

УДК 620.9:504

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2025-43.0614>**<sup>1</sup>Роман Гамоцький,**аспірант кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці,  
<https://orcid.org/0000-0002-5469-8606>, e-mail: [roman.hamotskyi@gmail.com](mailto:roman.hamotskyi@gmail.com)<sup>1</sup>Київський національний університет будівництва і архітектури, просп. Повітряних сил, 31, м. Київ, 03037, Україна

## ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ БУДІВЕЛЬ ТА ГРОМАД ПІД ЧАС ВІЙНИ

**АНОТАЦІЯ.** Стаття присвячена комплексному аналізу технічних рішень щодо забезпечення енергетичної стійкості міських будівель і громад України в умовах війни. Значна увага приділяється трансформації енергетичної інфраструктури з урахуванням збереження довкілля. Проаналізовано структуру сучасних систем енергозабезпечення з урахуванням ризиків порушення централізованих енергопостачальних мереж. Аналіз технічних рішень енергозабезпечення відображає не лише структуру взаємодії різних технологій, а й принцип адаптивного управління, що дозволяє забезпечити енергетичну стійкість, безперервність критичних функцій та мінімізацію витрат у надзвичайних умовах. Розроблено узагальнену схему інтеграції до систем централізованого енерго- та теплопостачання джерел, що включають сонячні фотоелектричні установки, вітрові мікротурбіни, комбіноване виробництво тепла та електроенергії, геотермальні теплові насоси, біомасові системи, водневі паливні елементи та системи накопичення енергії. Використання багатокритеріального аналізу рішень дозволяє системно зіставити та оцінити сучасні технологічні альтернативи з огляду не лише на їх енергетичну ефективність та економічну доцільність, але й з урахуванням вимог екологічної безпеки.

Показано, що застосування такої матриці в рамках концепції осередкових енергомереж (CEN) дає можливість громадам формувати поетапні стратегії переходу до децентралізованої, низьковуглецевої та стійкої енергосистеми. Результати дослідження можуть бути використані при розробленні локальних стратегій відновлення енергосистем і підвищення автономності міських будівель під час кризових ситуацій.

**Ключові слова:** енергетична стійкість, децентралізація енергозабезпечення, багатоповерхові будівлі, відновлювані джерела енергії, розумні системи управління, багатокритеріальний аналіз рішень, екологічна безпека.

## TECHNICAL SOLUTIONS FOR ENSURING THE ENERGY RESILIENCE OF BUILDINGS AND COMMUNITIES DURING WARTIME

**ABSTRACT.** The article is devoted to a comprehensive analysis of technical solutions for ensuring the energy resilience of urban buildings and communities in Ukraine under wartime conditions. Considerable attention is paid to the transformation of the energy infrastructure with regard to environmental protection. The structure of modern energy supply systems is analysed, taking into account the risks of disruptions to centralised energy networks. The analysis of technical energy supply solutions reflects not only the interaction structure of different technologies, but also the principle of adaptive management, which makes it possible to ensure energy resilience, continuity of critical functions and cost minimisation in emergency conditions. A general scheme has been developed for integrating into centralised power and heat supply systems such sources as solar photovoltaic installations, wind microturbines, combined heat and power generation, geothermal heat pumps, biomass systems, hydrogen fuel cells and energy storage systems. The use of Multiple Criteria Decision Analysis makes it possible to systematically compare and assess modern technological alternatives not only in terms of their energy efficiency and economic feasibility, but also taking into account environmental safety requirements.

It is shown that the application of such a matrix within the framework of the cell energy network (CEN) concept enables communities to develop step-by-step strategies for transitioning to a decentralised, low-carbon and resilient energy system. The results of the study can be used in developing local strategies for restoring energy systems and increasing the autonomy of urban buildings during crisis situations.

**Keywords:** energy resilience, decentralization of energy supply, high-rise buildings, renewable energy sources, smart control systems, multi-criteria decision analysis, environmental safety.

**1. Постановка проблеми.** Одним із ключових викликів української енергетики є забезпечення стабільного енергопостачання в умовах постійних військових загроз, цілеспрямованих атак на генерувальні об'єкти й мережеву інфраструктуру, що призводить до перебоїв електро- та теплопостачання для громад. Водночас воєнні дії поглиблюють екологічні ризики, зумовлюючи зростання викидів забруднюючих речовин, деградацію водних і земельних ресурсів та підрив екологічної безпеки. Це посилює потребу переходу до стійкої, децентралізованої моделі енергетики на основі відновлюваних джерел енергії, мікромереж, систем накопичення та гнучкого управління попиту, здатних підтримувати роботу критичної інфраструктури в кризових умовах [1]. Однак наявні підходи до планування та оцінювання технічних рішень залишаються фрагментарними, здебільшого зосередженими на економічних показниках або окремих технологіях, без урахування повного спектра військових, екологічних, технічних і соціальних факторів на рівні конкретних громад. Відсутність комплексних методик, що інтегрують критерії енергетичної, екологічної та соціальної стійкості, ускладнює прийняття обґрунтованих рішень щодо вибору конфігурацій локальних енергосистем і їх інтеграції з національною та європейською інфраструктурою. Розробка структурованої моделі вибору технічних рішень із використанням багатокритеріального аналізу (MCDA) дозволить поєднати цілі енергетичної безпеки, екологічної сталості та захищеності населення в єдиному науково-методичному інструментарії, забезпечуючи підґрунтя для прийняття раціональних управлінських рішень у сфері відновлення та модернізації енергетики громад.

