



ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕКОНОМІЧНА БЕЗПЕКА

УДК 620.9:338.45:351.824.11
JEL Classification: Q42, Q48, L94

DOI: <https://doi.org/10.37332/2309-1533.2025.2.34>

Пуцентейло П.Р.,
*д-р екон. наук, професор, професор кафедри
бізнес-аналітики та інноваційного інжинірингу,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0168-9316>,*
Шевчук С.Д.,
*викладач кафедри транспорту і логістики,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2028-2493>,*
Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль
Вербіцька І.І.,
*канд. екон. наук, доцент, доцент кафедри
фундаментальних та спеціальних дисциплін,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4632-859X>*
*Чортківський навчально-науковий
інститут підприємництва і бізнесу
Західноукраїнського національного університету, м. Тернопіль*

ІНФРАСТРУКТУРНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОЗВИТКУ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ В КОНТЕКСТІ ПОСИЛЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ НАЦІОНАЛЬНОЇ ЕКОНОМІКИ

Putsenteilo P.R.,
*dr.sc.(econ.), professor, professor at the department
of business analytics and innovative engineering,*
Shevchuk S.D.,
*lecturer at the department of transport and logistics,
West Ukrainian National University, Ternopil,*
Verbitska I.I.,
*cand.sc.(econ.), assoc. prof., associate professor at the
department of fundamental and special disciplines,
Chortkiv Education and Research Institute of Entrepreneurship
and Business of West Ukrainian National University, Ternopil*

INFRASTRUCTURAL SUPPORT FOR THE DEVELOPMENT OF DISTRIBUTED GENERATION IN THE CONTEXT OF STRENGTHENING THE ENERGY SECURITY OF THE NATIONAL ECONOMY

Постановка проблеми. Сучасна енергетика історично формувалася на основі централізованої моделі виробництва електроенергії. Основні обсяги електричної енергії традиційно генеруються на великих енергетичних об'єктах – теплових, атомних та гідроелектростанціях, які виступають ключовими елементами національних енергосистем. Концентрація значних генеруючих потужностей на таких станціях забезпечує економічні переваги завдяки ефекту масштабу, що проявляється у зниженні питомих витрат виробництва та підвищенні ефективності використання паливно-

енергетичних ресурсів. Електроенергія, вироблена на великих електростанціях, передається на значні відстані через розгалужені системи електропередачі до основних центрів споживання.

Отже, одним із ключових стратегічних викликів світового розвитку на найближчу перспективу є забезпечення переходу до вуглецево-нейтральної економіки. Досягнення цієї мети передбачає глибоку трансформацію енергетичного сектору, насамперед через реалізацію політики декарбонізації електроенергетики. У цьому контексті пріоритетного значення набуває поступове скорочення використання викопних паливних ресурсів та активне впровадження відновлюваних джерел енергії. Така структурна перебудова енергетичного балансу стимулює розвиток нових організаційно-технологічних моделей виробництва електроенергії, зокрема поширення систем розподіленої генерації, що базуються на локальних та екологічно чистих джерелах енергії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж тривалого часу енергетична інфраструктура України розвивалася на основі централізованої ієрархічної моделі, відповідно до якої виробництво електричної енергії здійснювалося на великих електростанціях, після чого вона передавалася магістральними мережами до систем розподілу і кінцевих споживачів. Така модель була ефективною в умовах стабільного розвитку енергетики та достатнього рівня інвестицій у мережеву інфраструктуру. Водночас сучасні виклики, зокрема руйнування енергетичної системи через ракетно-шахедні атаки, необхідність швидкої декарбонізації економіки, зростання ролі відновлюваних джерел енергії та підвищення вимог до енергетичної безпеки, зумовлюють потребу у формуванні більш гнучких і децентралізованих моделей функціонування енергосистем. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває розвиток розподіленої генерації, яка дозволяє створювати генеруючі потужності безпосередньо поблизу місць споживання електричної енергії, зменшуючи навантаження на магістральні мережі та підвищуючи рівень енергетичної автономності окремих територій.

Проблемами використання розподіленої генерації займалися такі вчені і практики, зокрема: Безкостний П., Бобров Є., Данильченко Д., Денисюк С., Драчук Ю., Запорожець А., Кириленко О., Кишакевич Б., Клендій П., Козирський В., Костенко Г., Коцар О., Мельникова М., Самков О., Стогній Б., Теліженко О., Чернюк А. У наукових працях значних дослідників значна увага приділяється питанням технологічних особливостей інтеграції об'єктів розподіленої генерації в енергетичні системи, підвищенню ефективності використання відновлюваних джерел енергії, розвитку інтелектуальних електромереж та формуванню децентралізованих моделей енергопостачання.

Окремий напрям досліджень стосується економічних аспектів функціонування систем розподіленої генерації, зокрема формування ефективних механізмів стимулювання інвестицій у розвиток відновлюваних джерел енергії, удосконалення ринкових моделей функціонування енергетичних систем, а також підвищення конкурентоспроможності енергетичного сектору. У цьому контексті значну увагу приділено дослідженню ролі розподіленої генерації у підвищенні гнучкості енергосистем, оптимізації енергетичних потоків та зниженні втрат під час транспортування електроенергії.

