]. As an example, some software and hardware have been designed for an unmanned vehicle with wireless sensor networks (WSN) navigation. Proposed test platform has the following two distinguishing features: (1) the vehicle and WSN may be designed either by ourselves or purchased at very low price, and (2) most of the challenges are embodied in this platform.

Brief review of the research progress in the IoT with emphasis on the security has been presented in [28]. On the analysis of the security architecture and features, the security requirements have been formulated. Proceeding from key technologies including encryption mechanism, communication security, protecting sensor data and cryptographic algorithms, some challenges have been briefly outlined.

The attacks for the execution layer, transport layer and control layer have been classified in [29]. The execution layer attacks include security attacks for nodes such as sensors and actuators. Transport layer attacks include data leakage or damage and security issues during massive data integration. Control layer attacks include the loss of user privacy, incorrect access control policies and inadequate security standards. For

all types of attacks security defenses and recommendations have been given.

Some methodology for model-based design of CPS has been proposed in [30]. In this methodology, the logic programming extended with coinduction, constraints over reals, and corouting are used for modeling CPS. The reactor temperature control system has been used as a running example to illustrate the various steps of the proposed methodology. On the base of the proposed framework a model of the system been presented, the safety property for the system has been verified, and performing of parametric analysis has been illustrated.

A methodology for identification and formal analysis of safety and security requirements, based on the Systems-Theoretic Process Analysis has been presented in [31]. Some method intended for generation ‘critical requirements’ to mitigate against undesirable system states, which are subsequently translated into constraints on an event-based representation of the system has been proposed. Using the Rodin toolset it has been demonstrated that automated verification of the critical requirements is provided.

The intellectual similarities and differences between classic information technology security research and IoT security research have been analyzed in [32].

It has been illustrated in [33] how the vulnerabilities exploited by Stuxnet (this attack has been designed to interrupt the Iranian nuclear program) could be addressed at the design level. For this purpose, the system theoretic approach, based on research of system safety, that takes both physical and cyber components into account to analyze the threats exploited by Stuxnet, has been used. This approach is capable to identify cyber threats towards CPSs at the design level. Some recommendations that CPS designers can utilize to design a more secure CPS has been provided.

III. CHALLENGES AND SOLUTIONS FOR HA

The bases of the HA theory of caused by requirements of the analysis and synthesis of CPS has been laid [8, 34, 35]. Since then the HA theory intensively developed in the following two directions.

The first direction consists of purely theoretical researches, such as reachability analysis, compositions of HA, solvability analysis of problems for HA, investigation of relevant transition systems, etc.

The second direction can be called “the theory for practice,” and contains the researches which are directly connected with problems of the analysis and synthesis of CPS. In this direction, many efforts have been made to investigate the following two actual problems.

The first problem consists of ensuring the safety and verification of HA.

Computationally tractable method for safety verification of hybrid systems has been proposed in [36]. This method uses a function called a barrier certificate for proving that all trajectories do not enter an unsafe region. The zero level set of this function separates the unsafe region from all possible trajectories starting from a given set of initial conditions, hence providing an exact proof of system safety.

Some computational scheme for constructing the local barrier functions and their domains of validity has been proposed in [37].

On the base of a durational graph abstraction, for which model checking is decidable, a method for verifying temporal properties of HA has been proposed in [38]. As a case study, air traffic management has been analyzed.

An automatic abstraction methodology for verification of CPS based on labeled hybrid Petri net has been proposed in [39].

Some new kind of barrier certificate with time constraints has been proposed in [40]. These functions are more suitable for HA whose safety heavily relies on well-defined real-time scheduling. The validity of the proposed verification method has been supported by a numerical example.

The second problem is connected with elaboration of methods for on-line diagnoses of CPS.

A model-based approach for diagnosis of CPS based on HA model that parameterizes abrupt and incipient faults has been presented in [41]. A novel mode estimation algorithm that uses model-based prediction to focus distributed processing signal algorithms has been proposed.

Some methodology for online tracking and diagnosis of hybrid systems based on combining digital (discrete) supervisory controllers with analog (continuous) plants has been presented in [42]. The effectiveness of the proposed approach has been illustrated for the fuel-transfer system of fighter aircraft.

The diagnosability of hybrid systems on the base of casting the problem into a discrete-event framework and hybrid diagnosability conditions has been investigated in [43]. As a case study, the attitude and orbit control system has been used.

Some diagnostic system based on control of the execution time of the tasks during the operation of the hybrid system has been proposed in [44].

IV. INTRODUCTION

In the given paper some short survey of the state of the art of researches in the area of CPS and HA. In recent years the number of publications connected with the problems considered in this paper, and also with the new problems arising at the research of CPS increased significantly. This factor emphasizes the important role which these systems play in the activity of mankind.

REFERENCES

- [1] (2013). “Foundations for Innovation in Cyber-Physical Systems. Workshop Summary Report,” [Online]. Available: www.nist.gov/sites/default/files/documents/el/CPS-WorkshopReport-1-30-13-Final.pdf
- [2] (2015) “Cyber-Physical European Roadmap and Strategy,” [Online]. Available: <http://cyphers.eu/sites/default/files/d6.1+2-report.pdf>
- [3] J. Shi, J. Wan, H. Yan, and H. Suo. “A Survey of Cyber-Physical Systems,” in *Wireless Communications and Signal: International Conference WCSP 2011*. Nanjing, China, 2011. [Online]. Available: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.397.4496&rep=rep1&type=pdf>
- [4] J. Wan, H. Yan, H. Suo, and F. Li. “Advances in Cyber-Physical Systems Research,” *KSII Trans. on Internet and Information Systems*, 5 (11), 2011, pp. 1891-1908.

- [5] Y.B. Reddy. "Cyber-Physical Systems: Survey," in *Information Security and Digital Forensics: International Conference*. Thessaloniki, Greece, 2014, [Online]. Available: https://www.academia.edu/9722710/Cyber-Physical_Systems_Survey
- [6] V. Gunes, S. Peter, N. Givargis, and F. Vahid. "A survey on concepts, applications, and challenges in cyber-physical systems," *KSII Trans. on Internet and Information Systems*, 8 (12), 2014, pp. 4242-4268.
- [7] Y. Liu, Y. Peng, B. Wang, S. Yao, and Z. Liu. "Review on cyber-physical systems," *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 4 (1), 2017, pp. 27-40.
- [8] T. Henzinger. "The Theory of Hybrid Automata," in: *Logic in Computer Science: 11th Annual IEEE Symposium*, IEEE Computer Society Press, 1996, pp. 278-292.
- [9] E.A Lee, S.A. Seshia. "Introduction to Embedded Systems. A Cyber-Physical Systems Approach," MIT Press, 2017.
- [10] K. Sampigethaya, and R. Poovendran. "Aviation Cyber-Physical Systems: Foundations for Future Aircraft and Air Transport," *Proceedings of the IEEE*, 101 (8), 2013, pp. 1834-1855.
- [11] A. Canedo, and J.H. Richter. "Architectural Design Space Exploration of Cyber-Physical Systems using the Functional Modeling Compiler," *Procedia CIRP*, 21, 2014, pp. 46-51.
- [12] J. Lee. "Smart Factory Systems," *Informatik-Spectrum* 38 (3), 2015, pp. 230-235
- [13] N. Dey, A.S. Ashour, F. Shi, S.J. Fong, and J.M. Tavares. "Medical Cyber-Physical Systems: a Survey," *Journal of Medical Systems*, 2018, 42 (4), pp. 1-13.
- [14] H. Xu, W. Yu, D. Griffith, and N. Golmie. "A Survey on Industrial Internet of Things: A Cyber-Physical Systems Perspective," IEEE Access. *Special Section on Towards Service-Centric Internet of Things (IoT): From Modeling to Practice*, Dec., 2018, [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8558534>
- [15] L.P. Carloni, M.D. DiBenedetto, R. Passerone, A. Pinto, and A. Sangiovani-Vincentelli. "Modeling Techniques, Programming Languages, and Design Toolsets for Hybrid Systems," *Tech. Rep., 2004*, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1561/1000000001>
- [16] Y. Tan, S. Goddard, and L.C. Perez. "A Prototype Architecture for Cyber-Physical Systems," *ACM Sigbed Review*, 2008, 5 (1), pp. 26-27.
- [17] S.A.H. Ahmed, G. Kim, and D. Kim. "Cyber Physical System: Architecture, Applications and Research Challenges," *IFIP Wireless Days*, 2013, [Online]. Available: www.academia.edu/8085376/Cyber_Physical_System_Architecture_Applications_and_Research_Challenges
- [18] J. Lee, B. Bagheri, H.-A. Kao. "A Cyber Physical Systems Architecture for Industry 4.0-based Manufacturing Systems," *Manufacturing Letters*, 2014, 3, pp. 18-23.
- [19] S.K. Khaitan, and J.D. McCalley. "Design Techniques and Applications of Cyber Physical Systems: A Survey," *IEEE Systems Journal*, 2015, 9 (2), pp. 350-365.
- [20] A. Whitmore, A. Agarwal, and L. Xu. "The Internet of Things-A survey of topics and trends," *Information Systems Frontiers*, 2015, 17 (2), pp. 261-274.
- [21] P. Lech, "WiFi Multi Access Point Smart Home IoT Architecture," *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2016, 466, pp. 247-254.
- [22] D. Sharma. "A Review on Application of Internet of Things for Home Automation," *International Journal for Scientific Research & Development*, 2017, 5 (9), pp. 716-718.
- [23] F. Berg, V. Garousi, B. Tekinerdogan, and B.R. Haverkort. "Designing Cyber-Physical Systems with a DSL: a Domain-Specific Language and Tool Support," *System of Systems Engineering: IEEE 13th Annual Conference SoSE 2018*, Paris, France, 2018. [Online]. Available: www.utwente.nl/en/eemcs/adsl/papers/sose2018.pdf
- [24] A. Madeira, R. Neves, M.A. Martins, and L.S. Barbosa. "Hierarchical Hybrid Logic," *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 2018, pp. 167-184.
- [25] L.P. Carloni, R. Passerone, A. Pinto, and A. Sangiovani-Vincentelli. "Languages and Tools for Hybrid Systems Design," *Foundations and Trends in Electronic Design Automation*, 2006, 1 (1/2), pp. 1-193.
- [26] A.A. Cardenas, S. Amin, B. Sinopoli, A. Giani, A. Perrig, and S. Sastry "Challenges for Securing Cyber Physical Systems," *Future Directios in Cyber Physical Systems Security: Workshop DHS*, Newark, NJ, USA, 2009. [Online]. Available: <https://ptolemy.berkeley.edu/projects/chess/pubs/601/cps-security-challenges.pdf>
- [27] J. Wan, H. Suo, H. Yan, and J. Liu. "A General Test Platform for Cyber-Physical Systems: Unmanned Vehicle with Wireless Sensor Network Navigation," *Procedia Engineering*, 2011, 24, pp. 123 - 127.
- [28] H. Suo, J. Wan, C. Zou, and J. Liu. "Security in the Internet of Things: A Review," *Computer Science and Electronics Engineering: IEEE International Conference*. Hangzhou, China, 2012, pp. 648-651.
- [29] T. Lu, J. Lin, L. Zhao, Y. Li, and Y. Peng. "A Security Architecture in Cyber-Physical Systems: Security Theories, Analysis, Simulation and Application Fields," *International Journal of Security and Its Applications*, 2015, 9 (7), pp.1-16.
- [30] N. Saeedloei, and G. Gupta. "A Methodology for Modeling and Verification of Cyber-Physical Systems based on Logic Programming," *ACM SIGBED Review*, 2016, 13 (2), pp. 34-42.
- [31] G. Howard, M. Butler, J. Colley, and V. Sassone. "Formal analysis of safety and security requirements of critical systems supported by an extended STPA methodology," *Security and Privacy Workshops: IEEE European Symposium*. London, UK, 2017, pp. 174-180.
- [32] E. Fernandes, A. Rahmati, K. Eykholt, and A. Prakash. "Internet of Things Security Research: A Rehash of Old Ideas or New Intellectual Challenges?" *IEEE Security & Privacy*, 2017, 15 (4), pp. 79-84.
- [33] A. Nourian, and S. Madnick "A Systems Theoretic Approach to the Security Threats in Cyber Physical Systems Applied to Stuxnet," *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 2018, 15 (1), pp. 2-13.
- [34] J. Lygeros. "Lecture notes on hybrid systems," University of Cambridge, Cambridge, UK, 2003. [Online]. Available: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779579688470/lygeros.pdf>
- [35] J.F. Raskin. "An Introduction to Hybrid Automata," *Handbook of Networked and Embedded Control Systems*. Springer-Verlag, 2005, pp. 491-518.
- [36] S. Prajna, and A. Jadbabaie. "Safety Verification of Hybrid Systems Using Barrier Certificates," *Lecture Notes in Computer Science*, 2004, 2993, pp. 477-492.
- [37] A.A. Julius, and G.J. Pappas. "Trajectory Based Verification Using Local Finite-Time Invariance Certificates," *Lecture Notes in Computer Science*, 2009, 5469, pp. 223-236.
- [38] A. D'Innocenzo, A.A. Julius, G.J. Pappas, M.D. Di Benedetto, and S. Di Gennaro. "Verification of Temporal Properties on Hybrid Automata by Simulation Relations," *Decision and Control: 46th IEEE Conference*. New Orleans, LA, USA, 2007, pp. 4039-4044.
- [39] R.A. Thacker, K.R. Jones, C.J. Myers, and H. Zheng. "Automatic Abstraction for Verification of Cyber-Physical Systems," *Cyber-Physical Systems: The 1st ACM/IEEE International Conference*. Stockholm, Sweden, 2010, pp. 12-21.
- [40] G. Wang, and J. Liu. "Safety Verification of Hybrid Automata with Transient Safe Model," *International Journal of Modeling and Optimization*, 2016, 6 (4), pp. 238-245.
- [41] F. Zhao, X. Koutsoukos, H. Haussecker, and J. Reich. "Monitoring and Fault Diagnosis of Hybrid Systems," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B*, 2005, 35 (6), pp. 1225-1240.
- [42] S. Narasimhan, and G. Biswas. "Model-Based Diagnosis of Hybrid Systems," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A*, 2007, 37 (3), pp. 348-361.
- [43] M. Bayouhdh, and L. Travé-Massuyès. "Diagnosability analysis of hybrid systems cast in a discrete-event framework," *Discrete Event Dynamical Systems*, 2014, 24, pp. 309-338.
- [44] L. Mhamdi, L. Belkacem, H. Dhoubi, and Z.S. Abazi. "Using Hybrid Automata for Diagnosis of Hybrid Dynamical Systems," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2015, 5 (6), pp. 1396-1406.

