

УРАХУВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ В ЗАДАЧАХ ІНТЕГРУВАННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ ДО ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Забезпечення надійного та безперервного енергопостачання є виключно важливим для великих міст і промислових підприємств. В сучасних Українських реаліях електроенергетична система не може цього гарантувати. У доповіді розглядаються можливості інтегрування відновлюваних джерел енергії в локальні енергосистеми, що здатні працювати автономно в умовах невизначеності, пов'язаної з виробництвом та попитом на відновлювану енергію. Показано надійний оптимізаційний підхід для моделювання гібридної енергосистеми з декількома джерелами енергії, який враховує різні стратегії прийняття рішень. Зазначені стратегії враховують ризики прийняття рішень, пов'язані з невизначеністю попиту на електроенергію та постачання відновлюваної енергії. Оптимізаційна задача сформульована як задача лінійного програмування. В ній поєднано джерела відновлюваної енергії (вітрові турбіни, фотоелектричні панелі), традиційні дизельні генератори та когенераційні установки. Застосування моделі сприяє забезпеченню надійного доступу до електроенергії та тепла, мінімізуючи операційні витрати локальної енергосистеми.

Ключові слова: локальна енергетична система, інтегрування відновлюваних джерел енергії, автономна енергосистема, когенераційна установка, вітрова електростанція, фотоелектрична станція.

Abstract

Ensuring reliable and continuous energy supply is extremely important for large cities and industrial enterprises. In today's Ukrainian realities, the electricity system cannot guarantee this. The report considers the possibilities of integrating renewable energy sources into local power systems that can operate autonomously under conditions of uncertainty associated with the production and demand for renewable energy. A robust optimization approach for modeling a hybrid power system with multiple energy sources is shown, which takes into account different decision-making strategies. These strategies take into account the decision-making risks associated with the uncertainty of electricity demand and renewable energy supply. The optimization problem is formulated as a linear programming problem. It combines renewable energy sources (wind turbines, photovoltaic panels), traditional diesel generators, and cogeneration units. The application of the model helps to ensure reliable access to electricity and heat, minimizing the operating costs of the local power system.

Keywords: local power system, integration of renewable energy sources, autonomous power system, cogeneration plant, wind power plant, photovoltaic plant.

Вступ

Враховуючи масштаби руйнувань електроенергетичної системи України, забезпечення надійного та безперебійного енергопостачання має величезне значення. Надійне енергопостачання забезпечує безперебійну роботу, зокрема й виробничих підприємств, що вкрай важливо для досягнення виробничих показників. Традиційно як резервні джерела енергії використовувалися дизельні генератори та інші традиційні джерела енергії. Вони досить надійні та маневрені. Але їх експлуатація пов'язана з високими витратами, використанням дефіцитних видів палива, впливом на навколишнє середовище і логістичними проблемами.

Підтримка виробництва стикається з постійними ризиками, пов'язаними з надійністю електропостачання через постійні атаки на енергетичну інфраструктуру України. Вирішення проблеми вимагає впровадження підходів сталої енергетики для покриття значного споживання енергії.

Тому багато компаній освоюють локальні енергетичні системи, які об'єднують систему централізованого електропостачання, традиційні генератори, що працюють на викопному паливі, з поновлюваними джерелами енергії, такими як сонце та вітер [1]. Зростаюче проникнення поновлюваних дже-

рел енергії, являє собою позитивну альтернативу, забезпечуючи, крім іншого, зниження експлуатаційних витрат, підвищення стійкості енергетичних систем, потенціал для скорочення викидів парникових газів. Проте інтеграція поновлюваних джерел енергії в енергосистему створює нові складнощі. Насамперед це пов'язано з нестабільністю і невизначеністю поновлюваних джерел енергії [2].

Можливість інтеграції систем накопичення енергії, таких як акумулятори, частково розв'язує ці проблеми і додатково підвищує надійність гібридних енергосистем, даючи змогу накопичувати надлишкову поновлювану енергію, що виробляється в періоди низького попиту, та використовувати її, коли поновлюваних ресурсів недостатньо [3].

Коли локальна енергосистема працює в ізольованому режимі, механізми реагування на попит також стає важливим інструментом для управління розподілом ресурсів. Не маючи доступу до енергомережі з достатнім резервом потужності, локальні енергосистеми повинні ефективно керувати балансом між попитом і пропозицією енергії [4].

