

МЕТОД СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗУ МЕРЕЖІ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

С. А. Шворов, доктор технічних наук, професор

О. О. Опришко, кандидат технічних наук, доцент

Р. Ф. Поліщук, аспірант

В. В. Іващук, доктор технічних наук, доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: sosdok@nubip.edu.ua

Анотація. Нині гостро постає проблема підвищення структурної стійкості енергетичних мереж від їх постійних руйнувань засобами повітряного нападу. У статті розглядається питання інтеграції децентралізованих джерел генерації для забезпечення енергетичної автономності об'єктів критичної інфраструктури. Метою дослідження є підвищення структурної стійкості мережі енергозабезпечення об'єктів критичної інфраструктури на основі оптимальної інтеграції відновлюваних джерел енергії, біогазових установок та накопичувачів енергії. Для досягнення поставленої мети в роботі сформульована постановка задачі та для її вирішення запропоновано використання модифікованого методу гілок та границь. Розроблено алгоритм вирішення багатокритеріальної задачі оптимізації структури енергетичних мереж. Основні результати підтверджують, що оптимальна структурна інтеграція сонячної, вітрової генерації, біогазових установок і батарей дозволяє забезпечити покриття критичного навантаження у прогнозованих умовах. Впровадження таких систем значно підвищує структурну стійкість енергосистем і створює умови для сталого розвитку енергонезалежних громад.

Ключові слова: *структурна стійкість, енергомережа, сонячна, вітрова генерація, накопичувачі енергії, біогазові установки, оптимізація*

Актуальність. Енергетична стабільність є однією з найважливіших проблем сучасного світу, особливо в умовах військових конфліктів та техногенних катастроф. У багатьох країнах руйнування централізованої енергетичної інфраструктури та її вразливість до зовнішніх впливів підкреслюють необхідність розробки нових підходів до забезпечення стійкості енергосистем [1]. Децентралізовані джерела енергії, такі як сонячна, вітрова генерація та біогазові установки, стали ключовими елементами сучасних енергетичних стратегій, спрямованих на підвищення енергетичної безпеки.

В Україні питання енергетичної безпеки набуло особливого значення через військові дії, які призвели до значних руйнувань централізованих генераторів та ліній передачі електроенергії. У таких умовах виникає необхідність вирішення проблеми інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) і, на цій основі – підвищення структурної стійкості мереж енергозабезпечення об'єктів критичної інфраструктури (ОКІ), що підтверджує актуальність подальших досліджень за даною тематикою.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У глобальному контексті децентралізована генерація енергії розглядається як одна із ключових проблем необхідності підвищення надійності та стійкості енергетичних систем особливо в умовах воєнного стану. Останні дослідження зосереджуються на інтеграції ВДЕ у локальні мережі, оптимізації їх взаємодії із системами зберігання енергії та забезпеченні стабільності її постачання для ОКІ [2]. Такі системи довели свою ефективність у зниженні навантаження на централізовані мережі та забезпеченні енергетичної автономності локальних споживачів [3]. Взагалі децентралізована генерація активно використовується для забезпечення критичних об'єктів, зокрема у віддалених районах, де централізоване постачання енергії обмежене [3].

В Україні проблема інтеграції децентралізованих систем залишається актуальною через руйнування централізованих мереж та генераторів. Локальні дослідження зосереджені на розробці математичних моделей, які враховують специфіку використання ВДЕ та особливості кризових умов. Значна увага приділяється інтеграції енергії від біогазових установок, які забезпечують надійність енергопостачання навіть за відсутності централізованої мережі [4].

Одним із найбільших викликів для дослідників є розробка ефективних алгоритмів розподілу енергетичних потоків між децентралізованими джерелами, системами накопичення та споживачами [5]. Такі алгоритми дозволяють оптимізувати роботу системи, знижувати витрати на енергію та забезпечувати стабільність навіть у пікові періоди споживання.

Таким чином, розвиток децентралізованих енергетичних систем вимагає проведення подальших досліджень, спрямованих на вирішення технічних і

економічних питань інтеграції децентралізованих джерел та систем накопичення енергії для забезпечення стабільності роботи ОКІ в кризових умовах.

Метою дослідження є підвищення структурної стійкості системи енергозабезпечення об'єктів критичної інфраструктури на основі оптимальної інтеграції відновлюваних джерел енергії, біогазових установок та накопичувачів енергії. Дослідження зосереджено на забезпеченні автономної роботи енергосистем у кризових умовах для покриття мінімальних потреб ОКІ на основі оптимізації структури мережі розподілу енергії між компонентами системи.

