

УДК 621.31
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.2\(500\).25](https://doi.org/10.15589/znp2025.2(500).25)

OPTIMIZATION OF ENERGY CONSUMPTION USING LOAD MANAGEMENT TECHNOLOGIES

ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕХНОЛОГІЙ УПРАВЛІННЯ НАВАНТАЖЕННЯМ

Serhii P. Denysiuk
spdens@ukr.net
ORCID: 0000-0002-6299-3680

Halyna S. Bielokha
pointage13@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4277-367X

Ihor I. Bohoiko
bigbrzb@gmail.com
ORCID: 0000-0002-6816-6352

С. П. Денисюк,
докт. техн. наук, професор

Г. С. Бєлоха,
канд. техн. наук, доцент

І. І. Богойко,
аспірант

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Abstract. Analysis of modern load management technologies, with an emphasis on their integration with electricity storage systems, renewable energy sources to increase the stability and efficiency of power systems, showed that modern power grids face challenges associated with the growth of peak loads and fluctuations in demand, which requires the implementation of innovative solutions to ensure network stability and reduce operating costs. Load shifting is not always profitable if used exclusively to benefit from low electricity prices during off-peak hours. However, with the integration of battery energy storage systems (BESS), load shifting always demonstrates efficiency. BESS allows end users to separate the time of energy consumption and the moment of its payment, providing greater flexibility. *The purpose* of the study is to analyze load management methods in local power systems with the implementation of battery energy storage systems to reduce peak loads and integrate renewable energy sources. *Method.* Applied methods and theories of electrical engineering, programming. When formulating the optimization problem at the initial stages, economic and technical components were used as optimization criteria, and possible optimization problems in local systems were identified. *The results of the research* are a developed algorithm for the operation of a local system consisting of solar generators and storage systems without connection to a centralized network using BESS while minimizing electricity costs. *The scientific novelty* lies in the development of strategies for optimizing these technologies, in particular economic feasibility and scalability. *The practical importance* of the research lies in the development of recommendations for using the proposed algorithm and methodology for forecasting, reducing the cost of implementing storage systems and creating new ones. The results obtained confirm that the combination of modern load management technologies and storage systems is an important step towards creating energy-efficient, sustainable and environmentally friendly energy systems.

Key words: demand management; energy storage systems; renewable energy sources; smart grid; microgrid; optimization.

Анотація. Аналіз сучасних технологій управління навантаженнями, з акцентом на їх інтеграцію з системами зберігання електроенергії, відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) для підвищення стабільності та ефективності енергосистем, показав що сучасні енергомережі стикаються з викликами, пов'язаними зі зростанням пікових навантажень та коливаннями попиту, що потребує впровадження інноваційних рішень для забезпечення стабільності мережі та зниження експлуатаційних витрат. Перенесення навантаження не завжди є вигідним, якщо застосовується виключно для отримання вигоди від низьких цін на електроенергію у позапікові години. Проте з інтеграцією акумуляторних систем зберігання енергії (BESS) перенесення навантаження завжди демонструє ефективність. BESS дозволяє кінцевим споживачам розділяти час споживання енергії та момент її оплати, забезпечуючи більшу гнучкість. *Метою дослідження* є аналіз методів управління навантаженнями

в локальних енергосистемах з впровадженням акумуляторних систем зберігання енергії для зниження пікових навантажень та інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). *Методика.* Застосовані методи та теорії електротехніки, програмування. Під час формулювання оптимізаційної задачі на початкових етапах використані економічні та технічні складові як критерії оптимізації, було виділено можливі оптимізаційні задачі в локальних системах. *Результатом досліджень* є розроблений алгоритм роботи локальної системи, яка складається з сонячних генераторів та систем зберігання без під'єднання до централізованої мережі при використанні BESS при мінімізації витрат на оплату електроенергії. *Наукова новизна* полягає у розробці стратегій оптимізації цих технологій, зокрема економічної доцільності та масштабованості. *Практична значимість дослідження* полягає у розробці рекомендацій щодо використання запропонованого алгоритму та методики для прогнозування, зниження вартості впровадження систем зберігання. Отримані результати підтверджують, що поєднання сучасних технологій управління навантаженнями та систем зберігання є важливим кроком до створення енергоефективних, стійких та екологічно орієнтованих енергетичних систем.

Ключові слова: керування попитом; системи зберігання енергії; відновлювані джерела енергії; розумна мережа; мікромережа; оптимізація.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Актуальністю проблеми пікових навантажень у сучасних енергосистемах є необхідність забезпечення стабільності та надійності роботи енергомереж у періоди значного зростання попиту на електроенергію. Традиційні методи, такі як розширення інфраструктури, часто є дорогими та не завжди екологічно доцільними. Замість цього компанії впроваджують нові підходи, включаючи технології управління попитом, гібридну генерацію та системи зберігання енергії (Battery Energy Storage Systems, BESS), які дозволяють зсувати піки навантаження та оптимізувати споживання електроенергії. Зокрема, технології peak shaving, load balancing і load shifting у поєднанні з BESS пропонують ефективні рішення для зниження пікових навантажень, стабілізації мережі та підвищення енергоефективності [1, 2].