Також у науковій літературі активно досліджуються питання інтеграції розподіленої генерації з інтелектуальними електромережами, системами накопичення енергії та цифровими платформами управління енергетичними потоками. Це зумовлено тим, що розвиток розподіленої генерації є одним із ключових напрямів трансформації сучасних енергетичних систем у контексті енергетичного переходу, декарбонізації економіки та підвищення енергетичної безпеки держав.

Разом з тим, попри значну кількість досліджень у цій сфері, недостатньо розробленими залишаються питання формування комплексного інфраструктурного забезпечення розвитку розподіленої генерації, інтеграції локальних енергетичних систем у загальнонаціональну енергетичну інфраструктуру, а також розроблення ефективних моделей стратегічного управління розвитком розподіленої енергетики в контексті зміцнення енергетичної безпеки національної економіки. У більшості сучасних досліджень розподілена генерація розглядається як допоміжний елемент енергосистеми, який виконує функцію покриття частини локального попиту на електроенергію. Такий підхід не повною мірою відображає потенціал розподіленої генерації у формуванні нової архітектури енергетичних систем.

У цьому контексті доцільно сформулювати нову концепцію розвитку енергосистеми, у якій розподілена генерація виступатиме не лише додатковим джерелом електроенергії, а ключовим елементом забезпечення енергетичної стійкості.

Постановка завдання. Мета статті – обґрунтування ролі розподіленої генерації у зміцненні енергетичної безпеки національної економіки, визначення ключових елементів її інфраструктурного забезпечення та формування підходів до подальшого розвитку розподіленої генерації в Україні.

Виклад основного матеріалу дослідження. Традиційна модель функціонування електроенергетики характеризується чіткою просторово-функціональною структурою, у межах якої енергетична система поділяється на декілька взаємопов'язаних складових:

1. Потужні об'єкти генерації, де відбувається виробництво електричної енергії.
2. Магістральні мережі електропередачі, призначені для транспортування значних обсягів електроенергії на великі відстані.

3. Локальні системи розподілу та кінцеві зони споживання, де електроенергія постачається безпосередньо споживачам.

Така організація енергетичної інфраструктури історично сформувалася на основі концентрації генеруючих потужностей у відносно обмеженій кількості великих електростанцій та їх подальшого підключення до розгалуженої мережі передачі й розподілу електроенергії.

Водночас значна частина традиційних електростанцій, зокрема теплові та атомні, у процесі виробництва електричної енергії генерують також значні обсяги теплової енергії. На відміну від електроенергії, теплова енергія має суттєві обмеження щодо транспортування на значні відстані, оскільки зростання довжини теплових мереж супроводжується істотними втратами тепла. Крім того, багато великих електростанцій розміщені на значній відстані від населених територій з огляду на технологічні, екологічні та безпекові вимоги. Внаслідок цього значна частина побічної теплової енергії, що утворюється під час виробництва електроенергії, нерационально використовується для потреб теплопостачання та розсіюється у навколишньому середовищі, фактично втрачаючи потенціал корисного енергетичного ресурсу.

Енергетична криза сімдесятих років ХХ століття призвела до того, що в західних країнах зникла тенденція до максимальної централізації електропостачання. З цього часу почала інтенсивно розвиватися розподілена (розосереджена) генерація. При роботі в системі розподілена генерація підключається в розподільчу мережу на низькі напруги (6–10–35 кВ) [1, с. 23].

Важливим технологічним рішенням для побудови сучасних та надійних мереж є розподілена генерація, яка відповідає вимогам енергоефективності та екологічної чистоти, але вимагає масштабних змін в інфраструктурі. Технології розподіленої генерації передбачають виробництво електроенергії в безпосередній близькості до точок споживання. Технічно розподілений енергетичний ресурс – це невеликий об'єкт генерації, приєднаний до розподільчої мережі. Він може бути представлений сонячними панелями, малими вітровими турбінами, газовими генераторами невеликої потужності або контрольованим навантаженням, а також різного роду комбінованими системами на базі різних технологій [2].

Ефективним способом оперативного подолання дефіциту генеруючих потужностей в об'єднаній енергетичній системі України є впровадження об'єктів розподіленої генерації з гарантованою видачею потужності, а також модернізація мережевої інфраструктури системи передачі та розподілу електричної енергії. Це зумовлено необхідністю забезпечення функціонування енергетичного сектору відповідно до вимог законодавства Європейського Союзу щодо спільних правил внутрішнього ринку електричної енергії, імплементація яких є одним із зобов'язань України в межах участі в Енергетичному Співтоваристві та в процесі інтеграції до Європейського Союзу.

У Стратегії розвитку розподіленої генерації під терміном «розподілена генерація» розуміють генеруючі установки, приєднані до систем розподілу. При цьому нові генеруючі одиниці, що встановлюються на існуючих електростанціях, які мають схему видачі потужності як в мережі операторів системи розподілу, так і оператора системи передачі, розглядаються як розподілена генерація [3].

