

10. IRENA (2023) Зберігання електроенергії та відновлювані джерела енергії: витрати та ринки до 2030 року. URL: <https://www.irena.org/publications/2023/Feb/Electricity-Storage-and-Renewables-Costs-and-Markets-to-2030> (дата звернення 15.03.2025).
11. Всесвітній економічний форум (2023) Сприяння ефективному енергетичному переходу 2023.
12. IRENA (2023) Відновлювана енергія та робочі місця – Річний огляд 2023.
13. МЕА (2023) Net Zero до 2050 року: дорожня карта для глобального енергетичного сектора.
14. IRENA (2023) Майбутнє сонячної фотоелектричної енергії: розгортання, інвестиції, технології, інтеграція в мережу та соціально-економічні аспекти.
15. Всесвітній економічний форум (2023) Стимулювання ефективного енергетичного переходу 2023. URL: <https://www.weforum.org/reports/fostering-effective-energy-transition-2023> (дата звернення 15.03.2025).
16. Міжнародна агенція з відновлюваної енергії (IRENA) (2023) Renewable Energy and Jobs – Annual Review 2023. URL: <https://www.irena.org/publications/2023/Sep/Renewable-Energy-and-Jobs-Annual-Review-2023> (дата звернення 15.03.2025).

УДК 621.31

Житницький С. О., аспірант, ORCID 0009-0005-8803-3871,
науковий керівник: канд. техн. наук, доцент **Д. В. Федоша**,
Національний університет “Запорізька політехніка”

ОГЛЯД ПІДХОДІВ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ТОПОЛОГІЇ ЖИВИЛЬНИХ ТА РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

OVERVIEW OF APPROACHES FOR DEFINING THE TOPOLOGY OF POWER SUPPLY AND DISTRIBUTION ELECTRICAL NETWORKS

Анотація. Сучасні електроенергетичні системи розвиваються в умовах зростання попиту та впровадження нових технологій генерації. Традиційні методи проектування не враховують нестабільність ВДЕ та необхідність автоматизації управління. Дослідження систематизує методи формування топології електромереж для підвищення їхньої ефективності та гнучкості. Розглянуто фактори впливу, типи топологій (радіальні, кільцеві, мережеві, мікромережі, Smart Grid) та алгоритми оптимізації (MST, PFA, GA, PSO, ACO). Використання цифрових двійників і ШІ сприяє підвищенню надійності та ефективності. Комплексний підхід, що поєднує класичні методи та інтелектуальні технології, забезпечує стабільність і масштабованість електромереж. Бібл. 6.

Ключові слова: топологія, електромережа, відновлювані джерела енергії, алгоритми оптимізації, штучний інтелект, smart grid, цифровий двійник.

Abstract. Modern power systems are evolving under increasing demand and the implementation of new generation technologies. Traditional design methods do not account for the instability of renewable energy sources (RES) and the need for automated control. This study systematizes methods for power grid topology formation to enhance efficiency and flexibility. The study examines influencing factors, topology types (radial, ring, mesh, microgrids, Smart Grid), and optimization algorithms (MST, PFA, GA, PSO, ACO). The use of digital twins and artificial intelligence (AI) improves reliability and efficiency. A comprehensive approach combining

classical methods and intelligent technologies ensures power grid stability and scalability.
Ref. 6.

Keywords: *topology, power grid, renewable energy sources, optimization algorithms, artificial intelligence, smart grid, digital twin.*

Вступ. Сучасні електроенергетичні системи розвиваються в умовах стрімкого зростання попиту на електроенергію та впровадження нових технологій генерації. За прогнозами ІЕА [1], до 2027 року глобальне споживання електроенергії зростатиме на 4 % щорічно, що створює значне навантаження на існуючі електромережі. Основними чинниками цього зростання є активна електрифікація транспорту, розширення енергоємного виробництва та розвиток цифрової економіки, включаючи дата-центри та індустрію штучного інтелекту.

Традиційні методи проектування електромереж не відповідають новим викликам, пов'язаним із нестабільністю виробництва електроенергії з відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), необхідністю підвищення надійності систем та впровадженням автоматизованих технологій управління. У цьому контексті актуальним є дослідження алгоритмів формування топології розподільчих мереж, що дозволяють забезпечити їхню гнучкість, ефективність та адаптивність до змінних умов експлуатації.