Ці технології не лише допомагають зменшити навантаження на мережу під час пікових періодів, але й сприяють інтеграції відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергія. Завдяки цьому знижується залежність від викопного палива та підвищується загальна стабільність енергосистеми.

З огляду на глобальні тенденції до декарбонізації та підвищення енергоефективності, впровадження таких технологій стає невід'ємною складовою сталого розвитку енергетичного сектору. Вони сприяють не лише зниженню експлуатаційних витрат, але й забезпечують гнучкість у функціонуванні мереж, підвищуючи їхню надійність і адаптивність до змінних умов ринку та попиту [1, 2].

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Мікромережі, особливо ті, що працюють в ізолюваному режимі, стикаються з суттєвими проблемами через нестабільність профілю навантаження, що призводить до пікових значень електроспоживання. Ці піки часто спричиняють неефективність генераційних систем, зношування обладнання та збільшення викидів вуглецю. Вирішення проблем пікових навантажень за допомогою ефективних стратегій управління

є критично важливим для забезпечення стабільності та надійності мережі [3]. Інтеграція BESS у системи мікромережі забезпечує суттєві можливості економії витрат. Знижуючи потребу у використанні дорогих пікових генераторів та зменшуючи зношування обладнання, ці системи подовжують термін експлуатації існуючої інфраструктури та знижують загальні витрати на енергію.

Розглядаються кілька можливих технологій управління навантаженням в локальних енергосистемах [4]:

1. Стратегія зниження навантаження (Load Curtailment) передбачає скорочення споживання електроенергії без перенесення його на інші часові періоди. Наприклад, побутові споживачі можуть вимикати світло або використовувати енергоощадні технології, комерційні споживачі – вимикати непотрібне обладнання, а промислові – скорочувати менш продуктивні години роботи.

2. Стратегія перенесення навантаження (Load Shifting) полягає у перенесенні споживання електроенергії на інші години за допомогою аналізу графіків навантаження. Побутові споживачі можуть відкладати використання електроприладів на більш пізні години, а промислові підприємства – змінювати графіки виробництва.

3. Стратегія підвищення мінімуму навантажень (Valley Filling strategy) спрямована на використання пристроїв зберігання енергії, таких як акумуляторні батареї, у непікові періоди. Це також включає можливість часткового відключення генераторів, забезпечуючи роботу обладнання на 70–90% від номінальних значень замість 15–20% у періоди низького попиту.

4. Гнучка стратегія змінення навантаження (Flexible Load Shape) базується на укладенні угод між агрегатором і споживачем, згідно з якими споживач формує графіки навантаження в обмін на фінансові стимули. Ця стратегія передбачає можливість коригування кривих навантаження для досягнення оптимальних показників.

Наведені стратегії дозволяють ефективно управляти електроспоживанням і забезпечувати балансування навантаження в енергосистемах.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Хоча окремі дослідження демонструють успішну інтеграцію акумуляторних систем зберігання енергії (BESS) із відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ), відсутні комплексні підходи до оптимізації роботи таких систем у реальному часі, зокрема в умовах швидких змін попиту на енергію. У той час як аналіз переваг використання BESS є частиною багатьох досліджень, існує недостатньо моделей та алгоритмів, які враховують довгострокові економічні аспекти, такі як термін служби батарей, динаміка вартості технологій та вплив на загальну структуру тарифів.

Вирішення цих питань потребує додаткових досліджень, розробки нових методологій, алгоритмів та адаптації існуючих підходів до сучасних локальних систем.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є аналіз методів управління навантаженнями в локальних енергосистемах з впровадженням акумуляторних систем зберігання енергії (BESS) для зниження пікових навантажень та інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методи дослідження базуються на критичному аналізі та порівнянні останніх наукових публікацій і досліджень у галузі енергетики. У роботі застосовано структурний підхід до аналізу доступної наукової літератури, де оцінювались основні підходи до використання технологій керування попитом у контексті сталого розвитку енергосистем.

Для аналізу останніх досліджень застосовувались методи систематичного огляду літератури, що дозволило виділити ключові тенденції, переваги та недоліки впровадження технологій зниження навантажень. Для складання алгоритму використовувались методи лінійного програмування.

Об'єкт дослідження: електроенергетичні процеси в локальних енергосистемах, що працюють із відновлюваними джерелами енергії, акумуляторними системами зберігання енергії (BESS) та технологіями управління навантаженням.

Предмет дослідження: локальні енергосистеми з акумуляторними системами зберігання енергії в якості технології управління навантаженням

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Акумуляторні системи зберігання енергії (BESS) є ефективним засобом для зниження пікових навантажень і стабілізації коливань енергоспоживання, викликаних динамічними змінами у виробництві енергії. Комерційні та промислові споживачі електроенергії часто демонструють нерегулярний режим споживання протягом дня, що призводить до значних

пікових навантажень. Ці піки суттєво впливають на вартість електроенергії. Методи зниження пікових навантажень спрямовані на зменшення витрат для споживачів шляхом зниження пікових значень навантаження.