Матеріали та методи дослідження. Оптимізація структури мережі енергозабезпечення об'єктів критичної інфраструктури є досить складним завданням, оскільки воно має багатокритеріальний характер: показники якості функціонування мережі, як правило, суперечать критерію мінімізації її вартості, а сама задача є дискретною. Узагальненим показником ефективності роботи енергомережі виступає комплексний критерій, що включає такі параметри, як живучість, надійність та здатність до відновлення мережі енергозабезпечення об'єктів критичної інфраструктури.

Нехай задані вузли мережі енергозабезпечення ОКІ і їхні координати V_{xi}, V_{yi} , $i=1, \dots, n$. Всі можливі для даних вершин топології утворюють множину L . Ставиться задача знайти таку топологію $l_i \in L$ щоб

$$F_S(l_{i\theta}) \rightarrow \max \quad (1)$$

$$W(l_i) \rightarrow \min, \quad (2)$$

де F_S – критерій якості енергомережі, а W – вартість будівництва та експлуатації енергомережі.

Розглянемо метод скалярної згортки за нелінійною схемою компромісів і його можливе застосування при розв'язанні задачі синтезу енергомережі.

Нехай задана множина можливих розв'язків $X \subset E^n$, що складається із векторів $x = \{x_i\}_{i=1}^n$ n -мірного Евклідового простору, компоненти яких можуть приймати тільки дискретні значення: $x_i = x_i^{(j)}$, $j \in [1, J_i]$, $J_i \geq 2$, $i \in [1, n]$. Рішення приймається при зовнішніх впливах, що описуються вектором r , заданим на множині можливих

факторів R . Ситуація, що складається в результаті прийняття багатокритеріального рішення x у заданих умовах r , характеризується декартовим добутком $S=X \times R$.

Якість рішення оцінюється за сукупністю окремих суперечливих критеріїв, що утворюють s -мірний вектор $y(x)=\{y_k(x)\}_{k=1}^s$, що визначений на множині X . Вектор часткових критеріїв обмежений допустимою областю: $y \in M$.

Ставиться задача: визначити таке рішення $x^* \in X$, що при заданих умовах, зв'язках і обмеженнях оптимізує вектор ефективності $y(x)$.

Не втрачаючи загальності будемо вважати, що всі часткові критерії потребують мінімізації і що вони невід'ємні та обмежені:

$$M = \{y \mid 0 \leq y_k(x) \leq A_k, k \in [1, s]\}. \quad (3)$$

Тут $A = \{A_k\}_{k=1}^s$ – вектор обмежень. Дана система нерівностей являє собою структурований вираз (паралелепіпед) допустимої області $y \in M$.

За своєю суттю пошук багатокритеріального розв'язку завжди ґрунтується на компромісі. Вибравши відповідну схему компромісів, можна здійснити перехід від загального векторного подання до скалярної згортки окремих критеріїв, що слугує основою для побудови конструктивного апарату розв'язання багатокритеріальних задач. У разі застосування методу скалярної згортки математична модель задачі векторної оптимізації набуває такого вигляду:

$$x^* = \arg \min_{x \in X} Y[y(x)], \quad (4)$$

де $Y(y)$ – скалярна функція, яка має зміст скалярної згортки вектору часткових критеріїв, вигляд якої залежить від обраної схеми компромісів.

Нелінійна схема компромісів, створена як формалізований інструмент для аналізу систем енергозабезпечення об'єктів критичної інфраструктури з конфліктними критеріями, дає змогу ефективно розв'язувати широкий спектр багатокритеріальних задач.

Таким чином, при розрахунку комплексного критерію доцільно використовувати такий вираз

$$\Phi = K_{\phi 1}(1 - F_s)^{-1} + K_{\phi 2}(1 + \varepsilon - W)^{-1}, \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^2 K_{\Phi i} = 1,$$

де ε – деяка достатньо мала величина, яка служить для того, щоб уникнути ділення на нуль при $W=1$.

При значеннях W близьких до 0 цей коефіцієнт мало впливає на значення комплексного критерію. При наближенні W до 1 (напружена ситуація) його вплив на комплексний критерій збільшується. Цей підхід можна використовувати тільки у випадку, якщо точно відомо значення W_{max} . У випадку, якщо W_{max} невідомо, можлива ситуація коли W більше 1, у цьому випадку можливо ділення на 0 при розрахунку комплексного критерію. У нашому випадку W_{max} легко підрахувати – це вартість будівництва повнозв'язної енергомережі (усі вершини сполучені безпосередньо з усіма).