Таким чином, проблеми, пов'язані з інтеграцією відновлюваних джерел енергії в локальні енергосистеми потребують комплексних рішень. Мінливість вітру та сонячної радіації в поєднанні з коливаннями споживання електроенергії, які важко спрогнозувати, вимагає розроблення надійних стратегій управління енергоспоживанням для забезпечення надійності, ефективності та стійкості локальної енергосистеми. Ці проблеми особливо яскраво проявляються в ізольованому режимі роботи локальної енергосистеми, де відсутність можливості підключення до мережі вимагає застосування стійких підходів до управління енергоспоживанням, здатних вирішувати проблеми, пов'язані з обмеженою доступністю резервних джерел живлення.

У таких умовах порушення балансу потужності може призвести до значних перебоїв у роботі системи, зокрема критичної інфраструктури міст і критичних промислових процесів, де безперервне та надійне енергопостачання має величезне значення. Тому стратегічний підхід, що об'єднує різні джерела енергії, включає програми реагування на попит і враховує невизначеності в генерації та попиті, має вирішальне значення для розвитку та підтримки стабільності локальних енергетичних систем.

Результати дослідження

Інтеграція відновлюваних джерел енергії в локальні енергосистеми, що можуть працювати автономно, привертає значну увагу, особливо в умовах обмежень централізованого електропостачання критичної інфраструктури міст і промислових підприємств, коли надійність і стійкість мають вирішальне значення. Проблеми, пов'язані з нестабільністю поновлюваних джерел енергії, призвели до необхідності використання різноманітних інноваційних рішень для проєктування та реалізації локальних енергетичних систем.

У дослідженні [5] запропоновано алгоритми кластеризації K-Means і K-Medoids для оптимізації структури гібридних систем відновлюваних джерел енергії. K-Means виявився надійнішим для розміщення ВДЕ, незважаючи на те, що K-Medoids пропонував вищі середні потужності сонячної та вітрової енергії. У дослідженні [6] запропоновано систематизовану та комплексну основу для економічної оптимізації структури гібридної мікромережі, на прикладі промислового підприємства. Дослідження присвячене оцінці рентабельності гібридних систем відновлюваних джерел енергії, зокрема для електропостачання промислових підприємств, з урахуванням технічних, екологічних та економічних обмежень. Робота [7] присвячена аналізу потенціалу гібридних систем відновлюваної енергетики, що поєднують фотоелектричні станції, вітряні турбіни та накопичувачі енергії на основі ванадієвих редокс-акумуляторів, для промислових підприємств з обмеженнями централізованого електропостачання або ізольованих підприємств. У роботі [8] розглядаються енергетичні рішення для автономних локальних енергосистем підприємств з використанням програмного забезпечення HOMER Pro та АНР для оптимізації структури та параметрів гібридних систем, включаючи вітрові, сонячні станції та акумуляторні батареї. За допомогою оптимізації Монте-Карло з обмеженням ризику дослідження показує, що поновлювані джерела енергії можуть забезпечити надійне енергопостачання за низьких експлуатаційних витрат, що робить їхнє використання прийнятним для комунальних і промислових об'єктів в умовах обмежень централізованого електропостачання. У роботі [9] використовується спільна робота фотоелектричних станцій, вітряних турбін, дизель-генераторів, акумуляторних батарей і водневих паливних елементів, оптимізована за допомогою генетичного алгоритму. Запропонований комплексний підхід окреслює потенціал інтеграції ВДЕ в умовах локальних енергосистем. У [10] описано мультигенераційну систему, призначену для виробництва електроенергії, тепла, охолоджен-

ня, очищення води та виробництва біометану. У роботі наведено детальну оцінку системи на основі термодинамічного, економічного та екологічного аналізу. Підтверджується можливість організації та управління локальною енергосистемою з кількома видами енергії. У роботі [11] автори представляють локальну енергосистему, яка об'єднує поновлювані джерела енергії з технологією Power-to-Gas. Як резерв використовуються дизельні генератори та акумулятори. Запропоновано оптимізовану систему для виробництва, зберігання та споживання водню, яка показує ефективність енергетичних рішень на основі водню в мікромережах. Крім того, в [12] представлено стратегію низьковуглецевої оптимізації інтегрованої енергетичної системи, що включає водневе енергосховище та систему комбінованого вироблення тепла й електроенергії. У роботі [13] досліджуються питання координації мобільного резерву в локальних енергосистемах на основі різних енергоносіїв в умовах ринку. Їхня робота об'єднує газові, теплові та електричні системи для оптимізації планування режимів енергосистеми з різними споживачами. Демонструється виняткова важливість координації керування джерелами енергії в локальних енергосистемах.