**2. Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Міжнародні та вітчизняні дослідження підкреслюють, що війна проти України трансформувала енергетичну сферу в систему постійних ризиків, де цілеспрямовані удари по генерувальних об'єктах та мережах призводять до хронічної нестабільності енергопостачання та підвищення екологічних загроз. У роботах R. Liu, S. Krivtsov та звітах Європейської Комісії наголошується, що атаки на теплові, атомні, гідроелектростанції й критичні елементи мереж супроводжуються зростанням токсичних викидів, деградацією водних і земельних ресурсів, що вимагає поєднання підходів енергетичної безпеки та екологічної політики [2, 3]. У працях J. Brown, A. Chernyak, O. Yatsyshin обґрунтовано, що підвищення стійкості енергетики можливе лише за умови системного врахування захищеності споживачів, безперервності електропостачання, використання «зелених» технологій і продуманого управління наслідками аварій, а не через локальні або одновимірні рішення [4–6]. Автори підкреслюють важливість багатокритеріального підходу до оцінки технічних рішень, де поряд з економічними показниками враховуються стійкість у кризових сценаріях, екологічний вплив, раціональність впровадження та довгострокова ефективність, оскільки технології, ефективні у звичайних умовах, можуть виявитися нежиттєздатними в умовах масових відключень чи руйнування інфраструктури.

Суттєву увагу в сучасних дослідженнях приділено ролі децентралізації та відновлюваних джерел енергії для підвищення стійкості громад – аналіз потенціалу дахових PV-систем в Україні, впровадження мікромереж, інтеграція систем накопичення енергії розглядаються як ключові умови формування гнучких локальних енергосистем. Роботи Winkler et al., та V. Oleksiuk показують, що розподілена генерація у поєднанні з підтримкою муніципалітетів і стабільною регуляторною базою створює можливості для локальної енергетичної автономії та швидкого реагування на удари по мережі, одночасно сприяючи досягненню кліматичних цілей [7–8]. Дослідження з питань smart grid, планування та оперативного керування енергосистемами акцентують на необхідності узгоджених метрик стійкості та рішень, які охоплюють увесь ланцюг – від генерації до кінцевого споживача, що формує наукове підґрунтя для комплексних моделей оцінки енергетичної стійкості громад.

Попри значний обсяг праць, що описують окремі технології, політичні рамки чи кейси громад, зберігається дефіцит інтегрованих методичних підходів до вибору технічних рішень для енергетичної та екологічної стійкості в умовах війни. Потребує подальшого розвитку єдина структурована модель, яка б поєднувала міжнародний досвід, національні стратегічні

цілі та локальні особливості громад, використовуючи інструменти MCDA для комплексної оцінки альтернатив із урахуванням військових ризиків, екологічних наслідків і соціальної вразливості населення. Це формує наукову нішу для розробки підходу, що дозволить системно інтегрувати енергетичні та екологічні рішення в муніципальне планування та практику відновлення інфраструктури в Україні.

**3. Мета роботи.** Обґрунтувати матрицю вибору технічних рішень щодо енергозабезпечення будівель, яка інтегрує екологічні, енергоефективні, соціальні та управлінські критерії в процес реконструкції та відновлення житлового фонду України.

**4. Матеріали та методи.** Для формування інтегрованої моделі вибору технічних рішень енергозабезпечення громад проаналізовано статистичні звіти Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України, НКРЕКП, відкриті дані операторів систем розподілу, муніципальні енергетичні плани та кейси впровадження локальних енергетичних рішень у громадах. У дослідженні використано також інформацію з відкритих наукових публікацій, звіти European Commission Joint Research Centre [9], International Energy Agency (IEA) [10], IEA-PVPS [11], International Renewable Energy Agency (IRENA) [12], Hydrogen Europe [13], матеріали MDPI та аналітичні бази щодо світових цін на енергоресурси. На основі цих джерел сформовано репрезентативні сценарії для типових будівель і громад з різним рівнем доступу до енергоресурсів та різним ступенем пошкодження інфраструктури, у тому числі з урахуванням досвіду функціонування осередкових енергомереж в умовах дефіциту основних джерел живлення.

