

Оцінювання Наслідків Ураження Складних Мережевих Систем

Олександр Поліщук

Лабораторія моделювання та оптимізації складних систем,
Інститут прикладних проблем механіки і математики
ім. Я.С. Підстригача, Національна академія наук України,
Львів, Україна
od_polishchuk@ukr.net

Evaluation of Lesion Consequences of Complex Network Systems

Olexandr Polishchuk

Laboratory of Modeling and Optimization of Complex Systems,
Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics,
National Academy of Sciences of Ukraine
Lviv, Ukraine
od_polishchuk@ukr.net

Анотація— Розглянуто структурний та потоковий підходи до аналізу уразливості складних мережевих систем (МС) від цілеспрямованих атак та нецільових уражень різних типів. Показано, що на підставі поточкових моделей МС можна відтворити значно реалістичнішу картину безпосередньо уражених та опосередковано постраждалих елементів системи порівняно зі структурним.

Abstract— Structural and flow approaches to analysis of complex network systems (NS) vulnerability from targeted attacks and non-target lesions of various types are considered. It is shown that on the basis of NS flow models, it is possible to reproduce a much more realistic picture of directly damaged and indirectly affected system elements compared to the structural one.

Ключові слова— складна мережа, мережева система, вплив, посередництво, уразливість, цілеспрямована атака, нецільове ураження

Keywords— complex network, network system, influence, betweenness, vulnerability, targeted attack, non-target lesion

III. ВСТУП

Натепер основна увага дослідників у теорії складних мереж (ТСМ) зосереджена на розробленні стратегій захисту від послідовних цілеспрямованих атак на найважливіші зі структурного погляду вузли мережевих систем [1, 2]. Створенню сценаріїв атак на процес функціонування таких систем приділяється значно менше уваги. Безумовно, ураження структури впливає на цей процес, але дестабілізувати або навіть припинити функціонування системи можна і за неураженої структури (під час російсько-української війни авіатранспортна система України повністю припинила свою діяльність лише із-за загрози збиття літаків) [3]. Ще одним недоліком структурного підходу до аналізу уразливості МС є оцінка масштабності ураження. Безпосередньо ураженими вважаються фактично знищені

елементи, які необхідно вилучити зі структури системи. Опосередковано постраждалими обгрунтовано можна вважати лише суміжні до безпосередньо уражених вузли мережевої системи. Такий підхід є цілком прийнятний для асортативних мереж [4]. Однак, для дисасортативних МС, до яких відносяться більшість створених людиною систем та елементи яких пов'язані шляхами, такий підхід не відображає у повній мірі усю сукупність постраждалих унаслідок цілеспрямованої атаки або нецільового ураження елементів системи. Саме об'єктивна оцінка реальної картини наслідків негативного впливу, тобто кількості не лише безпосередньо уражених, але й опосередковано постраждалих елементів системи надасть змогу точніше класифікувати тип цього впливу та кількісно визначити заподіяну ним шкоду.

IV. УРАЖЕННЯ СТРУКТУРИ МЕРЕЖЕВОЇ СИСТЕМИ

Математичною моделлю складної мережі $G = (V, E)$, де V – множина вузлів мережі G та E – множина її зв'язків, є матриця суміжності $A = \{a_{ij}\}_{i,j=1}^N$, N – кількість вузлів, які входять до складу мережі [5]. Значення a_{ij} матриці A дорівнює 1, якщо зв'язок між вузлами n_i та n_j існує (такі вузли називаються суміжними), та дорівнює 0, якщо такий зв'язок відсутній. Також припускається, що вузли не мають зв'язків-петель, тобто діагональні елементи матриці A є нульовими.

