

УДК 621.311:352.07:332.135:621.362

Роман Поліщук^{1,2*}, <https://orcid.org/0009-0009-0356-0226>

Сергій Шворов², д-р техн. наук, професор, <https://orcid.org/0000-0003-3358-1297>

¹Міністерство енергетики України, вул. Хрещатик, 30, Київ, 02000, Україна;

²Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 12, Київ, 03041, Україна

*Автор-кореспондент: polishchuk.r@nubip.edu.ua

ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ЕНЕРГОНЕЗАЛЕЖНИХ ГРОМАД ШЛЯХОМ ІНТЕГРАЦІЇ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

Анотація. Ефективність та стійкість енергетичних систем є ключовими питаннями в умовах сучасних викликів, таких як зростання попиту, кліматичні зміни та кризи, спричинені війною або аваріями. У статті розглядається інтеграція децентралізованих джерел генерації для забезпечення енергетичної автономності енергонезалежних громад та об'єктів критичної інфраструктури. Метою дослідження є аналіз можливостей підвищення стійкості системи енергозабезпечення громад на основі інтеграції децентралізованої генерації (сонячної, вітрової та біогазової генерації) та електроакумуляторних батарей. Методологія дослідження включала моделювання різних сценаріїв роботи системи (кризовий та звичайний режими), а також оцінку економічної ефективності. Основні результати свідчать, що інтеграція децентралізованої генерації та електроакумуляторних батарей дозволяє ефективно забезпечити покриття критичного навантаження в умовах змінного попиту та генерації. Водночас запропонована система децентралізованої генерації демонструє значну економічну ефективність із прогнозованим періодом окупності близько 8 років. Впровадження таких систем суттєво підвищує стійкість енергосистем та сприяє сталому розвитку енергонезалежних громад.

Ключові слова: енергетична автономія, децентралізована генерація, сонячна генерація, вітрова генерація, біогазова генерація, електроакумуляторні батареї, стійкість енергосистеми, критична інфраструктура.

1. Вступ

Енергетична стабільність є однією з найважливіших проблем сучасного світу, особливо в умовах глобальних викликів, таких як зміна клімату, воєнні конфлікти та техногенні катастрофи. У багатьох країнах руйнування централізованої енергетичної інфраструктури та її вразливість до зовнішніх впливів підтверджують необхідність розробки нових підходів до забезпечення стійкості енергосистем [1]. Децентралізовані джерела енергії, такі як сонячна генерація (СГ), вітрова генерація (ВГ) та біогазова генерація (БГ), стали ключовими елементами сучасних енергетичних стратегій, спрямованих на підвищення енергетичної безпеки та екологічної стійкості [2].

В Україні питання енергетичної безпеки набуло особливого значення через воєнні дії, які призвели до значних руйнувань централізованих генераторів та ліній передачі електроенергії. У таких умовах роль децентралізованих систем значно зростає, оскільки вони здатні забезпечувати мінімальне критичне навантаження для об'єктів критичної інфраструктури (ОКІ) навіть за умов повного відключення централізованих мереж. Це підтверджується успішними прикладами інтеграції мікрогрід-систем у країнах Європи та Північної Америки, де такі системи стали основою для підвищення автономності локальних громад [3].

У світовій практиці децентралізовані системи демонструють значні переваги, зокрема: гнучкість, можливість швидкого адаптування до змінних умов, зменшення вуглецевого сліду та економічну доцільність у довгостроковій перспективі [4]. Проте їх інтеграція вимагає розробки

математичних систем, які враховують як технічні особливості генерації відновлюваної енергії, так і економічні аспекти її використання.

2. Сучасний стан досліджень

У глобальному контексті децентралізована генерація енергії розглядається як один із ключових інструментів для підвищення надійності та стійкості енергетичних систем. Останні дослідження зосереджуються на інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у локальні мережі, можливостях їх взаємодії із системами зберігання енергії та забезпеченні стабільності постачання для ОКІ [6]. У країнах Європи та США мікрогрід-системи стали важливим компонентом енергетичної стратегії. Наприклад, у Данії створено високоефективні децентралізовані системи, які забезпечують стабільну роботу локальних громад навіть у кризових умовах.

У Німеччині реалізовано комплексні проєкти, спрямовані на інтеграцію сонячної та вітрової енергетики з системами накопичення енергії [5]. Такі системи довели свою ефективність у зниженні навантаження на централізовані мережі та забезпеченні енергетичної автономності локальних споживачів. У США децентралізована генерація активно використовується для забезпечення ОКІ, зокрема у віддалених районах, де централізоване постачання енергії обмежене [9].

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

Одним із найбільших викликів для дослідників є розробка ефективних алгоритмів розподілу енергетичних потоків між децентралізованими джерелами, системами накопичення та споживачами [7]. Такі алгоритми дозволяють оцінити роботу системи, знижувати витрати на енергію та забезпечувати стабільність навіть у пікові періоди споживання.

Розвиток децентралізованих енергетичних систем супроводжується численними дискусіями щодо їх ефективності, економічної доцільності та впливу на довкілля. Одна з головних гіпотез полягає в тому, що децентралізовані системи здатні забезпечити надійність енергопостачання для ОКІ в умовах кризи. Утім, опоненти вказують на технічні труднощі, пов'язані з їх впровадженням, зокрема складність інтеграції різномірних джерел енергії в єдину систему.

Ще одним дискусійним питанням є економічна вигода таких систем. Хоча децентралізована генерація дозволяє зменшити витрати на транспортування енергії та знизити навантаження на централізовані мережі, висока вартість впровадження інфраструктури може стримувати її поширення. Це особливо актуально для громад із обмеженими фінансовими ресурсами.

Екологічна складова також викликає суперечки. З одного боку, використання ВДЕ зменшує викиди парникових газів та сприяє збереженню довкілля. З іншого боку, процес виробництва та утилізації компонентів таких систем, як батареї чи сонячні панелі, може мати значний екологічний вплив, який потребує додаткових досліджень [6].

Крім того, особливу увагу привертає питання адаптації систем до змінних умов. Наприклад, ефективність сонячної та ВГ значною мірою залежить від погодних умов, що ускладнює прогнозування їхньої роботи. Це викликає потребу в розробці алгоритмів балансування та інтеграції додаткових джерел енергії, таких як БГ.

Таким чином, розвиток децентралізованих енергетичних систем вимагає подальших досліджень, спрямованих на вирішення технічних, економічних і екологічних питань, а також забезпечення стабільності роботи в умовах змінного попиту та кризи.

