

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

UDC 620.9:504

Tetiana Kryvomaz, Doctor of Technical Sciences, Candidate of Biological Sciences, Professor of the Department of Environmental Protection Technologies and Labor Protection
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7426-8745> *e-mail*: ecol@i.ua

Roman Hamotskyi, PhD student
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5469-8606> *e-mail*: roman.gamotskii@gmail.com

Artem Tsyba, PhD student
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-4532-0982> *e-mail*: absqueee@gmail.com

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

DIVERSIFICATION STRATEGIES OF ENERGY SUPPLY RISKS FOR MULTI-STORY RESIDENTIAL BUILDINGS IN WAR CONDITIONS

***Abstract.** Targeted large-scale attacks on Ukraine's energy infrastructure have led to massive outages and increased the risk of power supply. The total damage to facilities that provide electricity generation, transmission, and distribution is estimated at \$8 billion. High-rise residential urban buildings have become particularly vulnerable, where prolonged power outages can have catastrophic consequences. Powering high-rise residential buildings in wartime is achieved by combining various risk diversification strategies that take into account periodic power outages, the possibility of using alternative sources, and the installation of energy storage systems. The use of renewable energy sources for local generation ensures power supply during outages and reduces dependence on the centralized power system, but the specific technical requirements and operating parameters of heat pumps, wind turbines, and solar panels significantly limit their use in dense urban areas. Installing solar photovoltaic panels in multi-storey city buildings does not completely solve the problem of energy supply in winter, when their efficiency can drop to 10%, however, during summer power outages, solar energy can provide certain energy needs of residents of residential complexes. To stabilize the power system in extreme war conditions, it is advisable to locally apply maneuverable gas generation by implementing balancing technologies with a large range of regulation of various loads and use pickers for emergency situations. One of the key technical requirements for generating units is their ability to start/stop at least 4 times a day and reach maximum power within 15 minutes from the moment of switching on. Integration of centralized power supply, renewable energy sources, pickers and balancers is possible under the conditions of using energy storage systems that ensure stability and reliability of supply and allow for effective management of energy resources. The use of demand management technologies with intelligent*

control allows for optimal use of available energy, avoiding peak loads, reducing electricity costs, and increasing energy independence and reliability of energy supply for multi-apartment residential buildings. Decentralization is formed at the generation level with the strengthening of the balancing segment to ensure the agility of the Ukrainian power system, i.e. increasing the ability to produce as much electricity as consumers need at a given moment.

Key words: energy supply, high-rise buildings, diversification, renewable energy, batteries, flexible generation.

Т.І. Кривомаз, Р.О. Гамоцький, А.М. Циба

Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ, Україна

СТРАТЕГІЇ ДИВЕРСИФІКАЦІЇ РИЗИКІВ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БАГАТОПОВЕРХОВИХ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ В УМОВАХ ВІЙНИ

Анотація. Цілеспрямовані масштабні атаки на об'єкти енергетичної інфраструктури України призвели до масових відключень та збільшили ризики збоїв у постачанні електроенергії. Оцінка загальної суми збитків об'єктів, що забезпечують виробництво, передачу та розподіл електроенергії, наближається до \$8 млрд. Особливо вразливими стали житлові багатоповерхівки міст, де тривале відключення електроенергії має катастрофічні наслідки. Енергозабезпечення багатоповерхових житлових будівель в умовах війни досягається шляхом поєднання різних стратегій диверсифікації ризиків, що враховують періодичні відключення централізованого електропостачання, можливість використання альтернативних джерел та встановлення систем накопичення енергії. Використання відновлюваних джерел енергії для локальної генерації забезпечує енергопостачання під час відключень та знижує залежність від централізованої енергосистеми, проте специфічні технічні вимоги та параметри функціонування теплових насосів, вітряків та сонячних панелей значно обмежують їх використання в умовах щільної міської забудови. Встановлення сонячних фотоелектричних панелей у багатоповерхових міських будинках не вирішує повністю проблему енергозабезпечення взимку, коли їх ефективність може знижуватися до 10%, однак під час літніх знеструмлень сонячна енергія може забезпечити певні енергетичні потреби мешканців житлових комплексів. Для стабілізації енергосистеми в екстремальних умовах війни доцільно локально застосовувати маневрену газову генерацію шляхом впровадження технологій балансування з великим діапазоном регулювання різних навантажень і використовувати пікери для аварійних ситуацій. Однією з ключових технічних вимог до генеруючих одиниць є їхня здатність щонайменше 4 рази протягом доби забезпечувати пуск/зупинку та виходити на максимальну потужність за 15 хвилин від моменту включення. Інтеграція централізованого електропостачання, відновлюваних джерел енергії, пікерів та балансерів можлива за умов використання систем накопичення енергії, що забезпечують стабільність і надійність постачання та дозволяють ефективно управляти енергоресурсами. Застосування технологій керування поптом з інтелектуальним управлінням дозволяє оптимально використовувати доступну енергію, уникати пікових навантажень, зменшувати витрати на електроенергію, а також підвищувати енергонезалежність та надійність енергопостачання багатоквартирних житлових будівель. Децентралізація формується на рівні генерації з посиленням балансувального сегменту для

забезпечення маневреності української енергосистеми, тобто підвищення спроможності виробляти стільки електрики, скільки потрібно споживачам в певний момент.

Ключові слова: енергопостачання, багатоповерхові будинки, диверсифікація, відновлювана енергетика, акумулятори, маневрена генерація.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.1.7-21>

Вступ

Масовані атаки на енергетичну інфраструктуру України призвели до руйнування об'єктів виробництва та розподілу електроенергії, спричинили масові відключення та суттєво збільшили ризики збоїв у енергопостачанні. Попередня оцінка загальної суми збитків енергетичного сектору наближається до \$8 млрд, і ця сума зростає з кожним днем війни [6]. Особливо вразливими стали житлові багатоповерхівки, де тривалі відключення позбавляють мирних жителів електроенергії, опалення, водопостачання та інших життєво необхідних комунальних послуг.

