

В.Г. УСЕНКО

Національний університет
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

АНАЛІЗ СТРУКТУРНОЇ НАДІЙНОСТІ ТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ОСТОВНИХ ДЕРЕВ І ЦИКЛІВ

У роботі проведено дослідження структурної надійності технічної системи на основі графів шляхом аналізу остовних дерев, циклічних підграфів і загальної кількості зв'язних підграфів, що моделюють їхню топологію. Увагу приділено вивченню кількості остовних дерев, циклічних підграфів і загальної кількості зв'язних підграфів, що проходять через кожну ділянку системи. Ці показники дозволяють кількісно оцінити важливість окремих елементів структури та визначити їхній вплив на загальну її працездатність.

Надійність системи оцінювалася на основі кількості резервованих шляхів, що забезпечують працездатність навіть у разі відмови окремих елементів. Для аналізу було використано методи теорії графів, зокрема алгоритм пошуку у глибину (DFS) для виявлення циклічних підграфів і теорему Кірхгофа для підрахунку кількості остовних дерев.

Результати дослідження показали, що найбільш критичними ділянками структури є ті, через які проходить найбільша кількість остовних дерев і циклічних підграфів. Ребра, що забезпечують максимальну кількість резервованих зв'язків, є ключовими для підтримки працездатності системи. Їхня відмова значно знижує надійність, тоді як відмова менш значущих ділянок, через які проходить найменша кількість зв'язних підграфів, має незначний вплив завдяки альтернативним шляхам. Зроблено висновок, що надійність технічної системи залежить від кількості зв'язних підграфів, що проходять через кожен елемент. Практичне застосування отриманих результатів дозволяє оптимізувати проєктування технічних систем, підвищити їхню стійкість до відмов та знизити ризики відмови шляхом правильного розподілу ресурсів і резервування критичних ділянок. Отримані результати можуть бути застосовані для покращення надійності інженерних мереж, комп'ютерних систем та інфраструктурних об'єктів.

Ключові слова: надійність систем, теорія графів, остовне дерево, циклічний підграф, алгоритм DFS, теорема Кірхгофа, резервування, критичні ділянки.

V.H. USENKO

National University
“Yuriy Kondratyuk Poltava Polytechnic”

STRUCTURAL RELIABILITY ANALYSIS OF A TECHNICAL SYSTEM USING SPANNING TREES AND CYCLES

In this work, a study of the structural reliability of a technical system based on graph theory was conducted by analyzing spanning trees, cyclic subgraphs, and the total number of connected subgraphs modeling its topology. The focus was on examining the quantity of spanning trees, cyclic subgraphs, and the overall number of connected subgraphs passing through each section of the system. These indicators provide a quantitative assessment of the importance of individual structural elements and determine their impact on the overall system performance.

The system's reliability was evaluated based on the number of redundant paths that ensure functionality even in the event of individual element failures. Graph theory methods were employed for the analysis, including the depth-first search (DFS) algorithm for detecting cyclic subgraphs and Kirchhoff's theorem for calculating the number of spanning trees.

The study results revealed that the most critical sections of the structure are those through which the largest number of spanning trees and cyclic subgraphs pass. The edges providing the highest number of redundant connections are key to maintaining system functionality. Their failure significantly reduces reliability, while the failure of less significant sections, through which the fewest connected subgraphs pass, has minimal impact due to alternative paths. It was concluded that the reliability of a technical system depends on the number of connected subgraphs passing through each element. The practical application of the obtained results allows for optimizing the design of technical systems, enhancing their fault tolerance, and reducing failure risks by properly distributing resources and reserving critical sections. These findings can be applied to improve the reliability of engineering networks, computer systems, and infrastructure facilities.

Key words: system reliability, graph theory, spanning tree, cyclic subgraph, DFS algorithm, Kirchhoff's theorem, redundancy, critical sections.

