

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-75-19>

УДК 519.718.42

НЕВЗОРОВ Андрій

Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет»
<https://orcid.org/0009-0004-8095-5778>
e-mail: andrey.nevzorov@e-u.edu.ua

СКЛЯРЕНКО Олена

Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет»
<https://orcid.org/0000-0001-6555-1223>
e-mail: olena.skliarenko@e-u.edu.ua

КОЛОДІНСЬКА Яніна

Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет»
<https://orcid.org/0000-0002-3330-7565>
e-mail: yanina.kolodinska@e-u.edu.ua

НИКОЛАЄВСЬКИЙ Олександр

Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет»
<https://orcid.org/0000-0002-0786-5432>
e-mail: alexander.nikolaievskiy@e-u.edu.ua

МОДЕЛІ ОЦІНКИ СТРУКТУРНОЇ ЖИВУЧОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ

Авторами розглянуті питання визначення та оцінювання найважливіших характеристик комп'ютерних мереж, а саме, структурної живучості та надійності. Відзначено актуальність тематики дослідження у зв'язку з інтенсивним розвитком хмарних обчислень і відкритих даних та онлайн послуг за останнє десятиліття. Відмічено сучасні тенденції розвитку обчислювальної техніки, процеси конвергенції мереж, перехід до мереж нового покоління та нагальні виклики воєнного часу, що зумовлюють необхідність моделювання оцінки надійності і підвищення живучості сучасних комп'ютерних мереж з урахуванням напрямків їхнього розвитку. В роботі наведено методику та приклади розрахунку значення показника надійності зв'язку у мережах, яке розраховується в залежності від структури мережі. Проведено моделювання оцінки структурної живучості та надійності зв'язку в мережі між вузлами. Структурна живучість розглядається як можливості реконструкції, реорганізації, які дадуть змогу створити структуру, що забезпечує надійне функціонування комп'ютерної мережі. Авторами запропоновані правила і формули розрахунку значень показника надійності для різних варіантів з'єднання елементів мережі. Наведено розрахунок живучості комп'ютерної мережі певної структури. Для кількісної оцінки живучості мережі введено показник живучості, наведено вираз для його обчислення. Визначено показник живучості мережі певної структури при одноразовому впливі. Надано деякі рекомендації щодо підвищення структурної живучості та надійності комп'ютерних мереж після проведення оцінки цих характеристик. Отримані результати визначення деяких показників та характеристик мереж можуть бути використані у подальших дослідженнях з метою прийняття оптимальних рішень щодо підвищення структурної живучості та надійності комп'ютерних мереж.

Ключові слова: комп'ютерна мережа, вузол, живучість, надійність, конвергенція мереж, показник, математична модель, граф.

NEVZOROV Andrii, SKLIARENKO Olena,
KOLODINSKA Yanina, NIKOLAIEVSKYI Oleksandr
Private Higher Educational Establishment "European University"

ASSESSMENT MODELS OF STRUCTURAL SURVIVAL AND RELIABILITY OF COMPUTER NETWORKS

The authors considered the issues of defining and evaluating the most important characteristics of computer networks, namely, structural survivability and reliability. The relevance of the research topic is noted in connection with the intensive development of cloud computing and open data and online services over the last decade. The modern trends in the development of computer technology, the processes of network convergence, the transition to new generation networks and the urgent challenges of wartime are noted, which make it necessary to model the reliability assessment and increase the survivability of modern computer networks, taking into account the directions of their development. The work provides the methodology and examples of calculating the value of the reliability indicator of communication in networks, which is calculated depending on the network structure. Modeling of assessment of structural survivability and reliability of communication in the network between nodes was carried out. Structural survivability is considered as the possibilities of reconstruction, reorganization, which will make it possible to create a structure that ensures the reliable functioning of a computer network. The authors proposed rules and formulas for calculating reliability index values for various options for connecting network elements. The calculation of the survivability of a computer network of a certain structure is given. For the quantitative assessment of network survivability, a survivability index is introduced, and an expression for its calculation is given. The survivability index of a network of a certain structure with a one-time impact is determined. Some recommendations are provided for increasing the structural survivability and reliability of computer networks after evaluating these characteristics. The obtained results of determining some indicators and characteristics of networks can be used in further research with the aim of making optimal decisions to increase the structural survivability and reliability of computer networks.