Зниження пікових навантажень (peak shaving) стало важливим підходом для управління піковим попитом, покращення надійності, ефективності та стійкості сучасних енергосистем [5]. Профілі навантаження виступають ключовими інструментами для розробки ефективних стратегій зниження пікових навантажень, дозволяючи визначати періоди пікових навантажень, оптимізувати графіки споживання енергії та впроваджувати ініціативи з управління попитом. Аналіз цих профілів дозволяє організаціям стратегічно впроваджувати перенесення навантаження (load shifting), оцінювати розмір систем зберігання енергії та інтегрувати відновлювані джерела енергії для зменшення пікового попиту у критичні періоди. Крім того, профілі навантаження сприяють прийняттю рішень на основі даних, розробці оптимальних алгоритмів управління та оцінці ефективності стратегій з часом, що в кінцевому підсумку підвищує енергоефективність і стабільність мережі [5].

Перенесення навантаження (Load shifting) передбачає перерозподіл споживання енергії з пікових періодів на години позапікового навантаження. Такий підхід допомагає зрівноважити попит і пропозицію, збільшуючи споживання енергії у періоди низького попиту або високого виробництва відновлюваної енергії, що часто називають «заповненням долин» (valley filling). Перенесення навантаження можна реалізувати за допомогою таких стратегій, як перепланування виробничих процесів, коли графіки роботи машин або процесів адаптуються для оптимізації енергоспоживання. Завдяки вирівнюванню кривої навантаження, Load shifting покращує стабільність мережі, знижує витрати на енергію та сприяє інтеграції відновлюваних джерел енергії [6].

Перенесення навантаження не завжди є вигідним, якщо застосовується виключно для отримання вигоди від низьких цін на електроенергію у позапікові години. Проте з інтеграцією акумуляторних систем зберігання енергії (BESS) перенесення навантаження завжди демонструє ефективність. BESS дозволяє кінцевим споживачам розділяти час споживання енергії та момент її оплати, забезпечуючи більшу гнучкість. Промислові та комерційні споживачі, які мають на місці акумуляторні системи зберігання енергії, можуть скористатися перенесенням навантаження без порушення звичайних бізнес-процесів. Наприклад, виробниче підприємство може зменшити свої витрати на електроенергію, заряджаючи акумулятор у нічний час у позапікові години та використовуючи накопичену енергію вдень, коли ціни на ринку електроенергії досягають піку.

Вирівнювання навантаження (Load leveling) за допомогою систем зберігання енергії полягає у згладжуванні коливань попиту на електроенергію, перетворюючи типову криву “valley-shape” у більш стабільний профіль. Це досягається шляхом накопичення енергії під час низького попиту та її подачі в мережу під час високого попиту, ефективно балансує динаміку попиту та пропозиції [6].

Обмеження навантаження (Load curtailment) або його зниження може мати дві основні форми: для забезпечення потужності або енергії [6]. Обмеження для забезпечення потужності є аварійним заходом, який використовують незалежні системні оператори (ISO) для гарантування надійної роботи енергосистем. Шляхом зменшення частини навантаження ISO можуть уникнути катастрофічних подій, таких як повне відключення електроенергії. Цей тип обмеження інтегрується у енергетичні моделі через поняття ненаданої енергії, яке враховується у функціях цільової оптимізації за допомогою значення втраченої потужності (Value of Lost Load, VoLL) – показника, що відображає цінність ненаданої енергії для споживачів.

Обмеження енергії, навпаки, є частиною механізмів реагування на попит (Demand Response, DR) на енергетичних ринках, коли попит коригується залежно від змін цін та операційних обмежень [6]. DR зазвичай застосовується у енергоємних галузях, де процеси з високим коефіцієнтом використання можуть тимчасово знижувати свій попит. Така форма гнучкого попиту дозволяє контролювати зменшення енергоспоживання у певні періоди, сприяючи стабільності ринку.

Основна мета впровадження систем зберігання енергії (ESS) полягає у забезпеченні максимальної ефективності використання відновлюваних джерел енергії для задоволення потреб споживачів. ESS дозволяють уникнути втрат виробленої енергії під час перевищення виробництва над попитом та забезпечити безперервність постачання у випадках недостатнього виробництва. Завдяки цим системам забезпечується балансування попиту та пропозиції, підвищується стабільність мережі та посилюється роль відновлюваних джерел у загальному енергетичному балансі [1–3].

Метою оптимальної роботи ESS є максимізація економічної вигоди від операцій зниження пікових навантажень. Це досягається шляхом врахування таких факторів, як обсяг зниженої потужності, кількість циклів батареї на рік, термін служби батареї та плата за пікову потужність. Оптимальна траєкторія подій заряджання і розряджання визначається за допомогою динамічного програмування, що дозволяє забезпечити як зменшення витрат, так і підвищення загальної ефективності енергосистеми [7]. Такий підхід забезпечує сталий розвиток енергетичної

інфраструктури та інтеграцію відновлюваних джерел енергії, створюючи умови для економічно вигідного та екологічно сталого використання енергетичних ресурсів.

