

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-353-7>

УДК 621.316, 519.1

БЕВЗ СВІТЛАНА

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

<https://orcid.org/0000-0002-4651-2453>e-mail: bevz@vntu.edu.ua**БОНДАРЕНКО ЮРІЙ**

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

<https://orcid.org/0000-0003-0395-4275>e-mail: ostrovitynin75@ukr.net**БУРБЕЛО СЕРГІЙ**

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

<https://orcid.org/0000-0002-8554-2292>e-mail: smburbelo@gmail.com

МЕТОД РЕКУРСИВНОГО ПОШУКУ ХОРД ДЛЯ РОЗРАХУНКУ СХЕМ НАДІЙНОСТІ

Розглянуто актуальне питання пошуку хорд з метою подальшого використання результатів дослідження у розробці методу розрахунку надійності радіальних та кільцевих схем на основі запропонованої методології рівноважного балансування. Розглянуто і проаналізовано методи пошуку хорд для схем надійності. Одним із підходів до визначення хорди в схемі є можливість використання методу рекурсивного її пошуку серед віток, які утворюють незалежний контур.

У статті використовується матриця безвідмовної роботи віток схеми, в якій враховуються не лише безпосередні ймовірності віток, а й взаємовплив, що чинять вітки обраного та сусідніх контурів схеми надійності. Математичні моделі методу рекурсивного пошуку хорд сформовані на базі логіко-математичного апарату, який запропоновано для алгоритмізації задач та процесів з подальшою автоматизацією їх з метою розробки інформаційних та програмних модулів. Розроблено покроковий метод пошуку хорд у схемах надійності, репрезентованих незалежними контурами, який полягає у використанні алгоритму перебору вузлів контуру схеми до повтору вузла, що уже був використаний у процесі пошуку, який, у свою чергу, відповідає елементам симетричної відносно головної діагоналі матриці ймовірностей безвідмовної роботи схеми. Проілюстровано процес перебору елементів матриці безвідмовної роботи, який здійснює перехід по ненульових елементах матриці, що характеризує включення нового вузла до шуканого контуру, остання вітка якого ідентифікується як хорда. До наступної ітерації почергового пошуку решти хорд схеми надійності, обидва симетричні елементи відповідно до головної діагоналі матриці ймовірності обнуляються. Створено логіко-математичні, а також функціональну та алгоритмічну моделі, які використовувались для автоматизації процесу формування програмного забезпечення системи для розрахунку методу рекурсивного пошуку хорд для схем надійності. Програмне забезпечення реалізоване мовою PHP з використанням веб-сервера Apache2. Проілюстровано адекватність та працездатність розроблених моделей, алгоритмів та програм, підтверджена достовірність отриманих результатів.

Ключові слова: ймовірність безвідмовної роботи, рекурсія, логіко-математичний апарат, повна матриця взаємозв'язків, пошук хорд контурів, надійність роботи електричної мережі.

BEVZ SVITLANA, BONDARENKO YURIY, BURBELO SERHIY

Zhytomyr Military Institute named after S. P. Korolev

METHOD OF RECURSIVE CHORD SEARCH FOR CALCULATION OF RELIABILITY SCHEMES

The current issue of chord search is considered with the aim of further using the research results in developing a method for calculating the reliability of radial and ring circuits based on the proposed equilibrium balancing methodology. Chord search methods for reliability circuits are considered and analyzed. One of the approaches to determining a chord in a circuit is the possibility of using the method of recursively searching for it among the branches that form an independent circuit.

The article uses a matrix of fault-free operation of the branches of the scheme, which takes into account not only the direct probabilities of the branches, but also the mutual influence exerted by the branches of the selected and neighboring circuits of the reliability scheme. Mathematical models of the method of recursive chord search are formed on the basis of a logical-mathematical apparatus, which is proposed for algorithmization of tasks and processes with their subsequent automation for the purpose of developing information and software modules. A step-by-step method for searching for chords in reliability schemes represented by independent circuits has been developed. It consists in using algorithms for searching through the nodes of the circuit until a node that has already participated in the search process is repeated, which, in turn, corresponds to the elements of the matrix of the probability of failure-free operation of the circuit elements, symmetric with respect to the main diagonal. The process of searching for elements of the reliability uptime matrix is illustrated, which performs a transition through non-zero elements of this matrix, which characterizes the inclusion of a new node in the desired circuit, the last branch of which is identified as a chord. Before the next iteration of the alternate search for the remaining chords of the reliability scheme, both symmetric elements according to the main diagonal of the probability matrix are set to zero. Logical-mathematical, as well as functional and algorithmic models were created, which were used to automate the process of software development for the method of recursive chord search for reliability schemes. The software is implemented in PHP using the Apache2 web server. The adequacy and operability of the developed models, algorithms and programs are illustrated, and the reliability of the obtained results is confirmed.