В умовах постійних загроз ударів агресора по енергетичній системі України необхідно децентралізувати генерацію, щоб мережа продовжувала працювати навіть при пошкодженні магістральних ліній і систем централізованого електропостачання. Для забезпечення надійності та стійкості енергопостачання багатоповерхових житлових будинків можна використати кілька стратегій диверсифікації, що враховують різноманіття енергопостачання, генерацію на місці, зберігання енергії та керування попитом.

Локальне виробництво енергії з можливістю зберігання в акумуляторах дозволяє оптимально використовувати власні ресурси та мінімізувати залежність від зовнішніх постачальників. Використання відновлюваних джерел підвищує енергетичну незалежність та екологічність, однак потребує значних початкових витрат на встановлення, спеціалізоване технічне обслуговування і до того ж обмежене щільністю міської забудови. Впровадження систем накопичення для збереження надлишкової енергії та її використання під час пікових навантажень знижує потреби в постійному зовнішньому енергопостачанні та забезпечує резерв на випадок аварійних ситуацій. Проте існують певні обмеження щодо тривалості зберігання енергії та деградації батарей з часом. Система накопичення енергії з інтелектуальним управлінням дозволяє уникнути пікових навантажень і оптимально використовувати доступну енергію, що особливо важливо для житлових комплексів з високим попитом. Використання технологій керування попитом знижує енергоспоживання в пікові години, зменшує витрати на електроенергію, оптимізує використання енергії, підтримує екологічну стабільність.

Оптимальне енергозабезпечення для багатоповерхового житлового будинку досягається за допомогою різних стратегій та їх поєднання, що враховують особливості інфраструктури, кліматичні умови та потреби мешканців. Крім підвищення стійкості до руйнівних атак, децентралізована генерація сприятиме зростанню частки чистих джерел енергії в енергетичному балансі країни, що сприятиме залученню міжнародного фінансування в узгодженні з євроінтеграційними планами розвитку України.

Постановка завдання

Метою цього дослідження є пошук рішень для диверсифікації ризиків енергопостачання житлових міських багатоповерхівок в умовах війни. У відповідності із поставленою метою сформульовано наступні завдання:

- проаналізувати структуру енергогенерації України;
- дослідити можливості децентралізованої генерації житлових масивів;
- розглянути специфіку маневреної газової генерації;
- порівняти переваги і недоліки відновлюваних джерел енергії для багатоквартирних міських будинків;
- з'ясувати роль систем накопичення енергії для інтеграції різних способів енергопостачання;
- розробити схему модуля диверсифікованої системи енергопостачання та управління попитом багатоповерхових житлових будинків.

Результати досліджень

Об'єднана енергетична система України будувалася як централізована структура з великими вузловими електростанціями та системою передачі електричної енергії з лініями високих класів напруг. За даними НЕК «Укренерго», до початку повномасштабного вторгнення Україна мала наступну структуру енергогенерації: атомні електростанції (АЕС) забезпечували близько 50-55% усієї електроенергії, теплові електростанції (ТЕС) – 30-35%, гідроелектростанції (ГЕС) – 6-8%, відновлювані джерела енергії (ВДЕ) – 10-12% (рис. 1) [7]. В умовах війни така конфігурація виявилась вразливою до цілеспрямованих ворожих атак на енергосистему, оскільки практично неможливо забезпечити захист великих електростанцій.

На різних етапах було розроблено низку сценаріїв розвитку об'єднаної енергетичної системи України. Зокрема передбачалось, що електроенергія з відновлюваних джерел стане базовою та буде домінувати за обсягами вже з середини 2030-х років, а до 2050 року досягне 83%, тобто потужності сонячних електростанцій становитимуть 44 ГВт, а вітрових – 35 ГВт. При цьому на маневрені газові станції та установки зберігання енергії відводилось по 18 ГВт встановленої потужності [4].

В умовах війни централізована система енергопостачання виявилась вразливою, тому при перманентних загрозах найбільш раціональним рішенням стала децентралізована генерація енергії. Замість однієї електростанції в 1000 МВт пропонується побудувати багато станцій потужністю від 5 до 20-30 МВт, які підключаються до розподільних мереж. За оцінками НЕК «Укренерго», для відновлення генеруючих потужностей та забезпечення громадян стабільним енергопостачанням необхідно щонайменше 15 ГВт нових генеруючих потужностей. При цьому 11,6 ГВт з цього обсягу можуть бути побудовані з використанням підходу децентралізованої генерації. Це передбачає 3,3 ГВт маневреної генерації, 4,5 ГВт вітрової генерації та 3,8 ГВт сонячної генерації із залученням 12,8 млрд євро інвестицій (рис. 1) [6].