Для вибору найбільш доцільних технічних рішень застосовано метод системного аналізу в поєднанні з багатокритеріальним аналізом рішень (Multiple Criteria Decision Analysis, MCDA) у формі зваженої суми (Weighted Sum Model, WSM). Кожна альтернатива оцінюється за набором критеріїв за п'ятибальною шкалою, після чого бали нормалізуються та множаться на вагові коефіцієнти, що відображають пріоритети воєнного часу (підвищена вага стійкості, резервування та екологічної безпеки) [14]. Таким чином, загальна оцінка альтернативи отримується за базовою формулою MCDA:

$$TotalScore_i = \sum_{j=1}^n S_{ij}, \quad (1)$$

де  $S_{ij}$  – оцінка рішення  $i$  за критерієм  $j$  за шкалою від 1 до 5;  $n$  – кількість критеріїв оцінки.

Підсумковий інтегральний показник формується як сума зважених нормалізованих оцінок, що дає змогу ранжувати альтернативи та обирати сценарії з найкращим поєднанням факторів.

Для пріоритезації окремих критеріїв (наприклад, стійкості під час війни) використовується зважена формула оцінювання (Weighted Sum Model, WSM):

$$WeightedScore_i = \sum_{j=1}^n w_j \cdot S_{ij}, \quad (2)$$

де  $w_j$  – вага критерію  $j$ , причому сума всіх ваг дорівнює 1.

Наприклад: енергоефективність – 20%, екологічність – 20%, економічна ефективність – 10%, стійкість – 25%, сталість – 15%, масштабованість – 10%. Щоб нормалізувати різні діапазони оцінок всіх критеріїв (від 0 до 1), здійснюється додатковий крок:

$$S_{ij}^{norm} = \frac{S_{ij} - S_j^{\min}}{S_j^{\max} - S_j^{\min}}, \quad (3)$$

де  $S_{ij}^{norm}$  – нормалізований показник альтернативи  $i$  за критерієм  $j$ ;  $S_{ij}$  – фактичне значення показника;  $S_j^{max}$ ,  $S_j^{min}$  – максимальне та мінімальне значення показника за критерієм  $j$  серед усіх альтернатив.

**5. Результати дослідження.** Джерела енергії поділяють на відновлювані та невідновлювані залежно від їхнього походження та здатності до відновлення в природі. Відновлювана енергія надходить із практично невичерпних ресурсів (сонце, вітер, геотермальна, гідроенергія, біомаса, біогаз), тоді як невідновлювані джерела включають викопне паливо – нафту, газ і вугілля. Використання відновлюваних джерел підвищує енергонезалежність України та рівень екологічної безпеки, хоча потребує значних початкових інвестицій і врахування просторових обмежень, особливо в містах. До повномасштабного вторгнення їхня частка в енергобалансі України перевищувала 10%, а до 2040 року прогнозується зростання до приблизно 28–50% виробництва.

Потенціал використання різного роду енергії, базується на сукупності різноманітних технічних рішень, що забезпечують енергопостачання за аварійних відключень. Серед них можна виділити найбільш популярні:

- підключення до мережі (національне електропостачання);
- сонячні фотоелектричні системи (Photovoltaic, PV);
- вітрові мікротурбіни (міський масштаб);
- комбіноване виробництво тепла й електроенергії (Combined Heat and Power, CHP);
- геотермальні теплові насоси;
- біомасові системи опалення;
- дизельні генератори (резервне живлення);
- системи накопичення енергії на основі акумуляторів (Battery Energy Storage Systems, BESS);
- водневі паливні елементи;
- централізоване теплопостачання (у тому числі з відновлюваних джерел);
- інтеграція «розумних мереж» та управління попитом.

Орієнтовне порівняння 11 основних технічних рішень для України здійснено на основі кількісних даних з відкритих джерел (Таблиця 1), однак в остаточних проєктних розрахунках слід враховувати велику кількість змінних факторів: локальні особливості проєктів, їх масштаб, мережеві умови, субсидії, доступ до палива і компонентів, мінливість цін у воєнний час, тощо. Попередні результати порівняння свідчать про значну різницю між капітальними витратами (CAPEX), експлуатаційними витратами (O&M), собівартістю виробленої енергії (LCOE) та коефіцієнтом використання встановленої потужності (CF).

Особливу роль у сучасних сценаріях енергостійкості відіграють системи накопичення енергії (BESS) та інтегровані рішення «розумних мереж» (Smart-grid), які у поєднанні з фотоелектричними станціями (PV) та технологіями управління попитом (DSM) дають можливість значно знизити потребу у дизельних генераторах і, відповідно, зменшити загальну собівартість автономного чи резервного енергопостачання. Навіть за умов високих початкових витрат на PV та BESS, у більшості сценаріїв ці рішення є економічно вигіднішими за дизельні установки, якщо йдеться про часте використання. Це підтверджується й національними рекомендаціями щодо впровадження систем накопичення енергії [15] (Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України).