3. Гіпотеза та мета статті

Гіпотеза цього дослідження базується на припущенні, що інтеграція децентралізованих джерел енергії, таких як сонячна та ВГ, у поєднанні з БГ та АБ, здатна підвищити стійкість енергозабезпечення громад [8]. Зокрема, такі системи зможуть забезпечити мінімальне критичне

навантаження для ОКІ у кризових умовах, зменшивши залежність від централізованих мереж, та покращити економічну ефективність енергопостачання в звичайних умовах.

Метою дослідження є підвищення стійкості системи енергозабезпечення енергонезалежних громад на основі інтеграції ВДЕ, біогазових установок та електроаккумуляторних батарей (АБ). Дослідження зосереджено на двох ключових аспектах: забезпеченні автономної роботи енергосистем у кризових умовах для покриття мінімальних потреб ОКІ та розподілу енергії між компонентами системи із підвищенням її економічної ефективності у звичайних умовах роботи.

Це дослідження також передбачає аналіз алгоритмів балансування енергопотоків, що дозволить максимізувати ефективність використання ВДЕ та знизити вплив на довкілля. Очікувані результати сприятимуть створенню практичних рішень для енергонезалежних громад, зокрема в Україні, яка особливо потребує таких технологій у нинішніх умовах.

4. Методи та матеріали

Моделювання базувалося на аналізі енергетичних потоків у системі децентралізованої генерації [9]. Використання програмного середовища Python з бібліотекою PuLP дозволило моделювати різні сценарії роботи системи [10]. Основний акцент зроблено на балансі енергетичних потоків між джерелами генерації (сонячною, вітровою, біогазовою) та електроаккумуляторними батареями. Варто зазначити, що дослідження не включало класичної оптимізації, а зосереджувалося на аналізі ефективності роботи системи у різних режимах.

Енергосистема розроблена для забезпечення стійкості енергопостачання в умовах кризових ситуацій та можливості ефективної її роботи у звичайних умовах [11]. Вона інтегрує децентралізовані джерела енергії (СГ, ВГ та БГ), АБ та систему розподілу, яка є центральним вузлом, що координує всі потоки енергії. Система адаптована для двох основних сценаріїв: кризові та звичайні умови:

Кризові умови: у випадку виникнення кризи (відключення централізованої мережі, руйнування генераторів чи ліній передачі) система працює автономно, зосереджуючи ресурси на підтримці мінімально необхідного навантаження для ОКІ. БГ виконує роль стабілізуючого генератора, забезпечуючи безперебійне постачання енергії. Системи накопичення (батарей) використовуються як резервне джерело енергії, яке активується для компенсації дефіциту. СГ та ВГ можуть сприяти енергозабезпеченню залежно від погодних умов, однак їх генерація не є пріоритетною у кризових сценаріях.

Звичайні умови: система працює синхронно з централізованою мережею, забезпечуючи використання ВДЕ. СГ і ВГ спрямовується на задоволення локальних потреб, заряджання АБ та продаж надлишків енергії до централізованої мережі. АБ мають можливість використовуватися як установки зберігання енергії, заряджатися в періоди низького навантаження (наприклад, у нічний час) та розряджатися у години пікового споживання, забезпечуючи додаткову економічну вигоду. БГ у звичайних умовах використовуються для балансування системи або продають енергію в мережу у періоди високої ціни на енергію. Це дозволяє підвищити рентабельність системи та сприяє зменшенню вуглецевого сліду.

Компоненти системи (рис. 1):

1) СГ. Основне джерело енергії у денний час, забезпечує енергопостачання та заряджання батарей.

2) ВГ. Додаткова генерація, що працює незалежно від часу доби, але залежить від погодних умов.

3) БГ. Гнучке джерело енергії, що забезпечує стабільність системи у кризових умовах та максимальну економічну вигоду у звичайному режимі.

4) АБ. Накопичують надлишкову енергію та забезпечують резервне джерело живлення.

5) Система розподілу. Центральний вузол, який управляє потоками енергії між генераторами, АБ, ОКІ, побутовими споживачами та централізованою мережею.

6) Централізована мережа. Працює у звичайних умовах, забезпечуючи двосторонній обмін енергією.

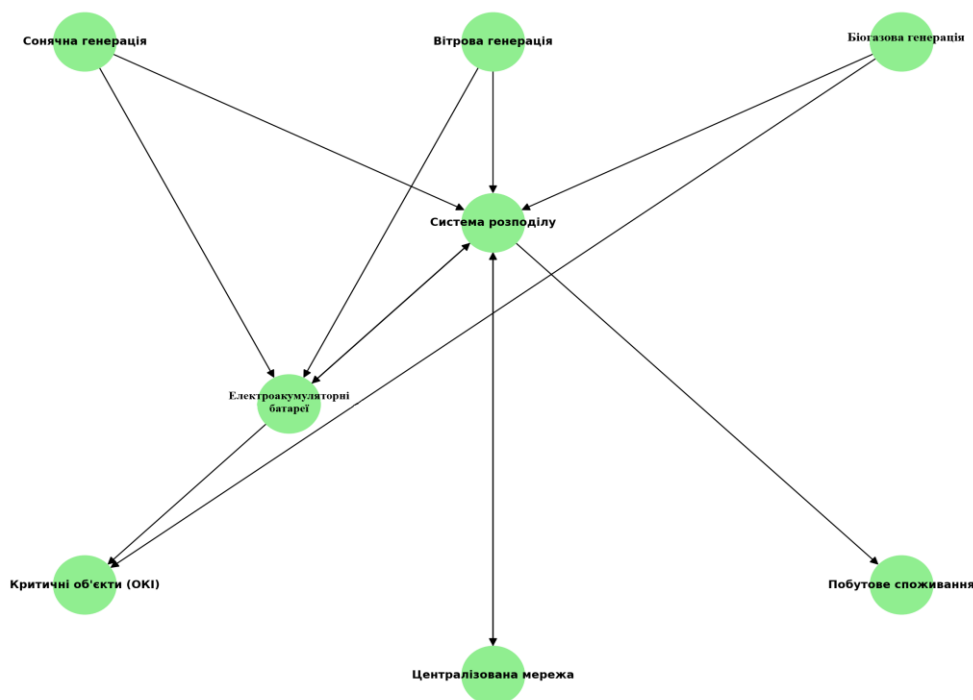


Рисунок 1. Система інтеграції децентралізованої енергетичної системи

Система розподілу координує всі енергетичні потоки, забезпечуючи стабільну роботу компонентів за різних сценаріїв. У звичайних умовах вона забезпечує гнучкість та адаптивність, дозволяючи інтегрувати надлишкову енергію в мережу або заряджати батареї. У кризових умовах система відключається від централізованої мережі та забезпечує автономну роботу, підтримуючи функціонування ОКІ.

Ця система є універсальною для адаптації до різних масштабів громади та дозволяє підвищити надійність енергозабезпечення в будь-яких умовах.