Постановка проблеми

Традиційні методи оцінювання надійності, що базуються на статистичних даних про відмови компонентів, не завжди дозволяють урахувати топологічні особливості структури системи. Моделювання технічної системи у формі графа, де вершини відповідають вузлам, а ребра — зв'язкам між ними, дає змогу аналізувати зв'язність системи, визначати критичні ділянки й оцінювати вплив їхньої відмови на загальну працездатність. Основною проблемою є відсутність ефективних методів кількісної оцінки важливості кожного елемента системи з урахуванням його ролі в забезпеченні як мінімальної зв'язності, так і резервованих шляхів. Наявні підходи не завжди дозволяють урахувати всі можливі працездатні стани системи та визначати найбільш вразливі ділянки. Постає необхідність у розробленні методів аналізу надійності технічних систем на основі графових структур. Для вирішення цієї проблеми пропонується використовувати кількісний аналіз остовних дерев, циклічних підграфів і загальної кількості зв'язних підграфів, що проходять через кожен елемент структури. Цей підхід дозволить не лише оцінити важливість окремих ділянок, а й розробити стратегії підвищення надійності шляхом оптимізації топології системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останні дослідження демонструють зростання інтересу до застосування теорії графів для оцінювання надійності складних технічних систем. Зокрема, у роботі [1] представлено моделювання та оцінку надійності електричних енергосистем за допомогою теорії графів і діаграм надійності блоків. Дослідження [2] пропонує точний метод оцінювання надійності інфраструктурних мереж, поєднуючи теорію графів і цілочисельне програмування. У роботі [3] розглянуто оцінку надійності розподільчих мереж через топологічний аналіз, заснований на теорії графів. Наукове джерело [4] зосереджується на огляді обчислювальної складності аналізу надійності мереж. Праця [5] представляє комбінаторні аспекти надійності мереж. Дослідження підтверджують ефективність використання теорії графів в аналізі та підвищенні надійності технічних систем. Ці підходи дозволяють детально моделювати складні мережеві структури, ідентифікувати критичні компоненти та розробляти стратегії для покращення загальної стійкості систем до відмов і різні аспекти комбінаторних конструкцій, зокрема й питання надійності мереж [6; 7].

У роботах виділяються ключові вимоги до надійності систем, визначення відповідних показників, а також методів обчислення числа остовних дерев, що можуть бути пов'язані із граничними працездатними станами топологічної структури [8–11]. У науковій літературі описано способи обчислення кількості остовних дерев у графах і методи визначення їх кількості для окремих ділянок структури [9].

Мета дослідження

Мета дослідження полягає в розробленні та застосуванні графоаналітичного підходу для оцінювання надійності технічних систем шляхом аналізу їхньої топологічної структури. Це передбачає кількісне визначення критичних елементів системи, що забезпечують працездатність і резервування шляхів, а також розроблення методів для оптимізації надійності шляхом виявлення та підсилення слабких місць структури.

Виклад основного матеріалу дослідження

Розглянемо структуру резервованої технічної системи як граф A , де ребра представляють ділянки структури x_i , $i=1,2,\dots, n$, а вершини v_j , $j=1,2,\dots, m$ — її вузли. Оскільки зв'язки між вузлами можуть існувати в обох напрямках, структура моделюється неорієнтованим графом. Підграф T , який не містить циклів, але має достатню кількість ребер для з'єднання всіх вершин, є остовним деревом. У контексті технічної системи таке дерево відображає працездатний стан, що є граничним, оскільки не містить структурної надлишковості. Кожен елемент такої

системи є критичним для її функціонування, а будь-яка відмова може призвести до втрати зв'язності всієї структури.

Надійність структури мережі безпосередньо залежить від кількості її нерезервованих працездатних станів, які визначаються через остовні дерева графа, що моделює систему. Граф A відображає технічну систему, де вузли (v_j) – це її компоненти (наприклад, сервери, датчики, станції), а ребра (x_i) – функціональні зв'язки між ними (кабелі, канали зв'язку, трубопроводи). Оскільки остовне дерево становить мінімальну зв'язну конфігурацію без надлишкових з'єднань, воно моделює працездатний стан системи без резервування. Кількість остовних дерев T_i у графі A визначає, скільки в нього існує різних конфігурацій працездатного стану. Якщо система має більше остовних дерев ($T_i > T_j$), то в неї є більше способів залишатися зв'язною навіть у разі виходу з ладу деяких з'єднань. Отже, її надійність вища ($P_i > P_j$). Якщо система має менше остовних дерев ($T_i < T_j$), вона більш вразлива до відмов. Цей взаємозв'язок записується як:

$$P_i > P_j, \text{ якщо } T_i > T_j, \quad (1)$$

де: P_i – надійність структури мережі, яка має T_i остовних дерев, P_j – надійність іншої структури з меншою кількістю остовних дерев T_j . Якщо система має лише одне остовне дерево та єдиний спосіб з'єднання вузлів, то будь-який збій у зв'язках руйнує мережу. Збільшення числа остовних дерев збільшує кількість можливих шляхів підтримки зв'язності мережі, що напряду підвищує її надійність. Надійність структури мережі визначається кількістю її працездатних станів без резервування.