У той же час, слід враховувати обмеження воєнного часу, оскільки доступність обладнання, проблеми з логістикою та високі ризики пошкодження інфраструктури безпосередньо впливають на CAPEX та реальний строк служби обладнання. Тому для повноцінного аналізу необхідно враховувати не лише цінові параметри, але й фактори, що мають визначальне значення у кризових умовах – надійність, мобільність та швидкість розгортання систем. Виходячи з цього, доцільно рекомендувати для швидкого підвищення енергетичної стійкості громад першочергову комбінацію розподілених PV, систем

накопичення BESS та управління попитом (DSM, smart-controls). Дизельні генератори слід залишати як резервне рішення лише для критичних випадків. Для великих об'єктів із потребами у теплопостачанні ефективними залишаються системи комбінованого виробництва тепла й електроенергії (CHP) за наявності доступного газу чи біомаси, а також централізоване теплопостачання з використанням відновлюваних джерел енергії, що дозволяє знизити рівень витрат на тепло (LCOH).

Таблиця 1. Орієнтовне порівняння технічних рішень забезпечення енергетичної стійкості  
Table 1. Approximate comparison of technical solutions for ensuring energy resilience

Технології	Капітальні витрати на встановлену потужність (CAPEX, тис.грн/кВт)	Щорічні експлуатаційні та технічні витрати (%CAPEX/рік)	Коефіцієнт використання встановленої потужності (CF, %)	Орієнтовна собівартість електроенергії (LCOE, тис.грн/МВт)	Життєвий цикл (роки)
Підключення до мережі	~21	1–2%	50–60	1,68-2,52	–
Сонячні фотоелектричні системи	29,4-42	1–2%	12–15	2,31-2,94	25–30
Вітрові мікротурбіни	63-105	2–3%	20–25	3,78-5,04	20–25
Комбіноване виробництво тепла і електроенергії	50,4-84	4–6%	70–80	2,1-3,36	20–25
Геотермальні теплові насоси	50,4-84	2–3%	–	~1,68-2,52	20–25
Біоенергетичні системи опалення	33,6-63	3–5%	70–80	1,68-2,73	15–20
Дизельні генератори	12,6-25,2	10–15%	15–20	6,3-10,5	5–10
Системи накопичення енергії	14,7-21	1–2%	–	6,3-10,5	10–15
Водневі паливні елементи	126-210	3–5%	40–50	8,4-16,8	10–15
Централізоване теплопостачання (з ВДЕ)	21-50,4	3–4%	50–70	1,68-2,94	25–30
«Розумні» мережі управління попитом	+5-15%	1–2%	–	–	20–25

*Примітка:* Підключення до стаціонарної мережі визначено як умовні витрати на інфраструктуру/резервні підключення; витрати на управління попитом за допомогою систем «розумних» мереж оцінено як додаткові до інших технологій; в містах показники встановленої потужності для вітрових мікротурбін нижче; термін служби для систем накопичення енергії залежить від кількості циклів і вартості заряджання; потужності геотермальних теплових насосів та централізованого теплопостачання оцінено в кіловат або мегават-годинах теплової енергії.

*Джерело:* розроблено автором на основі даних з відкритих джерел Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України [15], Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП) [16], European Commission Joint Research Centre [17], International Energy Agency (IEA) [10], International Energy Agency – Photovoltaic Power Systems Programme (IEA-PVPS) [11], International Renewable Energy Agency (IRENA) [12], Hydrogen Europe [13], Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI) [18], Global Petrol Prices [19].

Сонячні фотоелектричні системи є одним із найбільш перспективних напрямів, враховуючи річний сонячний ресурс України у межах 1100–1500 кВт·год/м<sup>2</sup> [11]. Централізовані теплові системи можуть бути інтегровані з біомасою, тепловими насосами чи ТЕЦ на ВДЕ. Дизельні генератори, хоча й забезпечують найшвидше встановлення та реагування у випадку аварій, залишаються найбільш дорогим варіантом через високу вартість палива та залежність від імпорту. Натомість комбінація PV + BESS + біомаса є більш стійкою завдяки автономності та використанню локальних ресурсів.

У перспективі вагому роль можуть відігравати водневі технології та паливні елементи. Наразі вони переважно реалізуються у вигляді пілотних проєктів через відсутність інфраструктури  $H_2$  та високі витрати, однак у середньо- та довгостроковій перспективі можуть стати важливим компонентом енергостійкості. «Розумні» мережі управління попитом також заслуговують особливої уваги, адже дозволяють інтегрувати відновлювані джерела, зменшувати пікові навантаження і, відповідно, підвищувати стійкість локальних енергетичних систем.

В результаті проведеного аналізу сформовано матрицю оцінювання енергозабезпечення житлових будівель (таблиця 2), яку можна використовувати у якості інструмента для обґрунтованого визначення пріоритетів і оптимального розподілу ресурсів під час вибору та впровадження технічних рішень у воєнний період. Представлена нижче система порівняльного оцінювання також дозволяє цілісно проаналізувати альтернативи та сформувані стратегічно доцільні рекомендації щодо перспектив розвитку енергозабезпечення багатоквартирних житлових будівель у містах.