Прямий Метод Дослідження Теплообміну у Системі – Куля Всередині Багатошарової Сферичної Оболонки

Роман Тацій, Марта Стасюк, Олег Пазен
кафедра прикладної математики та механіки
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності
Львів, Україна
roman.tatsiy@gmail.com, marta_stasiuk@yahoo.com, opazen@gmail.com

Direct Method of Research of the Heat Transfer in the System – Bullet Inside a Multilayered Spherical Shell

Roman Tatsiy, Marta Stasiuk, Oleg Pazen
Department of Applied Mathematics and Mechanics
Lviv State University of Life Safety
Lviv, Ukraine
roman.tatsiy@gmail.com, marta_stasiuk@yahoo.com, opazen@gmail.com

Анотація—Запропонована робота присвячена застосуванню прямого методу до дослідження процесів теплообміну в системі – куля всередині багатошарової сферичної оболонки (конструкції). Для розв'язування такої задачі поставлено допоміжну задачу про визначення розподілу нестационарного температурного поля у багатошаровій порожнистій сферичній конструкції з «вилученою» кулею достатньо малого радіуса. Реалізація розв'язку допоміжної задачі проводиться шляхом застосування методу редукції із використанням концепції квазіпохідних. Надалі використовується схема Фур'є із застосуванням модифікованого методу власних функцій. Для знаходження розв'язку вихідної задачі використано ідею граничного переходу шляхом прямування радіусу вилученої кулі до нуля. Встановлено, що при такому підході всі власні функції відповідної задачі на власні значення не мають особливостей в нулі, а це означає, що й розв'язки вихідної задачі є обмеженими у всій конструкції. Для ілюстрації запропонованого методу розв'язано модельний приклад про знаходження розподілу температурного поля у системі семишарових сферичних конструкцій з різними теплофізичними характеристиками матеріалів.

Abstract— The article is devoted to the application of the direct method to the research of heat transfer processes in the system - bullet inside a multilayered spherical shell (construction). To solve

such a problem, an auxiliary problem is proposed to determine the distribution of a unsteady temperature field in a multilayer hollow spherical construction with a "deleted" bullet of sufficiently small radius. The implementation of the solution of the auxiliary problem is carried out by applying a reduction method using the concept of quasi derivatives. In the future, the Fourier scheme is used with the use of the modified eigenfunctions method. To find the solution of the original problem, the idea of the marginal transition is used by passing the radius of the "deleted" bullet to zero. It is established that in this approach all the eigenfunctions of the corresponding problem on the eigenvalues have no singularities at zero, which means that the solutions of the original problem are constrained throughout the design. To illustrate the proposed method, a model example of finding the distribution of a temperature field in a system of seven-layer spherical constructions with different thermophysical properties of materials is solved.

Ключові слова—багатошарова куля, квазіпохідна, прямий метод, граничний перехід

Keywords— multilayer sphere, quasi derivative, direct method, marginal transition

I. ВСТУП

Багатошарові конструкції набули широкого застосування у різних галузях індустрії: будівництві, нафтогазовій, аерокосмічній, енергетичній та інших сферах.

Характерною особливістю таких елементів є поєднання різного роду механічних та теплофізичних характеристик шарів, що робить їх більш досконалішими. Проте, такий підхід зумовлює значні труднощі при розробці аналітичних методів їх дослідження.

Розв'язуванню проблеми теплообміну присвячені численні публікації. Основні методи дослідження задач про визначення розподілу нестационарного температурного поля у багатошарових конструкціях умовно поділяються на три види: а) прямі або класичні, які базуються на методі відокремлення змінних [1, 2]; б) операційні, що використовують різного роду інтегральні перетворення [3, 4]; в) наближені аналітичні та числові методи [5, 6].

Так, зокрема, за останні роки в роботах [7, 8] розглядаються багатошарові порожнисті циліндричні та сферичні конструкції. В основу цих публікацій покладено пряму (класичну) схему дослідження, що базується на методі редукції, концепції квазіпохідних, сучасній теорії систем лінійних диференціальних рівнянь, модифікованому методі власних функцій Фур'є.

II. ПОСТАНОВКА ВИХІДНОЇ ЗАДАЧІ

В початковий момент часу $\tau = 0$, куля радіусом $r = r_0$ вкладається в багатошарову порожнисту конструкцію радіусами $r_0 < r_1 < r_2 < \dots < r_{n-1} < r_n$ з однаковою початковою температурою $T = T_0$, яка співпадає з температурою навколишнього середовища. Між кулями існує ідеальний тепловий контакт (рис.1).

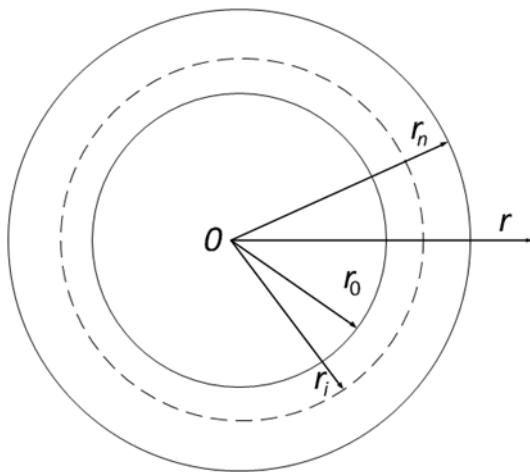


Рис. 1. Схема системи багатошарових сферичних куль (діаметральний переріз)

На зовнішній поверхні багатошарової порожнистої кулі існує конвективний теплообмін з навколишнім середовищем, тобто виконуються крайові умови третього роду. Температура навколишнього середовища змінюється за деяким законом $\psi(\tau)$, тобто залежить від часу τ . Необхідно знайти розподіл нестационарного температурного поля $T(r, \tau)$ у будь який момент часу τ у такій складній системі.

Така постановка задачі зводиться до розв'язування диференціального рівняння теплопровідності [3][3]

$$\tilde{n}\rho \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \lambda \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right), \quad (1)$$

$$r \in (0, r_n), \quad \tau > 0,$$

з початковою умовою

$$T(r, 0) = T_0, \quad (2)$$

крайовою умовою

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r}(r_n, \tau) = \alpha(T(r_n, \tau) - \psi(\tau)), \quad (3)$$

та умовою симетрії

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r}(0, \tau) = 0. \quad (4)$$

III. ДОПОМІЖНА ЗАДАЧА

У системі, куля всередині багатошарової оболонки, «вилучимо» кулю радіусом $r = \varepsilon$, $0 < \varepsilon < r_0$ та розглянемо мішану задачу теплопровідності для багатошарової порожнистої сферичної конструкції зображеної на рис. 2.

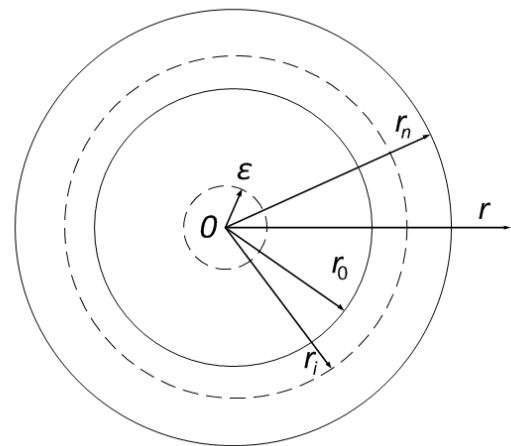


Рис. 2. Схема багатошарової порожнистої сферичної конструкції

Нехай θ_i – характеристична функція [9] на проміжках $[\varepsilon, r_n)$ тобто

$$\theta_0(r) = \begin{cases} 1, & r \in [\varepsilon, r_0), \\ 0, & r \notin [\varepsilon, r_0), \end{cases}$$

$$\theta_{i+1}(r) = \begin{cases} 1, & r \in [r_i, r_{i+1}), \\ 0, & r \notin [r_i, r_{i+1}), \end{cases} \quad i = 0, n-1.$$

Позначимо, $\lambda(r) = \sum_{i=0}^{n-1} \lambda_i \theta_i$, $c(r) \rho(r) = \sum_{i=0}^{n-1} c_i \rho_i \theta_i$, $\lambda_i > 0$, $c_i \rho_i > 0$, $\forall i = \overline{0, n-1}$, $\lambda_i, c_i, \rho_i \in \mathbb{R}$.

Для знаходження розподілу нестационарного температурного поля у цій багат шаровій порожнистій сферичній конструкції необхідно знайти розв'язок диференціального рівняння теплопровідності [8]

$$\tilde{n}\rho \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \lambda \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right), r \in (\varepsilon, r_n), \tau > 0, \quad (5)$$

з початковою умовою

$$t(r, 0) = t_0, \quad (6)$$

та крайовими умовами

$$\begin{cases} \lambda \frac{\partial t}{\partial r}(\varepsilon, \tau) = 0, \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial r}(r_n, \tau) = \alpha (T(r_n, \tau) - \psi(\tau)). \end{cases} \quad (7)$$

Ввівши позначення $t^{[1]} \stackrel{df}{=} r^2 \lambda t'_r$, та помноживши крайові умови (7) на r^2 отримаємо

$$\begin{cases} t^{[1]}(\varepsilon, \tau) = 0, \\ \alpha r_n^2 t(r_n, \tau) + t^{[1]}(r_n, \tau) = \alpha r_n^2 \psi(\tau). \end{cases} \quad (8)$$

Розв'язок задачі (5)-(6) шукатимемо за допомогою методу редукції [10], [11]

$$t(r, \tau) = u(r, \tau) + v(r, \tau), \quad (9)$$

де одна з функцій ($u(r, \tau)$ або $v(r, \tau)$) вибирається спеціальним чином, а інша вже визначається однозначно.

A. Крайова задача для $u(r, \tau)$ та мішана задача для $v(r, \tau)$.

Введемо позначення $r^2 \lambda u'_r \stackrel{df}{=} u^{[1]}$. Визначимо функцію $u(r, \tau)$ як розв'язок крайової (квазістационарної) задачі:

$$(r^2 \lambda u'_r)' = 0, \quad (10)$$

з крайовими умовами

$$\begin{cases} u^{[1]}(\varepsilon, \tau) = 0, \\ \alpha r_n^2 u(r_n, \tau) + u^{[1]}(r_n, \tau) = \alpha r_n^2 \psi(\tau). \end{cases} \quad (11)$$

Підставляючи (9) у рівняння (5), з урахування (10), послідовно отримуємо мішану задачу для функції $v(r, \tau)$

$$\begin{aligned} \tilde{n}\rho \frac{\partial}{\partial \tau} (u + v) &= \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \lambda \frac{\partial}{\partial r} (u + v) \right) \Rightarrow \\ \tilde{n}\rho \frac{\partial u}{\partial \tau} + \tilde{n}\rho \frac{\partial v}{\partial \tau} &= \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \lambda \frac{\partial v}{\partial r} \right) \Rightarrow \\ \Rightarrow \tilde{n}\rho \frac{\partial v}{\partial \tau} &= \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \lambda \frac{\partial v}{\partial r} \right) - \tilde{n}\rho \frac{\partial u}{\partial \tau}. \end{aligned} \quad (12)$$

Оскільки крайові умови (8) для функції $u(r, \tau)$ справджують крайові умови (7) для функції $t(r, \tau)$,

отримаємо нульові крайові умови для визначення функції $v(r, \tau)$, тобто

$$\begin{cases} v^{[1]}(\varepsilon, \tau) = 0, \\ \alpha r_n^2 v(r_n, \tau) + v^{[1]}(r_n, \tau) = 0, \end{cases} \quad (13)$$

а початкова умова набуде вигляду

$$v(r, 0) = t_0 - u(r, 0) = t_0. \quad (14)$$

IV. Розв'язування крайової задачі (10)-(11).

Структура розв'язування крайової задачі (10)-(11) детально описана у роботах [8], [12], [13]. Встановлено, що на кожному з проміжків розв'язок задачі (10)-(11) має вигляд

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_0(r, \tau) &= B_0(r, \varepsilon) \cdot \mathbf{P}_0, \\ \mathbf{u}_i(r, \tau) &= B_i(r, r_0) \cdot B(r_i, r_0) \cdot B(r_0, \varepsilon) \cdot \mathbf{P}_0, \end{aligned} \quad (15)$$

де \mathbf{P}_0 – початковий вектор, який визначається наступною формулою:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_0 &= (P + Q \cdot B(r_n, \varepsilon))^{-1} \cdot \Gamma = \\ &= \left[\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \alpha r_n^2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \left(1 \frac{1}{\lambda_0} \left(\frac{1}{\varepsilon} - \frac{1}{r_0} \right) + \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \left(\frac{1}{r_{i-1}} - \frac{1}{r_i} \right) \right) \right]^{-1} \times \\ &\quad \times \begin{pmatrix} 0 \\ \alpha r_n^2 \psi(\tau) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \psi(\tau) \\ 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

Відповідно, розв'язок задачі (10)-(11) на кожному з проміжків $[\varepsilon, r_0]$ та $[r_{i-1}, r_i]$ зображується так:

$$\mathbf{u}_0(r) = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{\lambda_0} \left(\frac{1}{\varepsilon} - \frac{1}{r} \right) \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \psi(\tau) \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \psi(\tau) \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (17)$$

$$\mathbf{u}_i(r) = \begin{pmatrix} 1 & \sum_{k=1}^i \frac{1}{\lambda_k} \left(\frac{1}{r_{k-1}} - \frac{1}{r} \right) \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \quad (18)$$

$$\times \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{\lambda_0} \left(\frac{1}{\varepsilon} - \frac{1}{r_0} \right) \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \psi(\tau) \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \psi(\tau) \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Отже, розв'язок крайової задачі (10)-(11) $u(r, t) \equiv \psi(\tau)$, тобто не залежить від радіуса r .

V. Розв'язування мішаної неоднорідної задачі для функції $v(r, \tau)$

Оскільки функція $u(r, \tau)$ вже є відомою, то задача (12) для функції $v(r, \tau)$ набуде вигляду

$$\tilde{n}\rho \frac{\partial v}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \lambda \frac{\partial v}{\partial r} \right) - \tilde{n}\rho \psi'(\tau), \quad (19)$$

з нульовими крайовими умовами (13), при початковій умові (14).