Для підвищення ефективності зниження пікових навантажень та покращення якості регулювання енергоспоживання, акумуляторні системи зберігання енергії (BESS) відіграють ключову роль, доповнюючи енергогенеруючі установки та задовольняючи різноманітні потреби багатфункціонального регулювання [8]. Акумуляторні системи зберігання енергії (BESS) здебільшого отримують основний дохід через участь у регульованих ринках енергії та допоміжних послуг. Водночас вони мають значний потенціал для підтримки операторів розподільчих мереж та їхніх споживачів.

Основною метою зниження пікових навантажень є уникнення необхідності встановлення додаткової потужності для задоволення пікового попиту при значних коливаннях навантаження. У випадках, коли пікове навантаження збігається з піковими цінами на електроенергію, зниження пікових навантажень також сприяє зменшенню витрат на електроенергію.

Оператори мережі оплачують не лише загальне споживання електроенергії, а й максимальне пікове навантаження від вищого рівня мережі [1]. Максимальний тариф за попит зазвичай застосовується до пікової потужності в місячному профілі навантаження, що робить зменшення пікових навантажень пріоритетом для цих зацікавлених сторін. У статті представлено підхід до зниження пікових навантажень у розподільчих мережах із використанням акумуляторних систем зберігання енергії (BESS). Зниження пікових навантажень, тобто процес зменшення споживання електроенергії під час періодів високого попиту, потребує стратегій, стійких до різних рівнів похибки прогнозування навантаження. Висока неточність у прогнозах може значно знизити ефективність таких стратегій [1]. Прогнозування навантаження є невід’ємною частиною методів зниження пікових навантажень для стаціонарних BESS у розподільчих мережах. У цьому контексті для щоденного прогнозування навантаження досліджуються традиційні статистичні та авторегресивні моделі, а також методи машинного навчання.

Отже, зниження пікових навантажень за допомогою акумуляторних систем зберігання енергії (BESS) є ключовим інструментом стабілізації мережі. У позапікові періоди або під час надлишкового виробництва відновлюваної енергії BESS заряджається, накопичуючи надлишкову енергію. Під час пікових періодів батареї розряджаються, компенсуючи піковий попит на електроенергію. Такий підхід дозволяє вирівнювати криву попиту, зменшувати витрати на електроенергію та знижувати навантаження на мережу.

BESS також підвищують стабільність та надійність енергопостачання, сприяючи інтеграції відновлюваних джерел енергії в енергетичний баланс. Це робить їх ключовим елементом сучасних стратегій управління попитом і пропозицією в енергосистемах [5].

Time of Use (ToU) як стратегія динамічного ціноутворення. Time of Use (ToU) є однією з форм динамічного ціноутворення, за якої тарифи на електроенергію змінюються залежно від часу доби та рівня споживання. У межах цієї схеми в періоди високого попиту (пікові години) тарифи зростають, а в періоди низького попиту (позапікові години) знижуються. Такий підхід стимулює споживачів змінювати графік споживання енергії, переносячи його на години з нижчими тарифами, що сприяє вирівнюванню навантаження на мережу [9].

Піковий попит на електроенергію є постійним викликом для енергомереж, адже він може збільшувати ризики аварій, підвищувати витрати та мати негативні екологічні наслідки. У пікові години мережі змушені використовувати менш ефективні та дорожчі генераційні потужності для задоволення попиту, що призводить до різкого зростання оптових цін на електроенергію. У деяких випадках це також супроводжується збільшенням викидів CO₂ через активне використання генераторів на викопному паливі [9].

Таким чином, впровадження Time of Use допомагає зменшити навантаження на мережу у пікові години, оптимізувати споживання енергії та знизити негативний вплив на довкілля завдяки більш раціональному використанню енергоресурсів.

Інтелектуальні мережі та технології IoT у підвищенні ефективності енергосистем. Технології Smart Grid та IoT значно підвищують ефективність, надійність та гнучкість роботи енергомережі. Вони використовують дані в реальному часі, автоматизовані системи управління та передові засоби зв'язку для моніторингу й управління потоками електроенергії. Це дозволяє покращити стабільність мережі та забезпечити ефективне балансування навантажень. Завдяки точному прогнозуванню та аналізу, оператори можуть краще планувати коливання попиту, особливо з урахуванням змінної генерації відновлюваних джерел, таких як сонячна та вітрова енергія [10].

Передові системи управління мережею використовують складні програмні засоби та алгоритми для оптимізації розподілу електроенергії. Вони забезпечують баланс між попитом і пропозицією в реальному часі, ефективно розподіляють ресурси та інтегрують відновлювані джерела енергії. Це дозволяє підтримувати стабільність роботи мережі, мінімізуючи ризики перевантаження або дефіциту [10–12]. Інтелектуальні мережі також створюють умови для активної участі споживачів у енергетичних процесах, дозволяючи їм адаптувати своє споживання залежно від тарифів і рівня доступності енергії. Такі технології

є ключовими для майбутнього енергосистем, які орієнтовані на інтеграцію відновлюваних джерел енергії та забезпечення сталого розвитку.