Результати досліджень та їх обговорення. Розглянемо та порівняємо алгоритм випадкового пошуку з модифікованим алгоритмом гілок і меж, застосованими для визначення оптимальної структури.

У випадковому пошуку оптимізація здійснюється шляхом генерації певної кількості зв'язних енергомереж і подальшого вибору серед них найкращого варіанта. Як додаткові параметри налаштування оптимізаційного процесу використовуються: *мінімальна кількість ребер*, що видаляються під час генерації мережі (R_{min}), *максимальна кількість ребер* для видалення (R_{max}) та *кількість ітерацій* (I_{max}).

Кількість ітерацій означає кількість енергомереж, що будуть згенеровані і з яких буде провадитись вибір оптимального варіанту. Чим більше значення цього параметра тим вище достовірність отриманих результатів тому, що збільшується кількість розглянутих випадків.

Розглянемо тепер модифікований метод гілок та границь.

У цьому випадку оптимізація відбувається шляхом вибору оптимального ребра для видалення на кожному кроці ітераційного процесу.

В якості додаткових параметрів настроювання оптимізаційного процесу виступають: *кількість ітерацій* (I_{\max}) і *ознака зупинки* при відсутності листів дерева оптимізації з кращими показниками ніж нетермінальні вузли.

Для виконання оптимізації спочатку формується повнозв'язна енергомережа, після чого здійснюється послідовне видалення ребер відповідно до значення комплексного критерію. Процес оптимізації подається у вигляді дерева рішень: його вузли відповідають варіантам енергомереж, а ребра — факту видалення одного з елементів мережі попереднього рівня. Чим глибше відбувається рух по дереву, тим більше ребер вилучено і, відповідно, менше їх залишається. На кожному етапі вибирається термінальна вершина з найкращим значенням комплексного критерію оптимізації та розглядаються всі можливі варіанти видалення одного ребра з відповідної енергомережі. Отримані результати разом зі значеннями комплексного критерію додаються до дерева оптимізації, а вибрана вершина перестає бути термінальною. Далі знову визначається найкраща термінальна вершина, і процедура повторюється доти, доки не будуть вичерпані всі термінальні вузли, не завершиться лічильник ітерацій або (за наявності ознаки зупинки) не виникне ситуація, коли оптимальне рішення не належить термінальній вершині.

Алгоритм може бути перерваний на будь-якій ітерації. У цьому випадку визначається кращий результат для даної кількості ітерацій.

Розглянемо алгоритм оптимізації.

Крок 0. Створити повнозв'язну енергомережу і встановити її в якості кореня дерева оптимізації S_0 .

Крок I. Знайти в дереві оптимізації лист із найкращим значенням комплексного критерію (на першому кроці це буде корінь дерева – тому що він єдиний вузол дерева) $S = S_1$. Обчислити всі можливі варіанти видалення одного ребра з енергомережі і отриманий результат занести до дерева оптимізації. Необхідно повторювати цей крок поки не досягне межі лічильник кількості ітерації або не залишиться жодного допустимого термінального вузла.

На основі описаних алгоритмів була розроблена комп'ютерна програма для проведення структурного синтезу енергомереж. Коротко розглянемо отримані на тестовому прикладі результати.

Вихідні дані для оптимізації: $K_{довж} = 50$ – коефіцієнт перерахунку відстаней із деяких умовних одиниць у кілометри. Таким способом координати вузлів можуть бути задані в будь-яких одиницях виміру (або безрозмірні); $W_{кан} = 1000$ – вартість капітальних витрат на будівництво й експлуатацію одного кілометра енергомережі (в у.о.); $E_n = 1$ – Коефіцієнт окупності капіталовкладень (безрозмірний); $N = 20$ – Кількість вузлів енергомережі (безрозмірний). Координати вузлів наведені в табл. 1.

1. Координати вузлів

9.8	10	10.25	11.2	8.9	3.7	13.65	4.7
10.4	14.4	9	11.6	7.2	5	17.65	5.1
10.9	17	8	9.1	7.1	4.5	11.75	2.45
10.5	15.5	8	6.85	6.45	5.6	15.1	5.3
10.3	13.2	9.4	8	8.15	5.9	13.65	4.4

Результати розрахунку на ПЕОМ представлені в табл. 2.