A. Метод Фур'є та задача на власні значення.

Нетривіальні розв'язки однорідного диференціального рівняння

$$\tilde{n}\rho \frac{\partial v}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \lambda \frac{\partial v}{\partial r} \right), \quad (20)$$

з крайовими умовами (13) шукатимемо у вигляді [10]

$$v(r, \tau) = e^{-\omega\tau} \cdot R(r), \quad (21)$$

де ω – параметр, а $R(r)$ – невідома функція.

Підставляючи праву частину (21) у рівняння (20) отримуємо квазидиференціальне рівняння [8]

$$\left(r^2 \lambda R' \right)' + \omega c \rho r^2 R = 0, \quad (22)$$

з крайовими умовами

$$\begin{cases} R^{[1]}(\varepsilon) = 0, \\ \alpha r_n^2 R(r_n) + R^{[1]}(r_n) = 0. \end{cases} \quad (23)$$

Задача (22), (23) є класичною задачею на власні значення, у якій необхідно знайти значення ω_k (власні значення) при яких існують відповідні їм нетривіальні розв'язки $R_k(r, \omega_k)$ (власні функції) задачі (22), (23). Як відомо [10], всі власні значення цієї задачі є додатними та різними.

B. Конструктивна побудова власних функцій.

Ввівши квазіпохідну $R^{[1]} \stackrel{df}{=} r^2 \lambda R'$, вектор $\mathbf{R} = \left(R, R^{[1]} \right)^T$ та матрицю

$$A(r) = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{r^2 \lambda(r)} \\ -\omega c(r) \rho(r) r^2 & 0 \end{pmatrix}, \quad \text{зведемо}$$

квазидиференціальне рівняння (22) до еквівалентної йому системи диференціальних рівнянь першого порядку

$$\mathbf{R}' = \mathbf{A}\mathbf{R}. \quad (24)$$

Відповідну систему на проміжках $[\varepsilon, r_0]$ та $[r_{i-1}, r_i]$ запишемо у вигляді

$$\mathbf{R}'_0 = A_0 \cdot \mathbf{R}_0, \quad \mathbf{R}'_i = A_i \cdot \mathbf{R}_i, \quad (25)$$

$$A_0 = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{r^2 \lambda_0} \\ -\omega c_0 \rho_0 r^2 & 0 \end{pmatrix}, \quad A_i = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{r^2 \lambda_i} \\ -\omega c_i \rho_i r^2 & 0 \end{pmatrix}.$$

Рівняння (22) можна переписати у вигляді

$$\left(r^2 R' \right)' + \beta_i^2 r^2 R = 0, \quad (26)$$

де позначено $\beta_i = \sqrt{\frac{\omega c_i \rho_i}{\lambda_i}} \quad i = 0, 1$.

У роботі [8] встановлено, що матриця Коші системи (25) має вигляд

$$B_i(r, s, \omega) = \begin{pmatrix} b_{11}^i & b_{12}^i \\ b_{21}^i & b_{22}^i \end{pmatrix}, \quad (27)$$

$$b_{11}^i = \frac{\beta_i s \cos(\beta_i(r-s)) + \sin(\beta_i(r-s))}{\beta_i r},$$

$$b_{12}^i = \frac{\sin(\beta_i \cdot (r-s))}{\lambda_i \beta_i r s},$$

$$b_{21}^i = \frac{\beta_i \cos(\beta_i \cdot (r-s)) [r-s] - \sin(\beta_i(r-s)) [1 + \beta_i^2 r s]}{\beta_i} \lambda_i,$$

$$b_{22}^i = \frac{\beta_i r \cos(\beta_i(r-s)) - \sin(\beta_i(r-s))}{\beta_i s},$$

$i = 0, n-1$.

Нетривіальні розв'язки $\mathbf{R}(r, \omega)$ системи (25) шукатимемо у вигляді

$$\mathbf{R}(r, \omega) = B(r, \varepsilon, \omega) \cdot \mathbf{C}, \quad (28)$$

де

$$B(r, \varepsilon, \omega) = B_0(r, \varepsilon, \omega) \Theta_0 + B_1(r, r_0, \omega) B_0(r_0, \varepsilon, \omega) \Theta_1 + \dots + B_n(r, r_{n-1}, \omega) \prod_{i=1}^{n-1} B_i(r_i, r_{i-1}, \omega) B_0(r_0, \varepsilon, \omega) \Theta_n,$$

а $\mathbf{C} = (1, 0)^T$.

Позначимо

$$B(r_n, r_0, \omega) = B_n(r_n, r_{n-1}, \omega) \cdot B_{n-1}(r_{n-1}, r_{n-2}, \omega) \cdot \dots \cdot B_1(r_1, r_0, \omega) = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{pmatrix}$$

Характеристичне рівняння задачі на власні значення (22), (23) має вигляд

$$\det [P + Q \cdot B(r_n, \varepsilon, \omega)] = 0. \quad (29)$$

Нетривіальний розв'язок відповідної до (22) системи можна записати у вигляді

$$\mathbf{R}_k(r, \omega_k) = \tilde{B}(r, \varepsilon, \omega) \cdot (1, 0)^T = \sum_{i=0}^{df} \mathbf{R}_{ki} \Theta_i \quad (30)$$

$$k = 1, 2, 3, \dots$$

На проміжках $[\varepsilon, r_0]$ та $[r_{i-1}, r_i]$ власні вектори мають вигляд

$$\mathbf{R}_{k0}(r, \omega_k) = \tilde{B}_0(r, \varepsilon, \omega_k) \cdot (1, 0)^T = (b_{11}^0, b_{21}^0)^T,$$

$$\mathbf{R}_{ki}(r, \omega_k) = \tilde{B}_i(r, r_{i-1}, \omega_k) \cdot \tilde{B}(r_{i-1}, r_0, \omega_k) \cdot \tilde{B}_0(r_0, \varepsilon, \omega_k) \cdot (1, 0)^T = \tilde{B}_i(r, r_{i-1}, \omega_k) \cdot \tilde{B}(r_{i-1}, r_0, \omega_k) \cdot (b_{11}^0, b_{21}^0)^T.$$

(31)

C. Розвинення за власними функціями.

Нехай $g(r)$ – кусково-неперервна функція, що має різні аналітичні вирази на проміжках $[\varepsilon, r_0)$ та $[r_{i-1}, r_i)$, тобто має вигляд

$$g(r) = \sum_{i=0}^n g_i \theta_i. \quad (32)$$

Розвинення функції $g(r)$ в ряд Фур'є за власними функціями $R_k(r, \omega_k)$ задачі (22), (23) має вигляд [9]

$$g(r) = \sum_{k=1}^{\infty} g_k \cdot R_k(r, \omega_k), \quad (33)$$

де коефіцієнти Фур'є g_k у розвиненні (33) обчислюються за формулою

$$g_k = \frac{1}{\|R_k\|^2} \int_{\varepsilon}^{r_n} c \rho g(r) R_k(r, \omega_k) r^2 dr \quad (34)$$

Зауважимо, що $\|R_k\|^2$ – квадрат норми власних функцій $R_k(r, \omega_k)$

$$\|R_k\|^2 = \int_{\varepsilon}^{r_n} c \rho r^2 R_k^2(r, \omega_k) dr. \quad (35)$$

D. Побудова розв'язку мішаної задачі для функції $v(r, \tau)$.

Схема побудови розв'язку цієї задачі методом власних функцій детально описана в роботах [7], [8], [12]-[14]. Цей розв'язок зображується у наступному вигляді:

$$v(r, \tau) = \sum_{k=1}^{\infty} \left[f_k \cdot e^{-\omega_k \tau} - \int_0^{\tau} e^{-\omega_k(\tau-s)} u_k(s) ds \right] \cdot R_k(r, \omega_k) = \sum_{i=0}^{n-1} v_i(r, \tau) \cdot \theta_i, \quad (36)$$

$$v_i(r, \tau) = \sum_{k=1}^{\infty} \left[f_k \cdot e^{-\omega_k \tau} - \int_0^{\tau} e^{-\omega_k(\tau-s)} u_k(s) ds \right] \cdot R_{ki}(r, \omega_k), \quad (37)$$

де f_k та u_k коефіцієнти розвинення початкової умови та функції $\psi(\tau)$ відповідно в ряди Фур'є за системою власних функцій $R_k(r, \omega_k)$.

VI. ГРАНИЧНИЙ ПЕРЕХІД ПРИ $\varepsilon \rightarrow 0$ ТА ЗОБРАЖЕННЯ РОЗВ'ЯЗКУ ВИХІДНОЇ ЗАДАЧІ (1)-(4)

На основі методу редукції розв'язок вихідної задачі зображується у вигляді

$$T(r, \tau) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} (u(r, \tau) + v(r, \tau)) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left(\psi(\tau) + \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{k=1}^{\infty} \left[f_{ki} \cdot e^{-\omega_k \tau} - \int_0^{\tau} e^{-\omega_k(\tau-s)} u_{ki}(s) ds \right] R_{ki}(r, \omega_k) \theta_i \right) \quad (38)$$

Зауваження! Характеристичне рівняння (29) задачі на власні значення (22), (23) після граничного переходу, очевидно, матиме вигляд

$$\begin{aligned} & (\alpha r_n^2 c_{11} + c_{21}) \cdot \frac{\sin(\beta_0(r_0))}{\beta_0 r_0} + \\ & (\alpha r_n^2 c_{12} + c_{22}) \cdot \frac{\beta_0 r_0 \cos(\beta_0 \cdot r_0) - \sin(\beta_0 r_0)}{\beta_0} \cdot \lambda_0 = 0, \end{aligned} \quad (39)$$

а відповідні власні вектори (31) зобразяться так:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{k0}(r, \omega_k) &= \tilde{B}_0(r, 0, \omega) \cdot (1, 0)^T = \\ &= \left(\frac{\sin(\beta_0 r)}{\beta_0 r}, \frac{\beta_0 r \cos(\beta_0 \cdot r) - \sin(\beta_0 r)}{\beta_0} \lambda_0 \right)^T, \\ \mathbf{R}_{k0}(0, \omega_k) &= (1, 0)^T \\ \mathbf{R}_{ki}(r, \omega_k) &= \tilde{B}_i(r, r_{i-1}, \omega_k) \cdot \tilde{B}(r_{i-1}, r_0, \omega_k) \cdot (b_{11}^0, b_{21}^0)^T = \\ &= \tilde{B}_i(r, r_{i-1}, \omega_k) \cdot \tilde{B}(r_{i-1}, r_0, \omega_k) \times \\ &\times \left(\frac{\sin(\beta_0 r_0)}{\beta_0 r_0}, \frac{\beta_0 r_0 \cos(\beta_0 \cdot r_0) - \sin(\beta_0 r_0)}{\beta_0} \lambda_0 \right)^T. \end{aligned} \quad (40)$$

VII. МОДЕЛЬНИЙ ПРИКЛАД

У якості модельного числового прикладу розглянемо систему семишарових ізотропних сферичних куль, для яких необхідно знайти розподіл нестационарного температурного поля, якщо температура навколишнього середовища змінюється за законом $\psi(\tau) = 3451g\left(\frac{8\tau}{60} + 1\right) + 20$, коефіцієнт теплообміну між поверхнею та середовищем $\alpha = 25$. В початковий момент часу конструкція має температуру 20 °С. Теплотехнічні характеристики матеріалів, з яких виготовлені кулі, та вихідні дані для розрахунку, наведено у таблиці 1.

TABLE I. ТЕПЛОТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРІАЛІВ

№ шару	Параметр			
	Радіус, м	Коеф. теплопровідності	Питома теплоємність	Густина
1	0-0,05	0,93	837	2000
2	0,05-0,08	209	894	2680
3	0,08-0,15	64	389	8000
4	0,15-0,25	34,6	130	11400
5	0,25-0,33	2,93	921	2800
6	0,33-0,39	58	470	7800
7	0,39-0,43	1,55	770	2200

Використавши запропонований метод розрахунку розподілу нестационарного температурного поля у системі багатошарових сферичних куль та програмне забезпечення Maple 13 [14], отримуємо розв'язок поставленої задачі у вигляді таблиці 2. Слід зауважити, що для одержання

результату із заданою точністю при обчисленні було використано перших 50 коренів характеристичного рівняння.

TABLE II. РОЗПОДІЛ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ У СИСТЕМІ БАГАТОШАРОВОЇ СФЕРИЧНОЇ КОНСТРУКЦІЇ, °C

Час	Координати шару, м								
	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,43
0 хв.	20	20	20	20	20	20	20	20	20
1 хв.	20	20	20	20	20	20	20	20	52,6
3 хв.	20	20	20	20	20	20	20	20	102
10 хв.	20	20	20	20	20	20	20,3	24,1	210
20 хв.	20	20	20	20	20,1	20,2	25,5	41,2	299
30 хв.	20,0 6	20,5	20,5	20,7	21,1	21,7	36,6	64	353
45 хв.	21,2	24,0	24,2	24,8	26,2	27,8	59,7	100	409
1 год.	25,6	32,1	32,5 2	33,6	36,1	38,8	86,5	137	453
2 год.	85,3	103	104	106	112	117	201	272	582
3 год.	183	205	206	209	215	221	315	389	678

Слід зауважити що поставлена задача є модельною, метою якої є ілюстрація можливостей запропонованого методу.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

[1] Singh, Suneet, and Prashant K. Jain. "Analytical solution for three-dimensional, unsteady heat conduction in a multilayer sphere." *Journal of Heat Transfer* 138.10 (2016): 101301. DOI: 10.1115/1.4033536.

[2] De Monte, Filippo. "Unsteady heat conduction in two-dimensional two slab-shaped regions. Exact closed-form solution and results." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46.8 (2003): 1455-1469..

[3] Lykov, A. V. (1967) *Teoriia teploprovodnosti*, Vysshaya shkola, Moscow, USSR [in Russian].

[4] Siegel R. "Transient thermal analysis of parallel translucent layers by using Green's functions" *J. Thermophys. Heat Transfer* (AIAA). Vol. 13, Issue 1, pp. 10–17, 1999.

[5] Özişik M. N., Orlande H. R. B., Colaço M. J., Cotta R. M. *Finite Difference Methods in Heat Transfer*, Second Edition. New York: CRC Press, 2017. 580 p.

[6] Gosz M. R. *Finite Element Method: Applications in Solids, Structures, and Heat Transfer*. - New York: CRC Press, 2017. - 400 p..