Розподілене виробництво енергії (англ. Distributed power generation) – це концепція будівництва джерел енергії та розподільчих мереж, яка передбачає наявність великої кількості користувачів, які виробляють теплову і електричну енергію для власних потреб, а також спрямовують надлишки в загальну мережу (електричну або теплову). Підключені до загальних мереж локальні джерела енергії в поєднанні з засобами накопичення, зберігання та перетворення енергії визначаються як розподілені енергетичні ресурси (англ. Distributed Energy Resources – DER) [4].

Розподілена генерація – це децентралізоване виробництво електроенергії, яке здійснюється невеликими енергетичними установками безпосередньо біля місць її споживання. На відміну від традиційної централізованої енергетичної системи, де електроенергія генерується на великих електростанціях і передається на великі відстані через магістральні лінії електропередач, розподілена генерація використовує локальні джерела енергії [5].

Окремі автори під розподіленою генерацією розуміють джерела електричної енергії, з'єднані безпосередньо з розподільною електричною мережею або підключені до такої мережі зі сторони електроспоживачів [6, с. 47]. Сучасна розподілена генерація – це нішова можливість, що базується на великому споживачеві (великому – для місцевих умов, і невеликому відносно національного ринку в цілому) і не може бути масштабованою за межі умовного локального споживання електроенергії чи тепла [7].

В країнах Північної Америки використовується термін «dispersed generation», що перекладається як «розпорошена генерація», а в Західній Європі та деяких країнах Азії часто застосовується термін «децентралізована генерація» [8]. При цьому окремі автори [9] під розподіленою генерацією вважають невеликі джерела електричної енергії, які не є частинами енергосистеми та знаходяться в безпосередній близькості до споживачів. Інші фахівці [10] дають більш конкретне визначення: розподілена генерація – це невеликі електростанції (робота яких може

базуватися як на технологіях спалювання палива, так і на інших), розташовані біля або поблизу кінцевих споживачів електричної енергії.

Під розподіленою генерацією розуміють малі генеруючі об'єкти потужністю до 30 МВт, що розташовуються біля споживачів з метою підвищення економічної ефективності розподільної мережі. Тип цих об'єктів залежить від специфіки місця приєднання [11]. Більш чітке поняття розподіленої генерації сформульоване в [8]: розподілена генерація – це джерело електричної енергії, з'єднане безпосередньо з розподільною електричною мережею або підключене до такої мережі зі сторони електроспоживача.

Наприклад, робоча група CIGRE [12] під розподіленою генерацією розуміє генеруючі пристрої, що, як правило, з'єднані з розподільними мережами, максимальна потужність яких становить від 50 МВт до 100 МВт. Тоді як IEEE [13] під розподіленою генерацією розглядають генераторні установки, значно менші за встановлену потужність, ніж централізовані електричні станції, допускаючи їхній зв'язок з будь-яким вузлом в енергосистемі, розташованим неподалік. International Energy Agency [14], на відміну від вище згаданого, не встановлює вимог щодо максимальної потужності генеруючих пристроїв розподіленої генерації. До розподіленої генерації належать об'єкти, що виробляють електричну енергію переважно на стороні споживачів та поставляють її безпосередньо в локальну розподільну електричну мережу.

Розподілена генерація (Distributed Generation) часто використовується нарівні з терміном «децентралізована енергетика» (Decentralized Energy). Під терміном «розподілена генерація» розуміється тільки генерація електроенергії, в той час як «децентралізована енергетика» включає в себе виробництво і теплової енергії, і електроенергії [15].

«Розподілена генерація – це об'єкт, що виробляє електроенергію в місці знаходження споживача або забезпечує підтримку розподільної мережі, підключений до мережі при напрузі рівня розподілу» [16].

З огляду на це, доцільно розглянути застосування термінологічного апарату, що використовується для характеристики організаційно-технологічних особливостей функціонування розподіленої генерації в різних країнах (табл. 1).

Таблиця 1

Класифікація термінології розподіленої генерації

Країна	Класифікація терміну «розподілена генерація»
Міжнародне об'єднання ЄРЕ	Розподілена генерація має такі ознаки: 1) Не включена в централізоване планування. 2) Не має централізованої диспетчеризації. 3) Зазвичай приєднана до розподільчих мереж. 4) Потужність менш ніж 50 МВт.
Бельгія	Когенераційна установка, приєднана до розподільчих мереж
Фінляндія	Джерело потужністю менше 20 МВт, що не має централізованої диспетчеризації і приєднане до розподільчих мереж
Естонія	Джерело потужністю менше 50 МВт для місцевого споживання або для продажу комунальним підприємствам
Данія	Джерело, для якого відсутні договірні відносини між власником і оператором системи передачі
Болгарія	Джерело потужністю менше 10 МВт, не має централізованого планування і підключене до розподільчих мереж
Франція	Електростанція приєднана до енергосистеми, власник якої є третьою стороною
Угорщина	Джерело потужністю менше 10 МВт, що використовує ВДЕ або когенерацію для виробництва теплоти
Італія	Когенераційна установка потужністю менше 1 МВт, що працює на кінцевого споживача
Нідерланди	Генерація, що не використовується для балансування енергосистеми
Норвегія	Джерело, що приєднане до розподільчих мереж
Польща	Джерело електроенергії або теплоти, приєднане до споживача
Румунія	Децентралізовані джерела, що мають потужність меншу за 50 МВт
Словаччина	Джерела потужністю менше 100 МВт, що не мають централізованого планування і диспетчеризації і приєднані до розподільчих мереж
Іспанія	Модульна генерація потужністю менше 50 МВт, що розташована на території споживача
Швеція	Джерело, приєднане до розподільчих мереж або до мереж споживача
Великобританія	Джерело, що не приєднане до системи передачі