У структурі технічної системи можливі не тільки нерезервовані, але й резервовані працездатні стани, які моделюються зв'язними циклічними підграфами. Резервовані працездатні стани відповідають наявності циклів у графі, які дозволяють зберігати зв'язність системи навіть у разі виходу з ладу одного або кількох елементів. Якщо у графі є циклічні підграфи, система має надлишковість, що підвищує її надійність. У графі A структури нерезервовані працездатні стани описуються остовними деревами. Натомість резервовані стани моделюються зв'язними підграфами B_i , які включають цикли, забезпечуючи додаткову стійкість до відмов. Чим більше таких циклічних структур у графі, тим вища загальна надійність системи. Імовірність суми довільного числа суміжних (несумісних) подій визначається класичною формулою теорії ймовірностей:

$$P(A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n) = \sum_{i=1}^n P(A_i), \quad (2)$$

де $A_1, A_2, \dots, A_n$ – несумісні події, тобто такі, що їх одночасне настання неможливе $P(A_i \cap A_j) = 0$ для всіх $i \neq j$. Якщо ж події не є несумісними й можуть відбуватися одночасно, то застосовується більш загальна формула для обчислення ймовірності об'єднання довільної кількості подій, відома як формула включень-виключень:

$$P(A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n) = \sum_{i=1}^n P(A_i) - \sum_{1 \leq i < j \leq n} P(A_i \cap A_j) + \sum_{1 \leq i < j < k \leq n} P(A_i \cap A_j \cap A_k) - \dots + (-1)^{n+1} P(A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n). \quad (3)$$

Ця формула враховує перетини подій. Якщо події несумісні, використовується проста сума їхніх ймовірностей. Для подій, що можуть відбуватися одночасно, застосовується формула

включень-виключень. Число всіх можливих підграфів графа A визначається як 2^x , де x – це кількість ребер у графі. Однак серед цих підграфів існує один тривіальний підграф, який не містить жодного ребра, він складається лише з вершин без з'єднань. Тому число всіх можливих підграфів, що мають хоча б одне ребро, обчислюється як: $N = 2x - 1$.

Урахування ймовірності існування всіх працездатних станів дозволяє отримати більш точну порівняльну оцінку надійності технічної системи. Кожен працездатний стан відповідає конкретному підграфу структури, який забезпечує зв'язність між вузлами. Якщо у структурі технічної системи відбувається зміна внутрішніх зв'язків, що приводить до збільшення числа циклічних підграфів, то зростає кількість резервних шляхів між вузлами. Тоді система стає менш вразливою до відмов, оскільки в разі виходу з ладу окремих елементів вона може залишатися працездатною завдяки альтернативним шляхам. Цей взаємозв'язок формалізується нерівністю:

$$P_i > P_j, \text{ якщо } B_i > B_j \text{ та } Q_i > Q_j, \quad (4)$$

де: P_i – імовірності працездатного стану системи в різних конфігураціях, B_i – кількість циклічних підграфів у відповідних структурах, Q_i – кількість остовних дерев, що моделюють працездатні стани без резервування. Збільшення циклічних підграфів, що забезпечують резервування, остовних дерев, що визначають мінімально необхідні зв'язки, сприяє підвищенню загальної надійності технічної системи.

Число циклічних зв'язних підграфів Q_i , що проходять через кожний елемент системи, можна визначити за допомогою алгоритму пошуку у глибину (Depth-First Search (далі – DFS)). Цей алгоритм дозволяє систематично досліджувати всі можливі цикли у графі та визначати, через які вершини та ребра вони проходять. Алгоритм DFS виконує рекурсивний обхід графа, зі збереженням інформації про вже відвідані вершини та ребра, що дозволяє виявляти цикли. Під час роботи алгоритму кожне ребро x_i та кожна вершина v_i розглядається тільки раз, що забезпечує ефективність пошуку.

Перехід від вершини v_j до v_{j+1} є ребром x_i , що їх пов'язує. За допомогою алгоритму пошуку у глибину можна переглянути всі можливі підграфи графа структури. Зв'язний циклічний підграф Q_i графа A має містити дерево [1]. Тому відбір зв'язного підграфа виконується з перевіркою на наявність у ньому дерева T_i .