[7] O. Y. Pazen and R. M. Tatsii. "Direct (classical) method of calculation of the temperature field in a hollow multilayer cylinder". *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, vol. 91, no. 6, pp. 1373-1384, November 2018. DOI 10.1007/s10891-018-1871-3.

[8] R. M. Tatsii, M.F. Stasiuk and O. Y. Pazen. "Pryamoy metod rascheta temperatury polya v mnogosloynnoy poloy sfericheskoy konstruktsii" *Vestnik Kokshetauskogo tekhnicheskogo instituta*, no. 1(29), pp. 9-20, 2018. (In Russian).

[9] O. Y. Pazen and R. M. Tatsii, "General boundary-value problems for the heat conduction equation with piecewise-continuous coefficients", *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, vol. 89, no. 2, pp. 357-368, March 2016. DOI:https://doi.org/10.1007/s10891-016-1386-8.

[10] Arsenin, V.Ya. (1974) *Metody matematicheskoi fizyky*, Nauka, Moscow, USSR [in Russian].

[11] Tihonov, A.N. and Samarskii, A.A. (1977) *Uravnenie matematicheskoi fizyky*, Nauka, Moscow, USSR [in Russian].

[12] Tatsiy R. M., O. Yu. Pazen "Pryamyy metod rozrakhunku nestatsionarnoho temperaturnoho polya za umov pozhezhi", *Pozhezhna bezpeka: Zb. nauk. pr.* – Lviv : LDU BZHD, 2015. – № 26. – S. 135-141 [in Ukrainian].

[13] Tatsiy R. M., Ushak T.I., O.Yu. "Pazen Zahalna tretya krayova zadacha dlya rivnyannya teploprovodnosti z kuskovo-stalymy koefitsiyentamy ta vnutrishnimy dzherelamy tepla", *Pozhezhna bezpeka: Zb. nauk. pr.* – Lviv : LDU BZHD, 2015. – № 27. – S. 120-126 [in Ukrainian].

[14] O. Y. Pazen "Mathematical modelling and computer simulation of direct method for studying boundary value problem of thermal conductivity" *Problems of Infocommunications. Science and Technology*, pp. 73-76. 2017. DOI:10.1109/INFOCOMMST.2017.8246353.

Дослідження Поздовжніх Коливаний Стрижня з Двох Кусків Кусково-Сталого Перерізу

Р.М. Тацій

кафедра прикладної математики і механіки
ЛДУ безпеки життєдіяльності
Львів, Україна

О.О. Карабин

кафедра прикладної математики і механіки
ЛДУ безпеки життєдіяльності
Львів, Україна
tosjakarabyn@gmail.com

О.Ю. Чмир

кафедра прикладної математики і механіки
ЛДУ безпеки життєдіяльності
Львів, Україна
o_chmyr@yahoo.com

The Investigation for Longitudinal Oscillations of Rods of Two Pieces of a Piecewise-Constant Section

R.M. Tatsij

Department of Applied Mathematics and Mechanics
Lviv State University of life safety
Lviv, Ukraine

O.O. Karabyn

Department of Applied Mathematics and Mechanics
Lviv State University of life safety
Lviv, Ukraine
tosjakarabyn@gmail.com

O.Yu. Chmyr

Department of Applied Mathematics and Mechanics
Lviv State University of life safety
Lviv, Ukraine
o_chmyr@yahoo.com

Анотація – Запропоновано схему дослідження поздовжніх коливаний стрижня, що складається з двох кусків кусково-сталого перерізу. В основу схеми покладено концепцію квазіпохідних, метод зведення вихідної задачі до розв'язування двох простіших, але взаємозв'язаних задач, сучасну теорію систем лінійних диференціальних рівнянь, класичний метод Фур'є та модифікований метод власних функцій. Перевагою методу є можливість розглянути задачу на кожному відрізку розбиття, а потім за допомогою матричного числення записати аналітичний вираз розв'язку. Такий підхід дозволяє застосовувати програмні засоби до процесу вирішення задачі та графічної ілюстрації розв'язку.

Abstract – The method of investigation for longitudinal oscillations rod of two pieces of a piecewise-constant section is

offered. In the basis of the solving scheme is a concept of quasi-derivatives, a modern theory of systems of linear differential equations, the classical Fourier method and a reduction method. The advantage of this method is a possibility to examine a problem on each breakdown segment and then to combine obtained solutions on the basis of matrix calculation. Such an approach allows the use of software tools for solving the problem.

Ключові слова: квазидиференціальне рівняння, крайова задача, матриця Коші, функція Дірака, задача на власні значення, метод Фур'є та метод власних функцій.

Keywords: kvazidifferential equation, the boundary value problem, the Cauchy matrix, the Dirac function, the eigenvalues problem, the method of Fourier and the method of eigenfunctions.

I. ВСТУП

Методи розв'язування нестационарних крайових задач можна поділити на прямі, основу яких становить метод відокремлення змінних, метод джерел (метод функції Гріна), метод інтегральних перетворень, наближені та числові методи.

Запропонована у цій роботі схема належить до прямих методів розв'язування крайових задач. В основу реалізації цієї схеми покладено концепцію квазіпохідних [1], метод зведення вихідної задачі до розв'язування двох простіших, але взаємопов'язаних задач, сучасну теорію систем лінійних диференціальних рівнянь, класичний метод Фур'є та модифікований метод власних функцій.

В цій роботі досліджуються позовжні коливання стрижня з двох кусків кусково-сталого перерізу. За допомогою методу редукції дослідження зводиться до знаходження розв'язку двох задач: стаціонарної неоднорідної крайової задачі з вихідними крайовими умовами та мішаної задачі з нульовими крайовими умовами для певного неоднорідного рівняння.

II. ОСНОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ, ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАДАЧІ

Нехай L – відкритий інтервал дійсної осі \square , $[x_0; x_2] \subset L$ – відрізок дійсної осі; $x_0 < x_1 < x_2$ – довільне розбиття відрізка $[x_0; x_2]$ дійсної осі Ox на дві частин.

Введемо основні позначення: θ_i – характеристична функція проміжку $[x_i; x_{i+1})$; F_0, F_1, E, ρ – сталі.

Покладемо $F(x) = F_0 \cdot \theta_0 + F_1 \cdot \theta_1$; $u^{[1]} = F(x) \cdot u_x'$ – квазіпохідна.

Розглянемо позовжні коливання стрижнів

$$\frac{\rho}{E} \cdot F(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(F(x) \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \right), \quad (41)$$

$$x \in (x_0; x_2), t \in (0; +\infty),$$

з крайовими умовами

$$\begin{cases} u(x_0, t) = \psi_0(t), \\ u(x_2, t) = \psi_1(t), \end{cases} \quad t \in [0; +\infty) \quad (42)$$

та початковими умовами

$$\begin{cases} u(x, 0) = \varphi_0(x), \\ \frac{\partial u}{\partial t}(x, 0) = \varphi_1(x), \end{cases} \quad x \in [x_0; x_2], \quad (43)$$

де $\psi_0(t), \psi_1(t) \in C^2(0; +\infty)$, $\varphi_0(x), \varphi_1(x)$ – кусково-неперервні на $(x_0; x_2)$.

Метод редукції відшукування розв'язку задачі детально описаний, наприклад, в [2, 3]. Згідно з цим методом розв'язок задачі (41) - (43) шукаємо у вигляді суми двох функцій

$$u(x, t) = w(x, t) + v(x, t). \quad (44)$$

Одну з функцій, наприклад $w(x, t)$, виберемо спеціальним способом, тоді функцію $v(x, t)$ вже визначимо однозначно.

III. ПОБУДОВА ФУНКЦІЇ $w(x, t)$

Визначимо функцію $w(x, t)$ як розв'язок крайової задачі

$$(F(x) \cdot w_x')'_x = 0, \quad (45)$$

$$\begin{cases} w(x_0, t) = \psi_0(t), \\ w(x_2, t) = \psi_1(t), \end{cases} \quad t \in [0; +\infty). \quad (46)$$

Зауважимо, що змінна t тут вважається параметром.

В основі методу розв'язування задачі (45), (46) лежить концепція квазіпохідних [4].

Введемо вектор $\bar{W} = \begin{pmatrix} w \\ w^{[1]} \end{pmatrix}$, де $w^{[1]} = F \cdot w_x'$. За таких

позначень квазідиференціальне рівняння (45) зводиться до еквівалентної системи диференціальних рівнянь першого порядку

$$\bar{W}_x' = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ F(x) & 0 \end{pmatrix} \bar{W}. \quad (47)$$

Під розв'язком системи (47) розуміємо абсолютно-неперервну вектор-функцію $\bar{W}(x, t)$, що за змінною x справджує її майже скрізь (див. [4]).

Крайові умови (46) запишемо у векторній формі

$$P \cdot \bar{W}(x_0, t) + Q \cdot \bar{W}(x_2, t) = \bar{\Gamma}(t), \quad (48)$$

$$\text{де } P = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, Q = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \bar{\Gamma}(t) = \begin{pmatrix} \psi_0(t) \\ \psi_1(t) \end{pmatrix}.$$

Нехай $w_i(x, t)$ та $w_i^{[1]}(x, t)$ визначені на проміжку $[x_i; x_{i+1})$, $i = \overline{0, 1}$. Покладемо

$$w(x, t) = w_0(x, t)\theta_0 + w_1(x, t)\theta_1. \quad (49)$$

На проміжку $[x_i; x_{i+1})$, $i = \overline{0, 1}$ система (47) набуває вигляду

$$\begin{pmatrix} w_i \\ w_i^{[1]} \end{pmatrix}'_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ F_i & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_i \\ w_i^{[1]} \end{pmatrix}. \quad (50)$$

Матриця Коші $B_i(x, s)$, $i = \overline{0, 1}$ цієї системи має вигляд

$$B_i(x, s) = \begin{pmatrix} 1 & b_i(x, s) \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \text{ де } b_i(x, s) = \int_s^x \frac{1}{F_i} dz = \frac{x-s}{F_i}. \quad (51)$$

Позначимо

$$B(x_1, x_0) \stackrel{def}{=} B_0(x_1, x_0),$$

$$B(x_2, x_0) \stackrel{def}{=} B_1(x_2, x_1) \cdot B_0(x_1, x_0). \quad (52)$$

Структура (51) матриць $B_0(x, s)$, $B_1(x, s)$ дає можливість встановити структуру матриці (52)

$$B(x_k, x_0) = \begin{pmatrix} 1 & \sum_{m=0}^{k-1} b_m(x_{m+1}, x_m) \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad k = \overline{1, 2}, \quad \text{причому}$$

$B(x_k, x_k) \stackrel{def}{=} I$, де I – одинична матриця.

Розв'язок системи (50) на проміжках $[x_0; x_1]$ та $[x_1; x_2]$ має вигляд

$$\begin{aligned} \bar{W}_0(x, t) &= B_0(x, x_0) \cdot \bar{P}_0, \\ \bar{W}_1(x, t) &= B_1(x, x_1) \cdot \bar{P}_1, \end{aligned} \quad (53)$$

де \bar{P}_0 , \bar{P}_1 – поки що невідомі вектори [1].

В точці $x = x_1$ повинна виконуватись умова неперервності $\bar{W}_1(x_1, t) = \bar{W}_0(x_1, t)$, в результаті чого одержимо рекурентне співвідношення

$$\bar{P}_1 = B_0(x_1, x_0) \cdot \bar{P}_0, \quad (54)$$

де \bar{P}_0 – початковий (невідомий) вектор.

Для знаходження \bar{P}_0 використовуємо крайові умови

$$(48), \text{ в яких покладемо } \bar{W}(x_0, t) \stackrel{def}{=} \bar{P}_0,$$

$$\bar{W}(x_2, t) \stackrel{def}{=} \bar{W}_1(x_2, t) = B(x_2, x_0) \bar{P}_0.$$

Тоді $[P + Q \cdot B(x_2, x_0)] \bar{P}_0 = \bar{P}_0$, звідки одержуємо

$$\bar{P}_0 = [P + Q \cdot B(x_2, x_0)]^{-1} \cdot \bar{P}_0. \quad (55)$$

Обчислимо $[P + Q \cdot B(x_2, x_0)]^{-1} = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} \Delta & 0 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$, де

$$\Delta = \sum_{m=0}^1 \frac{x_{m+1} - x_m}{F_m}. \text{ Тоді з (55) та (54)}$$

$$\bar{P}_0 = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} \Delta \cdot \psi_0(t) \\ -\psi_0(t) + \psi_1(t) \end{pmatrix}, \quad (56)$$

$$\bar{P}_1 = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} \frac{x_2 - x_1}{F_1} \psi_0(t) + \frac{x_1 - x_0}{F_0} \psi_1(t) \\ -\psi_0(t) + \psi_1(t) \end{pmatrix}. \quad (57)$$

На основі формул (53), (56), (57) після перетворень, отримаємо зображення вектор - функції $\bar{W}_0(x, t)$ та $\bar{W}_1(x, t)$ на проміжках $[x_0; x_1]$ та $[x_1; x_2]$, відповідно

$$\bar{W}_0(x, t) = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} \left(\frac{x_1 - x}{F_0} + \frac{x_2 - x_1}{F_1} \right) \psi_0(t) + \frac{x - x_0}{F_0} \cdot \psi_1(t) \\ -\psi_0(t) + \psi_1(t) \end{pmatrix}, \quad (58)$$

$$\bar{W}_1(x, t) = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} \frac{x_2 - x}{F_1} \psi_0(t) + \left(\frac{x_1 - x_0}{F_0} + \frac{x - x_1}{F_1} \right) \psi_1(t) \\ -\psi_0(t) + \psi_1(t) \end{pmatrix}. \quad (59)$$

Перші координати векторів $\bar{W}_0(x, t)$ та $\bar{W}_1(x, t)$ в (58) є шуканими функціями $w_0(x, t)$ та $w_1(x, t)$, відповідно. Підставляючи їх у (49), отримуємо розв'язок на всьому проміжку $[x_0; x_2]$.