Keywords: computer network, node, survivability, reliability, convergence of networks, indicator, mathematical model, graph.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

У роботі розглянуті математичні моделі оцінки структурної живучості та надійності комп'ютерних мереж. Живучість належить до найважливіших характеристик комп'ютерних мереж (КМ) у зв'язку з їхнім інтенсивним розвитком в останнє десятиліття. Під живучістю розуміють здатність КМ зберігати і відновлювати виконання основних функцій у заданому обсязі й протягом заданого часу у випадку зміни структури мережі й умов її функціонування внаслідок деяких зовнішніх несприятливих впливів (ЗНВ). Крім того, під живучістю будь-якої системи розуміють її здатність продовжувати функціонування і забезпечувати виконання основних функцій за заданих показників якості обслуговування.

Сучасні тенденції розвитку обчислювальної техніки, процеси конвергенції мереж, перехід до мереж нового покоління, а також виклики воєнного часу зумовлюють актуальність питань оцінки і підвищення живучості мереж. Структурна живучість розглядається як можливості реконструкції, реорганізації, які дадуть змогу створити структуру, що забезпечує надійне функціонування мережі.

Аналіз досліджень та публікацій

Живучість та надійність комп'ютерних мереж є актуальною темою наукових досліджень. Ці питання вчені аналізують і оцінюють на різних рівнях проектування, моделювання і функціонування, використовуючи певні методи аналізу й оцінки. Даній проблематиці присвячено наукові доробки як вітчизняних [1, 4, 5-7, 9], так і закордонних дослідників [2, 3, 8]. Використання сучасних методів тестування і діагностики мереж дозволяє своєчасно виявити та виправити збої, а також підвищити експлуатаційний термін мережі [2].

Враховуючи сучасні тенденції розвитку хмарних обчислень та існуючі виклики і вимоги до надійності комп'ютерних мереж, які стали ще більш нагальними в умовах воєнного часу, виникає потреба оцінки значення показника надійності зв'язку у мережах в залежності від їх структури та визначення надійності зв'язку в мережі між вузлами, що і запропоновано авторами у даній статті.

Формулювання цілей статті

Мета дослідження полягає у моделюванні кількісної оцінки структурної живучості і надійності комп'ютерних мереж та вивченні питань живучості мережі для різних варіантів її можливої структури, в тому числі, із врахуванням впливу, значень показника надійності для різних варіантів з'єднання елементів мережі.

Викладення основного матеріалу дослідження

Проведемо моделювання оцінки структурної надійності мережі.

Розглянемо задачу визначення надійності зв'язку в мережі між вузлами a_s і a_t , якщо задано безліч шляхів, які можуть бути використані для цього зв'язку, відомі значення ймовірності безвідмовної роботи p_{ij} всіх ребер мережі. Значення показника надійності ρ_{st}^k шляху μ_{st}^k , виходячи з визначення (без урахування показників надійності вузлів), знаходиться за формулою:

$$\rho_{st}^k = \prod_{\forall b_{ij} \in \mu_{st}^k} p_{ij}.$$

При визначенні показника надійності зв'язку в мережі між вузлами і враховуються надійність всієї сукупності шляхів, що з'єднують дані вузли:

$$\rho_{st} = \rho(m_{st}).$$

Значення показника надійності зв'язку розраховується в залежності від структури мережі. При послідовному з'єднанні елементів з показниками надійності p_1, p_2, \dots, p_n (рис. 1) використовують співвідношення:

$$p = p_1 p_2 \dots p_n,$$

де n – кількість послідовно з'єднаних елементів.