Формування оптимізаційних задач у локальних енергосистемах (ЛЕС) повинно враховувати обмінні процеси, які залежать від ролі та функцій різних видів навантажень. Зокрема, слід зважати на вимоги до графіків генерації та споживання електроенергії, їх характеристики та показники, які є важливими елементами оптимізації.

Локальні енергосистеми (ЛЕС), оснащені зарядними станціями та накопичувачами енергії, стають критично важливими елементами сучасної енергетики. У загальному випадку струм, який споживається зарядною станцією електромобілів є змінним у часі, тобто $i_{\text{зар}}(t) - \text{var}$. Можемо визначити середнє значення струму ICER, що споживається зарядною станцією електромобілів:

$$I_{\text{сеп}} = \int_0^T i_{\text{зар}}(t) dt \quad (1)$$

Будемо вважати, що $i_{\text{зар}}(t) = I_M$, де $t \in \Delta t$.

Втрати електроенергії на активному опорі R за інтервал часу T визначаються із виразу:

$$W_{\text{втр}} = I^2 R T \quad (2)$$

При цьому можемо записати наступні співвідношення:

$$I_{\text{сеп}} T = Q, \quad (3)$$

$$I_M \Delta t = Q, \quad (4)$$

$$W_{\text{втр}} = R(Q / \Delta t)^2 \Delta t = RQ^2 T / \delta, \quad (5)$$

де $\delta = \Delta t / T$.

Під час формулювання оптимізаційної задачі на початкових етапах слід використовувати економічні та технічні складові як критерії оптимізації. Водночас соціальні та екологічні обмеження, такі як екологічна прийнятність чи затребуваність, слугують ключовими обмеженнями для розв'язання задачі [13]. Постає необхідність уточнення компонентів оптимізаційної задачі, які, наприклад, можна врахувати через показник потужності Фризе. Розглядаючи енергетично стабільні стани системи протягом періоду її роботи T (наприклад, $T = 24$ години), що поділений на інтервали часу тривалістю t_i із кількістю nЕНС, можна перейти до балансу енергії.

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{n_{\text{ЕНС}}} W_{\text{СБі}}(t) \pm \sum_{i=1}^{n_{\text{ЕНС}}} W_{\text{Мі}}(t) \pm \sum_{i=1}^{n_{\text{ЕНС}}} W_{\text{АБі}}(t) &= \sum_{i=1}^{n_{\text{ЕНС}}} W_{\text{Ні}}(t); \\ \sum_{i=1}^{n_{\text{ЕНС}}} W_{\text{СБі}}(t) &= \sum_{i=1}^{n_{\text{ЕНС}}} W_{\text{Ні}}(t), \sum_{i=1}^{n_{\text{ЕНС}}} W_{\text{Мі}}(t) = \\ &= \sum_{i=1}^{n_{\text{ЕНС}}} W_{\text{Ні}}(t), \sum_{i=1}^{n_{\text{ЕНС}}} W_{\text{АБі}}(t) = \sum_{i=1}^{n_{\text{ЕНС}}} W_{\text{Ні}}(t); \end{aligned} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^{\eta_{\text{ЕНС}}} W_{\text{CBi}}(t) \pm \sum_{i=1}^{\eta_{\text{ЕНС}}} W_{\text{Mi}}(t) = \sum_{i=1}^{\eta_{\text{ЕНС}}} W_{\text{Hi}}(t);$$

$$\sum_{i=1}^{\eta_{\text{ЕНС}}} W_{\text{CBi}}(t) \pm \sum_{i=1}^{\eta_{\text{ЕНС}}} W_{\text{ABi}}(t) = \sum_{i=1}^{\eta_{\text{ЕНС}}} W_{\text{Hi}}(t).$$

З урахуванням вартості електроенергії C при її генерації та споживанні, що визначається множиною тарифів $\{C_1, \dots, C_j, \dots, C_{nT}\}$ кількість елементів якої дорівнює nT , та тарифного плану, можна перейти до оцінки вартості енергетичних процесів у системі. Це дозволяє сформулювати вартісні показники, які є основою для оптимізаційного моделювання:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{\eta_{\text{ЕНС}}} W_{\text{CBj}}(t)C_j \pm \sum_{i=1}^{\eta_{\text{ЕНС}}} W_{\text{Mj}}(t)C_j \pm \sum_{i=1}^{\eta_{\text{ЕНС}}} W_{\text{ABj}}(t)C_j &= \\ &= \sum_{i=1}^{\eta_{\text{ЕНС}}} W_{\text{Hj}}(t)C_j; \\ \sum_{i=1}^{\eta_{\text{ЕНС}}} W_{\text{CBj}}(t)C_j &= \sum_{i=1}^{\eta_{\text{ЕНС}}} W_{\text{Hj}}(t)C_j, \sum_{i=1}^{\eta_{\text{ЕНС}}} W_{\text{Mj}}(t)C_j = \\ &= \sum_{i=1}^{\eta_{\text{ЕНС}}} W_{\text{Hj}}(t)C_j, \sum_{i=1}^{\eta_{\text{ЕНС}}} W_{\text{ABj}}(t)C_j = \sum_{i=1}^{\eta_{\text{ЕНС}}} W_{\text{Hj}}(t)C_j; \quad (7) \\ \sum_{i=1}^{\eta_{\text{ЕНС}}} W_{\text{CBj}}(t)C_j \pm \sum_{i=1}^{\eta_{\text{ЕНС}}} W_{\text{Mj}}(t)C_j &= \sum_{i=1}^{\eta_{\text{ЕНС}}} W_{\text{Hj}}(t)C_j; \\ \sum_{i=1}^{\eta_{\text{ЕНС}}} W_{\text{CBj}}(t)C_j \pm \sum_{i=1}^{\eta_{\text{ЕНС}}} W_{\text{ABj}}(t)C_j &= \sum_{i=1}^{\eta_{\text{ЕНС}}} W_{\text{Hj}}(t)C_j. \end{aligned}$$