Таблиця 2. Оціночна матриця технічних рішень енергозабезпечення для житлових будівель у воєнний період

Table 2. Assessment matrix of technical energy supply solutions for residential buildings during wartime

Технічне рішення	Критерій оцінки						Загальна сума балів
	Рівень пріоритету	Енерго-ефективність	Економічна ефективність	Масштабованість	Сталий розвиток	Стійкість	
Розумні мережі + управління попитом	5	5	4	5	5	5	29
Централізоване теплопостачання	4	5	4	4	5	5	28
Сонячні фотоелектричні системи	5	5	4	5	5	4	28
Системи накопичення енергії (акумулятори)	5	5	3	5	5	4	27
Геотермальні теплові насоси	5	5	3	3	5	5	26
Підключення до мережі	3	3	4	5	3	2	20
Вітрові мікротурбіни	3	4	3	5	3	2	20
Когенерація (виробництво тепла й електроенергії)	3	4	4	4	3	2	20
Водневі паливні елементи	2	5	1	2	5	5	20
Дизель-генератори	4	2	2	5	1	5	19
Біомасові системи опалення	2	3	3	3	3	3	17

*Примітка:* Наведені в таблиці 2. технічні рішення оцінено по 5-бальній системі – від 1 (мінімальний) до 5 (максимальний) – за наступними критеріями:

- 1) рівень пріоритетності – визначається шляхом аналізу вигід, готовності та стратегічної цінності;
- 2) енергоефективність – яка кількість корисної енергії отримується відносно витрат;
- 3) вартість – включає як початкові інвестиції, так і експлуатаційні та обслуговуючі витрати;
- 4) масштабованість – легкість впровадження для різних типів і масштабів будівель;
- 5) сталий розвиток – довгострокова екологічна сумісність і відповідність стандартам ESG/«зеленим» стандартам;
- 6) стійкість – здатність функціонувати в умовах стресу (війна, відключення електроенергії, кліматичні події).

У період війни в Україні критично важливою стала здатність міст швидко адаптуватися до нових загроз. Матриця оцінки технічних рішень у цьому контексті відіграє ключову, адже її застосування разом із навчанням муніципалітетів практичним кейсам дозволяє формувати ефективні сценарії реагування на виклики в енергетичній сфері. У процесі створення осередкової енергомережі громада використовує матрицю оцінки як інструмент для прийняття зважених і обґрунтованих рішень. Спочатку на основі локального енергомоніторингу збирається інформація про реальні потреби й можливості; потім альтернативи порівнюються за допомогою матриці - наприклад, чи доцільно інвестувати в сонячні або газові генератори, чи краще встановити акумуляторні системи, чи розвивати кооперацію між приватними виробниками енергії. Всі ці рішення приймаються не інтуїтивно, а з урахуванням багатьох факторів, які формально оцінені.

В умовах постійної небезпеки, що постає для енергетичної інфраструктури України, виникає необхідність переходу до децентралізації виробництва електроенергії, що дає змогу підтримувати роботу електромереж навіть за припинення роботи основних ліній передачі та централізованих джерел живлення. Для забезпечення надійного джерела й безперервного постачання енергії доцільно впроваджувати різноманітні стратегії диверсифікації — за допомогою розвитку локальної генерації, впровадження системи накопичення, а також ефективного управління споживанням. Кожне управлінське рішення чи стратегія у сфері енергозабезпечення має обґрунтовуватися на комплексній оцінці всіх релевантних факторів. Недостатній аналіз окремих аспектів, таких як економічна ефективність, стійкість до зовнішніх загроз, екологічний вплив чи технологічна гнучкість, може призвести до нерационального використання ресурсів і зниження надійності системи. Для якісного проведення такого аналізу доцільно використовувати багатокритеріальний аналіз рішень (Multiple Criteria Decision Analysis, MCDA).

У сучасних умовах MCDA набуває особливої важливості для України у сфері технічного енергозабезпечення. Зважаючи на безпрецедентні виклики, спричинені широкомасштабною військовою агресією, руйнуванням енергетичної інфраструктури та необхідністю забезпечення енергетичної безпеки, постає потреба у впровадженні системних і комплексних підходів до ухвалення рішень. Традиційні підходи, що фокусуються переважно на одному або декількох ізольованих критеріях (наприклад, економічній доцільності чи технічній ефективності), вже не відповідають сучасним реаліям та вимогам часу. MCDA дозволяє перейти до інтегрованої оцінки, враховуючи широкий спектр кількісних та якісних критеріїв, серед яких стійкість до зовнішніх загроз, економічна ефективність, екологічна безпека, здатність до інтеграції з європейськими енергомережами, ресурсна доступність та технологічна гнучкість [20].

MCDA забезпечує:

- системний і прозорий процес вибору оптимальних рішень,
- комплексну оцінку впливу кожного фактора,
- підвищення ефективності використання наявних ресурсів,
- адаптивність до зовнішніх викликів та загроз.