У доповіді представлено підхід до оптимізації комбінованої системи енергопостачання в районах і на підприємствах, для яких можливі тривалі відключення від об'єднаної енергосистеми. У дослідженні оптимізовано локальну енергетичну систему з кількома джерелами енергії для задоволення попиту на електроенергію, тепло та питну воду в умовах автономної роботи.

Цільову функцію представлено у вигляді мінімізації сукупних витрат на експлуатацію локальної енергосистеми, що включають такі компоненти: витрати на паливо, витрати на запуск, витрати, пов'язані з реагуванням на попит, витрати на циклічне використання електричних і теплових акумуляторів, а також витрати на енергозабезпечення процесів, пов'язаних з водопостачанням:

$$\sum (B_{\text{П}} + B_{\text{З}} + B_{\text{РП}} + B_{\text{В}} + B_{\text{ЕА}} + B_{\text{ТА}}) \rightarrow \min$$

де $B_{\text{П}}$ – витрати на паливо для дизель-генераторів і когенераційних установок; $B_{\text{З}}$ – додаткові витрати, пов'язані із запуском і зупинкою енергоустановки; $B_{\text{РП}}$ – витрати на організацію та функціонування системи реагування на попит; $B_{\text{В}}$ – витрати, пов'язані із забезпеченням водопостачання; $B_{\text{ЕА}}$, $B_{\text{ТА}}$ – додаткові витрати, пов'язані зі встановленням та експлуатацією акумуляторів електричної та теплової енергії.

Обмеження задачі розроблено так, що вони забезпечують відповідний рівень надійної роботи локальної енергосистеми з кількома джерелами енергії за дотримання технічних та експлуатаційних обмежень. Балансові обмеження встановлюють взаємозв'язок між споживанням електричної та теплової енергії та її виробництвом із локальних відновлюваних і традиційних джерел енергії. У додаткових обмеженнях враховується ємність систем зберігання електричної та теплової енергії, а також експлуатаційні обмеження. Для регулювання споживання електроенергії в пікові періоди передбачено заходи реагування на попит, що підвищує адаптивність локальної системи.

Для врахування невизначеностей, пов'язаних із виробленням відновлюваної енергії, змінним споживанням електроенергії, волатильністю цін на паливо та відмовами устаткування, використано методи робастної оптимізації. Цей підхід дає змогу отримувати ефективні рішення і контролювати ризики перерв енерго- та водопостачання, що особливо важливо для критичної інфраструктури міст і критичних виробничих процесів.

Запропонований підхід забезпечує надійність і стійкість локальної системи в умовах невизначеності завдяки використанню передових методів змішано-інтегрального лінійного програмування (MILP) і робастної оптимізації.

Висновки

Локальні енергосистеми населених пунктів та промислових підприємств у районах, де обмежена надійність системи централізованого електропостачання, дедалі частіше стикаються з необхідністю інтеграції відновлюваних джерел енергії та врахування невизначеності, яку вони вносять у процес виробництва електроенергії. Оскільки нестабільні ресурси, такі як вітер і сонце, стають дедалі поширенішими, врахування цих невизначеностей має вирішальне значення для підтримання надійності та економічної ефективності локальних енергетичних систем. Для отримання надійного та сталого рішення необхідно об'єднувати відновлювані джерела енергії, традиційну генерацію та технології зберігання енергії в єдину локальну енергетичну систему. А для забезпечення оптимального функціонування такої системи доцільно використовувати робастну оптимізацію, яка дає змогу врахувати ризи-

ки мінливості споживання та нестабільності генерування.

