

Синтез Оптимального Керування Динамічними Процесами в Газотранспортних Системах

Назар Притула

відділ розроблення систем оптимального планування і прогнозування режимів роботи ГТС
Філія «Науково-дослідний інститут транспорту газу»
ПАТ «Укртрансгаз»,
Львів, Україна
nazar.prytula1@gmail.com

Мирослав Притула

відділ розроблення систем оптимального планування і прогнозування режимів роботи ГТС
Філія «Науково-дослідний інститут транспорту газу»
ПАТ «Укртрансгаз»
Львів, Україна
myroslav.prytula@gmail.com

Synthesis of Optimal Control of Dynamic Processes in GTS

Nazar Prytula

dept. of designing systems of optimal scheduling and forecasting operating modes of GTS
Research and Design Institute of Gas Transport of PJSC «Ukrtransgaz»
Lviv, Ukraine
nazar.prytula1@gmail.com

Myroslav Prytula

dept. of designing systems of optimal scheduling and forecasting operating modes of GTS
Research and Design Institute of Gas Transport of PJSC «Ukrtransgaz»
Lviv, Ukraine
myroslav.prytula@gmail.com

Анотація—У роботі поставлена проблема синтезу управління газотранспортною системою як складною відкритою динамічною системою із розподіленими параметрами в обмежених просторово-часових областях. Для рішення проблеми розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення для моделювання впливу зміни початково-крайових умов на параметри розподілу потоків у залежності від зовнішніх керованих та некерованих динамічних збурень. Поставлені задачі формування параметрів управління газодинамічними процесами активними об'єктами для забезпечення оптимальності потокорозподілу в системі за енергетичним критерієм. Приведені результати апробації розробленого алгоритмічного та програмного забезпечення. Приведено аналіз числових експериментів на розробленому програмному забезпеченні з використанням реальних даних, який підтвердив правильність вибраного напрямку досліджень.

Abstract—The problem of the synthesis of gas transmission system control as a complex open dynamic system with distributed parameters in limited spatio-temporal domains is presented. To solve this problem algorithms and software for modeling the effect of changing the initial boundary conditions on the flow distribution parameters, under conditions of external controlled and uncontrolled dynamic perturbations, have been developed. The tasks of finding parameters of control of gas-dynamic processes by active facilities are stated for ensuring

optimal flow distribution in the system by the energy criterion. The results of approbation of the developed algorithms and software are shown. The analysis of numerical experiments on the developed software using real data is presented, which confirmed the correctness of the chosen research direction.

Ключові слова—Газотранспортна система, оптимальний режим роботи, оптимальне керування, алгоритми оптимізації, програмний комплекс, компресорна станція

Keywords—Gas transmission system; optimal operation mode; optimal control; optimization algorithms; software; compressor station

I. ВСТУП

Існує багато актуальних, в самих різних областях, задач керування об'єктами з розподіленими параметрами, які описуються рівняннями в частинних похідних, наборами емпіричних відношень неперервного та дискретного типів. Вони характеризуються високим рівнем актуальності і значною специфікою, яка породжена просторовою розподіленістю керованих величин, керованих впливів та нескінченною розмірністю просторових станів [1-3].

Тепер отримано багато фундаментальних результатів, які покладені в основу теорії керування системами з розподіленими параметрами [4-6]. Однак залишилися

питання щодо розроблення конструктивних методів й техніки розв'язування конкретних задач керування із врахуванням особливостей предметної області. У роботі розглядаються деякі аспекти розвитку теорії керування конкретними складними системами на прикладі газотранспортної системи (ГТС).

Режими ГТС характеризуються частою зміною точок входу імпортованого газу, непроектними режимами функціонування (реверсне транспортування імпортованого газу на багатьох ділянках газопроводів), коливаннями транзиту та споживання газу в значних об'ємах тощо. А тому ситуація, яка складається, вимагає прийняття швидких та ефективних рішень щодо режимів експлуатації об'єктів та системи в цілому. Аналіз функціонування технологічних об'єктів системи транспортування газу з складною технологічною схемою дозволив визначити особливості її роботи.

В системі відбувається постійна зміна як режимних параметрів об'єктів ГТС, так і їх стану. Постійно проявляється унікальність об'єкту, яка полягає в індивідуальності структури, наборі технологічних об'єктів та їх параметрів, умовах функціонування технологічного обладнання та системи забезпечення їх керованості, постійній зміні складу елементів ГТС і структурних зв'язків між ними в залежності від режиму роботи.

Система може перебудувати в нескінченній кількості станів. Кожен стан, який визначається набором параметрів, повинен задовольняти набору обмежень, або належати певній багатомірній динамічній області. Важливими характеристиками стану є її стійкість до зовнішніх збурень та енергоефективність. Для забезпечення найкращих інтегральних характеристик системи на значних часових інтервалах необхідно забезпечити процес керування наявними обмеженими ресурсами. У такому випадку виникають задачі формування оптимальних параметрів керування.