2. Порівняльна таблиця результатів розрахунку на ПЕОМ

Опис	Метод випадкового пошуку	Метод гілок та границь
Кількість ітерацій	1000	200
Додаткові параметри методів	Rmin = 50 Rmax = 171	
Значення критеріїв	Fs: 1,39557965832538	Fs: 1,32417186843977
Час розрахунку	1 хв	18 хв

Виходячи з табл. 2 видно, що метод метод гілок та границь дає кращий показник ефективності. У зв'язку з цим цікавим є поєднання обох методів. Цілком зв'язана енергомережа апріорі має погане значення критерію оптимальності і знаходиться далеко від оптимального рішення. У зв'язку з цим неефективно використовувати її в якості базової.

Таким чином, метод випадкового пошуку ефективно використовувати для генерації початкових базових енергомереж, а метод гілок та границь – для

поліпшення їх характеристик. У цьому випадку оптимізація проводиться в два етапи. На першому етапі за допомогою методу випадкового пошуку будується деяка випадкова оптимальна енергомережа, а потім на другому – вона використовується як базова (коренева) для методу метод гілок та границь, за допомогою якого вона поліпшується.

Висновки і перспективи. У результаті проведеного дослідження підтверджено гіпотезу підвищення стійкості системи енергозабезпечення ОКІ на основі оптимальної інтеграції відновлюваних джерел енергії, біогазових установок та накопичувачів енергії.

Цілком зв'язана мережа апріорі має погане значення комплексного критерію оптимальності і знаходиться далеко від оптимального рішення. У зв'язку з цим неефективно використовувати її в якості базової. Як показують результати розрахунків метод випадкового пошуку доцільно використовувати для генерації початкових базових енергомереж, а метод метод гілок та границь – для поліпшення їх характеристик. Завдяки автономному функціонуванню компонентів, система демонструє високу стійкість до пошкоджень централізованої інфраструктури.

Перспективним напрямком є використання алгоритмів штучного інтелекту для прогнозування попиту та управління енергетичними потоками, що може значно підвищити ефективність децентралізованих систем.

References

1. Van der Meer, A. A., et al. Resilience of decentralized energy systems: A comparative study. *Renewable Energy*, 148, 800–813. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.038>.
2. I. Beniche, F. Karouach, M. Bakraoui and H. E. Bari (2019). "Energy Recovery Study by the Anaerobic Digestion of Dairy Dsludge from Moroccan Industry," 2019 7th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Agadir, Morocco, 1-6, Available at: <https://doi.org/10.1109/IRSEC48032.2019.9078301>
3. J. H. El Achkar, R. Ziade, N. Louka, R. G. Maroun and Z. Hobaika (2020). "Treatment of dairy waste by anaerobic digestion to produce methane as green energy," 2020 5th International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC), Marrakech, Morocco, 1-6. Available at: <https://doi.org/10.1109/REDEC49234.2020.9163848>.

4. Polishchuk V.M., Shvorov S.A., Pasichnik N.A., Davidenko T.S., Valiev T.O., Dvornyk Ye.O. (2023) Increasing the Production of Electrical and Thermal Energy in Biogas Plants through the Optimal Addition of Agricultural Waste. Problems of regional energy, 4 (60), doi: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.4-60.07>.

5. Polishchuk R., Shvorov S. (2025). Improving the resilience of power systems for energy-independent communities through the integration of decentralized generation. System research in energy, 1 (81), 15-28. <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0001564951>.

METHOD OF STRUCTURAL SYNTHESIS OF THE POWER SUPPLY NETWORK OF CRITICAL INFRASTRUCTURE FACILITIES

S. Shvorov, O. Opryshko, R. Polishchuk, V. Ivashchuk

Abstract. *At present, the urgent problem is to enhance the structural resilience of energy networks against their constant destruction caused by air attacks. The article examines the issue of integrating decentralized generation sources to ensure the energy autonomy of critical infrastructure facilities. The purpose of the study is to improve the structural resilience of energy supply networks for critical infrastructure based on the optimal integration of renewable energy sources, biogas plants, and energy storage systems. To achieve this objective, the problem statement was formulated, and a modified branch and bound method was proposed for its solution. An algorithm for solving the multi-criteria optimization problem of energy network structures was developed. The main results confirm that the optimal structural integration of solar and wind generation, biogas plants, and batteries makes it possible to cover critical loads under forecasted conditions. The implementation of such systems significantly increases the structural resilience of energy systems and creates conditions for the sustainable development of energy-independent communities.*

Key words: *structural stability, power grid, solar, wind generation, energy storage, biogas plants, optimization*