У роботі запропоновано оптимізаційну модель керування локальними енергосистемами в умовах невизначеності. Результати дослідження демонструють важливу роль врахування ризиків для забезпечення балансу між витратами на реалізацію локальної енергосистеми та надійністю електропостачання. Особливо це важливо в регіонах України, де надійність електропостачання та енергетична стійкість має стратегічне та життєво-важливе значення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Kudrya, S.; Lezhniuk, P.; Rubanenko, O.; Hunko, I.; Dyachenko, O. Local Power Systems Based on Renewable Energy Sources. In *Systems, Decision and Control in Energy VI*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2024; Volume 552, pp. 385–398.
2. Wójcik, W.; Lezhniuk, P.; Kaczmarek, C.; Komar, V.; Hunko, I.; Sobchuk, N.; Yesmakhanova, L.; Shermantayeva, Z. Integrated Assessment of the Quality of Functioning of Local Electric Energy Systems. *Energies*, 2025, 18, 137.
3. B. Parkhideh, H. Mirzaee, and S. Bhattacharya, "Supplementary energy storage and hybrid front-end converters for highpower mobile mining equipment," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, no. 4, pp. 1863-1872, 2013.
4. A. van Tonder, M. Kleingeld, and J. Marais, "Investigating demand response potential in a mining group," in *2013 Proceedings of the 10th Industrial and Commercial Use of Energy Conference*, 2013: IEEE, pp. 1-5.
5. R. Holloway *et al.*, "Optimal location selection for a distributed hybrid renewable energy system in rural Western Australia: A data mining approach," *Energy Strategy Reviews*, vol. 50, p. 101205, 2023.
6. O. Ellabban and A. Alassi, "Optimal hybrid microgrid sizing framework for the mining industry with three case studies from Australia," *IET Renewable Power Generation*, vol. 15, no. 2, pp. 409-423, 2021.
7. M. S. Nkambule, A. N. Hasan, and T. Shongwe, "Performance and techno-economic analysis of optimal hybrid renewable energy systems for the mining industry in South Africa," *Sustainability*, vol. 15, no. 24, p. 16766, 2023.
8. G. A. Castro, M. I. Murkowska, P. Z. Rey, and A. Anvari-Moghaddam, "Operational Planning of a Hybrid Power Plant for Off-Grid Mining Site: A Risk-constrained Optimization Approach," in *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2020: IEEE, pp. 4587-4592.
9. M. M. Ahmed, B. K. Das, P. Das, M. S. Hossain, and M. G. Kibria, "Energy management and sizing of a stand-alone hybrid renewable energy system for community electricity, fresh water, and cooking gas demands of a remote island," *Energy Conversion and Management*, vol. 299, p. 117865, 2024.
10. S. Zheng, Q. Hai, X. Zhou, and R. J. Stanford, "A novel multi-generation system for sustainable power, heating, cooling, freshwater, and methane production: Thermodynamic, economic, and environmental analysis," *Energy*, vol. 290, p. 130084, 1123 2024.
11. H. Mehrjerdi, H. Saboori, and S. Jadid, "Power-to-gas utilization in optimal sizing of hybrid power, water, and hydrogen microgrids with energy and gas storage," *Journal of Energy Storage*, vol. 45, p. 103745, 2022.
12. J. Yang, L. Zeng, K. He, Y. Gong, Z. Zhang, and K. Chen, "Optimization of the Joint Operation of an Electricity–Heat–Hydrogen–Gas Multi-Energy System Containing Hybrid Energy Storage and Power-to-Gas–Combined Heat and Power," *Energies*, vol. 17, no. 13, p. 3144, 2024.
13. Y. Xi, J. Fang, Z. Chen, Q. Zeng, and H. Lund, "Optimal coordination of flexible resources in the gas-heat-electricity integrated energy system," *Energy*, vol. 223, p. 119729, 2021.

Маціпура Сергій Миколайович – студент групи *1ЕСМ-21б*, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: matsipura2018@gmail.com

Кулик Володимир Володимирович – докт. техн. наук, професор кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: kulyk.v.v@vntu.edu.ua

Sergiy Matsipura – student of group 1ESM-21b, Faculty of Electric Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: matsipura2018@gmail.com

Volodymyr Kulyk – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Power Plants and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: kulyk.v.v@vntu.edu.ua