IV. ПОБУДОВА ФУНКЦІЇ $v(x, t)$

Запишемо мішану задачу для функції $v(x, t)$. Підставляючи (44) в (41) та враховуючи, що функція $w(x, t)$ задовольняє (45), одержуємо неоднорідне рівняння

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(F(x) \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{\rho}{E} \cdot F(x) \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \frac{\rho}{E} \cdot F(x) \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \quad (60)$$

$$x \in (x_0; x_2), \quad t \in (0; +\infty).$$

Підставимо (44) в початкові умови (43). Одержимо для функції $v(x, t)$ початкові умови

$$\begin{cases} v(x, 0) = \Phi_0(x), \\ \frac{\partial v}{\partial t}(x, 0) = \Phi_1(x), \end{cases} \quad x \in [x_0; x_2], \quad (61)$$

де $\Phi_0(x) \stackrel{def}{=} \varphi_0(x) - w(x, 0)$, $\Phi_1(x) \stackrel{def}{=} \varphi_1(x) - \frac{\partial w}{\partial t}(x, 0)$.

Оскільки функція $w(x, t)$ справджує крайові умови (46), то із (44) випливають крайові умови для функції $v(x, t)$

$$\begin{cases} v(x_0, t) = 0, \\ v(x_2, t) = 0, \end{cases} \quad t \in [0; +\infty). \quad (62)$$

Отже, за умови, що розв'язок $w(x, t)$ задачі (45), (46) є відомим, функція $v(x, t)$ є розв'язком мішаної задачі (60) - (62).

V. МЕТОД ФУР'Є ТА ЗАДАЧА НА ВЛАСНІ ЗНАЧЕННЯ

Для рівняння (60) розглянемо відповідне однорідне рівняння

$$\frac{\rho}{E} \cdot F(x) \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(F(x) \frac{\partial v}{\partial x} \right). \quad (63)$$

Його нетривіальні розв'язки шукаємо у вигляді

$$v(x, t) = \sin(\omega t + \varepsilon) \cdot X(x), \quad (64)$$

де ω – параметр, ε – константа, $X(x)$ – невідома функція. Підставимо (64) в рівняння (63). Одержимо квазидиференціальне рівняння

$$(F(x)X'(x))' + \alpha^2 \cdot F(x)X(x) = 0, \quad \alpha^2 = \frac{\rho}{E} \cdot \omega^2. \quad (65)$$

Підставивши (64) в умови (62), одержимо крайові умови

$$\begin{cases} X(x_0) = 0, \\ X(x_2) = 0. \end{cases} \quad (66)$$

Як і вище, під розв'язком рівняння (65) розуміємо абсолютно-неперервну на $[x_0; x_2]$ функцію $X(x)$, що справджує його майже скрізь [4].

Ввівши квазіпохідну $X^{[1]} \stackrel{def}{=} FX'$, вектор $\bar{X} = \begin{pmatrix} X \\ X^{[1]} \end{pmatrix}$

та матриці $A = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{F} \\ -\alpha^2 F & 0 \end{pmatrix}$, запишемо задачу (65)-(66) у

матричному вигляді

$$\bar{X}' = A \cdot \bar{X} \quad (67)$$

$$P\bar{X}(x_0) + Q\bar{X}(x_2) = \bar{0}. \quad (68)$$

Безпосередньою перевіркою переконуємось, що матриця Коші $B_i(x, s, \omega)$ системи (67) на проміжку $[x; x_{i+1}]$

$$i = \overline{0, 1}, \quad \text{має вигляд}$$

$$B_i(x, s, \omega) = \begin{pmatrix} \cos \alpha(x-s) & \frac{\sin \alpha(x-s)}{\alpha F_i} \\ -\alpha F_i \sin \alpha(x-s) & \cos \alpha(x-s) \end{pmatrix}.$$

Фундаментальна матриця (аналог матриці Коші на всьому проміжку) системи (67) має структуру

$$B(x, x_0, \omega) = \sum_{i=0}^{def} B_i(x, x_i, \omega) \cdot B(x_i, x_0, \omega) \cdot \theta_i, \quad (69)$$

де, аналогічно, як і в формулі (52),

$$B(x_1, x_0, \omega) = B_1(x_2, x_1, \omega) \cdot B_0(x_1, x_0, \omega).$$

Позначимо також

$$B(x, x_0, \omega) \stackrel{def}{=} \begin{pmatrix} b_{11}(\omega) & b_{12}(\omega) \\ b_{21}(\omega) & b_{22}(\omega) \end{pmatrix}. \quad (70)$$

Нетривіальний розв'язок $\bar{X}(x, \omega)$ системи (67) шукаємо

у вигляді $\bar{X}(x, \omega) = B(x, x_0, \omega) \cdot \bar{C}$, де $\bar{C} = \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix}$ – деякий ненульовий вектор.

Вектор - функція $\bar{X}(x, \omega)$ має справжувати крайові умови (68), тобто врахувавши, що $B(x_0, x_0, \omega) = I$, прийдемо до рівності

$$[P + Q \cdot B(x_2, x_0, \omega)] \cdot \bar{C} = \bar{0}. \quad (71)$$

Для існування ненульового вектора \bar{C} в (71) необхідно і досить виконання умови

$$\det[P + Q \cdot B(x_2, x_0, \omega)] = 0. \quad (72)$$

Конкретизуємо вигляд лівої частини характеристичного рівняння (72), врахувавши вигляд матриць P, Q та (70): $\det[P + Q \cdot B(x_2, x_0, \omega)] = b_{12}(\omega)$.

Твердження 1. *Характеристичне рівняння задачі на власні значення (65), (66) має вигляд*

$$b_{12}(\omega) = 0. \quad (73)$$

Як відомо (див. [5]), корені ω_k характеристичного рівняння (73), які є власними значеннями задачі (65), (66), є додатними та різними.

Для знаходження ненульового вектора \bar{C} підставимо в рівність (71) ω_k замість ω . Тоді прийдемо до системи рівнянь

$$\begin{cases} C_1 = 0, \\ b_{11}(\omega_k) \cdot C_1 + b_{12}(\omega_k) \cdot C_2 = 0. \end{cases} \quad (74)$$

Оскільки виконується (73), то система (74) зводиться до рівняння $C_1 = 0$, а $C_2 \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$, наприклад, $C_2 = 1$, тобто

$$\bar{C} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Нехай $\bar{X}_k(x, \omega_k)$ – нетривіальний власний вектор, що відповідає власному значенню ω_k . Справедливим є твердження.

Твердження 2. *Власні вектори системи диференціальних рівнянь (67) з крайовими умовами (68) мають структуру*

$$\bar{X}_k(x, \omega_k) = B(x, x_0, \omega_k) \cdot \bar{C}, \quad k \in \mathbb{N}.$$

Наслідок. *Власні функції $X_k(x, \omega_k)$, як перші координати власних векторів $\bar{X}_k(x, \omega_k)$, можна записати у вигляді*

$$X_k(x, \omega_k) = (1 \ 0) \cdot B(x, x_0, \omega_k) \cdot \bar{C}, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (75)$$

Зокрема, оскільки $X_k(x, \omega_k) = \sum_{i=0}^1 X_{ki}(x, \omega_k) \cdot \theta_i$, то з (69) та (75) випливає, що

$$X_{ki}(x, \omega_k) = (1 \ 0) \cdot B_i(x, x_i, \omega_k) \cdot B(x_i, x_0, \omega_k) \cdot \bar{C}. \quad (76)$$

VI. ПОБУДОВА РОЗВ'ЯЗКУ $v(x, t)$ МІШАНОЇ ЗАДАЧІ (60) - (62)

Для розв'язання задачі (60) - (62) застосуємо метод власних функцій [3], який полягає в тому, що розв'язок задачі (60) - (62) шукаємо у вигляді

$$v(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} T_k(t) \cdot X_k(x, \omega_k), \quad (77)$$

де $T_k(t)$ – поки що невідомі функції.

В [6] детально описано процес побудови функції $v(x, t)$. Використовуючи ці результати, і те, що $v(x, t) = v_0(x, t) \cdot \theta_0 + v_1(x, t) \cdot \theta_1$, де $v_i(x, t)$ визначені на проміжку $[x_i; x_{i+1})$, $i = \overline{0, 1}$, одержуємо

$$v_i(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \left[\Phi_{0k} \cos \omega_k t + \frac{\Phi_{1k}}{\omega_k} \sin \omega_k t - \frac{1}{\omega_k} \int_0^t \sin \omega_k(t-s) \cdot w_k(s) ds \right] \cdot X_{ki}(x, \omega_k), \quad (78)$$

де w_k , Φ_{0k} , Φ_{1k} – відповідні коефіцієнти Фур'є правих частин рівняння (60) та початкових умов (61), функції $X_{ki}(x, \omega_k)$ обчислюються за формулою (76).

Врахувавши перші координати векторів $\bar{W}_0(x, t)$, $\bar{W}_1(x, t)$ в (58) та, (78), отримаємо розв'язок задачі (41) - (43)

$$u(x, t) = (w_0(x, t) + v_0(x, t)) \cdot \theta_0 + (w_1(x, t) + v_1(x, t)) \cdot \theta_1.$$

VII. ЗАСТОСУВАННЯ ПАКЕТУ MAPLE ДО ЗНАХОДЖЕННЯ ВЛАСНИХ ЗНАЧЕНЬ ТА ВЛАСНИХ ФУНКЦІЙ ЗАДАЧІ (67) - (68)

Сучасні програмні засоби дають змогу отримати необхідну кількість власних значень та власних функцій, що забезпечує відповідну точність розв'язку. Розглянемо результат застосування пакету Maple для отримання розв'язку поставленої задачі. Для прикладу розглянемо сталевий стрижень довжиною 1 м, що складається з двох циліндричних кусків однакової довжини, площі поперечних перерізів яких відповідно становлять $F_0 = 0,0025\pi$ м², $F_1 = 0,000625\pi$ м². За таких умов $x_0 = 0$, $x_1 = 0,5$, $x_2 = 1$. Модуль Юнга для сталі становить $E = 20394324259$ кг/м², густина $\rho = 7900$ кг/м³. У [7] обчислено перші одинадцять власних значень та власних функцій.

ВИСНОВКИ

Адаптовано теорему про розвинення за власними функціями для випадку диференціальних рівнянь з кусково-сталими (за просторовою змінною) коефіцієнтами.

Отримано явні формули для обчислення розв'язку та його квазіпохідної для будь-якого підінтервала основного проміжку, які є справедливими для довільної скінченної кількості точок розриву першого роду згаданих вище коефіцієнтів.

Отримані результати мають безпосереднє практичне застосування в теорії коливань стрижнів з кусково-змінним розподілом параметрів.

Наведено приклад застосування пакету Maple до знаходження власних значень та власних функцій задачі коливання сталевого стрижня довжиною 1 м, що складається з двох кусків однакової довжини.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Тацій Р. М. Загальна перша крайова задача для рівняння теплопровідності з кусково-змінними коефіцієнтами / Р. М. Тацій, О. О. Власій, М. Ф. Стасюк // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Фізико-математичні науки. - 2014. - № 804. - С. 64-69.
- [2] Арсенин В.Я. Методы математической физики. - М.: Наука, 1974. - 432 с.
- [3] Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. - М.: Наука, 1977. - 735 с.
- [4] Тацій Р.М. Узагальнені квазідиференціальні рівняння / Р.М. Тацій, М.Ф. Стасюк, В. Мазуренко, О.О. Власій - Дрогобич. Коло, 2011. - 297 с.
- [5] Тацій Р.М., Мазуренко В.В. Дискретно-неперервні крайові задачі для квазідиференціальних рівнянь парного порядку. / Р.М. Тацій, В.В. Мазуренко // Математичні методи та фізико-механічні поля. 2001. - 44. №1 - С. 43-53.
- [6] Тацій Р. М. Загальні крайові задачі для гіперболічного рівняння із кусково-неперервними коефіцієнтами та правими частинами / Р. М. Тацій, О. Ю. Чмир, О. О. Карабин // Дослідження в математиці і механіці. 2017. - Т. 22, вип. 2(30). - С. 55-70.
- [7] Тацій Р. М. Схема дослідження поздовжніх коливань стрижня кусково - сталого перерізу/ Р. М. Тацій, О. Ю. Чмир, О. О. Карабин // Вісник ЛДУ БЖД. 2018. - Т. 18. - С. 60-69.

Шаблон Статті МНПК ІТКМ Згідно Вимог ІЕЕЕ за 2018 рік (стиль: *paper title*)

Підзаголовок, за необхідності (*paper subtitle*)

Любомир Петришин (*Author*)
кафедра управління (*Affiliation*)
AGH науково-технологічний університет (*Affiliation*)
Краків, Польща (*Affiliation*)
p.name@mail.com (*Affiliation*)
ORCID: 0000-0003-4168-3891

Артем Ізмайлов (*Author*)
кафедра комп'ютерних наук (*Affiliation*)
Прикарпатський національний університет
Івано-Франківськ, Україна (*Affiliation*)
a.name@mail.com (*Affiliation*)
ORCID: 000-0002-6165-7490

ISPC ITCM Article Template According to the IEEE Requirements for 2018 (use style: *paper title*)

Subtitle, as needed (*paper subtitle*)

Lubomyr Petryshyn (*Author*)
dept. of Enterprise Management (*Affiliation*)
AGH University of Science and Technology (*Affiliation*)
Krakow, Poland (*Affiliation*)
p.name@mail.com (*Affiliation*)
ORCID: 0000-0003-4168-3891

Artem Izmailov (*Author*)
dept. of Computer Science (*Affiliation*)
Precarpathian National University (*Affiliation*)
Ivano-Frankovsk, Ukraine (*Affiliation*)
a.name@mail.com (*Affiliation*)
ORCID: 000-0002-6165-7490

Анотація—Даний електронний документ є шаблоном, в якому визначено уклад та стилі компонентів статті згідно нових вимог ©IEEE 2018 року [назва, текст, заголовки, і т.д.]. **Не використовувати у назві статті чи анотації символи, спеціальні знаки, або математичні вирази.** (*Abstract*)

Abstract—This electronic document is a “live” template and already defines the components of your paper [title, text, heads, etc.] in its style sheet. **CRITICAL: Do Not Use Symbols, Special Characters, or Math in Paper Title or Abstract.** (*Abstract*)

Ключові слова—компонент; форматування; стиль; оформлення у визначеному стилі (*key words*)

Keywords—*paper; component; formatting; style; styling; insert (key words)*

I. ВСТУП (*HEADING 1*)

Шаблон уможлиблює авторам застосування стандартних стилів форматування при підготовці електронних версій статей згідно нових вимог ©IEEE в форматі "Microsoft Word", що вступили в дію в 2018 року [1]. Матеріал статті рекомендовано формувати згідно чинного шаблону з метою:

Вкажіть тут наявного спонсора. Якщо спонсор відсутній, то видаліть цей текстовий блок (*sponsors*).