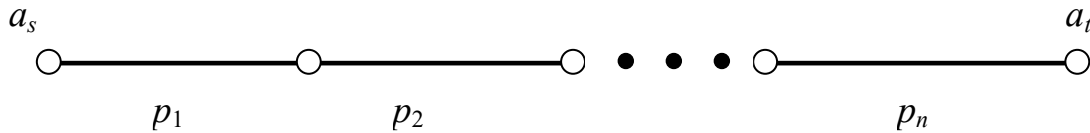


Рис. 1. Послідовне з'єднання елементів мережі (мережа типу «шина»)

При паралельному з'єднанні елементів буде справедливим співвідношення:

$$p = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i).$$

Наприклад, показник надійності зв'язку в мережі між двома вузлами, пов'язаними двома паралельними елементами (рис. 2), визначається з виразу:

$$p = p_1 + p_2 - p_1 p_2.$$

Визначення значення показника надійності зв'язку розглянемо на прикладі для мережі, що має структуру, представлену на рис. 3.

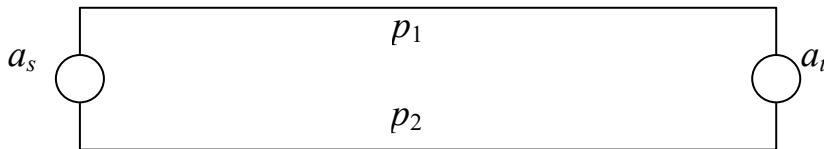


Рис. 2. Паралельне з'єднання елементів мережі (мережа типу «зірка»)

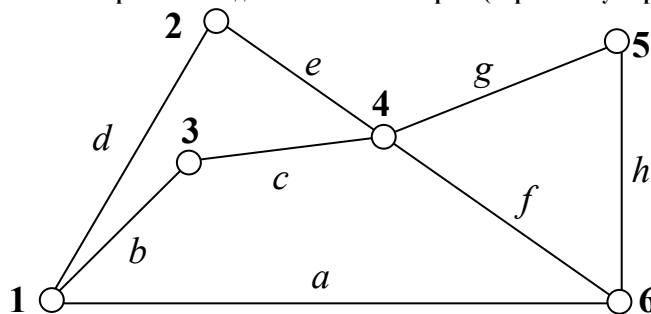


Рис. 3. Приклад структури мережі

Нехай необхідно визначити надійність зв'язку між вузлами 1 і 6, якщо відомі значення ймовірності безвідмовної роботи ребер. Аналіз структури мережі показує, що зв'язок між вузлами 1 і 6 можна представити як послідовнопаралельне з'єднання елементів наступного виду (рис. 4).

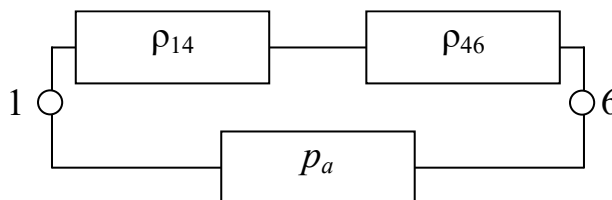


Рис. 4. Еквівалентне з'єднання елементів мережі

На рис. 4 позначені:

- p_a – ймовірність безвідмовної роботи ребра a ;
- p_{14} – показник надійності зв'язку між вузлами 1 і 4;
- p_{46} – показник надійності зв'язку між вузлами 4 і 6.

Використовуючи правила розрахунку показника надійності для різних варіантів з'єднання елементів, одержимо:

$$\rho_{16} = 1 - [(1 - p_a) \cdot (1 - \rho_{14} \cdot \rho_{46})];$$

$$\rho_{14} = p_b \cdot p_c + p_d \cdot p_e - p_d \cdot p_e \cdot p_b \cdot p_c;$$

$$\rho_{46} = p_f + p_g \cdot p_h - p_f \cdot p_g \cdot p_h.$$

З даного виразу отримуємо:

$$\rho_{16} = 1 - [(1 - p_a) (1 - (p_b \cdot p_c + p_d \cdot p_e - p_b \cdot p_c \cdot p_d \cdot p_e) (p_f + p_g \cdot p_h - p_f \cdot p_g \cdot p_h))]$$

Далі вивчимо питання оцінки живучості мережі.