Загалом для захисту мережевих систем від різномірних негативних впливів постають три види взаємопов'язаних завдань, а саме: аналіз реальних та потенційних загроз та розроблення засобів ефективного захисту від них до ураження; забезпечення способів протидії поширенню негативних впливів і мінімізації їх наслідків під час ураження

та оцінювання наслідків і відновлення структури та процесу функціонування системи *після* її ураження. Адже, чим краще захищена система, тим слабшою є дія негативного впливу, а отже меншими його наслідки. Для вирішення першого із цих завдань можна застосовувати типові сценарії цілеспрямованих атак [1, 2], а для другого та третього – структурну модель мережевої системи. Так, різниця рангу матриці \mathbf{A} до ураження та рангу цієї матриці під час (після) ураження визначає кількість знищених під час (після) нього вузлів у вихідній структурі МС. Різниця кількості ненульових елементів структурної моделі мережевої системи до ураження та кількості ненульових елементів матриці \mathbf{A} під час (після) ураження визначає кількість знищених під час (після) нього ребер у вихідній структурі МС. Таким чином, порівняння структурних моделей мережевої системи дає змогу скласти достатньо об'єктивне кількісне уявлення про рівень ураження системи або окремих її складових унаслідок здійсненої цілеспрямованої атаки або дії нецільового ураження. Водночас, поряд із інтегральними показниками ураження (сумарною кількістю знищених вузлів та ребер мережі), структурна модель дає змогу аналізувати ураження кожного елемента МС. Так, обнулення елемента матриці \mathbf{A} свідчить про вилучення (знищення, блокування) відповідного ребра зі складу структури мережевої системи, обнулення всіх елементів рядка та стовпця матриці \mathbf{A} – про вилучення відповідного вузла зі складу структури мережевої системи, зменшення узагальненого ступеня вузла – про скорочення кількості його взаємодій з іншими елементами системи. Загалом, структурна модель дає змогу відтворити картину усіх безпосередньо уражених та частини опосередковано постраждалих елементів МС. Відношення кількості реально уражених до кількості атакованих елементів системи є об'єктивним показником її захищеності від негативного впливу певного виду. Основним недоліком структурного підходу для оцінки наслідків ураження є те, що опосередковано постраждалими можна вважати лише суміжні до безпосередньо уражених вузлів мережевої системи (рис. 1, чорним позначені безпосередньо уражені вузли МС; сірим – суміжні із безпосередньо ураженими (опосередковано постраждали) вузли; білим – неуражени вузли мережевої системи; неперервна крива обмежує безпосередньо уражену область МС; штрихова крива – суміжну із безпосередньо ураженою, тобто область опосередковано постраждалих елементів мережевої системи).

V. УРАЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕРЕЖЕВОЇ СИСТЕМИ

Для дослідження уразливості процесу функціонування МС скористаємося її потоковою моделлю [3]. Відобразимо сукупність потоків, які проходять ребрами МС, у вигляді потокової матриці суміжності $\mathbf{V}(t)$, елементи якої визначаються об'ємами потоків, які пройшли ребрами складної мережі G за період $[t-T, t]$ до поточного моменту часу $t \geq T$:

$$\mathbf{V}(t) = \{V_{ij}(t)\}_{i,j=1}^N, \quad V_{ij}(t) = \tilde{V}_{ij}(t) / \max_{l,m=1,N} \tilde{V}_{lm}(t), \quad i, j = \overline{1, N},$$

у якій значення $\tilde{V}_{ij}(t)$ дорівнюють реальним обсягам потоків, які пройшли ребром (n_i, n_j) , $i, j = \overline{1, N}$, складної мережі за проміжок часу $[t-T, t]$, $t \geq T$. Очевидно, що структура матриці $\mathbf{V}(t)$ співпадає зі структурою матриці \mathbf{A} . Елементи потокової матриці суміжності МС визначаються на підставі емпіричних даних про рух потоків її ребрами. Натепер, за допомогою сучасних засобів відбору інформації такі дані достатньо легко отримати для багатьох природних та переважної більшості створених людиною систем (транспортних, енергетичних, фінансових, інформаційних тощо) [6].