Джерело: [17]

Ключовим моментом розподіленої генерації є можливість формування значної кількості невеликих енергогенеруючих об'єктів, розміщених безпосередньо у місцях споживання або в безпосередній близькості до них. На відміну від традиційної централізованої моделі, де виробництво електроенергії концентрується на обмеженій кількості великих електростанцій, розподілена генерація передбачає розосередження генеруючих потужностей між багатьма локальними майданчиками, що підключаються до розподільних електричних мереж. Такий підхід сприяє скороченню втрат електроенергії під час її транспортування, підвищує гнучкість функціонування енергетичної системи та забезпечує більш ефективне використання локальних енергетичних ресурсів.

Водночас важливою перевагою цієї моделі є підвищення стійкості та надійності функціонування енергосистеми. Розосередження значної кількості відносно малопотужних генеруючих установок, а також інтеграція систем накопичення енергії формують децентралізовану структуру енергопостачання, у якій відсутня критична залежність від невеликої кількості великих генеруючих об'єктів. За таких умов потенційне виведення з ладу окремих елементів інфраструктури не призводить до масштабної втрати генеруючих потужностей, що значно підвищує рівень енергетичної безпеки.

Для енергетичної системи України це набуває особливого значення, оскільки розвиток мережі локальних джерел генерації та систем зберігання електроенергії створює передумови для зменшення вразливості енергетичної інфраструктури та сприяє підтриманню стабільності роботи об'єднаної енергосистеми навіть у складних умовах її функціонування. Отже, впровадження принципів розподіленої генерації виступає важливим інструментом підвищення надійності енергопостачання та мінімізації ризиків значних втрат генеруючих потужностей.

Система з розподіленою генерацією має відповідати низці технічних, економічних та організаційних вимог [3]:

- забезпечувати можливість гарантованого електропостачання об'єктів критичної інфраструктури, а також електропостачання якомога більшої кількості інших споживачів, розташованих на відповідній території, у разі виникнення системної аварії в об'єднаній енергетичній системі України із знеструмленням основних регіональних джерел потужності – підстанцій системи передачі та вузлових електростанцій (технічні вимоги);

- забезпечувати прийнятну конкурентну ціну електричної енергії для споживачів (економічні вимоги);

- функціонувати в умовах діючої моделі конкурентного ринку електричної енергії (загальних норм та правил, передбачених законодавством) з урахуванням запланованих змін в рамках приведення законодавства України щодо ринку електричної енергії у відповідність з вимогами законодавства ЄС (організаційні вимоги).

Водночас система з розподіленою генерацією не має на меті забезпечувати повною мірою поточні та прогнозні обсяги попиту на електричну енергію в конкретному регіоні, а має бути елементом об'єднаної енергетичної системи України, всі електроустановки якої функціонують в єдиному синхронізованому режимі [3].

Основними видами об'єктів електроенергетики, використання яких є доцільним для створення систем розподіленої генерації та розв'язання проблеми недостатності генеруючих потужностей в об'єднаній енергетичній системі України, є електроустановки, які забезпечують гарантовану видачу доступної потужності та використовують природний газ як паливо, а також об'єкти відновлюваної енергетики та установки зберігання енергії [3].

До об'єктів, які забезпечують гарантовану видачу доступної потужності та використовують природний газ як паливо, належать:

- газотурбінна установка;
- газопоршнева установка;
- когенераційна установка.

До об'єктів відновлюваної енергетики належать:

- сонячна електростанція;
- вітрова електростанція;
- біоенергетична електростанція, котра працює на біомасі та біогазі;
- мала гідроелектростанція;
- установка зберігання енергії.

Технології розподіленої генерації охоплюють широкий спектр технічних рішень, що відрізняються за масштабами встановленої потужності, технологічними характеристиками та сферою застосування. Вони можуть функціонувати як у форматі невеликих систем побутового або індивідуального рівня, так і у вигляді відносно великих енергетичних установок, інтегрованих у локальні або регіональні енергетичні мережі. До найпоширеніших прикладів таких рішень належать дахові фотоелектричні установки та домашні системи накопичення електроенергії, що використовуються домогосподарствами для часткового або повного забезпечення власних енергетичних потреб.

Водночас розподілена генерація не обмежується лише малими побутовими установками. До її складу також належать більш потужні об'єкти, зокрема сонячні електростанції середнього масштабу, наземні сонячні ферми, агровольтаїчні системи, вітрові турбіни, системи акумулявання електроенергії, а також невеликі гідроенергетичні установки, зокрема мікро- та мінігідроелектростанції. Сукупність цих технологій формує децентралізовану систему виробництва електричної енергії, яка базується на використанні різноманітних локальних енергетичних ресурсів.