Keywords: probability of failure-free operation, recursion, logical-mathematical apparatus, complete matrix of relationships, search for chords of circuits, reliability of the electrical network.

Стаття надійшла до редакції / Received 22.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 10.05.2025

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

Надійність електричних систем має важливе значення для забезпечення стабільності їх роботи, зокрема, в критичних умовах, таких як: збройні конфлікти, аварійні ситуації, природні катаклізми. Процес розрахунку схеми надійності ґрунтується на репрезентації графа мережі у вигляді дерева та хорд, визначення яких має бути здійснено з використанням засобів автоматизації.

Актуальною проблемою матричного аналізу надійності роботи електроенергетичних схем є розробка нового рекурсивного методу пошуку хорд у схемах кільцевого типу. Такий підхід передбачає використання матриці ймовірностей безвідмовної роботи віток схеми, яка повинна враховувати не лише безпосередні зв'язки між її елементами, а й взаємозв'язки між елементами незалежного контуру за послідовним з'єднанням та взаємовплив елементів між іншими контурами (паралельно-послідовні, змішані та з'єднання типу трикутник, зірка і т. п.) [1]. З метою проведення автоматизації методу пошуку хорд для побудови моделей та алгоритмів доцільно застосувати логіко-математичний апарат, оскільки логіко-математичні моделі розкривають взаємозв'язки між об'єктами інформаційної системи та сприяють створенню ефективних засобів розробки програмного забезпечення системи.

Практична реалізація рекурсивного пошуку хорд потребує розробки алгоритмічного і програмного забезпечення системи з використанням відкритої мови програмування PHP та веб-сервера APCNE, що дозволить дослідити працездатність та адекватність розробленого методу.

Аналіз досліджень та публікацій

Надійність є одним з найбільш важливих техніко-економічних показників якості постачання електроенергії. В розрахунках електроенергетичних схем найчастіше використовуються кількісні характеристики надійності, серед них ймовірність безвідмовної роботи є одним із тих показників, що дозволяють комплексно характеризувати надійність роботи мережі [1, 2].

Ефективним методом розрахунку надійності є метод декомпозиції [1, 3], який дозволяє провести розрахунок схем, що містять контури. Тому важливо здійснювати комплексний аналіз надійності системи з урахуванням взаємовпливів її елементів. Для підвищення ефективності методу розрахунку використовується вибіркового підхід до виокремлення ключової ланки декомпозиції схеми надійності, що дозволяє визначити вітки, які розривають незалежні контури мережі та репрезентують хорди схеми. В задачах електротехніки передбачається доповнення дерева хордами до повного графа мережі [4], при цьому пошук хорд відбувається лише для незалежних контурів графа мережі. З метою автоматизації пошукового алгоритму визначення хорд необхідно формалізувати його моделі та засоби. Таким чином, є актуальною задача автоматизації методу пошуку хорд схеми надійності.

Формулювання цілей статті

Мета роботи полягає в підвищенні ефективності проведення розрахунків основних показників надійності та розробка моделей і методів, які дозволяють автоматизувати цей процес.

Методологія. Використано логіко-математичний апарат побудови моделей, які дозволяють автоматизувати процес пошуку хорд, математичний апарат показників надійності схем.

Об'єктом наукових досліджень є розрахунок показників надійності роботи електричної мережі.

Предметом наукового дослідження є метод пошуку хорд.

Наукова новизна роботи полягає у розробці рекурсивного методу пошуку хорд у матричному вигляді. Такий підхід дозволяє автоматизувати процес пошуку хорд та масштабувати його для застосування у складних замкнених мережах.

Виклад основного матеріалу

Нехай схема надійності задана переліком віток масиву $lines$ з файлу "lines.txt" та їх ймовірністю безвідмовної роботи:

$$V = [V_{i,1} \quad V_{i,2} \quad V_{i,3}], \quad i = \overline{1, m},$$

дет – кількість віток у схемі; $V_{i,1}$, $V_{i,2}$ – номери вузлів початку і кінця; $V_{i,3}$ – значення ймовірності безвідмовної роботи i -тої вітки.