- спрощення форматування статей авторським колективом, (*bullet list*)
- автоматичного дотримання вимог, що полегшує загальне формування матеріалів у електронній формі, (*bullet list*)
- відповідності стилів усіх статей в збірнику матеріалів конференції. (*bullet list*)

У шаблоні задані ширина колонок, міжрядковий інтервал та формати шрифтів. Шаблон вміщує стилі титулу статті, афіліації, анотації, ключових слів, тексту, заголовків, таблиць, рисунків, формул, літератури. **Стилі, які застосовано у даному документі, позначені у відповідних абзацах в дужках (*курсивом*).** Авторам необхідно здійснювати форматування рівнянь, графіки і таблиць з урахуванням наступних вказівок.

II. ВИКОРИСТАННЯ ШАБЛОНУ (*HEADING 1*)

A. Формат сторінки шаблону (*Heading 2*)

Розміри сторінки матеріалів публікації повинні відповідати формату A4.

В. Підтримка цілісності вимог (Heading 2)

Шаблон має на меті дотримання єдиного форматування статті та стилів тексту публікації. Шаблоном задано розміри полів, ширина колонок, міжрядковий інтервал та шрифти. Будь ласка, не змінюйте їх. Верхнє поле у цьому шаблоні має розміри, які відрізняються від загальноприйнятих, що встановлені на основі вимог, згідно яких стаття є окремою складовою цілісних матеріалів конференції, а не самостійним документом. Вимога не змінювати жодних з налаштувань шаблону.

III. ПІДГОТОВКА СТАТТІ ПЕРЕД ФОРМАТУВАННЯМ

При оформленні матеріалів рекомендовано підготувати текст статті та графіку робочим файлом, попередньо застосувавши відповідні стилі форматування цього шаблону, а краще сам шаблон. При підготовці статті увімкніть відображення недрукованих символів (знак ¶) та меж робочого поля, що дозволить автору бачити та правильно застосовувати форматування матеріалу. Відредагуйте текст та структуру статті до початку остаточного форматування шаблону. На основі робочого файлу заповніть шаблон та остаточно відформатуйте матеріал, застосовуючи відповідні стилі шаблону згідно авторського укладу, редагування вмісту та організації перед форматуванням. Будь ласка, зверніть увагу на розділи A-D нижче для отримання додаткової інформації про коректування, орфографію та граматику.

Важливо: до редакції подається авторський файл, який є наслідком збереження заповненого матеріалом статті шаблону, а не робочий файл, сформатований стилями шаблону. Шаблоном не передбачено застосування табуляції, тому прохання її не використовувати. Явні переноси рядка за необхідності обмежити одним переносом у кінці абзацу згідно задумки автора. У жодному місці статті не використовувати розбиття тексту на сторінки. Не нумерувати заголовки у тексті – у шаблоні це робиться автоматично шляхом застосування відповідного стилю.

При перевірці орфографії та граматики дотримуватись наступних вимог:

A. Абревіатури та скорочення

Визначення абревіатур та скорочень здійснюється при першій їх зустрічі в тексті. Загальноприйняті абревіатури, як IEEE, SI, MKS, CGS, sc, dc та rms визначати не потрібно. Застережено використання чи визначення абревіатур та скорочень у назві статті, анотації чи заголовках, якщо цього можна уникнути.

В. Одиниці вимірювання

- Для визначення одиниць вимірювання застосуйте систему СІ (МКС), або, у виключних випадках, СГС. За необхідності можна використовувати англійську систему мір шляхом додаткового визначення одиниць вимірювання (у дужках). Винятково дозволено використання англійської системи мір як комерційних ідентифікаторів, наприклад “3.5-дюймовий привід”. (bullet list)

- Уникати спільного використання одиниць СІ та СГС, наприклад, струм у амперах, а магнітне поле – у ерстедах, що спричиняє невідповідність розмірностей в аналітичних виразах. Якщо ж не можна уникнути використання змішаних одиниць, чітко вкажіть одиниці для кожної з вартостей, використаних в рівнянні. (bullet list)
- Не змішувати повне написання та скорочення одиниць вимірювання: “Wb/m²” або “вебер на квадратний метр”, але не “вебер/m²”. Повністю визначаєте назву одиниці вимірювання у тексті: “...кілька генрі,” але не “...кілька Н.” (bullet list)
- Використовуйте нуль перед десятковою крапкою: “0.25,” а не запис “.25.” Застосуйте “cm³,” а не “cc.” (bullet list)

С. Формули

При написанні формул необхідно застосовувати виключно *похилений* шрифт *Times New Roman* та регулярний *Symbol* згідно стилю (*equation*). *Курсивом* відображається аналітика, латинські символи величин та змінних, але не символи грецького алфавіту. У форматі формул, за наявності, текст пояснень повинен бути сформатований регулярним шрифтом *Times New Roman*. Якщо у Вас інші налаштування формульного процесора MS-Equation_Editor_3.1, ніж наведені на рис. 1 та рис. 2, змініть їх до рекомендованих на рисунках значень.

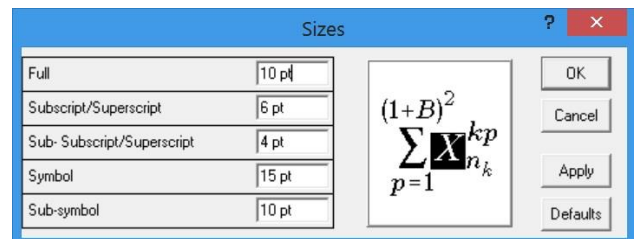


Рис. 1. Рекомендовані налаштування розмірів шрифту в формульному процесорі MS-Equation_Editor_3.1. (figure caption)

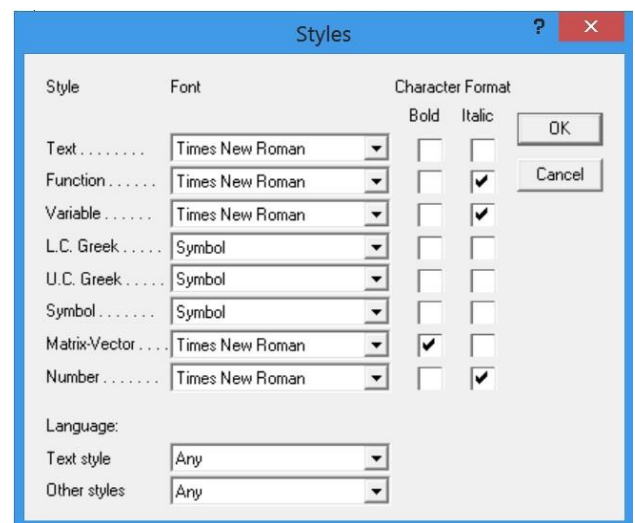


Рис. 2. Рекомендовані налаштування стилів шрифтів в формульному процесорі MS-Equation_Editor_3.1. (figure caption)

Застосуйте центрування формули з використанням табуляції по центру в стилі (*equation*).

$$\sum_{p=1}^{(1+B)^2} aX_{n_k}^{kp} \quad (1)$$

Здійсніть наскрізну в статті (а не за розділами) нумерацію тільки тих формул, на які є посилання в тексті статті. Номери формул, які зазначаються у дужках, слід вирівнювати вправо, як у прикладі (1), використовуючи відступ вправо з табуляцією. За наявності простих формул, що не вимагають застосування формульного процесора, уникайте його використання, наприклад

$$N = a_{n-1}q^{n-1} + \dots + a_iq^i + \dots + a_0q^0, \quad (2)$$

де q - основа; $a_i = \{q-1, 0\}$ - коефіцієнти.

Для знака мінус використовуйте довге тире –, а не дефіс -. Коли формули є складовими частинами речення, їх в кінці слід відділити комами або крапками, наприклад (1) та (2). Символи у рівнянні необхідно визначати до (1) або одразу після формули (2). Застосуйте посилання “(2),” а не “Eq. (2)” чи “equation (2),” за винятком, коли посилання відкриває речення: “Equation (2) is ...”

Для написання програмних кодів рекомендовано застосовувати шрифт із однаковою шириною символів Courier New.

D. Деякі розповсюджені помилки

- У якості над- чи підрядкових індексів у прикладі (2), та інших розповсюджених констант, наприклад μ_0 , слід застосовувати число “0” (нуль) з відповідним форматуванням, а не малу літеру “o”.
- У американському варіанті англійської мови такі розділові знаки, як коми, крапки з комою, крапки, знаки запитання та оклику записуються всередині лапок лише у випадку цитування закінченої думки або імені, наприклад, у випадку назви або повної цитати. Коли лапки використовуються для виділення слова або фрази, пунктуація повинна знаходитись поза лапками. Розділові знаки для фрази або висловлювання у дужках у кінці речення виносяться за межі дужок (як тут). (Розділові знаки у реченні, яке взяте у дужки, залишаються у дужках.)
- У латинському скороченні “et al” після “et” крапка не ставиться. тощо
- Скорочення “i.e.” означає “тобто,” а “e.g.” означає “наприклад.”

Рекомендовано посібник [9] по стилю написання наукових статей.

IV. ВИКОРИСТАННЯ ШАБЛОНУ

Після завершення редагування статті в робочому файлі необхідно перенести матеріал до шаблону. Або ж здійснити редагування безпосередньо в шаблоні. Для цього копії

файлу шаблону за допомогою команди «Зберегти як», присвоїти латинною ім'я файлу статті відповідно із прізвищем, іменем першого автора та скороченою темою статті, наприклад Prizvysche_Imya_Title.doc. Здійснити остаточне форматування матеріалу статті, використовуючи випадаюче вікно зі стилями панелі інструментів шаблону MS Word.

A. Автори та афіліації

Даний шаблон розроблено як приклад для двох авторів, проте не є обмеженням для більшої їх кількості. Афіліацію авторів не повторювати, коли співавтори є співпрацівниками одного підрозділу та організації. Прохання вказувати афіліацію якнайкоротше.

1) Для статей із кількістю авторів більше шести (*Heading 3*):

Застосуйте англійський шаблон IEEE, завантажений із веб-сторінки IEEE, або ж змодифікуйте даний україномовний шаблон згідно вказівок пункту П.А.3.е. Додавайте імена авторів по горизонталі, переходячи на третій рядок, навіть якщо потрібно більше 8 співавторів.

2) Для статей з менш ніж шістьма співавторами (*Heading 3*):

Налаштуйте шаблон таким чином.

a) *Вибір (Heading 4)*: Виділити рядки з автором та афіліацією.

b) *Змініть число колонок*: Вибрати пункт меню MS Word «Формат\Колонки», а наступним вибрати відповідне Вам значення.

c) *Видалення/додавання*: Видалити чи додати рядки з автором та відповідною афіліацією.

3) Для автора (ів) з однією афіліацією (*Heading 3*): Щоб змінити налаштування за замовчуванням, змініть шаблон наступним чином:

a) *Вибір (Heading 4)*: Виділити рядки з автором та афіліацією.

b) *Змініть число колонок*: Вибрати пункт меню MS Word «Формат\Колонки», а наступним вибрати пункт «одна».

c) *Видалення*: Видалити рядки з автором та афіліацією для другої афіліації.

4) Для автора (ів) з різними афіліаціями: Щоб змінити налаштування за замовчуванням, змініть шаблон наступним чином:

a) *Вибір*: Виділити рядки з автором та афіліацією.

b) *Змінити число колонок*: Вибрати пункт меню MS Word «Формат\Колонки», наступним вибрати пункт «одна».

c) Виділити усі рядки з автором та афіліацією 1 і скопіювати це виділення.

d) *Форматування*: Вставити жорстке перенесення одразу після останньої літери останнього рядка афіліації. Далі вставити копію афіліації 1. У випадку необхідності повторити чинності для кожної додаткової афіліації.

е) *Зміна кількості колонок*: Помістити курсор справа від останньої літери останнього рядка афіліації з парним номером (наприклад, якщо є три афіліації, помістити курсор у кінці другої афіліації). Перемістити курсор вгору, щоб виділити усі рядки з автором та афіліацією. Відкрити пункт меню «Формат\Колонки» та вибрати «дві». Якщо у статті непарна кількість афіліацій, то остання опиниться у центрі сторінки, а попередні будуть розташовані у двох колонках.

В. Визначення заголовків

Заголовки – це структурні елементи, які допомагають читачеві орієнтуватись у структурі статті. Визначено два типи заголовків: структурні та текстові.

Структурні заголовки визначають різні частини статті та тематично не залежать один від одного. Прикладами таких структурних заголовків є подяка та література, тому правильним стилем для них є (*Heading 5*). Початкові заголовки “Анотація” і “Ключові слова” вимагають застосування додаткового форматування (у даному випадку, *курсиву*) закладеного стилю з випадуючого списку для того, щоб відрізнити заголовок від тексту.

Текстові заголовки формують ієрархічну інфраструктуру тематики статті. Назва статті є головним текстовим заголовком, згідно якої здійснено викладку матеріалу статті. Якщо зміст матеріалу передбачає наявність двох чи більше підтем, то необхідно використовувати заголовки нижчого рівня (які позначаються римськими цифрами), і, навпаки, за відсутності принаймні двох підтем, то підзаголовки вводити не слід. Стили “Heading 1,” “Heading 2,” “Heading 3,” та “Heading 4” прописані у шаблоні за замовчуванням.

С. Рисунки і таблиці

Розташування рисунків і таблиць. Рисунки і таблиці вкладають після їх згадування у тексті. Великі рисунки і таблиці можуть займати формат шириною цілої сторінки, тобто обох колонок. Заголовки таблиць розташовувати над таблицями. Для назв таблиць використовуйте стиль (*Table Head*).

TABLE I. Заголовок Таблиці (*TABLE HEAD*)

Заголовок таблиці (<i>table col head</i>)	Заголовок стовпця таблиці (<i>table col head</i>)		
	Підзаголовок стовпця таблиці (<i>table col subhead</i>)	Підзаголовок (<i>table col subhead</i>)	Підзаголовок (<i>table col subhead</i>)
Текст (<i>table copy</i>)	текст в таблиці ^a (<i>table copy</i>)	текст в таблиці ^b (<i>table copy</i>)	текст в таблиці (<i>table copy</i>)

^a Приклад посилання у Таблиці. (*Table footnote*)

^b Приклад посилання у Таблиці. (*Table footnote*)

Використовуйте скорочення “Рис. 1”, в тому числі і на початку речення. Підписи до рисунків розташовувати під рисунками. Для підписів рисунків використовуйте стиль (*figure caption*).