На основі наведених співвідношень можна виділити такі оптимізаційні задачі: максимальна генерація енергії в мережу (за рахунок відновлюваних джерел енергії, ВДЕ); мінімізація споживання енергії від мережі (за відсутності генерації від ВДЕ); максимізація власного споживання енергії (за умов генерації від ВДЕ); мінімізація витрат на оплату електроенергії (за наявності чи відсутності ВДЕ); максимізація доходу від власної генерації з урахуванням енергетичних потреб.

Розглянемо режими роботи ЛЕС, яка складається з сонячних генераторів та систем зберігання без під'єднання до централізованої мережі щодо змінення навантаження при мінімізації витрат на оплату електроенергії.

При використанні програм реагування на попит врахуємо, що є три форми реагування на попит:

- дрібномасштабне реагування на попит – окремі домогосподарства та підприємства зменшують попит під час піків, скоординованим або інтегрованим чином за допомогою технологій керування попитом;
- масштабне реагування на попит – великі споживачі електроенергії зменшують попит під час піків;
- вимушене реагування на попит – споживачі змушені зменшувати свій попит на мережу протягом періодів, коли попит перевищує пропозицію. Ця

форма реагування на попит є небажаною та пов'язана з найбільшими пов'язаними з нею витратами для всієї системи.

Крім того при застосуванні програм реагування на попит слід виділити гнучкі навантаження, які можна додатково розділити на перервні та безперервні навантаження. Переривання безперервних навантажень можуть виникнути економічні збитки, якщо такі прилади перервати до завершення повного робочого циклу.

Цільова функція окремого споживача є мінімізація вартості електричної енергії:

$$C_i = f(P_i, t) \rightarrow \min, \quad (8)$$

де C_i – вартість електричної енергії окремого споживача, P_i – потужність окремого споживача, t – інтервал часу доби.

Розроблено методику та на її основі алгоритм керування для ЛЕС в острівному режимі, яка має у складі фотоелектричну систему та декілька елементів системи зберігання розрахованих на різну потужність для використання однієї з них для задоволення пікового навантаження

$$\Delta P = P_{pv} - P_n, \quad (9)$$

де P_{pv} – потужність фотоелектричної системи, P_n – потужність навантаження.

Якщо $\Delta P \geq 0$, то надлишок енергії від відновлюваних джерел використовується для зарядки BESS, яка складається з двох систем зберігання:

– BESS1 – система зберігання, яка приймає участь для зменшення пікового навантаження, вона заряджається першочергове, та тримає необхідний заряд для покриття пікового навантаження. Необхідний рівень заряду для покриття пікового навантаження розраховується за прогнозованими графіками навантажень та сонячної інсоляції на добу наперед.

– BESS2 – система зберігання, яка приймає участь в зберіганні надлишків сонячної енергії та покриває потреби споживача.

Якщо $\Delta P \geq 0$ (сонячної генерації недостатньо для покриття навантаження), то навантаження живиться від BESS2. Якщо потужностей BESS2 недостатньо, то у оператора або агрегатора є декілька шляхів:

- якщо це ділянка часу яка є піковою, задіювати BESS1;
- якщо це позапікові ділянки і вже були пікові, а потужність BESS1 ще є, то можливо використання цієї потужності;
- вимушене реагування на попит.

Для застосування такої методики та алгоритму необхідно аналізувати прогнозовані графіки споживання та вироблення енергії на добу наперед.

На основі прогнозованих графік визначають:

- необхідний рівень заряду BESS1 для покриття пікового навантаження;

– пропозиції споживачам щодо перенесення їх навантаження на інші години стимулюючи їх фінансово до цього.

Пропонується оцінювати економічну ефективності впровадження програм реагування на попит за допомогою коефіцієнта ефективності:

$$k_C = \frac{C - C'}{C} 100\%, \quad (10)$$

де C' – вартість електроенергії після застосування програм реагування на попит, C – вартість до застосування програм реагування.