Для зберігання індексів вузлів масиву $points$ використаємо файл "points.txt":

$$Z = [Z_{i,1} \quad Z_{i,2} \quad Z_{i,3}], \quad i = \overline{1, n},$$

де n – кількість вузлів, $Z_{i,1}$ – номер вузла, $Z_{i,2}$, $Z_{i,3}$ – координати x і y вузла при зображенні схеми на площині.

На рисунку 1 подано орієнтований граф мережі схеми надійності.

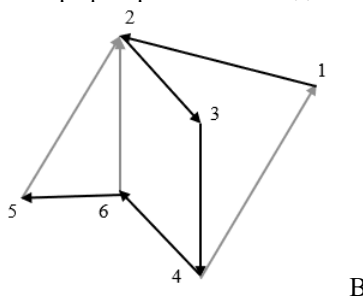


Рис. 1. Орієнтований граф мережі схеми надійності

Надійність схеми задаємо матрицею ймовірності безвідмовної роботи, яка формується з матриці V :

$$R_{i,j} = 0, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, n},$$

$$R_{V_{i,1}, V_{i,2}} = V_{i,3}; R_{V_{i,2}, V_{i,1}} = V_{i,3}; i = \overline{1, m},$$

де n – кількість вузлів.

Кількість незалежних контурів визначається з виразу: $k = m - n + 1$.

Оскільки в процесі розрахунку за методом декомпозиції кількість віток буде щоразу змінюватись, пропонується визначати кількість контурів із сформованої на початку та змінюваної в процесі розрахунку матриці ймовірностей.

Початкове значення кількості контурів приймаємо: $k = 1 - n$. Подальший розрахунок здійснимо, підрахувавши кількість ненульових елементів вище головної діагоналі матриці ймовірності R :

$$(R_{i,j} > 0) ? (k = k + 1), i = \overline{1, m-1}, j = i + 1, m$$

Здійснимо перебір ненульових елементів ймовірностей безвідмовної роботи, щоразу збільшуючи кількість контурів на одиницю.

Визначимо хорди графа мережі по одній в кожному незалежному контурі. Решта віток графа мережі повинні утворювати дерево графа, яке з'єднуватиме усі вузли схеми.

Запропонований метод рекурсивного пошуку хорд

$$B_1 = 1$$

$$B_i = 0 \quad \{i = \overline{2, m}\};$$

$$FH(1, 2, \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, R, B);$$

використовує рекурсивну функцію виду:

$$FH(X, Y, R, B) = ((H[1] <> 0) \text{ or } (m > J)) ? H :$$

$$(R_{X,J} = 0) ? (J = J + 1) : \left(\begin{array}{l} R[X,J] = R[J,X] = 0; \\ (B[J] = 1) ? (H = \begin{bmatrix} X \\ J \end{bmatrix}) : B(J) = 1; \\ (H[1] = 0) ? FH(J, 1, R, B). \end{array} \right)$$

Пошук хорд розпочинається з першого початкового вузла та здійснюється шляхом перебору усіх елементів матриці R , формуючи вектор знайдених вузлів дерева графа B . За алгоритмом здійснюється пошук вітки H , яка замикатиме контур, про що вказує номер вузла схеми. Якщо він повторюється, відповідно виконується умова $B_j = 1$. У цьому разі хордою визначається остання вітка контуру H з початком у вузлі X та кінцем у J .

За вищезрозглянутими математичними моделями розроблено програмне забезпечення системи, функціональна модель якої подана на рисунку 2.