З практичної точки зору, використання багатокритеріального аналізу уможливорює формування збалансованих стратегій розвитку енергетики, вибору пріоритетних об'єктів для відновлення, а також визначення найефективніших напрямків інвестування [21]. Такий підхід є особливо актуальним для України, яка сьогодні змушена оперативного трансформувати енергетичний сектор, зміщуючи акцент на децентралізовані та відновлювані джерела енергії. Комплексна оцінка різних альтернатив дозволяє значно підвищити якість управлінських рішень, зменшити залежність від окремих джерел енергії, а також сприяє інтеграції до європейського енергетичного простору [20, 22].

Взаємозв'язки між об'єктами громади формують мережу реагування, здатну забезпечити гнучкість і надійність енергетичної системи. Осередкова енергетична мережа (СЕН) об'єднує локальні джерела виробництва та споживання електроенергії із сучасними методами управління попитом і балансуванням для підтримки стійкості громади. Нині до складу локальних енергетичних мереж можуть входити різні засоби виробництва та зберігання електроенергії: бензинові, дизельні, газові генератори, відновлювані джерела (сонячні, вітрові, гідроелектростанції), а також станції накопичення енергії. Однак основна тенденція майбутнього – поступова відмова від джерел на викопному паливі на користь повномасштабної інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) [23]. Осередкова енергетична мережа, якою управляє оператор системи розподілу (DSO), базується переважно на відновлюваних джерелах: це вітрові (WPS), сонячні (SPS) та гідроелектростанції (HPP). Така мережа орієнтована на забезпечення енергією широкого кола споживачів – домогосподарств, комунальних підприємств, закладів соціальної сфери та промисловості.

Етапи створення осередкової енергомережі:

*Перший етап (короткостроковий).* Відбувається створення енергетичного кооперативу для об'єднання запитів місцевих споживачів електроенергії, організації прозорої та ефективної централізованої закупівлі енергії через спільні тендерні процедури. Такий крок дозволяє громаді ефективніше використовувати бюджетні ресурси.

*Другий етап (середньостроковий).* Запроваджуються власні джерела виробництва електроенергії та енергоефективні заходи. Це сприяє зниженню залежності від сторонніх постачальників і поступовому скороченню енергоспоживання, що веде до зростання енергетичної стійкості громади.

*Третій етап (довгостроковий).* Паралельно з розвитком генеруючих потужностей застосовуються сучасні системи управління попитом, балансуванням енергії та допоміжними послугами. Це дає можливість формувати додаткові надходження до місцевого бюджету і забезпечувати стабільність енергомережі.

Прикладом створення СЕН в Україні є проект у місті Долина, де за підтримки міжнародних партнерів запропоновано розбудову децентралізованої «розумної» мережі, яка об'єднує місцеві відновлювані джерела енергії, акумуляційні системи та енергоефективні технології. Завдяки такому підходу вдалося скоротити споживання енергії на 30%, підвищити енергонезалежність громади та забезпечити економічну і соціальну стійкість [24].

Системний підхід до оцінки та впровадження технічних рішень, їхнє раціональне поєднання й інтеграція на рівні громади дозволяють створити надійну та гнучку енергетичну систему, яка здатна забезпечити стійкість до різних викликів і загроз. Технічні рішення повинні відповідати не лише поточним потребам, а й враховувати довгострокову перспективу розвитку громади, її специфіку, доступні ресурси, фінансові можливості та потенціал до масштабування. Тобто матриця технічних рішень може видозмінюватись залежно від пріоритетності критеріїв, визначених певною громадою. Такий взаємозв'язок є головним чинником для обрання раціонального варіанту енергозабезпечення, який відповідатиме як власним потребам, так і програмі зеленого розвитку.

В умовах підвищених ризиків порушення енергопостачання, характерних для воєнного часу, ефективне функціонування систем енергозабезпечення багатоповерхових міських будівель залежить від інтеграції та взаємодоповнення різних технічних рішень, які

спільно формують гнучку, стійку та багаторівневу архітектуру енергетичного середовища (Рис. 1).

Розроблена схема відображає системну архітектуру енергозабезпечення міських будівель, побудовану на принципах багаторівневої резервності, гнучкості та пріоритетного використання локальних ресурсів. Модель враховує режими функціонування як у мирний період, так і в умовах воєнних дій, коли надійність постачання з зовнішньої мережі може бути обмеженою або повністю відсутньою.



Рис.1. Схема технічних рішень забезпечення енергією і теплом багатоповерхових міських будівель  
 Fig. 1. Scheme of technical solutions for providing energy and heat to multi-storey urban buildings

Базовим рівнем залишається підключення до національної електромережі, що забезпечує централізоване живлення будівель у звичайних умовах. Проте у кризових ситуаціях, пов'язаних із відключеннями чи пошкодженням інфраструктури, основне навантаження поступово переходить на децентралізовані та автономні джерела енергії, які можуть функціонувати незалежно або в режимі взаємного резервування.