Математична система системи енергозабезпечення децентралізованого типу описує взаємодію між ключовими компонентами: генерацією енергії (сонячною, вітровою, біогазовою), системою накопичення енергії (батареї), ОКІ, побутовими споживачами та централізованою мережею. Система враховує два основні сценарії: кризовий режим роботи (автономна система) та звичайний режим (інтеграція з централізованою мережею).

Основні рівняння системи:

1. Енергетичний баланс системи

Рівняння балансу описує загальний розподіл енергетичних потоків:

$$P_{gen}(\tau) \pm P_{grid}(\tau) = P_{load}(\tau) \pm P_{store}(\tau), \quad (1)$$

де: $P_{gen}(\tau)$ – сумарна потужність, згенерована всіма децентралізованими джерелами; $P_{grid}(\tau)$ – потужність, отримана від централізованої мережі або передана до неї; $P_{load}(\tau)$ – сумарне навантаження системи (споживання ОКІ та побутовими споживачами); $P_{store}(\tau)$ – потужність, пов'язана із заряджанням або розряджанням батарей.

2. Сумарна потужність генерації

Генерація децентралізованих джерел визначається як:

$$P_{gen}(\tau) = P_{solar}(\tau) + P_{wind}(\tau) + P_{bio}(\tau), \quad (2)$$

де: $P_{solar}(\tau)$ – потужність, згенерована СГ; $P_{wind}(\tau)$ – потужність, згенерована ВГ; $P_{bio}(\tau)$ – потужність, згенерована БГ.

3. Рівняння сонячної генерації [19]

Потужність, згенерована сонячними панелями, описується формулою:

$$P_{solar}(t) = \eta_s \cdot A_s \cdot I_\tau(\tau) \cdot \cos(\theta), \quad (3)$$

де: η_s – ефективність сонячної панелі; A_s – площа панелі; $I_\tau(\tau)$ – інтенсивність сонячного випромінювання; θ – кут падіння сонячного випромінювання.

4. Рівняння вітрової генерації [20]

Потужність, згенерована вітровими установками:

$$P_{wind}(\tau) = 0.5 \cdot \rho \cdot A_w \cdot v(\tau)^3 \cdot C_p, \quad (4)$$

де: ρ – густина повітря; A_w – площа ротора; $v(\tau)$ – швидкість вітру; C_p – коефіцієнт потужності турбіни.

5. Рівняння біогазової генерації [21]

Біогазові генератори забезпечують стабільну потужність:

$$P_{bio}(\tau) = \eta_b \cdot m_b \cdot LHV, \quad (5)$$

де: η_b – ефективність установки; m_b – витрата біогазу; LHV – теплота згоряння біогазу.

6. Баланс накопичення енергії

Зміна стану заряду батарей описується рівнянням:

$$E_{store}(\tau + 1) = E_{store}(\tau) + \Delta\tau \cdot E_{store}(\tau), \quad (6)$$

де: $E_{store}(\tau)$ – стан заряду батареї в момент часу τ ; $\Delta\tau$ – часовий інтервал моделювання.

7. Пріоритет забезпечення ОКІ

У кризових умовах пріоритетом є забезпечення ОКІ:

$$P_{load,OKI}(\tau) \leq P_{gen}(\tau) \pm P_{store}(\tau), \quad (7)$$

де $P_{load,OKI}(\tau)$ – сумарне навантаження, необхідне для функціонування ОКІ.

Необхідно знайти такий варіант розподілу енергії від різних джерел для забезпечення стабільного функціонування ОКІ, щоб виконувалась умова (7) при мінімальних вартісних витратах на генерацію енергії.

Одним з основних напрямків вирішення даної задачі є застосування математичних систем, які служать основою для аналізу та оцінки роботи децентралізованої енергетичної системи з урахуванням різних сценаріїв експлуатації [14]. Математичні системи дозволяють описати генерацію енергії від різних джерел (сонячної, вітрової та біогазової), динаміку накопичення та розрядження енергії у батареях, а також розподіл енергетичних потоків між компонентами системи та зовнішньою мережею. Завдяки цим системам можна оцінити, як система забезпечуватиме стабільне енергопостачання ОКІ в кризових умовах та досягатиме економічної вигоди за звичайних умов.

Взаємодія компонентів у системі спрямована на забезпечення енергетичної автономності громад, ефективне використання ресурсів та балансування попиту й пропозиції в реальному часі.

Оцінка роботи децентралізованих енергосистем є важливим інструментом для забезпечення їхньої ефективності та стійкості. Завдання оцінки полягає у визначенні раціонального управління потоками енергії між джерелами генерації, АБ, споживачами та централізованою мережею з урахуванням як кризових умов роботи, так і звичайного режиму [13].

Основні завдання системи:

1. Мінімізувати витрати на енергопостачання шляхом використання ВДЕ та управління запасами енергії у АБ [17].
2. Гарантувати стабільність у кризових умовах, забезпечуючи мінімальне критичне навантаження для ОКІ.
3. Максимізувати економічну вигоду у звичайних умовах, продаючи надлишкову енергію до централізованої мережі.

Аналіз роботи системи базується на раніше визначених рівняннях. Для моделювання використовується рівняння балансу енергетичних потоків (1), яке забезпечує збереження енергетичного балансу між генерацією, споживанням та накопиченням. Сумарна генерація визначається рівнянням (2), яке враховує СГ, ВГ та БГ.

Рівняння динаміки накопичення енергії (6) дозволяє відстежувати зміну рівня заряду АБ, що є критично важливим для стабільної роботи системи. У кризових умовах пріоритет надається задоволенню потреб ОКІ відповідно до обмеження (7), яке гарантує, що критичне навантаження покривається за рахунок генерації та накопиченої енергії АБ.

У звичайних умовах надлишкова енергія може бути направлена до централізованої мережі для продажу, що забезпечить економічну вигоду. Водночас зарядження АБ у нічний час (за рахунок профіциту генерації) та її розрядження у години пікового попиту дозволяють досягти енергетичного балансу.

Цільова функція оцінки спрямована на мінімізацію витрат на енергію з централізованої мережі та максимізацію доходу від використання біогазової генерації.

Для вирішення задачі оцінки використовується алгоритм сценарного моделювання. Основні етапи алгоритму:

1. Вхідні дані: завантажуються параметри генерації, навантаження та початковий стан заряду АБ.
2. Моделювання генерації: визначається потужність кожного джерела енергії залежно від часу та умов.
3. Розподіл енергетичних потоків: на основі рівняння (1) розраховується розподіл енергії між споживачами, АБ та мережею.
4. Пріоритет для ОКІ: у кризових умовах використовується обмеження (7) для задоволення критичних потреб.
5. Оцінка сценаріїв: аналізуються результати розподілу енергії у різних умовах роботи системи.