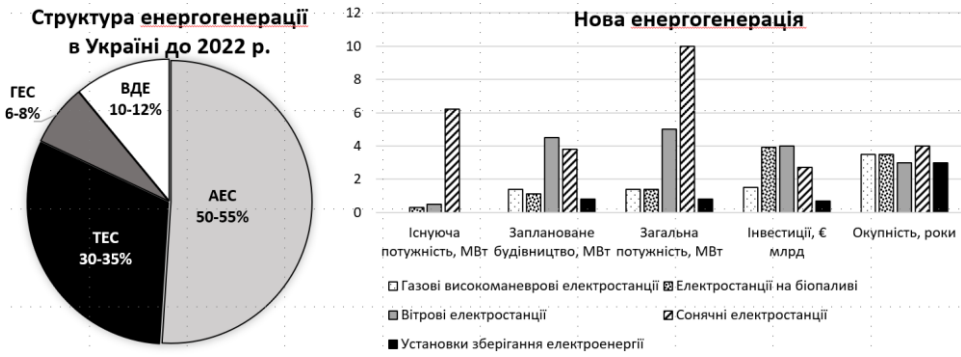


Рис. 1. Структура енергогенерації в Україні за даними НЕК «Укренерго»

Децентралізована генерація передбачає виробництво енергії безпосередньо поблизу споживачів на невеликих об'єктах, що дозволяє зменшити втрати при транспортуванні та підвищити надійність енергопостачання. Ворогу значно складніше одночасно знищити численні розосереджені невеликі електростанції та установки зберігання енергії, що дає змогу мінімізувати втрати потужності в об'єднаній енергетичній системі України. Таким чином децентралізація формується саме на рівні генерації з посиленням балансувального сегменту для забезпечення маневреності української енергосистеми, тобто збільшення спроможності виробляти стільки електрики, скільки потрібно споживачам в кожен момент.

Для порівняння економічної конкурентоспроможності та раціональної оцінки собівартості енергії з різних джерел використовують показник «врівноваженої вартості електроенергії» (Levelised Cost of Energy – LCOE). Це міра середньої чистої поточної вартості виробництва електроенергії для генеруючої станції протягом усього терміну служби. LCOE включає витрати на будівництво, експлуатацію, технічне обслуговування та постачання, а також витрати на фінансування. Аналіз врівноваженої вартості джерел електроенергії в США за 2023 р. продемонстрував діапазон вартості в доларах/МВт-год для різних джерел електроенергії, а також мінімальну та максимальну вартість для кожного джерела. Найдешевшими джерелами електроенергії в США у 2023 р. виявились наземні вітрові та сонячні фотоелектричні установки. Шкала корисності з діапазоном вартості 24-75 доларів США/МВт-год і 24-96 доларів США/МВт-год відповідно. Наступним за ціною виявився газовий комбінований цикл із діапазоном від \$39 до \$101/МВт-год [15]. Це найдешевше джерело серед викопного палива з урахуванням розвитку сучасних методів видобутку. Деякі джерела електроенергії мають широкий діапазон вартості, а інші – вузький. Це вказує на мінливість і невизначеність певних факторів, які впливають на LCOE, таких як капітальні витрати, витрати на паливо, експлуатаційні витрати, коефіцієнти потужності та ставки дисконту (рис. 2).

Базуючись на показниках LCOE та враховуючи не тільки нагальні потреби, але й довгострокові плани розвитку енергосистеми України, система розподіленої генерації включає такі елементи: 1) електроустановки з гарантованою потужністю на природному газі; 2) об'єкти відновлюваної енергетики; 3) установки зберігання енергії; 4) мережі керування попитом.

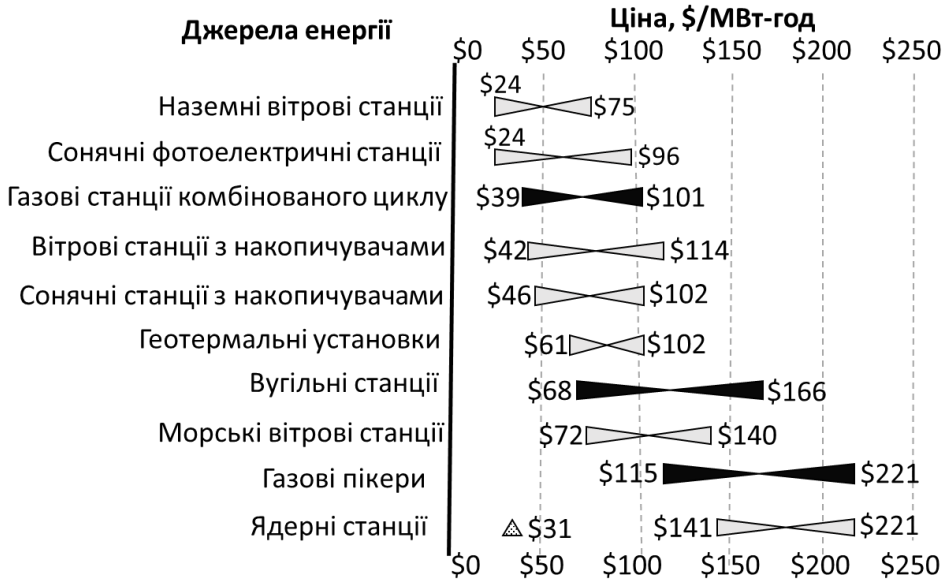


Рис. 2. Діапазон вартості для різних джерел електроенергії в США за 2003 рік

Маневрена газова генерація. Згідно з аналітичними оцінками спеціалістів українського енергетичного сектору, газова маневрена установка повинна відповідати таким характеристикам:

- 1) керованість – гарантовано забезпечувати певну потужність протягом визначеного часу з можливістю повного контролю оператором установки;
- 2) гнучкість – широкий діапазон регулювання потужності (близько 60% встановленої потужності) та швидкість виходу на номінальну потужність протягом 15 хвилин з «холодного» старту;
- 3) оперативність – мати короткий строк будівництва та введення в експлуатацію (до одного року);
- 4) незалежність – працювати на паливі вітчизняного видобутку (природний газ) з урахуванням цін на газ та електричну енергію;
- 5) високий коефіцієнт корисної дії (ККД) – до 40% для класичних газотурбінних установок простого відкритого циклу, 60% для установок комбінованого циклу з котлом-утилізатором та паровою турбіною, 90% у разі застосування когенерації [7].