Важливою особливістю розподіленої генерації є її орієнтація на безпосереднє (локальне) забезпечення потреб конкретних споживачів. Такі системи можуть використовуватися для енергозабезпечення промислових підприємств, комерційних об'єктів, сільськогосподарських господарств, а також житлових будинків. У багатьох випадках вони поєднують функції генерації, накопичення та управління споживанням електроенергії, що сприяє підвищенню енергоефективності та зниженню залежності споживачів від централізованих джерел постачання електроенергії.

Існує декілька основних загальноприйнятих у світі критеріїв класифікації генеруючого обладнання розподіленої генерації. Перша класифікація розглядає встановлену потужність генеруючих установок: мікро (1 Вт – 5 кВт), малі (5 кВт – 5 МВт), середні (5 МВт – 50 МВт) та великі (50 МВт – 300 МВт, в Україні остання категорія не відноситься до розподіленої генерації). Друга класифікація заснована на технології виробництва електроенергії, а саме: відновлювані, блокові чи когенераційні [18].

Доцільно виділити наступні можливі режими роботи об'єктів розподіленої генерації з основною мережею Об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України [19]:

1. Автономний режим – ізольована робота генеруючої установки об'єкта розподіленої генерації з повним забезпеченням електропостачання своїх споживачів у всіх зонах графіка навантаження, ремонтних резервів, технологічної, функціональної та аварійної броні.

2. Паралельний режим – паралельна робота генеруючого об'єкта розподіленої генерації з ОЕС, з видачею або без видачі потужності в мережу із забезпеченням роботи об'єкта розподіленої генерації у базовій зоні графіка навантаження за рахунок отримання з ОЕС потужності в години пікових навантажень та видачі в ОЕС надлишків потужності в години їх мінімуму.

3. Комбінований режим – об'єкт розподіленої генерації працює паралельно з ОЕС, але в разі аварійних ситуацій може бути переведений на ізольовану роботу, повністю забезпечуючи живлення споживачів.

Розподілена генерація найчастіше використовується:

– як автономні джерела електроенергії, тепла (в режимі когенерації) і холоду (в режимі тригенерації);

– для зняття пікових навантажень в режимах паралельної роботи з системою централізованого енергопостачання;

– в проєктах ко- і тригенерації, заснованих на використанні альтернативного палива: біогазу, попутного нафтового газу, шахтного метану та інших видів;

– у проєктах зі специфічними вимогами щодо якості енергії, надійності, термінів запуску, екології, які в конкретних умовах не можуть бути забезпечені централізованими енергосистемами [15].

Розподілену генерацію на базі автономних джерел використовують промислові підприємства, офісні центри, об'єкти соціальної інфраструктури в разі, якщо централізоване технологічне приєднання недоступне з будь-яких причин. До таких причин належать, зокрема: територіальна віддаленість об'єктів, дефіцит встановленої потужності в регіоні, обмежена пропускна здатність мережевої інфраструктури. Крім того, централізоване електропостачання може бути економічно неефективним (висока ціна за приєднання, високі тарифи, інші причини) або може не відповідати вимогам споживача щодо термінів приєднання з урахуванням планів реконструкції та розвитку мереж і генерації. У зв'язку з цим, нові або реконструйовані середні та малі підприємства різних галузей все частіше вибирають розподілену генерацію як альтернативу приєднанню до мереж енергосистеми країни.

Розподілені системи, в тому числі об'єднані в локальну мережу, можуть використовуватися для енергопостачання комплексно забудовуваних мікрорайонів і навіть міст. Таке будівництво може плануватися на територіях, не забезпечених відповідною інфраструктурою. Розподілена генерація дозволяє вводити енергетичні потужності поетапно, у міру зростання електроспоживання, наприклад, для механізації будівельних робіт або відповідно до черговості введення в експлуатацію житлових та інфраструктурних об'єктів. Таким чином забезпечується ефективність інвестицій, знижуються ризики простою під час робіт.

При зміні обсягів виробництва або перепрофілюванні об'єкта, особливо при нерівномірному добовому профілі споживання енергії, можливий як дефіцит, так і профіцит поставок електроенергії від центральної енергосистеми. Під час пікових навантажень розподілена система може передавати надлишки потужності при приєднанні до центральної енергосистеми і, навпаки, економічно ефективним може виявитися проєктування потужностей розподілених систем, виходячи з величини постійного споживання, а пікові навантаження покривати за рахунок центральної енергосистеми (табл. 2).