Число циклічних підграфів Q_i , що проходять через дану ділянку x_i , обчислюється за формулою:

$$Q_i = S_n - S_{n-1}, \quad (5)$$

де S_n – загальне число зв'язних підграфів у графі структури A з даною ділянкою x_i , S'_{n-1} – число зв'язних підграфів без ділянки x_i . Вираз дозволяє оцінити, скільки циклічних зв'язних підграфів проходять через конкретне ребро x_i .

Візьмемо структуру технічної системи (рис. 1). Її список зв'язності показано на рис. 2. Через усю структуру проходить $T_9 = 32$ різних остовних дерева, тобто вона має 32 різні граничні працездатні стани (рис. 2) та $Q_9 = 34$ циклічні підграфи (рис. 3). Якщо видалити зі структури ділянку x_1 (позначимо ділянку x_1 через її кінці, що є вузлами 1–4), граф A перетвориться на підграф A' . Число остовних дерев отримає значення $T'_8 = 21$. За допомогою алгоритму пошуку у глибину число циклічних підграфів визначимо $Q'_8 = 26$. Число T і число Q зменшились відповідно на числа підграфів, що проходили через ділянку x_{1-4} .

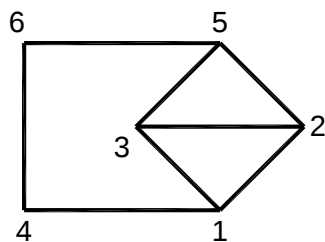


Рис. 1. Структура технічної системи

1	2	3	4
2	1	3	5
3	1	2	5
4	1	6	
5	2	3	6
6	4	5	

Рис. 2. Список зв'язності структури

Через ділянки x_{1-4} , x_{4-6} , x_{5-6} проходить 24 різних остовних дерева ($T_{1-4} = T_i - T_j = 24$) та 28 різних циклічних підграфів ($Q_{1-4} = Q_i - Q_j = 28$) структури. Вони є ключовими для підтримки зв'язності мережі, адже забезпечують найбільшу кількість резервованих шляхів. Натомість найменш важливою ділянкою для цієї структури є ребро x_{2-3} . Через нього проходить найменша кількість остовних дерев ($T_{2-3} = 16$) та циклічних підграфів ($Q_{2-3} = 26$).

У разі виходу з ладу ділянки x_{2-3} мережа залишиться працездатною значно більшою мірою, ніж у разі видалення будь-якої з більш важливих ділянок, як-от x_{1-4} , x_{4-6} , x_{5-6} . Структурна надлишковість, реалізована іншими зв'язками, дозволяє зберігати зв'язність графа навіть у разі втрати цього ребра. Для оцінювання надійності кожного елемента структури використовується сукупність усіх зв'язних підграфів, що включають як остовні дерева, так і циклічні підграфи. Надійність визначається за формулою:

$$F_i = T_i + Q_i \quad (6)$$

де F_i – загальна кількість зв'язних підграфів, що проходять через окрему ділянку x_i , T_i – кількість остовних дерев, які включають цю ділянку, Q_i – кількість циклічних підграфів, що проходять через дану ділянку. Для проведення аналізу впливу кожної ділянки на загальну надійність структури технічної системи врахуємо відношення кількості зв'язних підграфів через окрему ділянку до загальної кількості підграфів у структурі. Це відношення обчислюється за формулою:

$$C_i = \frac{F_i}{F}, \quad (7)$$

де C_i – частка зв'язних підграфів, що проходять через ділянку x_i , F_i – кількість зв'язних підграфів, пов'язаних із даною ділянкою, F – загальна кількість зв'язних підграфів у всій структурі, які можуть існувати за заданої топології графа А.

На рис. 4 зображено розподіл чисел остовних дерев, що проходять через ділянки структури. Найбільша кількість остовних дерев проходить через ділянки x_{1-4} , x_{4-6} та x_{5-6} – по 24 дерева для кожної. Ділянки x_{2-3} та x_{3-5} мають 16 і 18 остовних дерев відповідно, що свідчить про меншу важливість цих ребер для мінімальної зв'язності. Якщо видалити ребро із 24-ма остовними деревами, структура втратить значну частину своєї надійності, тоді як видалення ділянки x_{2-3} значно менше вплине на працездатність системи.

Розподіл чисел циклічних підграфів, що проходять через ділянки структури, показано на рис. 5. Найбільше циклічних підграфів проходить через ділянки x_{1-4} , x_{4-6} та x_{5-6} – по 28 циклів кожна. Ділянки x_{2-3} , x_{3-5} та x_{1-5} мають по 26 циклів. Їхня роль менш важлива, що підтверджує дані з рис. 4 про меншу значущість цих ребер.