Розглянемо мережу, структура якої представлена у вигляді графа на рис. 5.

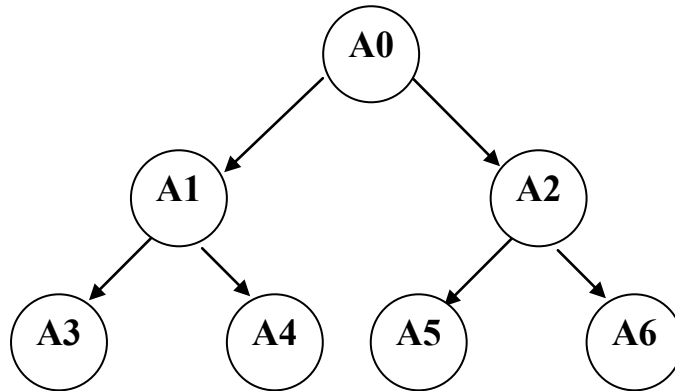


Рис. 5. Граф, що моделює структуру мережі

Комп'ютерну мережу будемо вважати зв'язаною, якщо вузол верхнього ярусу (A0) буде мати зв'язок хоча б з одним вузлом нижнього ярусу (A3, A4, A5, A6).

Для кількісної оцінки живучості мережі введемо показник живучості:

$$P_{жс} = \sum_{i=1}^S K_i \cdot p_i,$$

де S – кількість різних варіантів стану мережі в результаті впливу;

K_i – показник якості системи в i -му стані;

p_i – ймовірність того, що в результаті впливу система опиниться в i -му стані.

Показник якості знаходиться як математичне сподівання кількості вузлів нижнього ярусу, які будуть мати зв'язок з вузлом верхнього ярусу після екстремального впливу:

$$K_i = n_i / N,$$

де n_i – кількість вузлів нижнього ярусу, які залишилися пов'язаними з вузлом верхнього ярусу після екстремального впливу;

N – загальна кількість вузлів нижнього ярусу.

Значення ймовірності того, що в результаті впливу система опиниться в i -му стані, визначається з формули:

$$p_i = 1 - C_m^l q^l (1 - q)^{m-l},$$

де m – загальна кількість каналів зв'язку;

q – ймовірність відмови каналу x_i при одноразовому впливі,

l – кратність впливу ($l=1, 2, \dots$);

$$C_m^l = \frac{m!}{l!(m-l)!} - \text{число сполучень з } m \text{ по } l.$$

Таким чином, вираз для обчислення показника живучості можна записати у вигляді:

$$P_{жс} = \frac{\sum_{i=1}^s \frac{n_i}{N}}{C_m^l} \left[1 - C_m^l q^l (1-q)^{m-l} \right].$$

Визначимо показник живучості мережі заданої структури (рис. 5) при одноразовому впливі, якщо $q=0,1$. Для зручності розрахунків складемо табл. 1.

Таблиця 1

Розрахунок живучості комп'ютерної мережі заданої структури.

i		Стан системи							n _i	n _i /N
		x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆			
1	1	0	1	1	1	1	1	4	2	0,5
2	1	1	0	1	1	1	1	4	2	0,5
3	1	1	1	0	1	1	1	4	3	0,75
4	1	1	1	1	0	1	1	4	3	0,75
5	1	1	1	1	1	0	1	4	3	0,75
6	1	1	1	1	1	1	0	4	3	0,75

В колонках таблиці значення 0 означає відмову лінії, значення 1 – працездатний стан лінії.
 У нашому випадку

$$m=6;$$

$$C_m^l = \frac{m!}{l!(m-l)!} = \frac{6!}{1!5!} = 6;$$

$$\sum_{i=1}^6 \frac{n_i}{N} = 2 \cdot 0,5 + 4 \cdot 0,75 = 4$$

Підставимо отримані значення у формулу для розрахунку показника живучості:

$$P_{жс} = \frac{4}{6} \left[1 - 6 \cdot 0,1 \cdot (1 - 0,1)^{6-1} \right] = 0,43$$

З отриманих результатів видно, що навіть при одноразовому впливі живучість аналізованої мережі невелика.