Таблиця 2

Основні технічні характеристики джерел розподіленої генерації

Характеристика	Дизельний генератор	Газотурбінна установка	Парогазова установка	Малі ГЕС	Сонячна установка	Вітровий генератор
Паливо	Продукти переробки нафти	Природний біогаз	Природний біогаз	Енергія води	Енергія сонячного світла	Енергія вітру
Можливість роботи за графіком	Можлива	Можлива	Можлива	Можлива	Обмежена	Обмежена
Можливість регулювання	Висока	Висока	Висока	Низька	Низька	Низька
Встановлена потужність, МВт	0,05–4,5	0,15–35	2–15	2–25	До 3	0,2–3
ККД, %	35–45	30–40	50–65	60–90	15–22	25–45
Час запуску	Дуже швидкий (хвилини)	Швидкий	Середній	Середній	Миттєвий (при наявності сонця)	Залежить від швидкості вітру
Маневреність	Висока	Висока	Середня	Низька	Низька	Низька
Залежність від природних умов	Низька	Низька	Низька	Середня (водність)	Висока (інсоляція)	Висока (швидкість вітру)
Викиди CO ₂	Високі	Середні	Середні	Практично відсутні	Відсутні	Відсутні
Типовий режим використання	Резервна, пікова генерація	Пікова та маневрова генерація	Базова або напівопікова	Базова генерація	Додаткова генерація	Додаткова генерація

Джерело: [20–23]

Розподілена генерація за рахунок малих обсягів виробництва має як недолік (це вищі питомі витрати на будівництво і виробництво електричної енергії), так і конкурентну перевагу в короткому ланцюгу транспортування електроенергії. При цьому вони реалізують свої технологічні переваги там, де одночасно [7]:

- в одному ланцюгу поєднується виробництво і споживання теплоенергії (через когенерацію або електричні водонагрівачі-бойлери);
- є два, а ще краще три й більше джерела енергії, наприклад: природний газ та біометан;
- децентралізоване виробництво електроенергії з ВДЕ, доступна електроенергія від енергосистеми та існує можливість спалювання побутових відходів;
- наявна інфраструктура для інтеграції виробництва і споживання в електричну мережу, в оптимальному варіанті цією інфраструктурою виступає Smart Grid.

Об'єктам розподіленої генерації властиві відносно невелика встановлена потужність та функціонування безпосередньо до конкретного локального споживача або групи споживачів. Такі енергетичні установки інтегруються у місцеві розподільчі електричні мережі та з'єднуються зі споживачами однією або декількома лініями електропередачі. Їх функціонування базується на довгострокових договірних відносинах щодо постачання електричної енергії, а у випадку використання когенераційних технологій – також теплової енергії. Така організаційна модель передбачає орієнтацію насамперед на забезпечення локального попиту, що визначає особливості економіки та режимів роботи об'єктів розподіленої генерації.

На відміну від великих централізованих електростанцій, основним завданням яких є постачання значних обсягів електроенергії на оптовий ринок, розподілена генерація переважно орієнтується на покриття потреб місцевих споживачів. Участь таких об'єктів у загальному ринку електричної енергії зазвичай має допоміжний характер і здійснюється переважно у випадках наявності надлишкової електроенергії. Розвиток розподіленої генерації часто ґрунтується на використанні локальних енергетичних ресурсів, що обмежує можливості її масштабування у межах окремої території обсягами місцевого попиту на електричну та теплову енергію.

Водночас невеликі масштаби таких енергетичних об'єктів формують як певні обмеження, так і низку важливих переваг. До основних недоліків можна віднести відносно вищі питомі капітальні витрати на встановлення обладнання та виробництво електричної енергії порівняно з великими централізованими електростанціями, що пов'язано з відсутністю ефекту масштабу. Разом із тим, розподілена генерація має суттєву конкурентну перевагу завдяки скороченню довжини ланцюга транспортування електроенергії, що дозволяє зменшити втрати під час її передачі та підвищити ефективність використання енергетичних ресурсів.

Найбільша ефективність функціонування об'єктів розподіленої генерації досягається в умовах

інтегрованого використання різних енергетичних технологій та ресурсів. Зокрема, значний ефект забезпечується у випадках, коли в межах єдиної енергетичної системи поєднуються виробництво електричної та теплової енергії. Таке поєднання може реалізовуватися за допомогою когенераційних установок або через використання електричної енергії для потреб теплопостачання, наприклад, у системах електричних водонагрівачів чи теплових накопичувачів. Подібні рішення дозволяють підвищити загальний коефіцієнт використання первинної енергії та зменшити втрати енергоресурсів.

Важливим фактором підвищення ефективності розподіленої генерації є також диверсифікація джерел енергії. Оптимальні результати досягаються у випадках, коли в межах однієї локальної енергетичної системи використовується декілька видів енергоресурсів, наприклад, природний газ, біогаз або біометан, відновлювані джерела енергії, а також інші альтернативні джерела, зокрема енергія від перероблення побутових відходів. Така комбінована модель дає змогу підвищити гнучкість енергосистеми, зменшити залежність від одного виду палива та забезпечити більш стабільне енергопостачання.

Ефективна інтеграція розподіленої генерації потребує наявності відповідної інфраструктури управління енергетичними потоками та балансування виробництва і споживання енергії. У сучасних умовах важливу роль у цьому процесі відіграють інтелектуальні електричні мережі (Smart Grid), які забезпечують цифрове управління режимами роботи енергосистеми, координацію взаємодії між різними джерелами генерації та споживачами, а також оптимізацію потоків електроенергії в режимі реального часу.