Алгоритм реалізується у середовищі Python із використанням бібліотеки PuLP, яка дозволяє моделювати сценарії розподілу енергетичних потоків між джерелами генерації (СГ, ВГ, БГ) та АБ. Генерація енергії моделюється за допомогою даних про інтенсивність сонячного випромінювання та швидкість вітру, що завантажуються з відкритих джерел.

Для проведення дослідження реалізовано запропоновані математичні моделі у програмному середовищі для аналізу різних сценаріїв роботи децентралізованої енергосистеми, здатної забезпечувати стійке енергопостачання для ОКІ в умовах кризових ситуацій та у звичайних умовах.

Розглянемо варіант системи децентралізованого енергопостачання, яка моделюється для умовного базового навантаження у 1000 кВт встановленої потужності із можливістю масштабування, що інтегрує ВДЕ, БГ, АБ та централізовану мережу. Основними функціями системи є:

1) Кризовий режим:

- Енергозабезпечення ОКІ, таких як медичні установи, водопостачання та аварійний зв'язок.
- Використання БГ та АБ для стабільного постачання енергії.
- Максимальне використання доступних ресурсів від сонячної та ВГ залежно від природних умов.

2) Звичайний режим:

- Продаж надлишкової енергії до централізованої мережі для підвищення рентабельності.
- Заряджання АБ в періоди низького попиту (зокрема, вночі) та розряджання у години пікового споживання.
- Балансування енергетичних потоків між генерацією, накопиченням і споживанням для підвищення економічної ефективності.

Сценарії моделювання:

1) Кризові умови:

- Відключення централізованої мережі.
- Покриття мінімально необхідного навантаження для функціонування ОКІ.
- Пріоритет використання стабільних джерел генерації (БГ та АБ).

2) Звичайні умови:

- Робота системи синхронно з централізованою мережею.
- Максимізація використання ВДЕ (сонячна, ВГ).
- Продаж надлишкової енергії до централізованої мережі для підвищення рентабельності.

Ключові аспекти дослідження:

- Баланс енергетичних потоків: забезпечення рівноваги між генерацією, споживанням та накопиченням енергії – рівняння (1), (2) і (6).
- Пріоритетність для ОКІ: у кризових умовах забезпечення критичного навантаження для ключових об'єктів, як описано рівнянням (7).
- Оцінка сценаріїв роботи: аналіз результатів за різних умов функціонування системи.

Для моделювання було взято умовне навантаження у 1000 кВт встановленої потужності. Таке значення потужності обрано як приклад мінімально необхідного навантаження для забезпечення роботи ОКІ, таких як медичні установи, системи водопостачання та аварійного зв'язку. Це дозволяє створити універсальну систему, придатну для адаптації під конкретні потреби громад.

Для моделювання роботи децентралізованої енергосистеми використано мову програмування Python та бібліотеку `scipy.optimize.linprog`. Вибір цього інструмента обумовлений його здатністю моделювати сценарії розподілу енергетичних потоків між джерелами генерації (СГ, ВГ, БГ) та АБ. Цей метод дозволяє оцінити ефективність використання ресурсів системи у будь-якому сценарії.

Для аналізу розглянуто чотири основні режими роботи системи (табл. 1):

Таблиця 1. Розподіл генерації для кожного сценарію:

Сценарій	Сонячна генерація	Вітрова генерація	Біогазова генерація	Електроаккумуляторні батареї
День (звичайний)	500 кВт встановленої потужності (50 %)	300 кВт встановленої потужності (30 %)	20 кВт встановленої потужності (2 %)	180 кВт встановленої потужності (18 %)
Ніч (звичайний)	0 кВт встановленої потужності (0 %)	300 кВт встановленої потужності (30 %)	520 кВт встановленої потужності (52 %)	180 кВт встановленої потужності (18 %)
День (кризовий)	500 кВт встановленої потужності (50 %)	300 кВт встановленої потужності (30 %)	20 кВт встановленої потужності (2 %)	180 кВт встановленої потужності (18 %)
Ніч (кризовий)	0 кВт встановленої потужності (0 %)	300 кВт встановленої потужності (30 %)	520 кВт встановленої потужності (52 %)	180 кВт встановленої потужності (18 %)

1) День (звичайний режим): використовуються всі доступні джерела генерації, включаючи СГ. Основна мета – забезпечення навантаження та зарядження АБ для нічного використання.

2) Ніч (звичайний режим): СГ відсутня, головні джерела – ВГ, БГ та АБ. Зарядження АБ у разі профіциту генерації та розрядження у дефіциті дозволяє збалансувати систему.

3) День (кризовий режим): фокус на економії БГ для нічного використання. СГ максимально використовується для покриття денного навантаження.

4) Ніч (кризовий режим): ключовими джерелами залишаються ВГ, БГ та АБ. Головна мета – забезпечення мінімального навантаження для ОКІ.

На рис. 2 на основі математичного моделювання наведено графічне відображення розподілу енергії для кожного режиму роботи системи. Зарядження АБ, позначене від’ємними значеннями потужності, підкреслює роль профіцитної генерації у балансуванні системи.

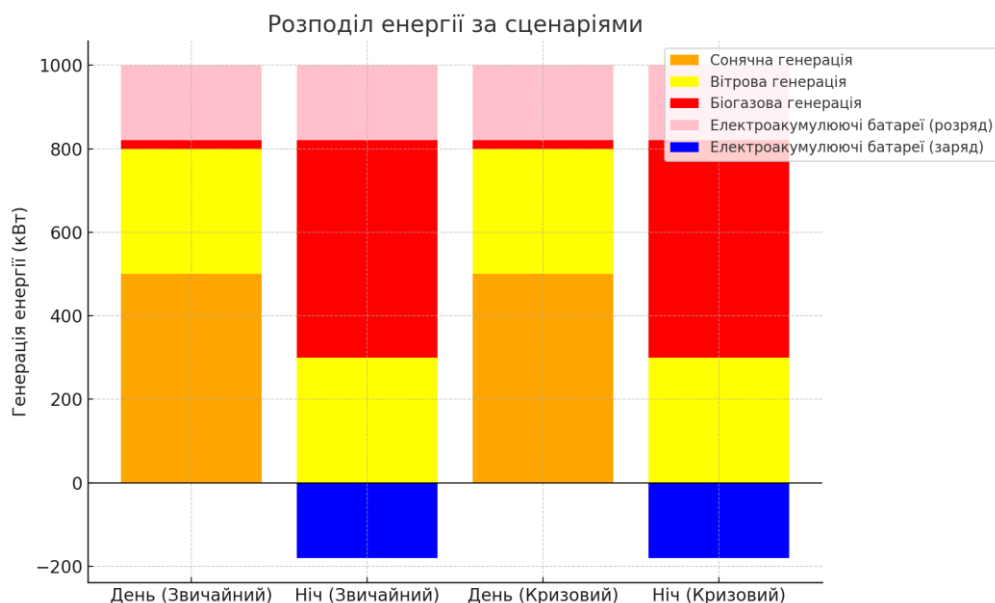


Рисунок 2. Графічне відображення розподілу потужності джерел генерації для кожного режиму

Для забезпечення необхідної стійкості системи запропоновано універсальний режим роботи, який базується на найгіршому сценарії – нічному кризовому режимі. Основна ідея – забезпечити стабільність за рахунок:

- 1) Використання ВГ (300 кВт встановленої потужності).
- 2) БГ (520 кВт встановленої потужності) як основного джерела.
- 3) АБ (180 кВт встановленої потужності) для балансування пікових навантажень.