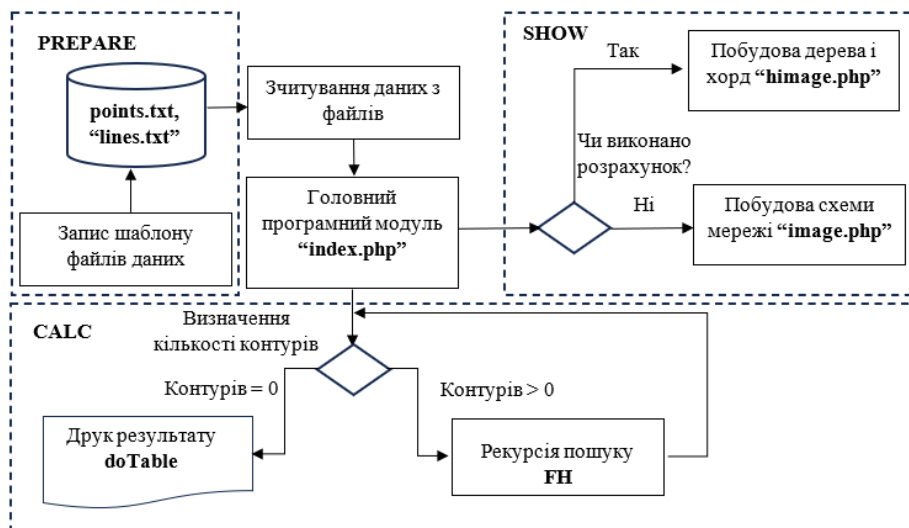


Рис. 2. Функціональна модель програмного забезпечення системи пошуку хорд

Функціональна модель програмного забезпечення системи пошуку хорд містить такі етапи:

1. У програмному модулі "index.php" з ужитком функцій *json_decode*, *file_get_contents* інформація з файлу "points.txt" та "lines.txt" потрапляє до масивів *points* і *lines*, дані з яких переформатовуються у симетричну матрицю ймовірностей з використанням функції *array_search* при пошуку відповідних номерів вузлів у масиві, де наявний перелік номерів початків та кінців віток. Крім цього, в програмному модулі "index.php" здійснюється розробка дизайну програми та побудова головного меню.

2. При виклику методу PREPARE з меню програми створюються файли даних з шаблонів масивів, закладених в програмному забезпеченні системи.

3. При виклику методу SHOW з меню програми виконується модуль побудови таблиці ймовірностей віток схеми мережі, а також ілюструється схема мережі, що будується програмно за модулем "image.php" у разі відсутності розрахунку, чи схеми з визначеними хордами за модулем "himage.php" у разі виконаного розрахунку.

4. При виклику методу CALC відбувається циклічний (за кількістю контурів) запуск рекурсивної функції FH, що здійснює пошук хорди, виведення таблиці ймовірностей з позначенням хорди, а також обнулення в модулі розрахунку значення ймовірності, що відповідає знайдений хорді матриці ймовірностей перед виконанням наступного кроку пошуку.

На рисунку 3 подано алгоритмічну реалізацію методу вибору хорд для розрахунку схем надійності, які містять контури. Алгоритм є уніфікованим та може також використовуватись для реалізації методу вибору хорд [5] розрахунку усталеного режиму роботи електричної мережі, наприклад, на ґрунті рівноважного балансування [6].

Проілюструємо метод пошуку хорд для схеми надійності електричної мережі, граф якої подано на рис. 1.

Функціональна модель використовує рекурсію пошуку, алгоритм якої подано на рисунку 3.

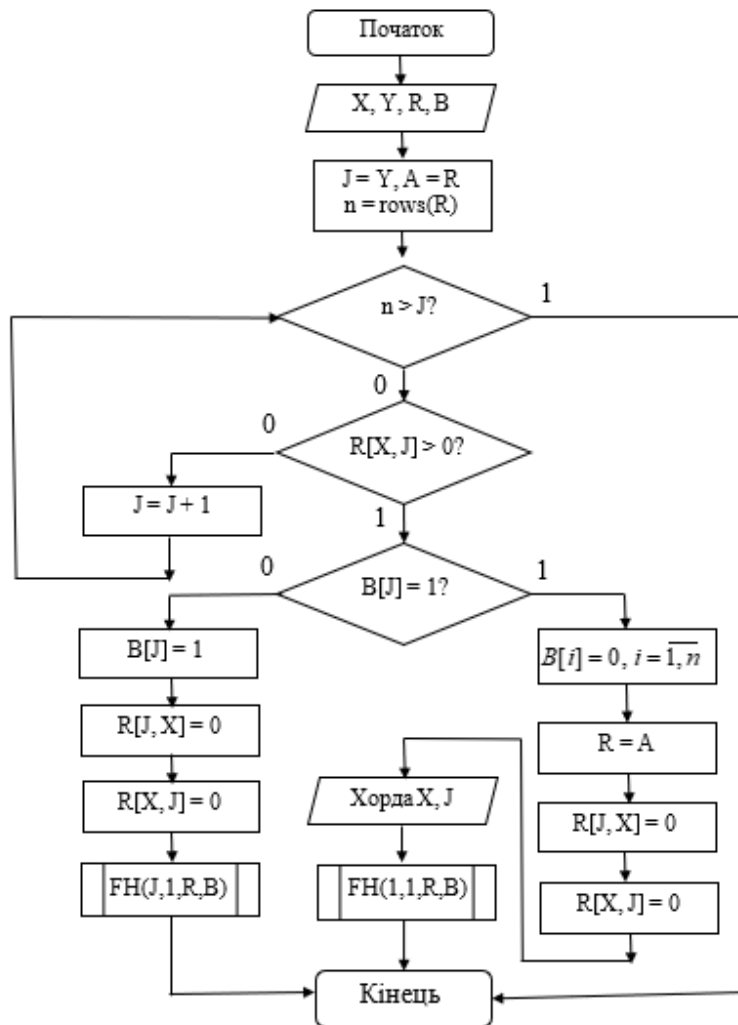
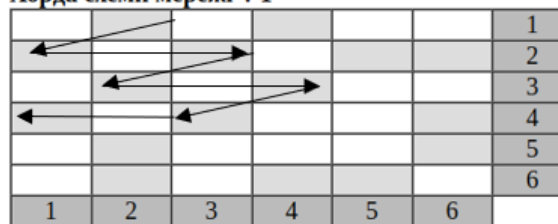