Для аварійних і непрогнозованих ситуацій використовують пікери – сучасні маневрені та потужні енергосистеми з високим ККД. Пікери більшу частину часу знаходяться у резерві, тому їх паливна ефективність досі не мала великого значення, а більше уваги приділялось капітальним витратам. Однак дослідження показали, що використання пікерів з відносно невисоким паливним ККД та значною вартістю кожного пуску для балансування енергосистеми є неефективним, тому коефіцієнт використання встановленої потужності пікерів та їх паливна ефективність тепер мають більше значення [11].

Для стабілізації енергосистеми України необхідно розвивати технології балансування. Балансери повинні вмикатися/вимикатися багаторазово

протягом доби, працюючи 20-25% часу на різних навантаженнях з великим діапазоном регулювання. Такі установки, як правило, використовують для балансування відновлюваних джерел. У цьому випадку важливі і капітальні, і експлуатаційні витрати, тобто не тільки ціна обладнання й будівництва, але й вартість отриманої енергії [12]. У пікерів і балансирів різні ролі, але для обох підходів до стабілізації енергопостачання найчастіше застосовують маневрену газову генерацію. Для газової генерації найбільш широко використовують газопоршневі, газотурбінні та парогазові установки [9].

Великі парогазові установки (ПГУ) зазвичай виконують роль станцій базового навантаження, оскільки вони краще функціонують в режимі постійних навантажень з обмеженим діапазоном регулювання потужності і не призначені для циклічної роботи. Водночас парогазові станції значно маневреніші за вугільні, тому їх можуть використовувати для балансування, однак через технологічні особливості часте вмикання/вимикання призводить до швидкого зносу обладнання. У ПГУ висока паливна ефективність (до 60%), однак вона суттєво знижується при роботі на частковому навантаженні, до того ж їх будівництво коштує близько 1200 євро за кВт встановленої потужності. Загалом ця технологія є досить ефективною, але водночас досить дорогою і не дуже маневреною [2].

Газотурбінні станції (станції прямого циклу) можуть стояти у резерві, за потреби запускатися за 15-20 хвилин і вимикатися без шкоди для обладнання, коли потреба в них зникає. Газотурбінні установки відносно дешеві в капітальних витратах – 1 кВт газотурбінної станції обійдеться у 600-700 євро, але їх ККД зазвичай близько 40%, а на часткових навантаженнях він падає до 30% [1]. Особливістю газотурбінних технологій є обмеження циклічності роботи, що має вираження у вартості кожного пуску станції. Тобто використання газотурбінної станції з відносно невисоким паливним ККД та значною вартістю кожного пуску у якості пікера для балансування енергосистеми є неефективним.

Газопоршневі установки схожі з газотурбінними за своїми технічними характеристиками, але у модульному варіанті діапазон регулювання становить до 90% номінальної потужності, час виходу на номінальну потужність з «холодного» старту займає до 5 хвилин, а ККД досягає 50%. У газопоршневих станцій капітальні витрати такі самі, як у газотурбінних станцій (600-700 євро на 1 кВт), а ККД в них близько 50% [4]. Тобто електроенергія буде як мінімум на чверть дешевшою, ніж та, яку виробляє газотурбінна станція. Таке співвідношення капітальних та експлуатаційних витрат є суттєвою перевагою. Отже, при застосуванні як для балансування відновлюваних джерел енергії, так і для «підхоплення» піків, газопоршневі станції є універсальною технологією і найдешевшим рішенням [5].

Когенераційні електроустановки призначені для комбінованого виробництва електричної та теплової енергії. Вони керовані, економічні, стали у довгостроковій перспективі, швидко будуються та вводяться в експлуатацію, тому гарантовано можуть корегувати графік навантаження електричної та теплової енергії за вимогою. За оцінками НЕК «Укренерго», для проєкту такої установки потужністю 5МВт необхідні інвестиції 5-6 млн євро, період окупності складе 1-2 роки. Вкладені кошти інвестор зможе повернути через 3-4 роки завдяки продажу електроенергії на ринку та надаючи послуги із забезпечення резерву [7]. Мережа високоманеврових генеруючих потужностей

зі швидким стартом критично необхідна енергосистемі для забезпечення наявності гарантованих резервів заміщення та швидкодіючих резервів вторинного регулювання.

Оцінка потенціалу відновлюваної енергетики. Відновлювані джерела енергії (ВДЕ) до повномасштабного вторгнення склали понад 10% в енергобалансі України і за прогнозами приріст цих потужностей становитиме більше половини від загального обсягу до 2040 року [12]. Для масштабного розміщення вітроелектростанцій підходять території Херсонської, Миколаївської, Запорізької, Донецької та Луганської областей, які потребують розмінування і відбудови після припинення бойових дій. Згідно з технічними вимогами території з вітровими станціями вимагають обмеженого доступу, що забезпечить час для тривалого процесу розмінування і сприятиме природному відновленню території.

В містах розміщувати вітрові станції немає сенсу та технічних можливостей, тому міські проекти відновлюваної енергетики реалізуються шляхом встановлення сонячних панелей на дахах і фасадах багатоквартирних будинків. Зокрема КМДА в умовах нестачі електроенергії щорічно виділяє на сонячні станції по 200 млн грн, а для приватних домогосподарств програми «Енергодім» та «ГрінДІМ» від Фонду енергоефективності пропонують суттєві пом'якшення умов кредитування [8]. У Спільці споживачів комунальних послуг України підтримують встановлення сонячних станцій у приватних будинках, але вважають недоцільним використання бюджетних коштів на розміщення сонячних панелей на дахах і фасадах міських багатоповерхівок. Найбільший дефіцит енергії виникає взимку при відключеннях внаслідок обстрілів, але саме тоді ККД потужності сонячних станцій може знижуватись шестикратно. Натомість пропонують забезпечити багатоповерхові будинки зарядними станціями та генераторами, а також подбати про термоізоляцію та облік тепла [6].