Метою досліджень є систематизація сучасних методів формування топології електричних мереж.

Фактори впливу на формування топології. Формування топології електромереж залежить від кількох взаємопов'язаних факторів. Перш за все, зростання енергоспоживання та урбанізація [2] створюють додаткове навантаження на мережу, що вимагає оптимального розподілу потужності та резервування ліній. Водночас перехід до децентралізованої генерації змінює традиційну модель передачі електроенергії, оскільки розподілені джерела генерації, такі як сонячні та вітрові станції, вимагають нових механізмів балансування потужності.

Окрім цього, кліматичні зміни спричиняють збільшення частоти екстремальних погодних явищ, таких як урагани, спека чи заморозки, що негативно впливають на стабільність роботи мереж. Для підвищення стійкості необхідно передбачати резервні маршрути електропостачання, а також впроваджувати автоматизовані системи виявлення та усунення аварій.

Іншим важливим фактором є розвиток цифрових технологій та автоматизації управління. Використання інтелектуальних систем, таких як Smart Grid, дозволяє оптимізувати потоки електроенергії та оперативно реагувати на зміни навантаження, що підвищує ефективність роботи мережі та мінімізує ризики збоїв.

Виклики та обмеження. Надійність та резервування. Умови безперервного електропостачання залежать від здатності мережі справлятися з несподіваними відмовами обладнання чи аварійними ситуаціями. Для цього необхідне ефективне резервування ліній та розподілення навантаження між декількома джерелами живлення. Запровадження кільцевих та мережевих

топологій, а також мікромереж дозволяє підвищити відмовостійкість системи.

Балансування ВДЕ. Оскільки відновлювані джерела енергії є нестабільними через погодні умови, їхня інтеграція в електромережу потребує особливих механізмів балансування. Використання накопичувачів енергії, таких як батареї та гідроакумулюючі станції, дозволяє згладжувати коливання генерації. Також важливо впроваджувати інтелектуальні системи управління, що можуть прогнозувати виробіток та попит у режимі реального часу.

Автоматизація управління. Впровадження SCADA-систем, цифрових двійників та ШІ-алгоритмів дозволяє оперативно реагувати на зміни у мережі та виконувати автоматичну оптимізацію розподілу потужності. Розвиток автоматизованих мереж забезпечує швидке відновлення після збоїв, зменшення втрат електроенергії та підвищення ефективності її використання.

Типи топології розподільчих мереж. Вибір топології розподільчої електромережі впливає на її надійність, ефективність та здатність адаптуватися до змін у споживанні та генерації. Найбільш поширеними є такі типи топології:

Радіальна топологія є найбільш простою та економічною у реалізації [3], проте має низьку стійкість до аварій, оскільки відмова в одній точці може призвести до відключення всього сегмента мережі.

Кільцева топологія забезпечує резервування електропостачання, дозволяючи перерозподіляти потоки електроенергії у разі аварії, що значно підвищує надійність мережі.

Мережеві (*Mesh*) топології складаються з множинних зв'язків між вузлами, що забезпечує високу стійкість до відмов, проте такі мережі потребують складнішої системи управління.

Мікромережі (*Microgrids*) – автономні енергетичні системи, які можуть працювати незалежно від основної мережі та використовувати локальні джерела генерації.

Smart Grid – сучасні інтелектуальні мережі, що використовують автоматизоване управління, адаптивне балансування потужностей та технології прогнозування для підвищення ефективності енергопостачання.

Алгоритми формування топології. Сучасні методи проектування електромереж базуються на використанні математичних моделей та алгоритмів оптимізації. Класичні математичні методи, такі як Minimum Spanning Tree (MST) [4] та метод потоків потужності (*Power Flow Analysis*, PFA), дозволяють розрахувати мінімально необхідну інфраструктуру для електропостачання.

Метод PFA є одним із ключових математичних інструментів для аналізу та проектування топології розподільчих електромереж. Він використовується для розрахунку розподілу активної та реактивної потужності між вузлами мережі, визначення напруги на шинах та втрат у лініях електропередачі.

Вибір алгоритму побудови мінімального остовного дерева (MST) для проектування топології залежить від щільності мережі, структури навантажень та вимог до резервування. Ключовими алгоритмами MST є алгоритм Прима, алгоритм Крускала, алгоритм Борувки. Кожен з них має свої особливості, які впливають на ефективність формування топології окремих типів розподільчих мереж: міські розподільчих мережі, розподільчі мережі у сільській місцевості, великі регіональні мережі тощо.