На рисунку 6 представлено розподіл чисел усіх зв'язних підграфів через ділянки структури. Найбільша загальна кількість зв'язних підграфів припадає на ділянки x_{1-4} , x_{4-6} та x_{5-6} – по 52 підграфи на кожна. Ділянка x_{2-3} має 42 зв'язних підграфи, що є найменшим показником серед усіх ребер. Її видалення не призведе до значного зниження працездатності системи завдяки надлишковим шляхам через інші ділянки.

Ключовими ділянками є x_{1-4} , x_{4-6} та x_{5-6} , оскільки вони мають найбільшу кількість остовних дерев (24), циклічних підграфів (28) і загальних зв'язних підграфів (52). Найменш важливою є x_{2-3} , через яке проходить лише 16 остовних дерев, 26 циклів і 42 загальних підграфи. Для забезпечення максимальної надійності технічної системи необхідно контролювати стан ділянок x_{1-4} , x_{4-6} та x_{5-6} .

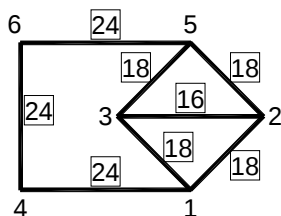


Рис. 4. Розподіл чисел остовних дерев, що проходять через ділянки структури

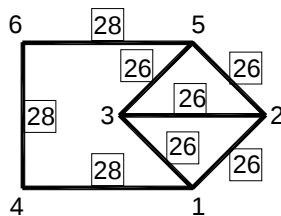


Рис. 5. Розподіл чисел циклічних підграфів, що проходять через ділянки структури

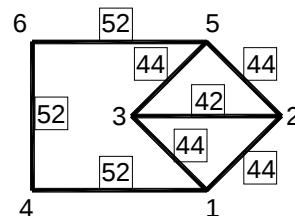


Рис. 6. Розподіл чисел усіх зв'язних підграфів по ділянках структури

На рис. 7 представлено відносний розподіл зв'язних підграфів по ділянках структури технічної системи, що дозволяє визначити топологічну важливість кожного елемента. Аналіз базується на кількісній оцінці зв'язності, яка враховує зв'язні підграфи, що проходять через кожну ділянку системи. Загальне число зв'язних підграфів становить $F = 32 + 34 = 66$. Кожна ділянка має свій відносний показник важливості C_i , який обчислюється як частка кількості підграфів, що проходять через ділянку x_i , до загальної кількості підграфів у системі. Значення C_i показують, наскільки критичною є окрема ділянка для підтримки зв'язності системи. Наприклад, ділянки з коефіцієнтом $C_i = 0,788$ є найбільш критичними, оскільки їх відмова значно знижує працездатність системи. Навпаки, ділянки з меншими значеннями C_i , наприклад 0,636, мають менший вплив на загальну зв'язність і можуть бути вилучені без значного ризику для працездатності системи.

Комплексний аналіз графа технічної системи дозволяє оцінити її надійність, виявити критичні та надлишкові елементи. Збільшення кількості циклічних підграфів і остовних дерев підвищує стійкість системи до відмов, забезпечує стабільність функціонування навіть у разі виходу з ладу окремих компонентів. Це робить методику корисною для проєктування, аналізу та модернізації інженерних систем і мереж.

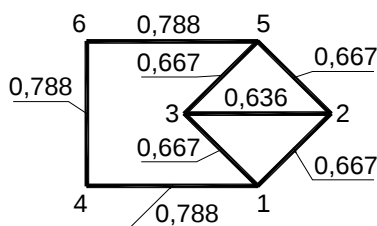


Рис. 7. Оцінка критичності ділянок структури технічної системи на основі топологічного аналізу

Висновки

Аналіз остовних дерев і циклічних підграфів дозволяє ідентифікувати найбільш важливі ділянки структури. Ділянки з найбільшою кількістю остовних дерев і циклів є критичними для загальної зв'язності системи. Циклічні підграфи є індикатором структурної надлишковості. Вони забезпечують альтернативні шляхи для зв'язності в разі виходу з ладу окремих елементів. Збільшення числа циклічних підграфів підвищує стійкість системи до відмов. Важливість кожної ділянки визначається кількістю зв'язних підграфів, які через неї проходять. Чим більше таких підграфів, тим критичніша роль ділянки. Ділянки з меншою кількістю зв'язних підграфів мають обмежений вплив на працездатність системи. Отримані результати можуть використовуватись для оптимізації проєктування мереж і технічних систем, дозволяють сфокусувати увагу на захисті найбільш критичних елементів.