Перевагами сонячних електростанцій є економічність, екологічність, короткий строк будівництва та введення в експлуатацію. Водночас вони мають негарантований графік виробництва електричної енергії, який залежить від рівня сонячної інсоляції, що характеризується добовою та річною періодичністю. При цьому середньодобові обсяги виробництва електричної енергії у зимовий період значно нижчі за аналогічні показники у період літнього максимуму сонячної інсоляції. Зростання потужностей сонячних електростанцій без впровадження систем управління попитом та установок зберігання енергії призводить до формування профіцитів електричної енергії у денні години весняно-літнього періоду [18]. У зв'язку з цим будівництво нових сонячних електростанцій має здійснюватися одночасно з будівництвом установок зберігання енергії та маневрової генерації для формування оптимальної структури генеруючих потужностей, що дозволить вирівняти попит на електричну енергію.

Однією з причин обмеженого використання ВДЕ є дискретність енергетичних потоків, тобто періодичність надходження енергії та змінність енергетичного потенціалу. В певні періоди вони можуть виробляти надлишок енергії, що призводить до перевантаження системи, а в інші періоди енергії надходить менше, ніж потрібно споживачам. Для подолання проблеми періодичності постачання енергії з відновлюваних джерел застосовують системи накопичення енергії.

Системи накопичення енергії (Energy Storage System, ESS) – це комплекс пристроїв і технологій, призначених для акумулювання, зберігання та подальшого використання електроенергії. Енергія може накопичуватися і зберігатися у тепловій, механічній, хімічній, електрохімічній, електричній, магнітній і гібридній формі [17]. При виборі накопичувачів електричної енергії враховують низку енергетичних та експлуатаційних показників: питома потужність, питома енергія, питома вартість накопичувача енергії, термін заряду-розряду, термін служби, ККД, рівень саморозряду, безпека, простота обслуговування, вид виробленої та споживаної енергії [13]. Кожна система має специфічний перелік переваг і обмежень, тому вибір здійснюється в залежності від потреб і можливостей.

Згідно з дослідженням в Україні найбільш широко використовуються п'ять типів акумуляторних батарей: свинцево-кислотні (VRLA – Valve Regulated Lead-Acid), літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄), літій-іонні (Li-ion), акумулятори з абсорбуючою сіткою зі скловолокна (AGM – Absorbed Glass Material) та гелеві (GEL) батареї. Свинцево-кислотним акумуляторам VRLA надають перевагу 35% споживачів, оскільки вони добре себе зарекомендували в умовах частих відключень електрики для резервного живлення. Літій-залізо-фосфатні акумулятори вибирає 26% користувачів, оскільки вони вважаються найбільш довговічними батареями з 10 000 циклами перезаряду та збереженням ємності до 85% від номінальної. Приблизно однакова кількість українців обирає літій-іонні (15%) та AGM (14%) акумулятори, що підходять для вискоєфективних систем з мінімальною вагою і довгим терміном служби. Гелевими акумуляторами користується 10% з опитаних споживачів. Ці батареї допускають досить глибокий розряд, повною мірою відновлюються після зарядки, не витікають навіть при пошкодженні корпусу, а термін служби складає 7-12 років (рис. 3).

Генеруюче обладнання на основі відновлюваних джерел акумулює енергію в режимі постійного підзаряду і забезпечує стабільне живлення, вирівнюючи добові коливання, що виникають у процесі експлуатації. При роботі з промисловою електромережею системи акумулювання електричної енергії накопичують позапікову електроенергію в нічний час і забезпечують електроживлення у періоди відключень. Комбіновані системи зберігання енергії (hybrid energy storage systems, HESS) відрізняються ефективним сполученням кількох технологій зберігання енергії з взаємодоповнюючими експлуатаційними характеристиками: щільність енергії та потужності, швидкість саморозряду, ефективність, термін експлуатації тощо [9].

Сумісність з системами генерації також грає одну з ключових ролей для побудови надійної системи безперебійного живлення. Можливість конвертування сонячної енергії або енергії дизельних або бензинових генераторів дозволять не залежати від наявності електроенергії в централізованих мережах 220 вольт. Слід також враховувати і пікові навантаження, які виникають при запуску енергоємного обладнання.

Найбільш поширені серед побутових споживачів системи енергетичної незалежності будуються на базі гібридного інвертора, який перетворює накопичену в акумуляторних модулях енергію в звичний змінний струм, який використовується для живлення побутових приладів. Також інвертори перетворюють енергію від сонячних панелей або інших систем генерації для заряду акумуляторів або віддачі надлишку в мережу.

Модульна архітектура окремих блоків з інверторів і акумуляторів дозволяє будувати трифазні мережі і значно нарощувати потужність шляхом паралельного підключення однакових пристроїв [11]. Системи накопичення енергії забезпечують стабільність і надійність постачання та дозволяють ефективно управляти енергоресурсами.