Коефіцієнт $k_{пер}$ на який змінено навантаження на кожному інтервалі, дорівнює

$$k_{пер} = \frac{P_{пер+} - P_{пер-}}{P}, \quad (11)$$

де $P_{пер+}$ – збільшення потужності навантаження на i -м інтервалі часу, $P_{пер-}$ – зменшення потужності навантаження.

$k_{пер} = 1$ якщо все навантаження було перенесено, 0 якщо навантаження не переносилось. Позитивне значення якщо на ділянках куди було перенесено, та від'ємне там звідки перенесено.

Споживач встановлює свої можливості щодо перенесення навантаження за допомогою цього коефіцієнта. Споживачі можуть використати декілька різних реакцій на програми: зменшити споживання електроенергії в години пік без будь-якого переходу до іншого часу; або можуть перенести споживання електроенергії з пікових годин на інші.

Запропонований підхід припускає, що споживачі не будуть зменшувати споживання електроенергії (загальне споживання енергії до та після виконання програми залишається незмінним), а хочуть заощадити гроші шляхом зміни моделі споживання.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Результати дослідження показали, що впровадження технологій управління навантаженнями у поєднанні з акумуляторними системами зберігання енергії (BESS) забезпечує суттєві переваги для стабілізації енергосистем. Аналіз сучасних підходів

продемонстрував, що інтеграція цих технологій сприяє зниженню пікових навантажень, оптимізації використання відновлюваних джерел енергії.

Запропонований алгоритм для локальних систем має наступні переваги:

- максимальне використання відновлюваних джерел енергії;
- наявність декількох систем зберігання, надає можливості використання однієї з них для покриття пікового навантаження;
- прогнозування графіків споживання та генерації;
- розрахунок вартості електроенергії;
- оптимізація споживання за допомогою технологій управління навантаженням.

Таким чином, отримані теоретичні викладки підтверджують, що комбіноване використання програм реагування на попит та систем зберігання сприяє підвищенню енергоефективності та інтеграції відновлюваних джерел енергії.

ВИСНОВКИ

Технології управління навантаженням, значно сприяють оптимізації енергоспоживання, підвищенню стабільності мережі та інтеграції відновлюваних джерел енергії. Вони дозволяють зменшити пікові навантаження, знизити експлуатаційні витрати та викиди CO₂, забезпечуючи ефективне вирівнювання попиту та пропозиції. Основними перевагами є економічна вигода, покращення енергоефективності та гнучкість у використанні ВДЕ. Однак, ці технології стикаються з викликами, такими як високі початкові витрати, технічна складність та соціальні бар'єри у зміні звичок споживачів.

Розроблено методику та алгоритм керування для ЛЕС, яка має у складі фотоелектричну систему та декілька елементів системи зберігання, використовуючи одну з них для забезпечення пікових навантажень, що дозволяє оптимізувати графіки споживання.

Подальші дослідження повинні зосереджуватися на вдосконаленні алгоритмів прогнозування, зниженні вартості систем зберігання енергії та розробці економічно ефективних рішень для інтеграції ВДЕ.

REFERENCES

- [1] Majchrzak, H., & Koziol, M. (2021). Analysis of Various Options for Balancing Power Systems' Peak Load. *Energies*, № 14(2), pp. 513. <https://doi.org/10.3390/en14020513>
- [2] Liu, Y., & Peng, M. (2024). Research on peak load shifting for hybrid energy system with wind power and energy storage based on situation awareness. *Journal of Energy Storage*, № 82, pp. 110472. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110472>
- [3] Rana, M. M., Atef, M., Sarkar, M. R., Uddin, M., & Shafullah, G. (2022). A review on peak load shaving in microgrid – Potential benefits, challenges, and future trend. *Energies*, № 15(6), pp. 22–78. <https://doi.org/10.3390/en15062278>
- [4] Bielokha, H., & Sychova, V. (2023). Optimization of electric load schedules by an aggregator in local power systems [Optymizatsiia hrafikiv elektrychnoho navantazhennia ahrehatorom v lokalnykh elektroenerhetychnykh systemakh]. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*, № 66. <https://doi.org/publishing2023.66.084> [in Ukrainian]
- [5] Syed, K. T. C., & Kolhe, M. L. (2023). A review on peak shaving techniques for smart grids. *AIMS Energy*, № 11(4), pp. 723–752. <https://doi.org/10.3934/energy.2023036>
- [6] Morales-España, G., Martínez-Gordón, R., & Sijm, J. (2022). Classifying and modelling demand response in power systems. *Energy*, no 242, pp. 122–544. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122544>