Методи MST та PFA є фундаментальними інструментами для проектування та оптимізації електричних мереж але ці методи працюють із статичними моделями, які розглядають електричну мережу у фіксованому стані, без урахування змін у навантаженні, генерації або топології мережі в реальному часі.

Сучасні методи проектування електромереж все частіше використовують гнучкі математичні підходи, такі як генетичні алгоритми (*Genetic Algorithms, GA*) та роєві алгоритми (*Particle Swarm Optimization, PSO; Ant Colony Optimization, ACO*) [5]. Ці методи дозволяють ефективно знаходити оптимальні варіанти мережі, які враховують змінні умови експлуатації.

Генетичні алгоритми (GA) працюють за принципом природного відбору: спочатку створюються різні варіанти топологій мережі, потім найкращі з них відбираються і комбінуються між собою, створюючи нові варіанти. Цей процес повторюється, доки не знайдеться оптимальне рішення, наприклад, конфігурація мережі з найменшими втратами електроенергії або витратами на будівництво.

Алгоритм оптимізації рою частинок (PSO) працює за аналогією з поведінкою зграї птахів або рою комах. Кожна “частинка” представляє певний варіант рішення (наприклад, точку підключення обладнання). Частинки переміщуються у просторі пошуку, враховуючи досвід інших частинок, і таким чином знаходять оптимальну конфігурацію мережі з мінімальними втратами енергії або витратами.

Алгоритм мурашиної колонії (ACO) базується на поведінці мурах, що шукають найкоротші маршрути. В контексті електромережі, цей алгоритм допомагає знайти оптимальні шляхи передачі електроенергії з мінімальними втратами або з максимальним резервуванням. Агенти (“мурахи”) послідовно аналізують можливі маршрути і адаптивно вибирають найефективніший.

Використання цифрових двійників дозволяє створити цифрову копію електромережі, яка оновлюється в режимі реального часу. Це дозволяє прогнозувати роботу мережі, швидко реагувати на зміни навантаження та генерації, а також планувати її розвиток на основі аналізу великих масивів даних.

Застосування штучного інтелекту (ШІ) [6] дає змогу автоматизувати управління електромережею, ефективно змінюючи маршрути передачі енергії залежно від реального стану генерації та споживання. Це сприяє зниженню втрат енергії та забезпечує стабільну роботу мережі в умовах постійних змін.

Висновки. Проектування топології живильних та розподільчих електромереж є складним завданням, що потребує використання оптимізаційних та аналітичних методів. MST забезпечує початкову оптимізацію структури мережі, дозволяючи знайти ефективні рішення залежно від особливостей її конфігурації. Проте ці алгоритми не адаптуються до змін у навантаженні та генерації, що обмежує їхню ефективність у динамічних умовах.

РФА відіграє ключову роль у розподілі енергії, дозволяючи оцінювати втрати потужності, балансувати навантаження та інтегрувати ВДЕ. З огляду на зростання частки розподіленої генерації, РФА став невід’ємним інструментом адаптивного управління топологією.

Сучасні мережі потребують інтелектуальних підходів, таких як генетичні алгоритми, методи рою частинок та цифрові двійники, що забезпечують прогнозування навантажень, управління ризиками та автоматичну оптимізацію параметрів мережі. Концепція самоорганізованих мереж дозволяє ідентифікувати аварії та змінювати маршрути передачі енергії без втручання операторів. Формування мікромереж підвищує енергонезалежність об’єктів та забезпечує стабільність електропостачання.

Створення ефективної та стійкої енергетичної інфраструктури вимагає комплексного підходу, що поєднує класичні оптимізаційні алгоритми, методи аналізу потоків потужності та інтелектуальні технології прогнозування та адаптації. Це дозволяє забезпечити масштабованість та надійність електромереж в умовах сучасного енергетичного розвитку.