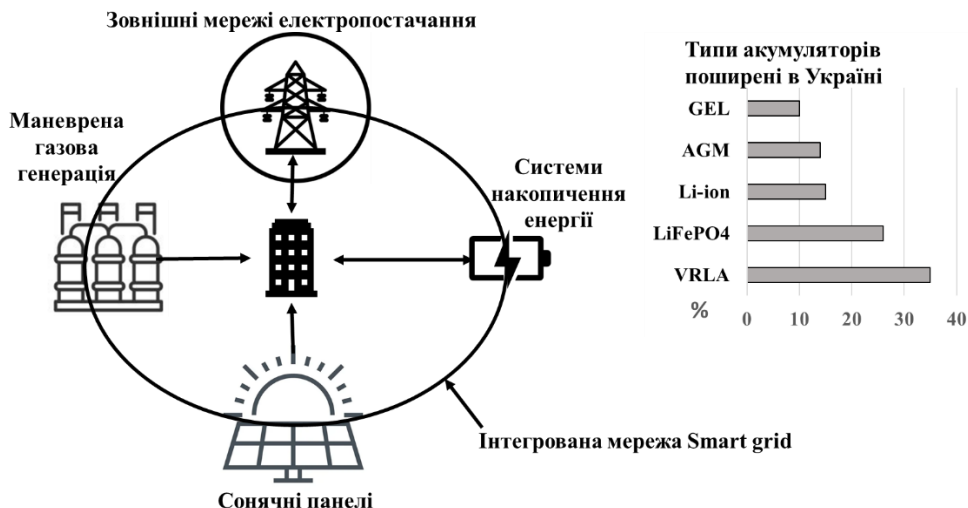


Рис. 3. Диверсифікаційний модуль енергозабезпечення багатоповерхових будівель

Керування попитом виходить на якісно новий рівень завдяки розвитку саморегулюючих, поновлюваних та повністю інтегрованих розумних електроенергетичних систем Smart grid. Такі електричні мережі включають різноманітні оперативні та енергоощадні заходи, зокрема розумні лічильники, поновлювані джерела енергії та ресурси забезпечення енергоефективності. Розумна мережа (Smart grid) має мережеву топологію на основі генеруючих джерел, магістральних та розподільних мереж [19]. Всі типи споживачів електричної енергії координуються в єдиній мережі інформаційно-керуючих пристроїв, де баланс попиту і пропозицій відстежується в режимі реального часу. Інтелектуальні адаптивні системи захисту, прогнозування, підтримки та прийняття рішень можуть мати вбудовану функцію автоматичного відновлення живлення. Віртуальні електростанції з акумуляторним живленням об'єднують в єдиній системі домашні акумулятори та розумні лічильники різних споживачів. Системи накопичення енергії можливо об'єднати в загальний агрегатор домашніх акумуляторів для балансування енергосистеми. Акумулятори накопичують електроенергію, яка за потреби продається споживачами на балансуєчому ринку [16].

Згідно із сценарієм нової політики (New Policies Scenario) Міжнародного енергетичного агентства, світовий попит на електроенергію зростає більше, ніж на 20% протягом наступного десятиліття. Водночас попит на гнучкість, тобто здатність енергосистеми швидко адаптуватися до змін в енергопостачанні й енергосистемі, збільшиться приблизно на 80% [14]. Тому гнучкість лежить в основі розвитку майбутніх систем електроенергетики. Актуальна технічна потреба вимагає розвитку технології балансування, що вмикається

багаторазово протягом доби, працює на різних навантаженнях з великим діапазоном регулювання. Використання технологій керування попитом знижує енергоспоживання в пікові години, зменшує витрати на електроенергію, оптимізує використання енергії, підтримує екологічну стабільність.

Дискусія

Енергетичний сектор та комунальна сфера трансформуються, щоб відповідати викликам енергетичної безпеки в умовах війни. Для цього система з розподіленою генерацією має відповідати ряду технічних, економічних та організаційних вимог. На технічному рівні має бути гарантовано електропостачання об'єктів критичної інфраструктури та якомога більшої кількості споживачів у разі виникнення системної аварії в об'єднаній енергетичній системі України із знеструмленням підстанцій системи передачі та вузлових електростанцій. Економічні вимоги забезпечують прийнятну конкурентну ціну електричної енергії для споживачів та раціональне використання коштів міжнародної фінансової допомоги. Організаційна складова передбачає інтеграцію діючої моделі конкурентного ринку та законодавства України щодо ринку електричної енергії у відповідність з вимогами законодавства Європейського Союзу [1].

За прогнозами Bloomberg до 2030 року очікується тринадцятикратне зростання темпів розвитку балансуєчих технологій на газу та приросту потужностей систем накопичення енергії [10]. Потреба в додаткових маневрених потужностях існувала вже давно і питання розвитку високоманеврової генерації в Україні розглядалося ще у 2020 році, але тоді відповідні проекти не отримали підтримки через високу вартість. Будівництво генеруючих потужностей не розглядалося компаніями, бо навіть за ставками зовнішнього фінансування термін окупності становив близько 12 років [4]. Без вилучення капітальних витрат з ціни на енергію навіть найпередовіша інвестиція не буде конкурентоздатною, хоч би вона й була дуже необхідною для енергосистеми. Інвесторам було не вигідно заходити на український ринок з адміністративними регулюючими механізмами без державної підтримки на будівництво чи бонусів за когенерацію [6]. Тепер за рахунок міжнародної підтримки відкриваються унікальні можливості для будівництва балансуєчих потужностей.