Для вставки рисунків (растровий файл формату BMP, GIF, PNG, TIFF, JPEG, JPG або EPS з роздільною здатністю 300 dpi зі всіма включеними шрифтами) рекомендовано використовувати графічний текстовий бокс, як на цьому прикладі. Щоб зробити рамку невидимою, у меню MS Word “Формат\Напис” виберіть опції “Немає заливки” та “Немає ліній”.

Рис. 3. Приклад підпису до рисунку. (*figure caption*)

З метою уникнення плутанини використовуйте слова замість символів або скорочень при підписуванні координатних осей на рисунку. Наприклад, вкажіть величину “Magnetization” або “Magnetization, M.”, але не “M.” Рекомендовано у підписах включати одиниці вимірювання, подаючи їх (у дужках). Не підписувати осі координат тільки одиницями вимірювання. Наприклад, використовуйте “Magnetization (A/m)”, але не “A/m.” Не підписуйте координатні осі, використовуючи відношення величин і одиниць вимірювання. Наприклад, використовуйте “Temperature (°K),” але не “Temperature / °K.”

ПОДЯКА (*HEADING 5*)

Подяка спонсору наводиться у нумерованому посиланні на першій сторінці.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES (*HEADING 5*)

Шаблон передбачає послідовне нумерування цитованих джерел у квадратних дужках [1]. Розділові знаки у реченні слідує за квадратними дужками [2]. Посилатись на джерело необхідно як [3], а не як запис виду “Ref. [3]” або “reference [3]”, за винятком початку речення: “У джерелі [4] вперше ...”

Нумеруйте посилання окремо, з використанням нарядкових індексів. Помістіть конкретне посилання внизу тієї колонки, у якій воно згадується. Не розміщуйте посилання у списку літератури. Використовуйте букви для посилання у таблиці, як у вище наведеному прикладі табл. 1.

Статті, які не були опубліковані, навіть якщо вони були відправлені у журнал, повинні згадуватись як “unpublished” («неопубліковані») [5]. Статті, які були прийняті до публікування, повинні згадуватись як “in press” («подано до друку») [6]. Якщо у публікації менше шести співавторів, не використовуйте скорочення “et al” («та ін.»), а наводьте повний список [7]. З великої літери пишуть лише перше слово у назві статті, за винятком власних назв, імен та символів елементів.

Для статей, які опубліковано у перекладених виданнях, прохання спочатку навести джерело цитування англійською, а потім мовою оригіналу [2, 8]. Форматування списку літератури здійснити згідно вимог IEEE [9]. Застережено автоцитування.

Стрічку «Література» обов’язково здублювати англійською «References».

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES (HEADING 5)

- [1] IEEE. (2014). "Manuscript templates for conference proceedings," [Online]. Available: www.ieee.org/publications_standards/publications/conferences/2014_04_msw_a4_format.doc (*references*)
- [2] L. Petryshyn, A. Izmailov, "ISPC ITCM article template," – "Шаблон статті МНПК ІТКМ," *Information Technologies and Computer Modelling, Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання*: International Scientific and Practical Conference ITCM-2017: Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk, 2017, pp. 452-455.
- [3] J. K. Author, "Title of chapter in the book," in *Title of His Published Book*, xth ed. City of Publisher, Country if not USA: Abbrev. of Publisher, year, ch. x, sec. x, pp. xxx-xxx.
- [4] J. K. Author, "Name of paper," *Abbrev. Title of Periodical*, vol. x, no. x, pp. xxx-xxx, Abbrev. Month, year.
- [5] J. K. Author, "Title of paper," unpublished.
- [6] R. Nicole, "Title of paper with only first word capitalized," J. Name Stand. Abbrev., in press.
- [7] A. Author, B. Author, C. Author, D. Author and E. Author, "Title of conference technical articles," *IEEE Transl. J. Magn. Japan*, vol. 2, pp. 740-741, August 1987 [Digests 9th Annual Conf. Magnetism Japan, p. 301, 1982].
- [8] L.B. Petryshyn, M.L. Petryshyn, "Synthesis of discrete recursive functions and properties of recursive data coding systems," — "Синтез системы дискретных рекурсивных функций и свойства систем рекурсивного кодирования данных." *Information Processing Systems, Системи обробки інформації*, vol. 3 no. 2, pp. 46–51. 2013.
- [9] D. Graffox. (2009). IEEE citation reference [Online]. Available: <http://www.ieee.org/documents/ieeecitationref.pdf>

З М І С Т

СЕКЦІЯ 1. ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ТЕХНІЧНИХ ТА СИСТЕМАХ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....	3
SECTION 1. INFORMATION TECHNOLOGIES IN TECHNICAL SYSTEMS AND SYSTEMS OF SPECIAL PURPOSE	3
ОЦІНКА АЛГОРИТМІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ: ПРОДУКТИВНІСТЬ ТА ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ (НА ПРИКЛАДІ КЛАСИФІКАТОРА ТА РЕГРЕСІЇ)	4
О. Блоконь.....	4
ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ НАВЧАННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ НАВИЧОК ЗАСТОСУВАННЯ ВОГНЕПАЛЬНОЇ ЗБРОЇ.....	10
СЕРГІЙ ЗЛЕПКО, ДМИТРО ШТОФЕЛЬ, ЛЕОНІД КОВАЛЬ, МИХАЙЛО ПАЛАМАРЧУК	10
МЕТОДИ РОЗПІЗНАВАННЯ НАКИДІВ ТА КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ У ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ	14
Олег Люра.....	14
ВИМІРЮВАННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ХМАРНОСТІ НА ОСНОВІ ОЗНАК РОЗПОДІЛЕНОЇ КУМУЛЯТИВНОЇ ГІСТОГРАМИ	20
Р. А. Мельник, Ю. В. Гаврилко	20
ПЕРСПЕКТИВНІ ТОПОЛОГІЇ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЙ ВІРТУАЛІЗАЦІЇ.....	24
Микола Николайчук, Леонід Замиховський	24
ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ВИЗНАЧЕННЯ ЧИСЛА ВОББЕ	28
Ігор Петришин, Олександр Бас, Людмила Присяжнюк.....	28
МЕТОДОЛОГІЯ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ НА ОСНОВІ ОБРАЗНОЇ-КЛАСТЕРНОЇ МОДЕЛІ.....	32
Ігор Пітух.....	32
ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ОЦІНКИ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ У РОЗВИТКУ ПАРКУ ВИСОКИХ ТЕХНОЛОГІЙ	36
Наталія Пунченко	36
СПЕЦПРОЦЕСОРИ ВИЗНАЧЕННЯ ХЕММІНГОВОЇ ВІДДАЛІ ПРИ РОЗПІЗНАВАННІ ОБРАЗІВ.....	40
Андрій Сидор, Наталія Возна, Ярослав Николайчук	40
ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНОГО СИНТЕЗУ ГІБРИДНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ	44
Віктор Синеглазов, Олена Чумаченко.....	44
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА МЕДИЧНА ДІАГНОСТИЧНА СИСТЕМА НА ОСНОВІ НЕЧІТКИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ.....	48
Чумаченко Олена, Кот Анатолій.....	48
СЕКЦІЯ 2. ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В СОЦІУМІ, ОСВІТІ, МЕДИЦИНІ, ЕКОНОМІЦІ, УПРАВЛІННІ, ЕКОЛОГІЇ ТА ЮРИСПРУДЕНЦІЇ.....	52
SECTION 2. INFORMATION TECHNOLOGIES IN SOCIETY, EDUCATION, MEDICINE, ECONOMICS, MANAGEMENT, ECOLOGY AND LAW.....	52
ВИДІЛЕННЯ ПІДМНОЖИН ЕФЕКТИВНИХ РІШЕНЬ В ЗАДАЧАХ РЕІНЖИНІРИНГУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ	53
Валерій Семенець, Володимир Безкоровайний, Ольга Шевченко, Оксана Драз.....	53

ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ПОВІТРЯ ГАЗОТУРБІННОГО УСТАТКУВАННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НЕЧІТКОГО ВИВЕДЕННЯ	57
Людмила Бугаєва, Юрій Безносик, Микола Іванов.....	57
ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ІНДИВІДУАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ НАВЧАННЯ У РОЗПОДІЛЕНОМУ ВІРТУАЛЬНОМУ УНІВЕРСИТЕТІ	61
Артур Васильєв, Ігор Шубін	61
ОПТИМІЗАЦІЯ СТРУКТУРИ ПРОЕКТУ СТРАТЕГІЧНОГО РОЗВИТКУ ТУРИЗМУ В КАРПАТСЬКОМУ РЕГІОНІ	65
Мар'яна Грицюк, Юрій Грицюк, Павло Грицюк.....	65
THE PROBLEM OF REGIONAL ELECTRIC POWER SYSTEMS REENGINEERING	70
VOLODYMYR BESKOROVAINYI, MARYNA HUBARENKO, YEVHEN HUBARENKO.....	70
ПІДХІД ДО ВИРІШЕННЯ НЕЧІТКОЇ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ЗАДАЧІ ВИБОРУ ВАРІАНТІВ РОЗМІЩЕННЯ ТЕРИТОРІАЛЬНО-РОЗПОДІЛЕНИХ ОБ'ЄКТІВ В ГІС	74
Світлана Кузніченко, Ірина Бучинська, Людмила Коваленко	74
ON ESTIMATION AND DISCOVERY OF SURGICAL CLINIC STANDARDS	78
ALEXANDER LITVINOV, MAKSYM PAVLENKO, NADIIA KARPENKO.....	78
ЗАСТОСУВАННЯ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ПРОСТОРОВОГО АНАЛІЗУ ПОТЕНЦІАЛУ РОЗВИТКУ ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ	82
Петро Топилко, Богдан Любінський.....	82
ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ПРАВОВОЇ КУЛЬТУРИ В УКРАЇНСЬКОМУ ІНФОРМАЦІЙНОМУ СУСПІЛЬСТВІ	86
Любов Николайчук.....	86
ОПТИКО-ЧАСТОТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ГАЗУ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ШТАМІВ БАКТЕРІЇ HELICOBACTER PYLORI.....	90
Олександр Осадчук, Неоніла Осадчук, Ярослав Осадчук	90
ФОРМАЛІЗАЦІЯ ЕТАПІВ МАМОГРАФІЧНИХ ОБСТЕЖЕНЬ В МЕДИЧНИХ СИСТЕМАХ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ....	97
Анатолій Поворознюк, Халед Шехна.....	97
ПЕРСПЕКТИВИ ВИВЧЕННЯ КРОСПЛАТФОРМНОГО ПРОГРАМУВАННЯ В ШКОЛІ.....	102
Віра Козінчук, Марія Семаньків, Даріуш Саля	102
ПРОЕКТНІ ТЕХНОЛОГІЇ В НАВЧАЛЬНОМУ ПРОЦЕСІ.....	106
Марія Семаньків, Наталія Карпенко, Богдан Білусяк	106
ІНФОРМАЦІЙНИЙ ПОШУК АНСАМБЛЕМ КЛАСИФІКАТОРІВ	110
Олександр Шумейко, Геннадій Шевченко	110
ПРО ОДНУ ДИНАМІЧНУ МОДЕЛЬ ЛЕОНТЬЄВА	110
Фахріддін Мірзоахмедов, Людмила Сіренко.....	110
 СЕКЦІЯ 3. ТЕОРІЯ ІНФОРМАЦІЇ, КОДУВАННЯ, ПЕРЕТВОРЕННЯ ФОРМИ, ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ТА УЩІЛЬНЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ	117
SECTION 3. INFORMATION THEORY, CODING AND INFORMATION FORM TRANSFORMATION.....	117
 АЛГОРИТМ СТАТИСТИЧНОГО КОДУВАННЯ ДАНИХ ІНФОРМАЦІЙНОГО РЕСУРСУ З ВИКОРИСТАННЯМ КОНЦЕПЦІЇ ВНУТРІШНЬОЇ РЕСТРУКТУРИЗАЦІЇ	118
Володимир Бараннік, Іван Тупиця, Валерій Бараннік, Сергій Шульгін.....	118

ТЕОРІЯ ТА КОНЦЕПЦІЯ ЦИФРОВОГО ОПРАЦЮВАННЯ ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНИХ ДАНИХ	122
НАТАЛІЯ ВОЗНА	122
МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ТРІЙКОВИХ СИМЕТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ДЛЯ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ.....	126
АРТЕМ ІЗМАЙЛОВ	126
РЕКУРЕНТНИЙ ЛОГАРИФМІЧНИЙ АНАЛОГО-ЦИФРОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ.....	130
ЗИНОВІЙ МИЧУДА, ЛЕСЯ МИЧУДА.....	130
ТЕОРЕТИЧНІ, ФУНКЦІОНАЛЬНІ ТА ПРИКЛАДНІ ПЕРЕВАГИ ЗАЛИШКОВИХ КЛАСІВ ПРИ ОПРАЦЮВАННІ ЦИФРОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ	134
ЯРОСЛАВ НИКОЛАЙЧУК	134
ОЦІНКА КОЛЬОРОРОЗРІЗНЕННЯ ЗА ПОЛІХРОМАТИЧНИМИ ТАБЛИЦЯМИ ЩО СТВОРЮВАНІ ПРОГРАМНИМ МЕТОДОМ	138
ОЛЕНА ОШАРОВСЬКА, ВОЛОДИМИР ПИЛЯВСЬКИЙ.....	138
ТЕОРІЯ ЕНТРОПІЙНОГО АНАЛІЗУ ТА ЇЇ ЗАСТОСУВАННЯ У ВИРІШЕННІ ПРИКЛАДНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ЗАДАЧ	142
АНДРІЙ СЕГІН	142
ІТЕРАТИВНЕ ДЕКОДУВАННЯ ЦИКЛІЧНИХ КОДІВ.....	146
ВАСИЛЬ СЕМЕРЕНКО.....	146
BOOLEAN ALGEBRA OF THE SENSE AS MODEL TO KNOWLEDGE EXTRACTION FROM TEXTUAL INFORMATION	150
OLEG. V. BISIKALO, ILONA V. ВОНАЧ, ANNA I. LISOVENKO	150
МЕТОД ТА НУМЕРОВАНІ КАРТИ ПРОЦЕСУ АДИТИВНОГО АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ.....	150
ЛЮБОМИР ПЕТРИШИН, МИХАЙЛО ПЕТРИШИН	150
 СЕКЦІЯ 4. ГЛИБИННИЙ АНАЛІЗ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ ДАНИХ, ТЕХНОЛОГІЇ ВЕЛИКИХ ДАНИХ, СИСТЕМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ, «РОЗУМНІ» АПЛІКАЦІЇ.....	
159	
 SECTION 4. DEEP ANALYSIS AND DATA ORGANIZATION, BIG DATA TECHNOLOGIES, ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEMS, SMART APPLICATIONS.....	
159	
 МЕТОДОЛОГІЧНА БАЗА ЕФЕКТИВНОГО ЗАСТОСУВАННЯ МУЛЬТИАГЕНТНИХ СХЕМ У ПРОЦЕСІ КОДУВАННЯ ВІДЕОДАНИХ З ЗАБЕЗПЕЧЕННЯМ ПОКАЗНИКІВ ЦІЛІСНОСТІ ІНФОРМАЦІЇ ТА ЗМЕНШЕННЯМ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО НАВАНТАЖЕННЯ	
160	
ВОЛОДИМИР БАРАННІК, АНТОН СОРОКУН, ОКСАНА СТЕЦЕНКО, ВІКТОРІЯ ХІМЕНКО.....	160
МОДЕЛЮВАННЯ ЧАСТОТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ В ПРИСТРОЯХ АНАЛОГО-ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ	164
СТЕПАН НОВОСЯДЛИЙ, ВОЛОДИМИР МАНДЗЮК, ВОЛОДИМИР ГРИГА, ВОЛОДИМИР ЛУКОВКІН	164
ОСОБЛИВОСТІ СИНТЕЗУ УЗАГАЛЬНЕНИХ ОЗНАК ПРИ ПОБУДОВІ СИСТЕМ РОЗПІЗНАВАННЯ ЗА МЕТОДОМ ЛОГІЧНОГО ДЕРЕВА	168
ПОВХАН ІГОР ФЕДОРОВИЧ	168
ЗАСТОСУВАННЯ АВС-АНАЛІЗУ ДЛЯ ВІДСІКАННЯ НЕІНФОРМАТИВНИХ НАБОРІВ ПРИ ПАРАЛЕЛЬНОМУ ПОШУКУ АСОЦІАЦІЙ	173
ОЛЬГА ПОЛОВИНКА, ОЛЬГА ДМИТРІЄВА	173