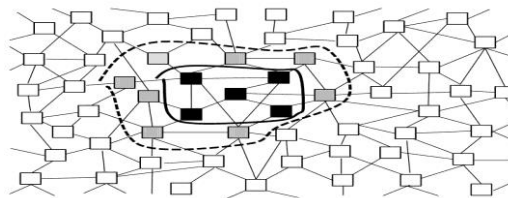


Рис. 1. Оцінка наслідків цілеспрямованої атаки на підставі структурної моделі МС

Інший порівняно зі структурним, і часто значно дієвіший та простіший для реалізації спосіб атаки полягає у дестабілізації або припиненні процесу функціонування окремих складових або системи загалом без безпосереднього ураження її елементів – суттєвого скорочення або припинення руху потоків мережею, створенні умов критичного завантаження шляхів руху цих потоків, блокування окремих вузлів-генераторів, транзитерів та/або кінцевих приймачів потоків чи десинхронізації руху потоків мережею.

У якості інтегрального показника втрат, заподіяних мережеві системі певним негативним впливом, можна використовувати різницю суми елементів матриці $\mathbf{V}(t)$ до ураження та суми елементів цієї матриці під час (після) ураження. Цей показник визначає сумарне зменшення обсягів потоків, в системі унаслідок дії негативного впливу. Водночас, поряд із інтегральними показниками, потокова модель дає змогу аналізувати ураження кожного елемента МС. Так, обнулення елемента матриці $\mathbf{V}(t)$ свідчить про вилучення (знищення, блокування) відповідного ребра з процесу функціонування мережевої системи, обнулення всіх елементів рядка та стовпця матриці $\mathbf{V}(t)$ – про вилучення відповідного вузла з процесу функціонування МС. Очевидно, що саме такі елементи МС визначаються за допомогою структурної моделі мережевої системи. Зменшення значення елемента матриці $\mathbf{V}(t)$ є ознакою зменшення обсягів потоків, які проходять відповідним ребром, а зменшення значення суми елементів у рядку та стовпці, які відповідають певному вузлу мережевої системи – про зменшення обсягів потоків, які генеруються, приймаються та проходять транзитом через цей вузол МС. Загалом, потокова модель дає змогу відтворити картину не тільки знищених, але й опосередковано постраждалих вузлів та ребер мережевої системи та кількісно визначити рівень заподіяної шкоди, що є додатковою перевагою цієї моделі. На

рис. 2 зображені наслідки цілеспрямованої атаки на мережеву систему, отримані на підставі її потокової моделі (чорним позначені безпосередньо уражені вузли МС; сірим – вузли, обсяги руху потоків з (до, через) яких зменшились унаслідок ураження; білим – неуражені вузли мережевої системи; неперервна крива обмежує безпосередню уражену область МС; штрихова крива – суміжну із безпосередньо ураженою областю мережевої системи; точкова крива – опосередковано постраждалу область МС). Як слідує із цього рисунка, визначена на підставі потокової моделі область опосередковано постраждалих елементів МС може бути значно більшою, ніж визначена на підставі структурної моделі область суміжних із безпосередньо ураженими вузлами мережевої системи. Таким чином, порівняння поточкових моделей МС до, під час та після негативного впливу дає змогу скласти достатньо об'єктивне кількісне уявлення про рівень ураження мережевої системи або окремих її складових унаслідок здійсненої цілеспрямованої атаки або дії нецільового ураження. Відношення кількості реально уражених до кількості атакованих елементів системи є об'єктивним показником її захищеності від атак певного виду.