В Європейському Союзі розроблено певні механізми підтримки потужностей, які мають забезпечити балансову надійність енергосистеми та сприяти вирішенню проблем безпеки постачання. Розбудовується система, включно з платформами для транскордонного обміну балансуєчими послугами, яка має на меті забезпечити оптимізацію ринку балансуєвальних ресурсів по всій Європі. Для інтеграції України до європейського енергетичного простору ще 28 червня 2017 року між НЕК «Укренерго» та ENTSO-E підписана Угода про можливість синхронізації енергосистеми України з ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity). У 2021 році систему управління інформаційною безпекою Укренерго було сертифіковано за міжнародним стандартом ISO/IEC 27001:2013. Впроваджена інтегрована система управління НЕК «Укренерго» відповідає вимогам міжнародних стандартів ISO 9001:2015, ISO 14001:2015,

ISO 45001:2018. Ще у грудні 2021 року НКРЕКП сертифікував НЕК «Укренерго» як оператора системи передачі європейського зразка. Але тільки 24 лютого 2022 року після повномасштабного вторгнення росії «Укренерго» виконало запланований перехід енергосистеми України на ізольований режим роботи – енергосистема була відключена від російської, білоруської і навіть від європейських енергосистем. Вже 28 лютого 2022 року Рада Європейського Союзу підтримала екстрену синхронізацію енергосистем України та Молдови до електромережі континентальної Європи ENTSO-E. А 16 березня 2022 року, в умовах війни, енергосистема України екстрено перейшла на пробну синхронну роботу з європейським енергооб'єднанням країн континентальної Європи ENTSO-E [3].

Хронологія кроків у напрямку інтеграції енергосистеми України до європейської свідчить про те, що шлях відмови від енергоносіїв ворога був довгим і складним, але переломний момент вже залишився позаду. Тепер настав важливий етап формування стійкої децентралізованої мережі енергопостачання з впровадженням сучасних технологій генерації, накопичення, розподілу та балансування енергії. Кошти міжнародної фінансової допомоги на підтримку енергосектора України в першу чергу слід використовувати для термінового ремонту зруйнованої і пошкодженої інфраструктури. Водночас необхідно враховувати потреби формування базису для стійкої енергетики нового рівня. Завдяки міжнародній фінансовій допомозі відкриваються можливості для створення унікальної диверсифікованої енергоструктури, яка навіть може стати прикладом для інших країн.

Для забезпечення фінансової прозорості та ефективності процесу енергореконструкції необхідна тісна співпраця підприємств енергетичного сектору та професійних галузевих асоціацій. Грунтовний аналіз сучасних технологій у галузі енергетики потребує залучення широкого кола науковців і практиків. А міжнародна законодавча база та вітчизняні законотворчі ініціативи у галузі енергетики вимагають ретельного опрацювання для розробки механізмів їх практичного впровадження у реальне життя з урахуванням потреб громадян України.

Висновки

Енергозабезпечення багатоповерхових житлових будівель в умовах війни досягається шляхом поєднання різних стратегій диверсифікації ризиків, що враховують періодичні відключення централізованого електропостачання, можливість використання альтернативних джерел та встановлення систем накопичення енергії.

Використання відновлюваних джерел енергії для локальної генерації забезпечує енергопостачання під час відключень та знижує залежність від централізованої енергосистеми, проте специфічні технічні вимоги та параметри функціонування теплових насосів, вітряків та сонячних панелей значно обмежують їх використання в умовах щільної міської забудови.

Встановлення сонячних фотоелектричних панелей у багатоповерхових міських будинках не вирішує повністю проблему енергозабезпечення взимку, коли їх ефективність може знижуватися до 10%, однак під час літніх знеструмлень сонячна енергія може забезпечити певні енергетичні потреби мешканців житлових комплексів.

Для стабілізації енергосистеми в екстремальних умовах війни доцільно локально застосовувати маневрену газову генерацію шляхом впровадження технологій балансування з великим діапазоном регулювання різних навантажень і використовувати пікери для аварійних ситуацій.

Інтеграція централізованого електропостачання, відновлюваних джерел енергії, пікерів та балансерів можливе тільки за умов використання систем накопичення енергії, що забезпечують стабільність і надійність постачання та дозволяють ефективно управляти енергоресурсами.

Застосування технологій керування попитом з інтелектуальним управлінням дозволяє оптимально використовувати доступну енергію, уникати пікових навантажень, зменшувати витрати на електроенергію, а також підвищувати енергонезалежність та надійність енергопостачання багатоквартирних житлових будівель.

Децентралізація формується на рівні генерації з посиленням балансувального сегменту для забезпечення маневреності української енергосистеми, тобто підвищення спроможності виробляти стільки електрики, скільки потрібно споживачам в певний момент.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Вікно Відновлення України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: recovery.win. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 12.12.2024.
2. Децентралізована генерація як можливість зміцнення та оновлення української енергосистеми [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://rehouse.org.ua/counsellor/detsentralizovana-heneratsiya-yak-mozhlyvist-zmitsnennya-ta-onovlennya-ukrayinskoji>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 12.12.2024.
3. Законодавство України. Офіційний вебпортал парламенту України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 12.12.2024.
4. Звіт секретаріату енергетичного співтовариства Україна [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://energy-community.org/news/Energy-Community-News/2020/12/02.html>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 12.12.2024.
5. Про енергетичну ефективність будівель [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ips.ligazakon.net/document/T172118?an=1&ed=2020_12_01. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 12.12.2024.
6. Українська енергетика [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ua-energy.org/>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 12.12.2024.
7. Укренерго НЕК ПрАТ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ua.energy/>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 12.12.2024.
8. Фонд енергоефективності [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://eefund.org.ua/>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 12.12.2024.
9. Ali A.O., Elmarghany M.R., Abdelsalam M.M., Sabry M.N., Hamed A.M. Closed-loop home energy management system with renewable energy sources in a smart grid: A comprehensive review. – *Journal of Energy Storage*. – №50. – 2022. – P.104609.
10. BloombergNEF [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://about.bnef.com/>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 12.12.2024.
11. Cook N., Taylor E.J. Assembling imperceptibility: The material, financial and policy dimensions of combustible cladding in residential high-rise. – *Housing, Theory and Society*. – №40(1). – 2023. – P.113-129.
12. Gas to Power Journal [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://gastopowerjournal.com/>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 12.12.2024.