СЕКЦІЯ 5. ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ В ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ	177
SECTION 5. INFORMATION PROTECTION IN INFORMATION AND TELECOMMUNICATION SYSTEM	177
ОБГРУНТУВАННЯ ЗАХИЩЕНОСТІ ІНФОРМАЦІЇ ВІД ВИТОКУ ТЕХНІЧНИМИ КАНАЛАМИ ДЛЯ СУЧАСНИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ	178
СЕРГІЙ ІВАНЧЕНКО, ОЛЕГ РУЩАК, ОЛЕКСАНДР ПУЧКОВ, АНАТОЛІЙ ГОЛІШЕВСЬКИЙ	178
АНАЛІЗ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ КІБЕРНЕТИЧНИХ АТАК	183
НАДІЯ КАЗАКОВА, ЮРІЙ ЩЕРБИНА, ОЛЕКСІЙ ФРАЗЕ-ФРАЗЕНКО	183
ФОРМУВАННЯ МНОЖИН ФУНКЦІЇ РАУНДОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ДЛЯ БЛОКОВИХ ШИФРІВ З ПСЕВДОНЕДЕТЕРМІНОВАНОЮ ПОСЛІДОВНІСТЮ КРИПТОПРИМІТИВІВ	187
АЛІНА ОСТАПЕНКО-БОЖЕНОВА, ВАЛЕНТИНА КАПЛУН	187
ANALYSIS OF PSEUDORANDOM SEQUENCES USING N-DIMENSIONAL STATISTICS	191
SVITLANA POPERESHNYAK	191
КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ ПРОГРАМНО - АПАРАТНОЇ КОРЕКЦІЇ ПОМИЛКИ З ПРАКТИЧНОЮ РЕАЛІЗАЦІЄЮ В ОБЧИСЛЮВАЛЬНІЙ МІКРО СИСТЕМІ	195
ВАДИМ ПУЙДЕНКО	195
НЕЧІТКА МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКІВ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ WI-FI МЕРЕЖ	204
КУПЕРШТЕЙН ЛЕОНІД, ТАТАРЧУК АРТЕМ, ВОЙТОВИЧ ОЛЕСЯ, БУДА АНТОНІНА	204
НЕЙРОМЕРЕЖЕВА МОДЕЛЬ БІОМЕТРИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ЛЮДИНИ ПО ГЕОМЕТРІЇ ОБЛИЧЧЯ	208
ЮРІЙ КУЛАКОВ, ОЛЕГ ТЕРЕЙКОВСЬКИЙ	208
СЕКЦІЯ 6. АРХІТЕКТОНІКА ТА КОМПОНЕНТИ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ	212
SECTION 6. COMPONENTS, COMPUTER SYSTEMS AND NETWORKS ARCHITECTONICS	212
ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИСКОРЮВАЧІВ АРИФМЕТИКО-ЛОГІЧНИХ ОПЕРАЦІЙ	213
АЛІНА ДАВЛЕТОВА	213
МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ МІКРОСИСТЕМ-НА-КРИСТАЛИ ЗІ СТРУКТУРАМИ «КРЕМНІЙ-НА-ІЗОЛЯТОРІ» ДЛЯ БІОМЕДИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	217
М.В.КОТИК, І.Т.КОГУТ, Т.Г.БЕНЬКО	217
ШВИДКОДІЮЧІ БАГАТОРОЗРЯДНІ МАТРИЧНІ ПЕРЕМНОЖУВАЧІ	221
БОРИС КРУЛІКОВСЬКИЙ, ВОЛОДИМИР ГРИГА, АЛІНА ДАВЛЕТОВА, ЯРОСЛАВ НИКОЛАЙЧУК	221
МОДЕЛЮВАННЯ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ПРИВОДУ КЛАПАНУ ПОДАЧІ ГАЗУ СУДНОВОГО ДИЗЕЛЯ В СІМІНТЕК	225
ВІТАЛІЙ НІКОЛЬСЬКИЙ, МАРК НІКОЛЬСЬКИЙ, ВІКТОР ЛИСЕНКО	225
ОПТИМІЗАЦІЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛІ БЛОКУ LRU КЕШ ПАМ'ЯТІ ПРОЦЕСОРНОГО ЯДРА АРХІТЕКТУРИ IA-32	225
ВАДИМ ПУЙДЕНКО	225

СЕКЦІЯ 7. МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ	233
SECTION 7 MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING OF COMPLEX SYSTEMS.....	233
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ УПРАВЛІННЯ ПІД КОНТРОЛЕРОМ БЕЗПЕЧНОГО ПРИЗЕМЛЕННЯ КВАДРОКОПТЕРА ПРИ АВАРІЇ	234
Богдан Благітко, Юрій Мочульський, Ігор Заячук.....	234
ЕФЕКТИВНІ ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ СХЕМИ ДЛЯ УЗАГАЛЬНЕНОГО ДВОВИМІРНОГО ДРОБОВОГО ЗА ЧАСОМ РІВНЯННЯ ДИФУЗІЇ	238
В. О. Богаєнко	238
ПРОГНОЗУВАННЯ ЗМІНИ ХАРАКТЕРИСТИК ФІЛЬТРУЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ У ПРОЦЕСІ ЗВОРОТНЬОЇ ПРОМИВКИ ПОРИСТИХ ЗАВАНТАЖЕНЬ БАГАТОШАРОВИХ ФІЛЬТРІВ	242
Андрій Бомба, Юрій Климюк.....	242
ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КЕРОВАНИХ ПРОЦЕСІВ ВИБУХУ МЕТОДАМИ КВАЗІКОНФОРМНИХ ВІДОБРАЖЕНЬ	246
Андрій Бомба, Катерина Малаш.....	246
МОДЕЛЮВАННЯ КОНФЛІКТНИХ СИТУАЦІЙ НА ОСНОВІ МЕТОДУ СИСТЕМОЇ ДИНАМІКИ	250
Юрій Штифурак, Борис Бутвін, Олександр Сидоренко	250
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ МОБІЛЬНИМ РОБОТОМ	254
Віталій Веретельник, Бесєдіна Світлана Валеріївна	254
УЗАГАЛЬНЕНЕ РІВНЯННЯ ДИФУЗІЇ З ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОЮ НЕЛОКАЛЬНІСТЮ.....	260
Олександра Візнович.....	260
ДО ОЦІНКИ СТАЛИХ МАТЕРІАЛУ ЛОКАЛЬНО ГРАДІЄНТНОЇ ПРУЖНОСТІ.....	264
Ольга Грицина, Галина Мороз.....	264
МАТЕМАТИЧНИЙ МЕТОД ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ	268
Ярослав Іванчук	268
АДАПТИВНИЙ МЕТОД ІДЕНТИФІКАЦІЇ МОДЕЛЕЙ У ВИГЛЯДІ ІНТЕГРАЛЬНИХ РЯДІВ ВОЛЬТЕРРИ	272
Віталій Іванюк, Володимир Федорчук	272
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ФАЗОВОЇ ДИНАМІКИ ВНУТРІШНЬОШЛУНОЧКОВОГО ТИСКУ З УРАХУВАННЯМ ОСНОВНИХ ФАКТОРІВ СКОРОЧУВАЛЬНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ МІОКАРДА.....	276
Олена Кірик, Алла Яковлева.....	276
ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ОРГАНІЧНИХ ВКЛЮЧЕНЬ МЕТОДОМ ПУЛЬСУЮЧОГО МЕНІСКА.....	280
Олександр Малько, Анастасія Малько.....	280
ПОКРАЩЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ ПРИНЦИПУ РУДУКЦІЇ.....	284
Матвійчук Я.М.....	284
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ МІГРАЦІЇ ДОМІШКОВОЇ РЕЧОВИНИ В ДВОФАЗНИХ АРМОВАНИХ ТІЛАХ ВИПАДКОВОЇ СТРУКТУРИ.....	289
Сергій Ментинський.....	289
СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ ЗАКЛАДУ ВИЩОЇ ОСВІТИ	293
Борис Мокін, Олена Слободянюк, Ольга Войцеховська	293

ІЄРАРХІЧНА САМОПОДІБНА МОДЕЛЬ ПЕРЕРОЗПОДІЛУ ВЛАДИ У СУЧАСНОМУ СУСПІЛЬСТВІ	297
Микола МоргуН.....	297
БІОРТОГОНЛЬНІ МНОГОЧЛЕНИ В ПРИКЛАДНИХ ЗАДАЧАХ.....	301
Ярослав П'янило, Валентина Собко	301
ВИБІР ТОЧОК СПОСТЕРЕЖЕННЯ В ЗАДАЧАХ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ДЕФЕКТІВ В ТОНКОСТІННІЙ СИСТЕМІ	305
Наталія Гук, Наталія Степанова	305
КОМБІНАТОРИКА ТА ЗАДАЧІ СЕМАНТИКИ	309
Тимофієва Н.К.	309
КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ.....	313
Вадим Яковенко, Юлія Ульяновська	313
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СТОХАСТИЧНИХ ДИФУЗІЙНИХ ПРОЦЕСІВ В ШАРУВАТИХ СТРУКТУРАХ З УРАХУВАННЯМ СТРИБКІВ ФУНКЦІЇ КОНЦЕНТРАЦІЇ НА ГРАНИЦЯХ КОНТАКТУ.....	317
Ольга Чернуха, Юрій Білуцзяк	317
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ДОМІШКОВОЇ ДИФУЗІЇ У СИЛЬНО ПОРИСТОМУ ТІЛІ ЗА ВИПАДКОВОГО РОЗТАШУВАННЯ СФЕРИЧНИХ ПОР.....	322
Ольга Чернуха, Анастасія Чучвара	322
PROBLEMS OF CALCULATIONS AND CREATION OF UNIVERSAL SYSTEM OF KNOWLEDGE.....	327
PETRO TROKHMICHUK.....	327
<i>СЕКЦІЯ 8. ПРИКЛАДНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИСКРЕТНО-НЕПЕРЕРВНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ... 331</i>	
<i>SECTION 8. APPLIED METHODS FOR CONTINUOUS AND DISCRETE MATHEMATICAL MODELS RESEARCH</i>	<i>331</i>
ЗСУВНЕ ПЛАСТИЧНЕ ВІДШАРОВУВАННЯ ЖОРСТКОГО ПРЯМОКУТНОГО ВКЛЮЧЕННЯ	332
Василь Кривень, Надія Крива, Андрій Бойко, Наталія Блащак.....	332
КІБЕР-ФІЗИЧНІ СИСТЕМИ: ДОСЯГНЕННЯ ТА ПРОБЛЕМИ	336
Володимир Г. Скобелев, Володимир В. Скобелев	336
ПРЯМИЙ МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОБМІНУ У СИСТЕМІ – КУЛЯ ВСЕРЕДИНІ БАГАТОШАРОВОЇ СФЕРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ	340
Роман Тацій, Марта Стасюк, Олег Пазен.....	340
ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЗДОВЖНИХ КОЛИВАНЬ СТРИЖНЯ З ДВОХ КУСКІВ КУСКОВО-СТАЛОГО ПЕРЕРІЗУ	346
Р.М. Тацій, О.О. Карабин, О.Ю. Чмир.....	346
ШАБЛОН СТАТТІ МНПК ІТКМ ЗГІДНО ВИМОГ ІЕЕЕ ЗА 2018	352
Любомир Петришин, Артем Ізмайлов	352
З М І С Т.....	356
ДЛЯ НОТАТОК	363

Наукове видання

**"ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ
ТА
КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ"**

**матеріали
Міжнародної науково-практичної конференції
14-19 травня 2018 року
Івано-Франківськ**

**"INFORMATION TECHNOLOGIES
AND
COMPUTER MODELLING"**

**proceedings
of the International Scientific Conference
2019, May, 20th to 25th
Ivano-Frankivsk**

Науковий редактор: Л.Б. Петришин
Технічний редактор: В.З. Максимець
Коректор: Ю.Ю. Іляш
Комп'ютерна верстка: О.М. Голіней

Прикарпатський національний університет
імені Василя Стефаника
76018, Івано-Франківськ, вул. Шевченка, 57,
ПНУ, адміністративний корпус

Формат. Папір офсетний. Ум. Друк арк.
Тираж 150 прим.

Друк: підприємець Голіней О.М.
тел. (0342) 58 04 32

Свідоцтво внесення до державного реєстру
ДК №

Для нотаток

Для нотаток