Рис. 3. Алгоритм рекурсивного пошуку хорд

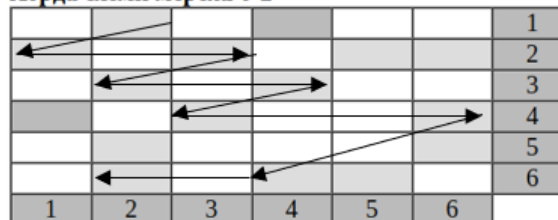
На рисунку 4 репрезентовано покроковий метод пошуку хорд у трьох незалежних контурах шляхом перебору вузлів контуру схеми, що відповідають елементам симетричної відносно головної діагоналі матриці ймовірностей безвідмовної роботи.

На рисунку 4а проілюстровано процес перебору елементів матриці ймовірностей, що полягає у виборі ненульових елементів для подальшого аналізу схеми, здійснюючи рух по вітці від початкового до кінцевого вузла. Із останнього вузла далі здійснюється пошук наступної вітки, яка виходить з нього. Якщо з вузла виходить декілька віток, то алгоритм обирає вузол з найменшим індексом. Процес пошуку хорд триватиме, доки алгоритм не виділить повторювального вузла, який вказуватиме на те, що обхід контуру завершено. Останню знайдену вітку контуру вважаємо хордою.

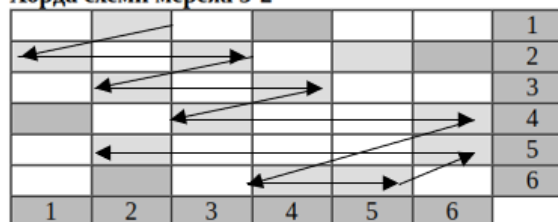
Хорда схеми мережі 4-1



Хорда схеми мережі 6-2



Хорда схеми мережі 5-2



Хорда схеми мережі 4-1

0	0.89	0	0.96	0	0	1
0.89	0	0.87	0	0.85	0.95	2
0	0.87	0	0.95	0	0	3
0.96	0	0.95	0	0	0.94	4
0	0.85	0	0	0	0.9	5
0	0.95	0	0.94	0.9	0	6
1	2	3	4	5	6	

Хорда схеми мережі 6-2

0	0.89	0	0	0	0	1
0.89	0	0.87	0	0.85	0.95	2
0	0.87	0	0.95	0	0	3
0	0	0.95	0	0	0.94	4
0	0.85	0	0	0	0.9	5
0	0.95	0	0.94	0.9	0	6
1	2	3	4	5	6	

Хорда схеми мережі 5-2

0	0.89	0	0	0	0	1
0.89	0	0.87	0	0.85	0	2
0	0.87	0	0.95	0	0	3
0	0	0.95	0	0	0.94	4
0	0.85	0	0	0	0.9	5
0	0	0	0.94	0.9	0	6
1	2	3	4	5	6	

а)

б)

Рис. 4. Ілюстрація роботи програмного забезпечення системи пошуку хорд:

а) автоматизований процес пошуку хорд в незалежних контурах;

б) результат роботи розробленого програмного забезпечення системи

З метою автоматизації процесу визначення хорд за методом рекурсивного пошуку відповідно до запропонованого алгоритму (див. рис. 2) розроблено програмне забезпечення системи мовою РНР. Ілюстрація його роботи подана на рис. 4б.