Список використаних джерел

1. Growth in global electricity demand is set to accelerate in the coming years as power-hungry sectors expand (Електронний ресурс) / The International Energy Agency (IEA) – 14 лютого 2025. URL: <https://www.iea.org/news/growth-in-global-electricity-demand-is-set-to-accelerate-in-the-coming-years-as-power-hungry-sectors-expand> (дата звернення 24.03.2025).
2. Вплив мегатенденцій на частку енергетики у комунальному секторі окремих країн / Я. І. Глущенко, О. О. Корогодова, Т. Є. Моїсеєнко, Н. О. Черненко – Економічний вісник НТУУ “Київський політехнічний інститут”, 2022. – С. 28–34.
3. Алгоритм визначення проміжних вузлів навантаження радіальних розподільчих мереж / А. П. Заболотний, Д. В. Федоша, К. І. Парусімова, С. В. Усенко – Запоріжжя: Електротехніка і електроенергетика, 2010. – С. 68–71.
4. A Comparative Study Of Minimal Spanning Tree Algorithms / ResearchGate GmbH – березень 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/340975690_A_Comparative_Study_Of_Minimal_Spanning_Tree_Algorithms (дата звернення 24.03.2025).
5. Particle Swarm Optimization for an Optimal Hybrid Renewable Energy Microgrid System under Uncertainty (Електронний ресурс) / MDPI AG – 15 січня 2024. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/2/422> (дата звернення 24.03.2025).
6. AI and Generative AI: transforming Europe’s electricity grid for a sustainable future (Електронний ресурс) / Directorate-General for Communications Networks, Content and Technology – 3 жовтня 2024. URL: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/ai-and-generative-ai-transforming-europes-electricity-grid-sustainable-future> (дата звернення 24.03.2025).

References

1. Growth in global electricity demand is set to accelerate in the coming years as power-hungry sectors expand. URL: <https://www.iea.org/news/growth-in-global-electricity-demand-is-set-to-accelerate-in-the-coming-years-as-power-hungry-sectors-expand> (accessed 14.03.2025).
2. The Impact of Megatrends on the Energy Share in the Municipal Sector of Selected Countries / Ya. I. Hlushchenko, O. O. Korohodova, T. Ye. Moiseienko, N. O. Chernenko – Economic Bulletin of NTUU “Kyiv Polytechnic Institute”, 2022. – pp. 28–34. (Ukr).
3. Algorithm for Determining Intermediate Load Nodes in Radial Distribution Networks / A. P. Zabolotnyi, D. V. Fedosha, K. I. Parusimova, S. V. Usenko – Zaporizhzhia: Electrical Engineering and Electric Power Engineering, 2010. – pp. 68–71. (Ukr).
4. A Comparative Study Of Minimal Spanning Tree Algorithms. URL: https://www.researchgate.net/publication/340975690_A_Comparative_Study_Of_Minimal_Spanning_Tree_Algorithms (accessed 29.02.2025).
5. Particle Swarm Optimization for an Optimal Hybrid Renewable Energy Microgrid System under Uncertainty. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/2/422> (accessed 25.02.2025).
6. AI and Generative AI: transforming Europe’s electricity grid for a sustainable future. URL: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/ai-and-generative-ai-transforming-europes-electricity-grid-sustainable-future> (accessed 23.01.2025).

УДК 621.31

Цюх В. О., аспірант, ORCID 0009-0001-2312-7026,
науковий керівник: канд. техн. наук, доцент **Веремійчук Ю. А.**,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

АНАЛІЗ НОРМАТИВНО-ПРАВОВОГО РЕГУЛЮВАННЯ РОЗВИТКУ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ В УКРАЇНІ

ANALYSIS OF THE REGULATORY FRAMEWORK FOR THE DEVELOPMENT OF DISTRIBUTED GENERATION IN UKRAINE

Анотація. У роботі розглянуто поточний стан нормативно-правового регулювання та його відповідність потребам децентралізованої енергетики. Проаналізовано основні зміни в українському законодавстві, які визначають ключову роль у формуванні концепції розподіленої генерації. Визначено регуляторні акти, що сприяють розвитку когенераційних технологій в Україні для відновлення енергетичної інфраструктури та підвищення безпеки енергозабезпечення. Бібл. 9.

Ключові слова: когенерація, розподілена генерація, енергоефективність, нормативне регулювання, ринок електроенергії, енергетична безпека.

Abstract. The article considers the current state of legal and regulatory framework and its compliance with the needs of decentralized energy. The main changes in Ukrainian legislation that determine the key role in shaping the concept of distributed generation are analyzed. Regulatory acts that promote the development of cogeneration technologies in Ukraine to restore energy infrastructure and increase the security of energy supply are identified. Ref. 9.