II. ГАЗОТРАНСПОРТНА СИСТЕМА ЯК ОБ'ЄКТ КЕРУВАННЯ

Всі технологічні об'єкти, які приймають участь в транспортуванні та зберіганні газу об'єднані в єдиний комплекс трубопроводами з довжинами від кількох метрів до ста і більше кілометрів та діаметрами які мають від 100 до 1420 мм. Рельєф траси прокладання трубопроводів є змінним і на десятках кілометрів може мінятися до кількох сотень метрів. Робочий тиск в трубах доходить до 7.5 МПа. Компресорна станція (КС) може складатися із декількох цехів. Досить часто цехи відрізняються типом газоперекачуючих агрегатів (ГПА), як за потужністю (від 4.0 до 27.0 МВт) так і типом приводу (електропривід, газотурбінна установка) для відцентрового нагнітача. На багатьох підземних газосховищах працюють компресори поршневого типу. Технологічні схеми окремих КС можуть забезпечити її роботу в дві – три ступені. На ГТС є присутніми велика кількість різнотипної запірної та регулюючої арматури.

Вибір і підтримка найбільш оптимального режиму газотранспортної системи, при існуючій схемі взаємодії

централізованої і розподіленої схеми керування здійснюється способом зміни режиму роботи системи магістральних газопроводів.

Структура системи керування режимами роботи ГТС та його об'єктів включає підсистеми: актуалізації технологічних схем та даних; прогнозування та формування вхідних даних; ідентифікації параметрів моделей; розрахунку інтегральних параметрів режиму; пошуку оптимального розв'язку та представлення результатів моделювання [8].

Складність ідентифікації параметрів моделей та стану об'єктів пов'язаний із значним рівнем невизначеності режимної інформації, яка, в основному, проявляється у відсутності замірів витрат, тисків і температур в багатьох вузлах газотранспортної системи. Проведений аналіз видів невизначеностей, характерних для газотранспортної системи, показав: недостатню точність і неповноту оперативної інформації яка породжується похибкою вимірювання, малопродуктивною системою передачі даних, асинхронністю вимірювання і поступлення, недоступністю до частини інформації тощо. Крім цього неточність моделей пов'язана із допущенням про однорідність певних підсистем за параметрами гідравлічного стану, спрощенням, яке пов'язане з неврахуванням в повній мірі рельєфу прокладання трубопроводів, введенням нечітких моделей типу термо - гідравлічних еквівалентів, неврахуванням у повній мірі суттєвої не лінійності та часткового використання паспортних характеристик тощо.

III. ЗМІСТОВНА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Математична модель задачі оптимізації процесу керування формується на основі моделей газових потоків у технологічних схемах, моделі структури об'єкту та балансових відношеннях на стику декількох об'єктів, початкових та крайових умов [7,10,11]. Крім цього задані технологічні обмеження, обмеження на величину керуючих впливів і на режимні параметри роботи, математичний опис показників ефективності (критерію якості) процесу керування. Вважаємо, що математична задача процесу керування є цілком визначеною (є коректною), тобто з достатнім рівнем адекватності описана математична модель газових потоків у системі.

Математична модель керованого процесу в системі S газопроводів ґрунтується на понятті змінних стану (фазових координат), які в кожен момент часу споглядання $t_i \in [t_0, t_1]$ можуть бути описані скінченним числом дійсних чисел $x_1(t_i), x_2(t_i), \dots, x_n(t_i)$. Цей набір чисел можна вважати компонентами деякого вектору $x(t_i) = (x_1(t_i), x_2(t_i), \dots, x_n(t_i))^T$ - вектор стану системи. При зміні часу споглядання змінюється і вектор x . Зміна вектору стану змінюється під дією і прикладеного впливу (внутрішнього та зовнішнього). Множина всіх векторів стану в різні моменти часу $t_i \in [t_0, t_1]$ утворює n -вимірний простір станів детермінованої системи $X^n \subset R^n$ (n - вимірний фазовий простір). Питання щодо мінімальності компонент вектору станів не стоїть, навпаки

компонентів (заміри параметрів газу) є недостатньо, з точки зору ідентифікації параметрів моделей кожного об'єкту. В ході розвитку системи число компонент і точність їх вимірювання може змінюватися.

Зміна стану (еволюція) системи S на часовому інтервалі часу $T = \{t, t_0 \leq t \leq t_1\}$ описується системою диференціальних рівнянь у частинних похідних [7] при заданих початкових та крайових умовах, алгоритмічними моделями активних об'єктів (компресорних станцій) і моделями дискретної дії – запірної та регулюючої арматури.