На ґрунті отриманих результатів у подальшому будемо здійснювати розробку методу розрахунку надійності радіальних та кільцевих схем на основі методології рівноважного балансування. Перспективою подальших досліджень також є автоматизація розрахунку еквівалентних імовірностей безвідмовної роботи елементів схеми із використанням методу декомпозиції схеми, що дозволить розділити схему на дві підсхеми шляхом розриву вітки, яка визначена хордою, чи об'єднання вузлів, які позначають початок та кінець хорди.

Висновки

У роботі розроблено метод рекурсивного пошуку хорд, який, на відміну від існуючих, використовує симетричну відносно головної діагоналі матрицю ймовірностей безвідмовної роботи. Запропоновані моделі, метод та алгоритм дозволили розробити програмне забезпечення системи, що автоматизує процес розрахунку схем надійності електричної мережі та суттєво підвищує ефективність матричного аналізу схем, спрямованого на пошук хорд.

Література

- Бевз С. В., Бурбело С. М., Томашевський Ю. В. Матричний аналіз надійності складних систем // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – № 5. – С. 5–8. – ISSN 1997-9266.
- Васілевський О. М., Ігнатенко О. Г. Нормування показників надійності технічних засобів: навч. посіб. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – 160 с. – Режим доступу: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2024/Vasilevskii_2013_160.pdf.
- Базилевич Р., Ключта О. Алгоритми острівкування енергетичної системи // Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security. – 2024. – № 2. – С. 3–9. – DOI: <https://doi.org/10.32782/IT/2024-2-1>.
- Бурбело М. Й., Бевз С. В., Кравець О. М. Математичні задачі електроенергетики: практикум. – Вінниця: ВНТУ, 2021. – 126 с.
- Бевз С. В., Бурбело С. М., Кравець В. В., Піскунічев Є. А., Грабенко Я. І. Автоматизація рекурсивного методу визначення хорд у контурах схем електричної системи // Матеріали І науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ (НТКП ВНТУ–2021): зб. доп. – Вінниця: ВНТУ, 2021. – С. 2269–2272. – ISBN 987-966-641-856-5.

6. Бевз С. В., Бурбело С. М., Войтко В. В. Метод рівноважного балансування та автоматизація розрахунків усталеного режиму електричної мережі // Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. – Миколаїв: НУК, 2020. – № 4 (482). – С. 36–44.

References

1. Bezv S. V., Burbelo S. M., Tomashevskiy Yu. V. Matrychnyi analiz nadiinosti skladnykh system // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2005. – № 5. – С. 5–8. – ISSN 1997-9266.
2. Vasilevskiy O. M., Ihnatenko O. H. Normuvannya pokaznykiv nadiinosti tekhnichnykh zasobiv: navch. posib. – Vinnytsia: VNTU, 2013. – 160 s. – Rezhym dostupu: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2024/Vasilevskii_2013_160.pdf.
3. Bazylevych R., Kliushta O. Alhorytmy ostrivkuvannya enerhetychnoi systemy // Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security. – 2024. – № 2. – С. 3–9. – DOI: <https://doi.org/10.32782/IT/2024-2-1>.
4. Burbelo M. Y., Bezv S. V., Kravets O. M. Matematychni zadachi elektroenerhetyky: praktykum. – Vinnytsia: VNTU, 2021. – 126 s.
5. Bezv S. V., Burbelo S. M., Kravets V. V., Piskunichiev Ye. A., Hrabenko Ya. I. Avtomatyzatsiia rekursyvnoho metodu vyznachennia khord u konturakh skhem elektrychnoi systemy // Materialy L naukovo-tekhnichnoi konferentsii pidrozdiliv VNTU (NTKP VNTU–2021): zb. dop. – Vinnytsia: VNTU, 2021. – С. 2269–2272. – ISBN 987-966-641-856-5.
6. Bezv S. V., Burbelo S. M., Voitko V. V. Metod rivnovazhnogo balansuvannya ta avtomatyzatsiia rozrakhunkiv ustalenooho rezhymu elektrychnoi merezhi // Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannya. – Mykolaiv: NUK, 2020. – № 4 (482). – С. 36–44.