Такий підхід дозволяє підтримувати необхідне навантаження, забезпечуючи роботу ОКІ навіть у найгірших умовах. У звичайному режимі це дозволяє використовувати сонячну енергію вдень для економії біогазу, що знижує витрати та підвищує ефективність.

Для аналізу енергетичної та економічної ефективності децентралізованої енергосистеми розрахунки виконано з урахуванням цін на енергію, сезонних коливань у СГ, а також обмежень на використання БГ. Усі значення показників базуються на актуальних ринкових даних та розподілі генерації.

Вартість системи розрахована на основі потужності компонентів та середньої ціни за 1 кВт встановленої потужності [12]. У таблиці наведено детальний розподіл витрат (табл. 2).

Таблиця 2. Потужності компонентів та загальна вартість середньої ціни за 1 кВт встановленої потужності

Компонент	Потужність (кВт встановленої потужності)	Вартість за 1 кВт встановленої потужності (\$)	Загальна вартість (\$)
Сонячна генерація	500	1000	500,000
Вітрова генерація	300	1500	450,000
Біогазова генерація	520	3000	1,560,000

Компонент	Потужність (кВт встановленої потужності)	Вартість за 1 кВт встановленої потужності (\$)	Загальна вартість (\$)
Електроаккумуляторні батареї	180	2000	360,000
Загалом	1000		2,870,000

Прибуток розраховано на основі середньорічного коефіцієнта використання встановленої потужності (СГ в Україні складає 14–15 %, а ВГ 34–35 %) та вартості енергії на українському ринку: 6 грн/кВт встановленої потужності·год для пікових годин і середніх величин тарифів для ВДЕ. Також враховано сезонність, яка знижує СГ взимку та обмежує використання БГ (табл. 3).

Таблиця 3. Дохід та ціна генерації енергії від компонентів системи

Джерело	Генерація (кВт встановленої потужності·год/рік)	Ціна (грн)	Дохід (грн)
Сонячна генерація	$500 \times 3,5 \times 365$	6.70	4,279,625
Вітрова генерація	$300 \times 8,4 \times 365$	4.10	3,771,180
Біогазова генерація (пікові)	$520 \times 6 \times 365$	6.00	6,832,800
Електроаккумуляторні батареї (пікові)	$180 \times 1 \times 365$	6.00	394,200
Загалом			15,277,805

На основі розрахованого річного доходу та загальної вартості системи визначено період окупності. Загальна вартість системи становить \$2,870,000 (~120,540,000 грн), а річний дохід (за винятком витрат на паливо для БГ) – 15,277,805 грн. Таким чином, окупність системи становить близько 8 років.

Висока рентабельність системи досягається завдяки продажу енергії за піковими тарифами та ефективному використанню БГ і АБ. Це робить систему привабливою для інвестицій і забезпечує її довготривалу ефективність.

5. Обговорення та порівняння результатів із попередніми дослідженнями

Результати цього дослідження узгоджуються з тенденціями, відзначеними в наукових роботах щодо переваг децентралізованих систем енергозабезпечення. Основний акцент робиться на стійкості, економічній ефективності та гнучкості запропонованої системи, особливо в умовах кризових ситуацій.

Децентралізовані системи є менш вразливими до руйнувань мережевої інфраструктури, оскільки вони забезпечують автономне функціонування локальних енергетичних кластерів [15]. У цьому контексті наша система підтверджує можливість покриття мінімально необхідного навантаження для ОКІ навіть у найгіршому сценарії – нічному кризовому режимі. Це суттєва перевага над централізованими системами, які є надзвичайно залежними від магістральних ліній електропередач [9].

Також варто зазначити можливості зменшення витрат і скорочення часу окупності за рахунок гнучкого управління децентралізованими ресурсами. Запропонована система демонструє близько 8 років окупності, що відповідає найкращим показникам, зазначеним у роботі [10] (7–9 років), завдяки:

1. Максимальному використанню дешевої сонячної енергії вдень.
2. Продажу енергії у години пікового споживання з батарей та біогазу.
3. Мінімізації втрат у мережі через локальну генерацію.

Порівняння з централізованими системами.

Централізовані системи, попри ефективність у звичайних умовах, втрачають свою надійність у кризових ситуаціях, наприклад під час війни чи стихійних лих. Децентралізована система з нашої статті демонструє здатність забезпечувати стійке енергопостачання за рахунок автономної роботи кожного джерела генерації.

Результати дослідження підтверджують основну гіпотезу про те, що інтеграція децентралізованих джерел генерації в енергосистему суттєво підвищує її стійкість та економічну ефективність у кризових умовах [16], а саме:

1. **Стійкість системи:** за результатами моделювання система здатна автономно покривати мінімальне навантаження 1000 кВт встановленої потужності навіть у найгіршому сценарії (нічний кризовий режим). Це підтверджує тезу про те, що децентралізована система менш вразлива до зовнішніх факторів, таких як пошкодження централізованої інфраструктури [7].

2. **Економічна ефективність:** період окупності у 8 років перевершує середні показники для децентралізованих систем. Це підтверджує тезу, що комбінування ВДЕ, біогазу та АБ забезпечує економічну вигоду навіть за високих початкових інвестицій [18].

3. **Гнучкість системи:** динамічний розподіл генерації між сонячними, вітровими установками та біогазом дозволяє забезпечити максимальну ефективність використання ресурсів протягом доби.

Деякі аспекти, такі як довгострокова стійкість системи за умов значних кліматичних змін (зменшення ефективності СГ та ВГ), не розглядалися в рамках цього дослідження. Тому гіпотеза про універсальність підходу потребує додаткових досліджень.