- [7] Kucevic, D., Semmelmann, L., Collath, N., Jossen, A., & Hesse, H. (2021). Peak shaving with battery energy storage systems in distribution grids: A novel approach to reduce local and global peak loads. *Electricity*, № 2(4), pp. 573–589. <https://doi.org/10.3390/electricity2040033>
- [8] Zhu, J., Cui, X., & Ni, W. (2022). Model predictive control-based strategy for battery energy storage system integrated power plant meeting deep load peak shaving demand. *Journal of Energy Storage*, № 46, pp 103–811. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103811>
- [9] Yuniarto, H. A., et al. (2024). Customer's response to dynamic pricing in utility energy tariff quality and reliability with the time of use: An empirical case study of household electricity customers in Indonesia. *Heliyon*, № 10(11), pp. e31415. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31415>
- [10] Biswal, B., Deb, S., Datta, S., Ustun, T. S., & Cali, U. (2024). Review on smart grid load forecasting for smart energy management using machine learning and deep learning techniques. *Energy Reports*, № 12, pp. 3654–3670. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.09.056>
- [11] Meiers, J., & Frey, G. (2024). A case study of the use of smart EV charging for peak shaving in local area grids. *Energies*, № 17(1), pp. 47. <https://doi.org/10.3390/en17010047>
- [12] Denysiuk, S., Bielokha, H., & Bohoiko, I. (2024). Perspectives on the application of multi-stage charging methods for lithium-ion batteries. [Perspektyvy zastosuvannya bahatostupeneykh metodiv zariadzhannia litii-ionnykh akumuliatoriv.] In *Perspectives of Contemporary Science: Theory and Practice. Proceedings of the 11th International Scientific and Practical Conference*, pp. 314–319 [in Ukrainian]
- [13] Denysiuk, S. P., & Lysyi, V. V. (2023). Analysis of energy exchange processes during balancing modes of energy supply systems with distributed generation [Analiz protsesiv enerhoobminu pry balansuvanni rezhymiv system enerhozabezpechennia z rozoseredzhenoiu heneratsiieiu]. *Enerhetyka: Ekonomika, Tekhnolohii, Ekolohiia*, № 73(3), pp. 7–22. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2023.289648> [in Ukrainian]

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Majchrzak, H., & Koziół, M. (2021). Analysis of Various Options for Balancing Power Systems' Peak Load. *Energies*, № 14(2), pp. 513. <https://doi.org/10.3390/en14020513>
- [2] Liu, Y., & Peng, M. (2024). Research on peak load shifting for hybrid energy system with wind power and energy storage based on situation awareness. *Journal of Energy Storage*, № 82, pp. 110472. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110472>
- [3] Rana, M. M., Atef, M., Sarkar, M. R., Uddin, M., & Shafiullah, G. (2022). A review on peak load shaving in microgrid – Potential benefits, challenges, and future trend. *Energies*, № 15(6), pp. 2278. <https://doi.org/10.3390/en15062278>
- [4] Белоха Г., Сичова В. (2023) Оптимізація графіків електричного навантаження агрегатором в локальних електроенергетичних системах. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. № 66. DOI: <https://doi.org/publishing2023.66.084>
- [5] Syed, K. T. C., & Kolhe, M. L. (2023). A review on peak shaving techniques for smart grids. *AIMS Energy*, № 11(4), pp. 723–752. <https://doi.org/10.3934/energy.2023036>
- [6] Morales-España, G., Martínez-Gordón, R., & Sijm, J. (2022). Classifying and modelling demand response in power systems. *Energy*, № 242, pp. 122–544. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122544>
- [7] Kucevic, D., Semmelmann, L., Collath, N., Jossen, A., & Hesse, H. (2021). Peak shaving with battery energy storage systems in distribution grids: A novel approach to reduce local and global peak loads. *Electricity*, № 2(4), pp. 573–589. <https://doi.org/10.3390/electricity2040033>
- [8] Zhu, J., Cui, X., & Ni, W. (2022). Model predictive control-based strategy for battery energy storage system integrated power plant meeting deep load peak shaving demand. *Journal of Energy Storage*, № 46, pp 103–811. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103811>
- [9] Yuniarto, H. A., et al. (2024). Customer's response to dynamic pricing in utility energy tariff quality and reliability with the time of use: An empirical case study of household electricity customers in Indonesia. *Heliyon*, № 10(11), pp. e31415. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31415>
- [10] Biswal, B., Deb, S., Datta, S., Ustun, T. S., & Cali, U. (2024). Review on smart grid load forecasting for smart energy management using machine learning and deep learning techniques. *Energy Reports*, № 12, pp. 3654–3670. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.09.056>
- [11] Meiers, J., & Frey, G. (2024). A case study of the use of smart EV charging for peak shaving in local area grids. *Energies*, № 17(1), 47. <https://doi.org/10.3390/en17010047>
- [12] Denysiuk, S., Bielokha, H., & Bohoiko, I. (2024). Perspectives on the application of multi-stage charging methods for lithium-ion batteries. In *Perspectives of Contemporary Science: Theory and Practice. Proceedings of the 11th International Scientific and Practical Conference*, pp. 314–319. SPC “Sci-conf.com.ua”. [in Ukrainian]
- [13] Денисюк, С. П., Лисий В.В. (2023) Аналіз процесів енергообміну при балансуванні режимів систем енергозабезпечення з розосередженою генерацією *Енергетика: економіка, технології, екологія: науковий журнал*. № 3 (73). С. 7–22. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2023.289648>

© Денисюк С. П., Белоха Г. С., Богойко І. І.

Дата надходження статті до редакції: 20.05.2025

Дата затвердження статті до друку: 02.06.2025