Підвищити живучість дозволить, наприклад, введення додаткових зв'язків та структурне резервування каналів зв'язку.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Розглянуті у статті питання моделювання оцінки структурної живучості та надійності комп'ютерних мереж є актуальними і затребуваними в умовах сучасних викликів та стрімкого розвитку хмарних технологій і тенденцій цифрової трансформації суспільства. Процеси конвергенції мереж, перехід до мереж нового покоління, сучасні виклики воєнного часу зумовлюють необхідність оцінювання надійності і підвищення живучості комп'ютерних мереж. Використання сучасних методів тестування та діагностики мереж дозволяє своєчасно виявити та виправити збої, а також підвищити експлуатаційний термін мережі. В даній роботі наведено приклади розрахунку значення показника надійності зв'язку у мережах в залежності від їх структури та визначення надійності зв'язку в мережі між вузлами. Авторами запропоновані правила і формули розрахунку значень показника надійності для різних варіантів з'єднання елементів мережі. Наведено розрахунок живучості комп'ютерної мережі певної структури. Для кількісної оцінки живучості мережі введено показник живучості, наведено вираз для його обчислення. З отриманих

результатів та обчислень характеристик мережі видно, що навіть при одноразовому впливі, живучість проаналізованої комп'ютерної мережі досить мала.

Отримані результати оцінки важливих характеристик мереж можуть бути використані у подальших дослідженнях з метою прийняття оптимальних рішень щодо підвищення структурної живучості та надійності комп'ютерних мереж.

Література

1. Воробієнко П.П., Нікітюк Л.А., Резніченко П.І. Телекомунікаційні та інформаційні мережі. Підруч. для ВНЗ. Київ: Самміт-книга, 2010. 708 с.
2. Muriel M'edard, Steven S. Lumetta. (2003). Network Reliability and Fault Tolerance March. URL: https://www.researchgate.net/publication/2884965_Network_Reliability_and_Fault_Tolerance
3. Rubens, P. (2019, June 17). Understanding Fault Tolerance: Securing Your System. *Enterprise storage forum*. URL: <https://www.enterprisestorageforum.com/storage-management/fault-tolerance.html>
4. Микитишин А.Г., Митник М.М., Стухляк П.Д., Пасічник В.В. Комп'ютерні мережі: Львів: Магнолія, 2013. 256 с.
5. Ткачов В.М., Коваленко А.А., Фесенко Т.Г. Оптимізація мережного алгоритму функціонування комп'ютерних мереж підвищеної живучості на мобільній платформі на етапі їх проектування. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2021. Вип. 3 (65). с.143-147.
6. Зайченко Ю.П., Мохаммадреза Моссаварі. Аналіз показників живучості комп'ютерної мережі з технологією MPLS. *Вісник Національного технічного університету "КПІ". Інформатика, управління та обчислювальна техніка*. 2005. Вип. 43. с. 73-80.
7. Ткачов В.М. Метод забезпечення живучості високомобільної комп'ютерної мережі. *Сучасні інформаційні системи*. 2021. № 2. с. 159-165.
8. Chriki A. FANET: Communication, mobility models and security issues. *Computer Networks*. 2019.
9. Князева Н.О. Алгоритми оцінки структурної живучості інфокомунікаційної мережі. *Сучасні інформаційно-комунікаційні технології: VIII наук.-техн. конф.: збірник тез*. Київ, 2012. с. 192–193.
10. Невзоров А.В., Склярєнко О.В., Колодінська Я.О., Яровий Р.О. Особливості аналітичного забезпечення експлуатації інформаційних систем та обладнання у сучасних умовах. *Прикладні питання математичного моделювання*. Т. 6. № 1. 2023.
11. Ніколаєвський О.Ю., Левченко С.В., Невзоров А.В., Склярєнко О.А. Аналіз протоколу для побудови захищеної комп'ютерної мережі на прикладі IPSec. Актуальні питання забезпечення кібербезпеки та захисту інформації: колективна монографія. Київ: Європейський університет, 2023. С.108-114.