Дослідження має кілька важливих обмежень, які необхідно враховувати при інтерпретації отриманих результатів. Одним із основних обмежень є спрощення системи. Зокрема, використані системи генерації енергії базуються на середніх значеннях для оцінки потужності джерел енергії. Це означає, що потужність СГ оцінювалася без урахування добових і сезонних коливань, за винятком зимового періоду. Крім того, моделювання ВГ здійснювалося за умов ідеальної доступності сировини, що може суттєво відрізнятися від реальних умов експлуатації.

Ще одним значущим обмеженням є неврахування зовнішніх факторів. У дослідженні не враховувався довгостроковий вплив кліматичних змін на ефективність ВДЕ. Також не розглядалася можливість збоїв у постачанні компонентів системи, таких як акумулятори або обладнання для біогазових установок. Окрім того, соціальні та економічні аспекти, такі як доступність інвестицій і субсидій, залишилися поза увагою, що може впливати на реалістичність практичного впровадження досліджених технологій.

Окремо слід зазначити обмеження, пов'язані з географічною специфікою. Системи, що використовувалися у дослідженні, були адаптовані до умов України. Це створює труднощі у застосуванні отриманих результатів для регіонів із суттєво відмінними кліматичними або економічними умовами. Зазначене обмеження вказує на необхідність додаткової адаптації систем для інших регіонів перед їх використанням.

Загалом, зазначені обмеження підкреслюють важливість обережного підходу до інтерпретації результатів і врахування додаткових факторів при подальшому впровадженні подібних систем у практиці.

6. Рекомендації для впровадження

Одним із ключових напрямків впровадження децентралізованих енергетичних систем є їх використання в енергонезалежних громадах [19]. Ці системи мають особливу ефективність для забезпечення стабільного енергопостачання ОКІ, таких як лікарні, школи та системи водопостачання. Крім того, громади, розташовані в регіонах із високим сонячним чи вітровим потенціалом, зокрема в південних областях України, мають найбільші переваги від впровадження систем із СГ та ВГ. Такі технології здатні значно підвищити енергетичну автономність та зменшити залежність від централізованих джерел енергії.

Фінансова підтримка є ще одним критично важливим фактором для успішної реалізації таких систем [20]. Зокрема, державні субсидії та міжнародна фінансова допомога можуть суттєво зменшити стартові витрати на впровадження систем. У цьому контексті важливим є також запровадження пільгових програм кредитування для локальних громад. Такі програми здатні стимулювати перехід на ВДЕ, знижуючи бар'єри для фінансування проєктів, особливо в громадах із обмеженими ресурсами.

Іншим перспективним підходом є створення енергоефективних кластерів, які об'єднують сусідні громади в децентралізовані енергетичні мережі. Такий підхід дозволяє забезпечити ефективний обмін енергією між громадами, мінімізуючи втрати через її транспортування. Використання розумних мереж (smart grids) у цих кластерах забезпечує автоматизацію управління енергетичними потоками, що підвищує загальну ефективність системи та сприяє використанню наявних ресурсів.

Масштабування запропонованої системи відкриває значні можливості для інтеграції децентралізованої генерації в промислові зони та великі міста. Це забезпечує можливість використання ВДЕ та АБ, що сприятиме зниженню вуглецевого сліду великих споживачів енергії, таких як промислові підприємства та міська інфраструктура. Таким чином, міста та великі об'єкти можуть значно підвищити енергоефективність, одночасно зменшуючи залежність від викопних джерел енергії.

Для ефективного функціонування масштабованих систем необхідно розширити та вдосконалити системи управління енергетичними потоками. Це передбачає інтеграцію із сучасними платформами управління, які базуються на алгоритмах прогнозування попиту, зокрема із застосуванням штучного інтелекту. Автоматизація роботи БГ та АБ дозволить балансувати між генерацією та споживанням, що є критично важливим для великих систем із різноманітними споживачами.

Крім технічних можливостей, масштабування відкриває перспективи для значних інвестицій у розвиток енергетичних технологій. Великі міста можуть стати платформами для залучення як державних, так і приватних інвесторів, зацікавлених у створенні кластерів децентралізованої енергетики. Інтеграція таких кластерів забезпечить взаємовигідне партнерство та стане ключовим фактором розвитку інновацій у сфері енергетики.

Загальні рекомендації.

Для реалізації повного потенціалу децентралізованої енергетики важливо забезпечити підтримку на законодавчому рівні. Це включає розробку нормативно-правової бази, яка стимулюватиме розвиток таких систем, а також впровадження спрощених процедур підключення до енергетичних мереж для громад і підприємств, які використовують децентралізовані джерела [21].

Освітні програми, спрямовані на висвітлення переваг децентралізованих систем, можуть сприяти формуванню позитивного ставлення до таких проєктів. Демонстраційні проєкти, які показують реальні приклади успішної реалізації децентралізованих систем, допоможуть залучити як громади, так і потенційних інвесторів.

Отже, масштабування децентралізованих енергетичних систем для великих об'єктів і міських інфраструктур вимагає поєднання технологічних інновацій, інвестиційної підтримки та активного сприяння на законодавчому рівні, що разом забезпечить сталий розвиток енергетики в Україні.

7. Основні результати та перспективи

В результаті проведеного дослідження підтверджено гіпотезу підвищення стійкості системи енергозабезпечення енергонезалежних громад на основі інтеграції ВДЕ, БГ та АБ. Результати моделювання показали, що децентралізована енергосистема здатна забезпечити необхідне навантаження для ОКІ навіть у найгірших сценаріях, таких як нічний кризовий режим. Завдяки автономному функціонуванню компонентів, система демонструє високу стійкість до пошкоджень централізованої інфраструктури.

У звичайному режимі система забезпечує значну економічну вигоду за рахунок використання наявних ресурсів та продажу надлишкової енергії за піковими тарифами. Період окупності становить близько 8 років, що перевищує середній показник для подібних систем.

Впровадження децентралізованих енергетичних систем дозволяє суттєво підвищити стійкість загальної енергосистеми, знижуючи її вразливість до зовнішніх впливів, таких як пошкодження мереж або підвищення попиту. Також розподілена генерація створює умови для сталого енергозабезпечення в громадах, особливо у віддалених регіонах.

Використання ВДЕ (сонячна та ВГ) сприяє зменшенню викидів CO₂ та інших шкідливих речовин, що відповідає цілям сталого розвитку. Локальне виробництво та споживання енергії мінімізує втрати у мережі, підвищуючи енергоефективність.

Перспективним напрямком є використання алгоритмів штучного інтелекту для прогнозування попиту та управління енергетичними потоками, що може значно підвищити ефективність децентралізованих систем. Це дозволить автоматизувати регулювання генерації та накопичення енергії залежно від змінних умов. Крім того, необхідно провести моделювання впливу кліматичних змін на генерацію ВДЕ. Такі дослідження допоможуть оцінити стабільність системи у тривалому часовому горизонті. Аналіз впливу тарифів та економічних змін на рентабельність системи дозволить адаптувати систему до реальних ринкових умов.