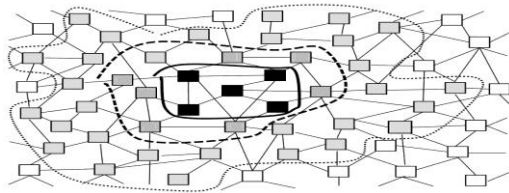


Рис. 2. Оцінка наслідків цілеспрямованої атаки на підставі потокової моделі МС

На підставі матриці $V(t)$ ми можемо визначити такі глобальні характеристики вузлів МС, як вхідні та вихідні параметри їхнього впливу на систему, а також параметри посередництва вузла [7]. А саме, вхідною (вихідною) силою впливу вузла – кінцевого приймача (генератора) потоків вважатимемо сумарні обсяги потоків, які були прийняті (згенеровані) у цьому вузлі за період $[t-T, t]$; вхідною (вихідною) областю впливу вузла – кінцевого приймача (генератора) потоків вважатимемо сукупність вузлів МС, у яких були згенеровані (кінцево прийняті) спрямовані до (з) нього потоки за період $[t-T, t]$; вхідна (вихідна) потужність впливу вузла – кінцевого приймача (генератора) потоків дорівнює кількості елементів областей вхідного (вихідного) впливу цього вузла відповідно. Мірою посередництва вузла вважатимемо сумарні обсяги потоків, які пройшли через нього транзитом за проміжок часу $[t-T, t]$, $t \geq T$; областю посередництва вузла називатимемо сукупність вузлів МС, які спрямовували та з яких приймалися потоки через даний транзитний вузол, а потужністю області посередництва – кількість елементів, які входять до неї. Загалом, після ураження певного вузла МС поєднання областей його впливу та посередництва повністю визначає сукупність усіх опосередковано постраждалих унаслідок цього елементів системи. Важливість аналізу ураження вузлів-генераторів, кінцевих приймачів та

транзитерів потоків слідує з того, що вони потребують пошуку нових постачальників, споживачів та альтернативних шляхів руху потоків, що зазвичай є достатньо складною проблемою.

На рис. 3 зображені наслідки цілеспрямованої атаки на мережеву систему на підставі аналізу поведінки параметрів впливу та посередництва елементів мережевої системи (чорним позначені безпосередньо уражені вузли МС; сірим – суміжні із безпосередньо ураженими вузлами; сірими ромбами, трикутниками та кружками – опосередковано постраждали вузли-генератори, кінцеві приймачі та транзитери потоків відповідно; білим – неуражені вузли МС; неперервна крива обмежує безпосередню уражену область МС; штрихова крива – суміжну із безпосередньо ураженою областю мережевої системи; точкова крива – опосередковано постраждалу область МС).

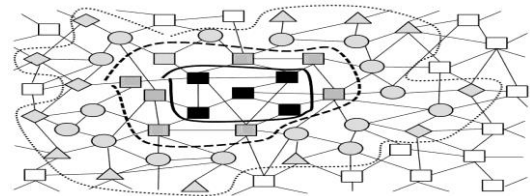


Рис. 3. Оцінка наслідків цілеспрямованої атаки на підставі аналізу параметрів впливу та посередництва елементів мережевої системи

VI. ВИСНОВКИ

Об'єктивне оцінювання масштабності ураження, заподіяного системі негативним впливом певного типу, є одним із основних чинників успішного відновлення системи та її повернення до нормальної життєдіяльності після закінчення дії цього впливу. У роботі показано, що потоковий підхід до аналізу масштабності ураження є значно ефективнішим за структурний та дає змогу створити набагато реалістичнішу картину наслідків різномірних негативних впливів на складні мережеві системи.

REFERENCES

- [1] Q. Nguyen et al, "Conditional attack strategy for real-world complex networks", *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 530, 12156, 2019.
- [2] M. Bellingeri, D. Cassi, and S. Vincenzi, "Efficiency of attack strategies on complex model and real-world networks", *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 414, pp. 174-180, 2014.
- [3] О.Д. Поліщук, М.С. Яджак, *Моделі та методи комплексного дослідження складних мережевих систем та міжсистемних взаємодій*. Львів: ІППММ ім. Я. С. Підстригача, 2023, 385с.
- [4] M. Catanzaro, G. Caldarelli, L. Pietronero, "Assortative model for social networks", *Physical Review E*, Vol. 70, 037101, 2004.
- [5] S. Boccaletti et al, "Complex networks: Structure and dynamics", *Physics reports*, Vol. 424 (4), pp. 175-308, 2006.
- [6] A.-L. Barabasi, "The architecture of complexity", *IEEE Control Systems Magazine*, 27 (4), pp. 33-42, 2007.
- [7] A. D Polishchuk, "Construction of boundary operators for the laplacian", *Proc. of Xth International Seminar/Workshop on Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory*, pp. 137-139, 2005.