References

1. Vorobiienko P.P., Nikitiuk L.A., Reznichenko P.I. (2010). *Telekomunikatsiini ta informatsiini merezhi*. [Telecommunication and information networks]. Kyiv: Sammit-knyha [in Ukrainian].
2. Muriel M'edard, Steven S. Lumetta. (2003). *Network Reliability and Fault Tolerance March*. URL: https://www.researchgate.net/publication/2884965_Network_Reliability_and_Fault_Tolerance
3. Rubens, P. (2019, June 17). Understanding Fault Tolerance: Securing Your System. *Enterprise storage forum*. URL: <https://www.enterprisestorageforum.com/storage-management/fault-tolerance.html>
4. Mykytyshyn A.H., Mytnyk M.M., Stukhliak P.D., Pasichnyk V.V. (2013). *Kompiuterni merezhi*. [Computer networks]. Lviv: Mahnoliia [in Ukrainian].
5. Tkachov V.M., Kovalenko A.A., Fesenko T.H. (2021). Optymizatsiia merezhnoho alhorytmu funktsionuvannia kompiuternykh merezh pidvyshchenoi zhyvuchosti na mobilnii platformi na etapi yikh proektuvannia. [Optimization of the network algorithm for the functioning of high-survivability computer networks on a mobile platform at the stage of their design], *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zv'iazku*, 3 (65), 143-147. [in Ukrainian].
6. Zaichenko Yu.P., Mokhammadreza Mossavari. (2005). Analiz pokaznykiv zhyvuchosti kompiuternoi merezhi z tekhnolohiieiu MPLS [Analysis of survivability indicators of a computer network with MPLS technology], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KPI". Informatyka, upravlinnia ta obchysluvalna tekhnika*, 43, 73-80. [in Ukrainian].
7. Tkachov V.M. (2021). Metod zabezpechennia zhyvuchosti vysokomobilnoi kompiuternoi merezhi [A method of ensuring the survivability of a highly mobile computer network], *Suchasni informatsiini systemy*, 2, 159-165. [in Ukrainian].
8. Chriki A. (2019). FANET: Communication, mobility models and security issues. *Computer Networks*.
9. Kniazieva N.O. (2012). Alhorytmy otsinky strukturoi zhyvuchosti infokomunikatsiinoi merezhi [Algorithms for assessing the structural viability of the information communication network], *Suchasni informatsiino-komunikatsiini tekhnolohii* [Modern information and communication technologies]. Kyiv [in Ukrainian].
10. Nevzorov A.V., Skliarenko O.V., Kolodinska Y.O., Yarovy R.O. (2023). Osoblyvosti analitychnoho zabezpechennia ekspluatatsii informatsiinykh system ta obladnannia u suchasnykh umovakh [Peculiarities of analytical support for the operation of information systems and equipment in modern conditions]. *Prykladni pytannia matematychnoho modelivannia*. 1. [in Ukrainian].
11. Nikolaievskiy O.Y., Levchenko S.V., Nevzorov A.V., Skliarenko O.A. (2023). Analiz protokolu dlia pobudovy zakhyshchenoi kompiuternoi merezhi na prykladi IPSec [Analysis of the protocol for building a secure computer network using IPSec as an example]. *Aktualni pytannia zabezpechennia kiberbezpeky ta zakhystu informatsii: kolektyvna monohrafiia* [Current issues of cyber security and information protection: a collective monograph] (pp. 108-114). Kyiv: Yevropeyskyi universytet, [in Ukrainian].