Внесок авторів. Аналіз та систематизація інформації, матеріали дослідження, розробка методології, моделювання сценаріїв роботи енергосистеми, результати та обговорення – Роман Поліщук; концептуалізація дослідження, науковий супровід, огляд літератури, перевірка методології, висновки – Сергій Шворов.

Посилання

1. Kalju J., Kehinde H. M., Oladipo S. S. Integrating 4IR technologies in microgrid development: Implications for sustainable economic growth in rural areas of Nigeria. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2024. Vol. 24. Iss. 3. P. 1–15. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.24.2.3077>
2. Eagles A. Global perspectives on energy communities for a just transition: UK and Africa Community Energy Systems. 2024. 27 p. URL: https://cesetproject.com/sites/default/files/Global%20Perspectives%20on%20Community%20Energy%20for%20a%20Just%20Transition_Eales_0.pdf (Last accessed: 02.12.2024).
3. Chrostek T., Favaro V. The role of decentralized energy communities in supporting telecom infrastructure: KTH Masters Thesis Report. 2024. URL: <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1900870/FULLTEXT01.pdf> (Last accessed: 03.12.2024).
4. Idzikowski A., Dudnikov S., Miroshnyk O., Savchenko O., Trunova I., Pazy V., Milenin A., Shchur T., Halko S., Burnayev O., Mazur M. Prospects for Biogas Plant Implementation in the Unified Energy System. *System Safety: Human – Technical Facility – Environment*. 2024. Vol. 6. Iss. 1. P. 154–166. <https://doi.org/10.2478/czoto-2024-0017>
5. Brown D., Sappington D. E. M. Employing Simple Cost-Sharing Policies to Motivate the Efficient Implementation of Distributed Energy Resources. USAEE Working Paper. 2018. 54 p. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3213275>
6. Pepermans G., Driesen J., Haeseldonckx D., Belmans R., D'haeseleer W. Distributed generation: definition, benefits and issues. *Energy Policy*. 2005. Vol. 33. Iss. 6. P. 787–798. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2003.10.004>
7. Bielokha H., Chupryna L., Denisyuk S., Eutukhova T., Novoseltsev O. Hybrid Energy Systems and the Logic of Their Service-Dominant Implementation: Screening the Pathway to Improve Results. *Energy Engineering*. 2023. Vol. 120. Iss. 6. P. 1307–1323. <https://doi.org/10.32604/ee.2023.025863>
8. Khorasany M., Azuatalam D., Glasgow R., Liebman A., Razzaghi R. Transactive Energy Market for Energy Management in Microgrids: The Monash Microgrid Case Study. *Energies*. 2020. Vol. 13. Iss. 8. <https://doi.org/10.3390/en13082010>
9. Kostenko G., Zaporozhets A. Enhancing of the Power System Resilience Through the Application of Micro Power Systems (microgrid) with Renewable Distributed Generation. *System Research in Energy*. 2023. No. 3(74). P. 25–38. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.03.025>
10. Orumwense E., Abo-Al-Ez K. Internet of Things for smart energy systems: A review on its applications, challenges and future trends. *AIMS Electronics and Electrical Engineering*. 2022. Vol. 7. Iss. 1. P. 50–74. <https://doi.org/10.3934/electreng.2023004>
11. Honarmand M. E., Hosseinneshad V., Hayes B., Siano P. Local Energy Trading in Future Distribution Systems. *Energies*. 2021. Vol. 14. Iss. 11. 3110. <https://doi.org/10.3390/en14113110>
12. Басок Б.І., Дубовський С.В., Куделя П.П. Сучасні проблеми функціонування ТЕЦ України. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 6. С. 52–57. <https://doi.org/10.15407/techned2022.06.052>
13. Находов В.Ф. Управління режимами споживання та ефективністю використання електричної енергії в енергетичних системах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.01 – енергетичні системи та комплекси. Київ, 2018. 52 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/23188> (дата звернення: 01.12.2024).
14. Про Національний план скорочення викидів від великих спалювальних установок: розпорядження Кабінету Міністрів України від 08.11.2017 р. № 796-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/796-2017-%D1%80#Text> (дата звернення: 02.12.2024).
15. Тесленко О.І. Енергетичний потенціал розподіленої генерації на потужних котельнях України в умовах воєнної агресії. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2024. Т. 78. № 1. С. 47–59. <https://doi.org/10.33070/etars.1.2024.04>

16. DIRECTIVE 2004/8/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the promotion of cogeneration based on a useful heat demand in the internal energy market and amending Directive 92/42/EEC (2004, February 11). *Official Journal of the European Union*. L 52/50. URL: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:052:0050:0060:EN:PDF> (Last accessed: 04.12.2024).
17. Дерій В., Згуровець О. Акумулятори теплової енергії. *Системні дослідження в енергетиці*. 2023. № 3(74). С. 4–14. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.03.004>
18. Energy Improvement Districts – Conceptual and Technical Guidance for Implementing Cooperative Energy Planning at the District Level. AREA 21. Baltic Sea Region Programme 2014–2020. 2020. 100 p. URL: <https://interreg-baltic.eu/wp-content/uploads/2021/08/105-AREA21-Energy-Improvement-Districts-Book.pdf> (Last accessed: 06.12.2024).
19. Про комбіноване виробництво теплової та електричної енергії (когенерацію) та використання скидного енергопотенціалу: Закон України. *Відомості Верховної Ради України (ВВР)*. 2005. № 20. ст. 278. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2509-15#Text> (дата звернення: 24.10.2024).
20. Про ринок електричної енергії: Закон України. *Відомості Верховної Ради (ВВР)*. 2017. № 27-28. ст. 312. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text> (дата звернення: 23.11.2024).
21. Про альтернативні джерела енергії: Закон України. *Відомості Верховної Ради України (ВВР)*. 2003. № 24. ст. 155. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text> (дата звернення: 11.12.2024).