Керована змінна $u = (u_1(t, x), u_2(t, x), \dots, u_m(t, x))$, окремі компоненти якої можуть залежати від однієї змінної - від часу або від стану об'єкту, входить тільки в модель активних об'єктів і не входить в рівняння руху газу на ділянках газопроводів. За керовану змінну можна взяти одну із величин – коефіцієнт стиску газу, обороти відцентрових нагнітачів, потужність ГПА тощо. Між вказаними величинами є однозначний зв'язок за відомих крайових умов на тиски та витрату газу. Керована змінна породжує узгоджені крайові умови на витрату та тиск газу на кінцях ділянок газопроводів, які примикають до активних об'єктів у процесі їх взаємодії.

Величина керуючого впливу визначається на основі вимірювання, чи розрахунку наявного стану системи $x(t)$ в момент часу t . Кожному вибору вектору параметрів керування u і наявного стану відповідає послідовність $x(t, x_0, t_0)$, яка називається фазовою траєкторією системи S . Пара $\{u(t), x(t)\}$ називається процесом керування, чи режимом. Поведінка вектору керування не є довільним. Він має свої допустимі межі $u \in [u_{min}, u_{max}]$, які є змінними і залежать від крайових умов та сформованого режиму роботи КС.

Заданий режим роботи ГТС в момент часу t_0 . Це може бути як стаціонарний, так і нестаціонарний режими. Задання нестаціонарного режиму вимагає знання розподілу режимних параметрів вздовж ділянок газопроводів. Прогнозований оптимальний режим на певний момент часу t_1 буває, в основному, стаціонарним. Крім цього, заданими є крайові умови на витрату газу та, для контрактних умов, на параметри газу для зовнішніх вхідних та вихідних потоків. Відомим ще є інтервали зміни тисків. Можливі додаткові умови на параметри газу, які в роботі не розглядаються - на точку роси та його температуру.

Основна задача – перейти з наявного в прогнозований режим при задоволенні певних критеріїв. Розглянемо проблеми які при цьому виникнуть. Перша проблема – об'єми акумульованого газу в режимах поточному та прогнозованому можуть суттєво відрізнятися. В цьому випадку виникне задача пошуку способу забезпечення зміни об'ємів акумульованого газу у системі. Якщо виявиться, що таких ресурсів немає, то доведеться змінити прогнозований режим. Інша проблема – чи система

встигне за час $\Delta t = t_1 - t_0$ досягнути параметрів прогнозованого режиму використовуючи наявні ресурси за потужністю і не порушуючи технологічних обмежень. На етапі планування прогнозованих режимів відповіді на поставлені запитання проблематично. У цьому можна переконатися тільки в процесі моделювання. Швидкість перехідних процесів бажано синхронізувати зі швидкістю перехідних режимів, щоб не виникало суттєве розбалансування системи.

Автоматизація процесу синтезу керування забезпечується:

- Постійним аналізом, на кожному ітераційному кроці процесу моделювання, зміни контрольованих параметрів та їхньої швидкості.
- Введенням в режим запланованого активного об'єкту шляхом зміни його потужності в таким чином, щоб забезпечити попадання контрольованих параметрів у спланований коридор.
- Регулюванням швидкості зміни значення контрольованих параметрів при їх наближенні до меж заданих коридорів.
- Виводом із режиму активних об'єктів при неможливості підтримки ними контрольованих параметрів у розрахованих коридорах.
- Регулюванням потужністю активних об'єктів для дотримання значень контрольованих параметрів у межах спланованих коридорів.
- Редагуванням технологічних коридорів із використанням балансових показників.
- Можливістю втручатися в процес керування – зупиняти роботу програми моделювання, повертатися в часі назад та редагувати параметри керування.
- Автоматизацією процесу реалізації перехідних режимів, супроводження режимів у технологічних межах.”

Розв'язування таких задач пов'язано з багатьма труднощами, які полягають в:

- просторовій розмірності системи та розмірності за кількістю та різноманітністю об'єктів;
- складності технологічних процесів, систем керування, виконавчих механізмів, метрологічного забезпечення тощо;
- математичному представленні моделей газових потоків в об'єктах системи та складністю їх інтеграції в єдину термо – гідравлічну модель системи;
- алгоритмічному забезпеченні автоматизації процесів розв'язування режимних задач (автоматична побудова математичної моделі системи при зміні вхідних, крайових умов, зміні

топології системи та типів технологічного обладнання).