13. Hussein I., Ilinca A., Perron J. Energy storage systems – Characteristics and comparisons. – *Renewable and sustainable energy reviews*. – №12.5. – 2008. – P.1221-1250.
14. International Energy Analysis (IEA) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iea.org/commentaries/battery-storage-is-almost-ready-to-play-the-flexibility-game>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 12.12.2024.
15. International Renewable Energy Agency (IRENA) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.irena.org/>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 12.12.2024.
16. Kadrić D., Aganovic A., Martinović S., Delalić N., Delalić-Gurda B. Cost-related analysis of implementing energy-efficient retrofit measures in the residential building sector of a middle-income country – A case study of Bosnia and Herzegovina. – *Energy and Buildings*. – №257. – 2022. – P.111765.
17. Mitali J., Dhinakaran S., Mohamad A.A. Energy storage systems: A review. – *Energy Storage and Saving*. – №1.3. – 2022. – P.166-216.
18. Olabi A.G. Renewable energy and energy storage systems. – *Energy*. – №136. – 2017. – P.1-6.
19. Stopps H., Thorneycroft C., Touchie M. F., Zimmermann N., Hamilton I., Kesik T. High-rise residential building makeovers: Improving renovation quality in the United Kingdom and Canada through systemic analysis. *Energy Research & Social Science*. – №77. – 2021. – P.102085.
20. Zhou Y. Climate change adaptation with energy resilience in energy districts – A state-of-the-art review. – *Energy and Buildings*. – №279. – 2023. – P.112649.

Стаття надійшла до редакції 11.11.2024 і прийнята до друку після рецензування 04.02.2025

REFERENCES

- [1] Ukraine Recovery Window. (2024, December 12). <https://recovery.win>. (in Ukrainian).
- [2] Decentralized generation as an opportunity to strengthen and renew the Ukrainian energy system. (2024, December 12). <https://rehouse.org.ua/counsellor/detsentralizovana-heneratsiya-yak-mozhlyvist-zmitsnennya-ta-onovlennya-ukrayinskoyi>. (in Ukrainian).
- [3] Legislation of Ukraine. Official web portal of the Parliament of Ukraine. (2024, December 12). <https://zakon.rada.gov.ua/laws>. (in Ukrainian).
- [4] Report of the Energy Community Secretariat Ukraine. (2024, December 12). <https://energy-community.org/news/Energy-Community-News/2020/12/02.html>. (in Ukrainian).
- [5] About energy efficiency of buildings. (2024, December 12). https://ips.ligazakon.net/document/T172118?an=1&ed=2020_12_01. (in Ukrainian).
- [6] Ukrainian energy. (2024, December 12). <https://ua-energy.org/>. (in Ukrainian).
- [7] Ukrengo. (2024, December 12). <https://ua.energy/>. (in Ukrainian).
- [8] Energy Efficiency Fund. (2024, December 12). <https://eefund.org.ua/>. (in Ukrainian).
- [9] Ali, A.O., Elmarghany, M.R., Abdelsalam, M.M., Sabry, M.N., Hamed, A.M. (2022). Closed-loop home energy management system with renewable energy sources in a smart grid: A comprehensive review. *Journal of Energy Storage*, 50, 104609.
- [10] BloombergNEF. (2024, December 12). <https://about.bnef.com/>.
- [11] Cook, N., Taylor, E.J. (2023). Assembling imperceptibility: The material, financial and policy dimensions of combustible cladding in residential high-rise. *Housing, Theory and Society*, 40(1), 113-129.
- [12] Gas to Power Journal (2024, December 12). <https://gastopowerjournal.com/>.
- [13] Hussein, I., Ilinca, A., Perron, J. (2008). Energy storage systems – Characteristics and comparisons. *Renewable and sustainable energy reviews*, 12.5, 1221-1250.
- [14] International Energy Analysis (IEA). (2024, December 12). <https://www.iea.org/commentaries/battery-storage-is-almost-ready-to-play-the-flexibility-game>.

- [15] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2024, December 12). <https://www.irena.org/>.
- [16] Kadrić, D., Aganovic, A., Martinović, S., Delalić, N., Delalić-Gurda, B. (2022). Cost-related analysis of implementing energy-efficient retrofit measures in the residential building sector of a middle-income country – A case study of Bosnia and Herzegovina. *Energy and Buildings*, 257, 111765.
- [17] Mitali, J., Dhinakaran, S., Mohamad, A.A. (2022). Energy storage systems: A review. *Energy Storage and Saving*, 1.3, 166-216.
- [18] Olabi, A.G. (2017). Renewable energy and energy storage systems. *Energy*, 136, 1-6.
- [19] Stopps, H., Thorneycroft, C., Touchie, M. F., Zimmermann, N., Hamilton, I., Kesik, T. (2021). High-rise residential building makeovers: Improving renovation quality in the United Kingdom and Canada through systemic analysis. *Energy Research & Social Science*, 77, 102085.
- [20] Zhou, Y. (2023). Climate change adaptation with energy resilience in energy districts – A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 279, 112649.

The article was received 11.11.2024 and was accepted after revision 04.02.2025

Кривомаз Тетяна Іванівна

доктор технічних наук, кандидат біологічних наук, професор кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва та архітектури

Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітряних сил, 31

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7426-8745> **e-mail:** ecol@i.ua

Гамоцький Роман Олегович

аспірант Київського національного університету будівництва та архітектури

Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітряних сил, 31

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5469-8606> **e-mail:** roman.gamotskii@gmail.com

Циба Артем Миколайович

аспірант Київського національного університету будівництва та архітектури

Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітряних сил, 31

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-4532-0982> **e-mail:** absqueee@gmail.com