References

1. Kalju, J., Kehinde, H. M., & Oladipo, S. S. (2024). Integrating 4IR technologies in microgrid development: Implications for sustainable economic growth in rural areas of Nigeria. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 24(3), 1–15. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.24.2.3077>
2. Eagles, A. (2024). *Global perspectives on energy communities for a just transition: UK and Africa Community Energy Systems* (27 p.). Retrieved December 02, 2024, from https://cesetproject.com/sites/default/files/Global%20Perspectives%20on%20Community%20Energy%20for%20a%20Just%20Transition_Eales_0.pdf
3. Chrostek, T., & Favaro, V. (2024, July 23). *The role of decentralized energy communities in supporting telecom infrastructure* [KTH Masters Thesis Report]. Retrieved December 03, 2024, from <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1900870/FULLTEXT01.pdf>
4. Idzikowski, A., Dudnikov, S., Miroshnyk, O., Savchenko, O., Trunova, I., Pazyi, V., Milenin, A., Shchur, T., Halko, S., Burnayev, O., & Mazur, M. (2024). Prospects for Biogas Plant Implementation in the Unified Energy System. *System Safety: Human – Technical Facility – Environment*, 6(1), 154–166. <https://doi.org/10.2478/czoto-2024-0017>
5. Brown, D., & Sappington, D. E. M. (2018, July 13). *Employing Simple Cost-Sharing Policies to Motivate the Efficient Implementation of Distributed Energy Resources*. USAEE Working Paper (54 p.). <https://doi.org/10.2139/ssrn.3213275>
6. Pepermans, G., Driesen, J., Haeseldonckx, D., Belmans, R., & D'haeseleer, W. (2005). Distributed generation: definition, benefits and issues. *Energy Policy*, 33(6), 787–798. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2003.10.004>
7. Bielokha, H., Chupryna, L., Denisyuk, S., Eutukhova, T. & Novoseltsev, O. (2023). Hybrid Energy Systems and the Logic of Their Service-Dominant Implementation: Screening the Pathway to Improve Results. *Energy Engineering*, 120(6), 1307–1323. <https://doi.org/10.32604/ee.2023.025863>
8. Khorasany, M., Azuatalam, D., Glasgow, R., Liebman, A., & Razzaghi, R. (2020). Transactive Energy Market for Energy Management in Microgrids: The Monash Microgrid Case Study. *Energies*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/en13082010>
9. Kostenko, G., & Zaporozhets, A. (2023). Enhancing of the power system resilience through the application of micro power systems (microgrid) with renewable distributed generation. *System Research in Energy*, 3(74), 25–38. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.03.025>
10. Orumwense, E., & Abo-Al-Ez, K. (2022). Internet of things for smart energy systems: A review on its applications, challenges and future trends. *AIMS Electronics and Electrical Engineering*, 7(1), 50–74. <https://doi.org/10.3934/electreng.2023004>
11. Honarmand, M. E., Hosseinneshad, V., Hayes, B., & Siano, P. (2021). Local energy trading in future distribution systems. *Energies*, 14(11), 3110. <https://doi.org/10.3390/en14113110>
12. Basok, B.I., Dubovskiy, S.V., & Kudelya, P.P. (2022). Modern problems of CHP functioning in Ukraine. *Technical Electrodynamics*, 6, 52–57 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/techned2022.06.052>
13. Nakhodov, V.F. (2018). *Management of consumption patterns and efficiency of electricity use in power systems*. [Abstract for the degree of Doctor of Technical Sciences, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"]. Retrieved December 01, 2024, from <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/23188> [in Ukrainian].
14. On the National Plan for Reducing Emissions from Large Combustion Plants: Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine of 08.11.2017 No. 796-r. Retrieved December 02, 2024, from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/796-2017-%D1%80#Text> [in Ukrainian].

15. Teslenko, O.I. (2024). Energy potential of distributed generation at powerful boiler houses of Ukraine in conditions of military aggression. *Energy Technologies & Resource Saving*, 78(1), 47–59 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.33070/etars.1.2024.04>
16. DIRECTIVE 2004/8/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the promotion of cogeneration based on a useful heat demand in the internal energy market and amending Directive 92/42/EEC (2004, February 11). *Official Journal of the European Union*, L 52/50. Retrieved December 04, 2024, from <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:052:0050:0060:EN:PDF>
17. Derii, V., & Zgurovets, O. (2023). Heat Energy Storages. *System Research in Energy*, 3(74), 4–14 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.03.004>
18. Energy Improvement Districts – Conceptual and technical guidance for implementing cooperative energy planning at the district level. (2020). AREA 21, Baltic Sea Region Programme 2014–2020 (100 p.). Retrieved December 06, 2024, from <https://interreg-baltic.eu/wp-content/uploads/2021/08/105-AREA21-Energy-Improvement-Districts-Book.pdf>
19. Verkhovna Rada of Ukraine. (2005). On combined heat and power generation (cogeneration) and the use of waste energy potential: Law of Ukraine. *Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine (VVR)*, 20, Art. 278. Retrieved October 24, 2024, from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2509-15#Text> [in Ukrainian].
20. Verkhovna Rada of Ukraine. (2017). About the electricity market: Law of Ukraine. *Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine (VVR)*, 27-28, Art. 312. Retrieved November 23, 2024, from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text> [in Ukrainian].
21. Verkhovna Rada of Ukraine. (2003). About alternative energy sources: Law of Ukraine. *Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine (VVR)*, 24, Art. 155. Retrieved December 11, 2024, from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text> [in Ukrainian].

IMPROVING THE RESILIENCE OF POWER SYSTEMS FOR ENERGY-INDEPENDENT COMMUNITIES THROUGH THE INTEGRATION OF DECENTRALIZED GENERATION

Roman Polishchuk^{1,2*}, <https://orcid.org/0009-0009-0356-0226>

Serhii Shvorov², Dr. Sci. (Engin.), Professor, <https://orcid.org/0000-0003-3358-1297>

¹Ministry of Energy of Ukraine, 30, Khreshchatyk St., Kyiv, 02000, Ukraine;

²National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 12, Heroiv Oborony St., Kyiv, 03041, Ukraine

*Corresponding author: polishchuk.r@nubip.edu.ua

Abstract. *The efficiency and resilience of energy systems are critical issues in addressing modern challenges such as growing demand, climate change, and crises caused by wars or accidents. This article examines the integration of decentralized generation sources to ensure the energy autonomy of self-sufficient communities and critical infrastructure facilities. The study aims to analyze the potential for enhancing the resilience of energy supply systems in communities through the integration of decentralized generation (solar, wind, and biogas generation) and electrochemical batteries. The research methodology included modeling various operational scenarios of the system (crisis and normal modes) and assessing economic efficiency. The main results indicate that the integration of decentralized generation and electrochemical batteries effectively ensures the coverage of critical loads under variable demand and generation conditions. At the same time, the proposed decentralized generation system demonstrates significant economic efficiency with a projected payback period of approximately 8 years. The implementation of such systems significantly enhances the resilience of energy systems and promotes the sustainable development of self-sufficient communities.*

Keywords: energy autonomy, decentralized generation, solar generation, wind generation, biogas generation, electrochemical batteries, energy system resilience, critical infrastructure.

Надійшла до редколегії: 03.01.2025