IV. ЕТАПИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧІ ФОРМУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ УПРАВЛІННЯ

Формування параметрів управління починається з аналізу прогнозного режиму на заданому інтервалі часу, який необхідно, за заданим критерієм близькості режимів, розбити на часові підінтервали. Для кожного підінтервалу часу формується режим близький до оптимального за енергетичним критерієм. Сформовані режими дозволяють визначити інтервали зміни (часові коридори) контрольованих параметрів, які служать умовами, при їх порушенні контрольованими параметрами, відбуваються зміни керування активними об'єктами системи. Швидкість зміни параметрів керування вибирається з умови ощадливої технічної експлуатації активних об'єктів.

Систему планування режимів повинна задовольняти певним вимогам. Вона повинна забезпечити: планування прогнозованих режимів за заданими критеріями та із високим рівнем автоматизації процесу планування. В процесі планування повинні враховуватися всі наявні технологічні обмеження.

В області точності вхідних даних існує не єдиність розв'язку задач планування режимів для ГТС з компресорними станціями. Серед близьких режимів за критерієм оптимальності слід вибрати той який буде вимагати мінімальну кількість переключень у перехідних режимах.

Розв'язування оптимізаційних задач дискретними методами цільового перебору вимагають обмеження на критерій оптимальності – виконання властивості адитивності цільової функції. В цьому випадку можна суттєво зменшити складність перебірних методів. Для зменшення переборів та побудови швидких методів пошуку оптимальних режимів запропоновано декілька підходів. У всіх підходах вимагається представлення структури ГТС як об'єднання більш простих структур.

Висновки

У роботі запропоновано один із можливих підходів щодо розв'язування проблеми синтезу оптимального керування. Реалізація оптимального керування в реальному часі у процесі її руху (ситуативне керування) супроводжується фазовою траєкторією динамічної системи, коли керування формується як функція поточних фазових координат та крайових умов. На складність алгоритмів впливає наявність у системі дискретного впливу на крайові умови, структуру системи, на стан активних та пасивних об'єктів. Розривність розв'язків, часта зміна структури системи і відповідно зміна моделі її роботи, поєднання швидких та короткотермінових процесів, слаба прогнозованість зовнішніх та внутрішніх впливів на роботу системи, можлива зміна критерію якості роботи та керуючих впливів вимагають розробки адекватних методів формування параметрів керування таких систем. В умовах нечіткого прогнозу вибрати із

множини параметрів керування оптимальне за заданим критерієм якості керування в більшості випадків є проблематичним. Часто буває достатнім, якщо вдається визначити тільки межі зміни таких параметрів. Розроблене математичне та програмне забезпечення, як складова частина системи прийняття оперативних рішень для керування роботою об'єктами ГТС, включає ефективне розв'язання наступного комплексу задач:

- розрахунок і оптимізацію режимів роботи компресорних станцій,
- розрахунок режимів роботи підземних сховищ газу,
- інтерпретацію результатів розрахунків на технологічних схемах ГТС,
- формування робочих характеристик для кожного елемента із множини варіантів роботи КС для заданої схеми включення агрегатів в роботу із наперед заданою надійністю,
- розрахунок паливно-енергетичних затрат та формування оптимальних режимів роботи КС,
- моделювання й прогнозування роботи системи транспортування газу в умовах стаціонарного й нестаціонарного режимів її роботи,
- формування допустимих оптимальних експлуатаційних режимів роботи системи транспортування газу.

Приведені постановки задач та методи їх розв'язування апробовані на реальних прикладах. Значний ефект отримується від зниження енергетичних затрат та підвищення надійності газотранспортної системи за умов ефективною експлуатації технологічного обладнання.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе, Е. Ф. Мищенко "Математическая теория оптимальных процессов," М.: Наука, 1969, 392 с.
- [2] Р. Беллман "Динамическое программирование," М., 1960, 326 с.
- [3] А. Я. Фридман, О. В. Фридман, А. А. Зуенко "Ситуационное моделирование природно-технических комплексов," СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 436 с
- [4] R. Bellman, L. Zadeh "Decision making in fuzzy environment," *Manag. Sci.*, 1970, no. 4, pp. 141–164.
- [5] H. K. Lam, F. H. F. Leung "Stability Analysis of Fuzzy-Model-Based Control Systems" Berlin: Springer, 2011, p. 246
- [6] А. Н. Борисов, О. А. Крумберг, И. П. Федоров "Принятие решений на основе нечетких моделей. Примеры использования," Рига: Зинатне, 1990, 184 с.
- [7] В. С. Кулик, А. С. Казак, И. Ю. Храбров "Оптимизация режимов функционирования магистральных систем транспорта газа при изменении производительности," *Трубопроводный транспорт: теория и практика*, 2015, №5, С. 38–42.
- [8] N. Prytula "Mathematical modelling of dynamic processes in gas transmission," *Econtechmod. An international quarterly journal*, 2015, Vol.4, no. 3, pp. 57–63