**5. Висновки.** 1. Дослідження показало, що найбільш універсальними рішеннями для енергетичної та екологічної стійкості будівель і громад в умовах війни є інтеграція сонячних фотоелектричних систем із накопичувачами енергії, застосування геотермальних технологій, «розумних» енергомереж з автоматизованим управлінням попитом та гнучке використання когенерації в громадських будівлях.

2. Серед проаналізованих альтернатив найвищий потенціал енергетичної автономності забезпечують комбіновані системи (PV + накопичувачі + когенерація), які дозволяють підтримувати базове навантаження навіть за повної втрати централізованого електропостачання. Відновлювальні джерела, насамперед дахові й розподілені PV, забезпечують гнучкість, швидке реагування та автономну генерацію, але потребують поєднання з системами накопичення для згладжування нестачі генерації й пікових навантажень; їх ефективність залежить від локації, масштабу й умов експлуатації.

3. Схема пріоритетності енергозабезпечення демонструє взаємодію централізованих мереж і локальної мікрогенерації, що дозволяє формувати гібридні енергетичні кластери з високою гнучкістю, відмовостійкістю та керованістю. Інтеграція систем управління попитом є

ключовим елементом адаптивності енергосистем у кризових умовах, забезпечуючи баланс між споживанням, генерацією та накопиченням енергії й підсилюючи стійкість будівель і громад.

4. Моделі розподіленої генерації та осередкових енергомереж підвищують не лише енергетичну автономію, а й екологічну безпеку та економічну незалежність громад, демонструючи ефективність у зменшенні витрат і підтримці соціальних сервісів під час тривалих перебоїв електропостачання. Енергетична стійкість будівель і громад за воєнних ризиків прямо залежить від рівня децентралізації енергопостачання й інтеграції локальних ВДЕ, але її реалізація обмежується фінансуванням, регуляторними умовами, логістикою та надійністю постачання обладнання.

5. Подальші дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення алгоритмів багатокритеріальної оптимізації для складних енергосистем, розробку інтегрованих методів оцінки ризиків та адаптивності сценаріїв впровадження технологій, а також пошук ефективних фінансових і комунікаційних моделей для масштабування децентралізованих рішень у різних типах регіонів.

### Список використаних джерел:

1. Укргідроенерго. Децентралізація енергетики: стратегічні плани України. Режим доступу: <http://uhe.gov.ua/media/tsentr/novyny/detsentralizatsiya-enerhetyky-stratehichni-plany-ukrayiny>
2. Liu, R. (2024). Hybrid microgrids in crisis response: An international perspective. *Smart Energy Systems*, 22(3), 134–147.
3. Krivtsov, S. (2023). Environmental impact of wartime energy infrastructure damage in Ukraine. *Environmental Security Review*, 18(2), 95–109.
4. Brown, J. (2023). Decentralised power and community adaptation amid crisis. *International Journal of Energy Policy*, 37(4), 204–218.
5. Chernyak, A. (2023). Resilience of energy systems under wartime stress. *Journal of Energy Security*, 43(1), 21–35.
6. Yatsyshin, O. (2023). Hydrogen and battery storage technologies in crisis management. *Energy Engineering*, 49(1), 52–68.
7. Winkler, C., Dabrock, K., Kapustyan, S., Hart, C., Heinrichs, H., Weinand, J.M., Linßen J. & Stolten, D. (2025). High-resolution rooftop photovoltaic potential assessment for Ukraine. *Energy Conversion and Management*, 28, 101242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101242>
8. Oleksiuk, V. (2025). Green energy as a tool for resilience and recovery of Ukraine during the war and in the post-war period. *Modern Economics*, 50, 136-143. DOI: 10.31521/modecon.V50(2025)-18
9. Joint Research Centre of the European Commission. (2025). Available at: <http://joint-research-centre.ec.europa.eu>
10. International Energy Agency. (2025). IEA Data and Statistics. Energy Prices. Available at: <http://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/energy-prices>
11. International Energy Agency – Photovoltaic Power Systems Programme. (2025). Available at: <http://iea-pvps.org>
12. International Renewable Energy Agency. (2025). Available at: <http://www.irena.org>
13. Hydrogen Europe. (2025). Available at: <http://hydrogeneurope.eu>
14. Sahabuddin, M., & Khan, I. (2021). Multi-criteria decision analysis methods for energy sector's sustainability assessment: Robustness analysis through criteria weight change. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 45, 101380. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101380>.
15. Official website of the State Agency for Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine. (2025). Available at: <http://saee.gov.ua>
16. Official website of the National Commission for State Regulation in the Energy and Utilities Sectors. (2025). Available at: <https://www.nerc.gov.ua>
17. European Commission. (2023). *Towards resilient energy networks in Europe: Policy report*. Brussels: Publications Office of the European Union.
18. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. (2025). Available at: <http://www.mdpi.com>
19. Global Petrol Prices. Ukraine electricity prices. (2025). Available at: [http://www.globalpetrolprices.com/Ukraine/electricity\\_prices/](http://www.globalpetrolprices.com/Ukraine/electricity_prices/)
20. Гирич О. С. (2024). Поняття енергетичної безпеки за законодавством України. *Юридичний науковий електронний журнал*, 8, 323–325. <https://doi.org/10.32782/2524-0374/2024-8/75>