У практиці функціонування енергетичних систем дедалі більшого поширення набувають концепції мікромереж (microgrids), які передбачають локальне об'єднання джерел генерації, систем накопичення енергії та споживачів у межах єдиної керованої енергетичної системи. При цьому трактування поняття мікромережі у нормативно-правових та регуляторних підходах Європейського Союзу і України має певні відмінності, що зумовлено різними етапами розвитку енергетичних ринків та інфраструктури електричних мереж.

Таким чином, розподілена генерація виступає важливим елементом сучасної трансформації енергетичних систем, поєднуючи локальне виробництво енергії, використання різноманітних енергоресурсів та інтеграцію з інтелектуальними мережами управління енергопостачанням. Це створює передумови для формування більш гнучких, енергоефективних та стійких моделей функціонування енергетичної інфраструктури.

Аналітики неоднозначно оцінюють ринок розподіленої генерації. В глобальних звітах за 2023 рік наводяться оцінки світового ринку від 150 до 250 млрд дол. США, що відповідає частці в загальній структурі генерації 10–20 %. Також по-різному оцінюються і перспективи, але в цілому експерти оцінюють темпи розвитку розподіленої генерації в структурі енергетичного балансу в межах 6,5–13,6 % на рік, що помітно вище загального приросту виробництва електричної енергії [7].

Упродовж 2010–2024 років світова енергетична система пережила глибоку структурну трансформацію, зумовлену необхідністю декарбонізації економіки, технологічним прогресом та посиленням міжнародної кліматичної політики. Аналіз динаміки структури виробництва електроенергії за основними джерелами енергії свідчить про поступове зменшення ролі традиційних енергоресурсів та активне зростання частки відновлюваних джерел енергії. Глобальне виробництво електроенергії з відновлюваних джерел демонструє стабільну тенденцію до зростання і є ключовим драйвером енергетичного переходу, забезпечуючи більшу частину приросту генерації у світі (рис. 1).

Однак, викопні види палива все ще залишаються домінуючим джерелом електрогенерації, хоча їх частка поступово скорочується. Так, протягом 2010–2024 років вона зменшилась з 68 % до 54 %, така тенденція є наслідком посилення глобальної політики декарбонізації, зростання інвестицій у чисту енергетику та поступового виведення з експлуатації вугільних електростанцій у багатьох країнах. Частка атомної енергетики також характеризується помірно низхідною динамікою. За досліджуваний період вона скоротилася приблизно з 12 % до 8 %, що пояснюється високою капіталомісткістю будівництва нових атомних потужностей, значними строками реалізації інвестиційних проєктів та посиленням вимог до ядерної безпеки. Водночас гідроенергетика демонструє відносну стабільність, зберігаючи частку на рівні близько 15–16 %. Така динаміка пов'язана з тим, що значна частина економічно доцільного гідроенергетичного потенціалу у світі вже освоєна, а нові масштабні гідроенергетичні проєкти реалізуються обмежено через екологічні та соціальні фактори.

Найбільш динамічний розвиток спостерігається у секторі сонячної та вітрової енергетики, які виступають ключовими драйверами глобальної енергетичної трансформації. Частка цих джерел зросла з 2 % у 2011 р. до 20 % у 2024 р., що свідчить про десятикратне збільшення їх внеску у світовий енергетичний баланс. Основними чинниками такого стрімкого зростання стали технологічні інновації, значне зниження вартості виробництва електроенергії з відновлюваних джерел, а також державна підтримка розвитку чистої енергетики. Біоенергетика та геотермальна енергетика займають відносно невелику частку у структурі виробництва електроенергії.