Список використаної літератури

1. Bouziane B., Belouchrani A., Benyettou A. Reliability Analysis of Electrical Power System Using Graph Theory and Reliability Block Diagram. *Proceedings IEEE International Conference on Industrial Technology*. Melbourne, Australia, February 13–15, 2019. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8713175> (дата звернення: 01.04.2025).
2. Colbourn C.J., Dinitz J.H. (Eds.). *The CRC Handbook of Combinatorial Designs*. Boca Raton : CRC Press, 1996. 753 p.
3. Ball M.O., Provan J.S. Calculating bounds on reachability and connectedness in stochastic networks. *Networks*. 1983. Vol. 13, № 2. P. 253–278.
4. Ball M.O. Computational Complexity of Network Reliability Analysis: An Overview. *IEEE Transactions on Reliability*. 1986. Vol. 35, № 3. P. 230–239.
5. Colbourn C.J. *The Combinatorics of Network Reliability*. Oxford : Oxford University Press, 1987. 206 p.
6. Ball M. O. Complexity of network reliability computations. *Networks*. 1980. Vol. 10, № 2. P. 153–165.
7. Provan J.S., Ball M.O. The complexity of counting cuts and of computing the probability that a graph is connected. *Journal on Computing*. 1983. Vol. 12, № 4. P. 777–788.
8. Shier D.R. *Network Reliability and Algebraic Structures*. Oxford : Clarendon Press, 1991. 280 p.
9. Reinschke K.J. Graph-theoretic approach to symbolic analysis of linear descriptor systems. *Linear Algebra and its Applications*. 1994. Vol. 197–198. P. 217–244.
10. Reinschke K.J. Graph-theoretic characterization of fixed modes in centralized and decentralized control. *International Journal of Control*. 1984. Vol. 40, № 3. P. 449–465.
11. Röbenack K., Reinschke K.J. On generalized inverses of singular matrix pencils. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*. 2011. Vol. 21, № 1. P. 161–172.

References

1. Bouziane, B., Belouchrani, A., & Benyettou, A. (2019, February 13–15). Reliability analysis of electrical power system using graph theory and reliability block diagram. In *IEEE International Conference on Industrial Technology* (Melbourne, Australia). Retrieved from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8713175> [in English].
2. Colbourn, C.J., & Dinitz, J.H. (Eds.). (1996). *The CRC handbook of combinatorial designs*. CRC Press [in English].
3. Ball, M.O., & Provan, J.S. (1983). Calculating bounds on reachability and connectedness in stochastic networks. *Networks*, 13 (2), 253–278 [in English].
4. Ball, M.O. (1986). Computational complexity of network reliability analysis: An overview. *IEEE Transactions on Reliability*, 35 (3), 230–239 [in English].
5. Colbourn, C.J. (1987). *The combinatorics of network reliability*. Oxford University Press [in English].
6. Ball, M.O. (1980). Complexity of network reliability computations. *Networks*, 10 (2), 153–165 [in English].
7. Provan, J.S., & Ball, M.O. (1983). The complexity of counting cuts and of computing the probability that a graph is connected. *Journal on Computing*, 12 (4), 777–788 [in English].
8. Shier, D.R. (1991). *Network reliability and algebraic structures*. Clarendon Press [in English].
9. Reinschke, K.J. (1994). Graph-theoretic approach to symbolic analysis of linear descriptor systems. *Linear Algebra and its Applications*, 197–198, 217–244 [in English].
10. Reinschke, K.J. (1984). Graph-theoretic characterization of fixed modes in centralized and decentralized control. *International Journal of Control*, 40 (3), 449–465 [in English].
11. Röbenack, K., & Reinschke, K.J. (2011). On generalized inverses of singular matrix pencils. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 21 (1), 161–172 [in English].

Усенко Валерій Григорович – д.т.н., професор кафедри будівництва та цивільної інженерії Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». E-mail: valery_usenko@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4937-6442.

Valery Hryhorovych Usenko – Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Construction and Civil Engineering of the National University “Yuriy Kondratyuk Poltava Polytechnic”. E-mail: valery_usenko@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4937-6442.