21. Щуров І. В. (2022). Енергетична безпека держави: концепція формування стратегічних векторів зміцнення. *Економіка і регіон*, 4(87), 319–326. [https://doi.org/10.26906/EiR.2022.4\(87\).2814](https://doi.org/10.26906/EiR.2022.4(87).2814)
22. Шевченко О. А. (2021). Енергетична безпека як невід’ємний елемент забезпечення економічної безпеки держави в стратегіях національної безпеки України. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Право*, 67, 163–168. <https://doi.org/10.24144/2307-3322.2021.67.32>
23. Chen, W., Zhang, X., Li, Y., & Han, B. (2024). Simultaneous community energy supply-demand optimization by multi-microgrid operation scheduling in distribution networks. *Applied Energy*, 359, 122347. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261924013059>
24. Бондаренко Ю., Дирій І., Уніховський Л., Чех С. (2024). Бізнес-модель для сотової енергетичної мережі Долинської територіальної громади. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://e-b.com.ua/biznes-model-dlya-sotovoyi-energetichnoyi-merezi-dolinskoyi-tergromadi-6214>

## References:

1. Ukrhydroenergo. Decentralization of energy: strategic plans of Ukraine.
2. Liu, R. (2024). Hybrid microgrids in crisis response: An international perspective. *Smart Energy Systems*, 22(3), 134–147.
3. Krivtsov, S. (2023). Environmental impact of wartime energy infrastructure damage in Ukraine. *Environmental Security Review*, 18(2), 95–109.
4. Brown, J. (2023). Decentralised power and community adaptation amid crisis. *International Journal of Energy Policy*, 37(4), 204–218.
5. Chernyak, A. (2023). Resilience of energy systems under wartime stress. *Journal of Energy Security*, 43(1), 21–35.
6. Yatsyshin, O. (2023). Hydrogen and battery storage technologies in crisis management. *Energy Engineering*, 49(1), 52–68.
7. Winkler, C., Dabrock, K., Kapustyan, S., Hart, C., Heinrichs, H., Weinand, J.M., Linßen J. & Stolten, D. (2025). High-resolution rooftop photovoltaic potential assessment for Ukraine. *Energy Conversion and Management*, 28, 101242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101242>
8. Oleksiuk, V. (2025). Green energy as a tool for resilience and recovery of Ukraine during the war and in the post-war period. *Modern Economics*, 50, 136–143. DOI: 10.31521/modecon.V50(2025)-18
9. Joint Research Centre of the European Commission. (2025). Available at: <http://joint-research-centre.ec.europa.eu>
10. International Energy Agency. (2025). IEA Data and Statistics. Energy Prices.
11. International Energy Agency – Photovoltaic Power Systems Programme. (2025).
12. International Renewable Energy Agency. (2025). Available at: <http://www.irena.org>
13. Hydrogen Europe. (2025). Available at: <http://hydrogeneurope.eu>
14. Sahabuddin, M., & Khan, I. (2021). Multi-criteria decision analysis methods for energy sector's sustainability assessment: Robustness analysis through criteria weight change. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 45, 101380. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101380>.
15. Official website of the State Agency for Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine. (2025).
16. Official website of the National Commission for State Regulation in the Energy and Utilities Sectors. (2025).
17. European Commission. (2023). *Towards resilient energy networks in Europe: Policy report*. Brussels: Publications Office of the European Union.
18. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. (2025).
19. Global Petrol Prices. Ukraine electricity prices. (2025).
20. Hyrych, O. S. (2024). The concept of energy security according to the legislation of Ukraine. *Legal Scientific Electronic Journal*, 8, 323–325. <https://doi.org/10.32782/2524-0374/2024-8/75>
21. Shchurov, I. V. (2022). The concept of forming strategic vectors for strengthening the state’s energy security. *Economics and Region*, 4(87), 319–326. [https://doi.org/10.26906/EiR.2022.4\(87\).2814](https://doi.org/10.26906/EiR.2022.4(87).2814)
22. Shevchenko, O. A. (2021). Energy security as an integral element of ensuring the economic security of the state in the national security strategies of Ukraine. *Scientific Bulletin of Uzhhorod National University. Series: Law*, 67, 163–168. <https://doi.org/10.24144/2307-3322.2021.67.32>
23. Chen, W., Zhang, X., Li, Y., & Han, B. (2024). Simultaneous community energy supply-demand optimization by multi-microgrid operation scheduling in distribution networks. *Applied Energy*, 359, 122347.
24. Bondarenko, Y., Dyriy, I., Unihovsky, L., & Chekh, S. (2024). Biznes-model dlia sotovoi enerhetychnoi merezhi Dolynskoi terhomady [Business model for a cellular energy network of the Dolyna community].