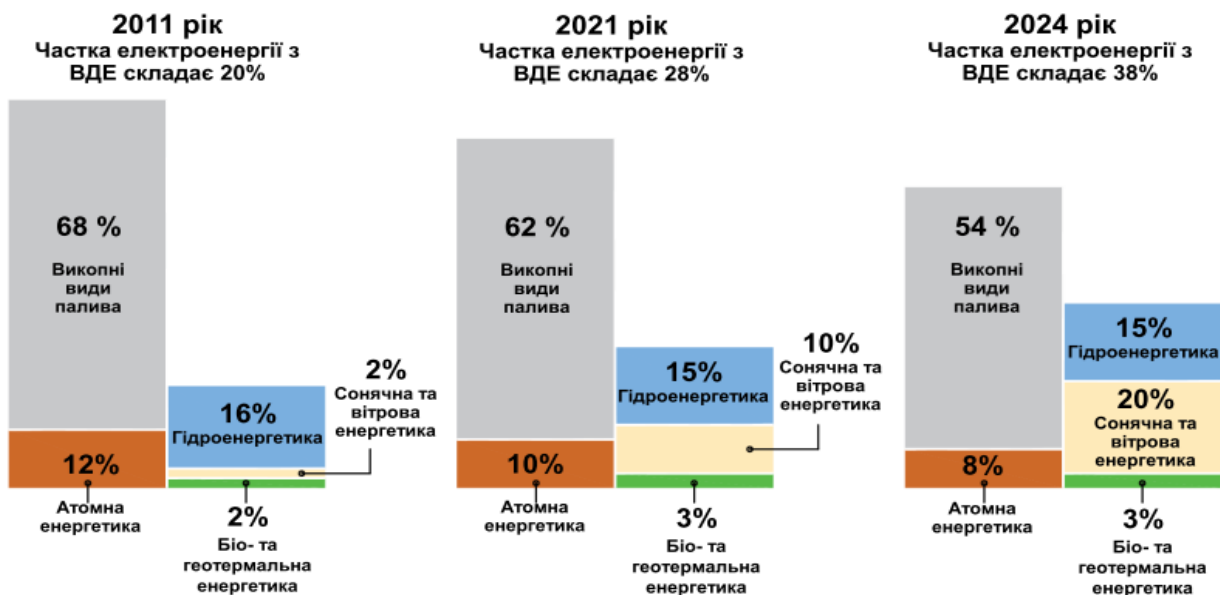


Рис. 1. Частка ВДЕ у виробництві електроенергії

Джерело: [24]

Отже, частка відновлюваних джерел енергії у світовому виробництві електроенергії демонструє стійку висхідну тенденцію. За досліджуваний період вона зросла з 20 % до 38 %, тобто сучасний етап розвитку світової енергетики характеризується активною фазою глобального енергетичного переходу, у межах якого відбувається поступове витіснення викопних джерел енергії відновлюваними технологіями.

Світові тенденції прискореного розвитку відновлюваних джерел енергії знаходять своє безпосереднє відображення у формуванні енергетичної політики та практичній реалізації енергетичного переходу в країнах Європейського Союзу. ЄС виступає одним із глобальних лідерів у сфері декарбонізації енергетики та впровадження відновлюваних джерел енергії, що зумовлено як необхідністю зниження викидів парникових газів, так і прагненням підвищити рівень енергетичної безпеки та зменшити залежність від імпортованих викопних енергоресурсів. У межах реалізації довгострокової кліматичної та енергетичної стратегії Європейський Союз активно впроваджує комплекс політичних, економічних і технологічних заходів, спрямованих на збільшення частки відновлюваних джерел енергії у структурі енергоспоживання (рис. 2).

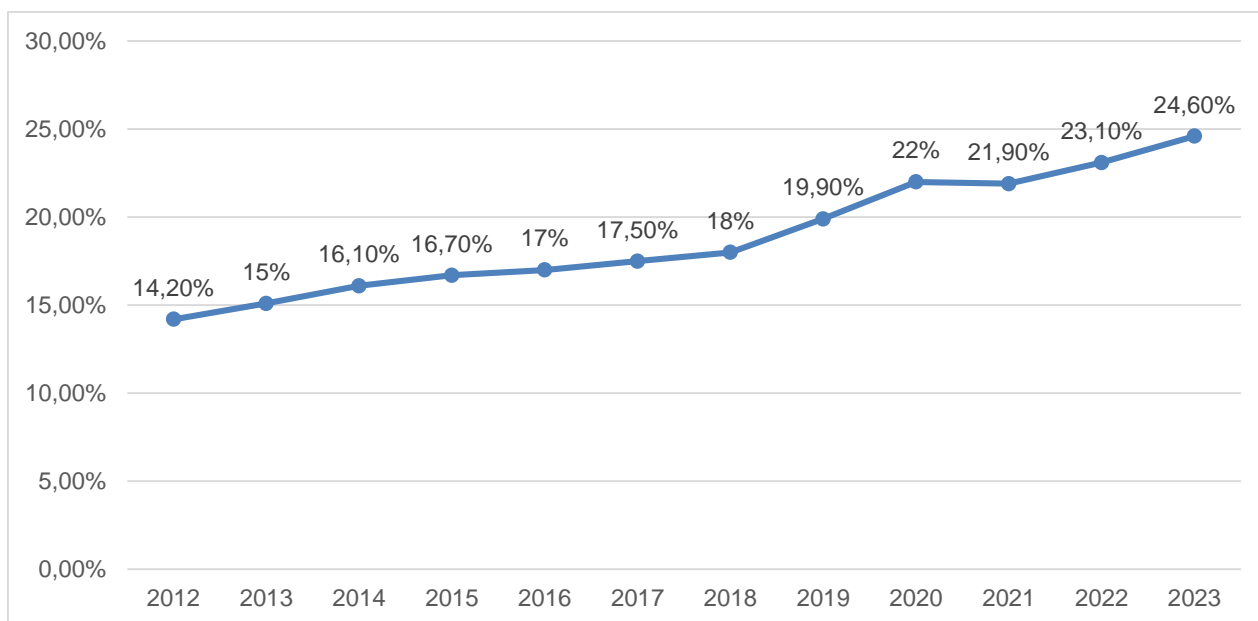


Рис. 2. Частка відновлюваної енергії у валовому споживанні енергії в Європейському Союзі в 2012–2023 рр.

Джерело: [25]

У 2012 році частка відновлюваних джерел енергії у валовому споживанні енергії в ЄС становила 14,2 %. У наступні роки спостерігалось поступове зростання цього показника: у 2013 році він досяг 15 %, у 2014 році – 16,1 %, а у 2015 році – 16,7 %. Така динаміка свідчить про послідовне впровадження європейської політики підтримки розвитку відновлюваної енергетики та виконання стратегічних цілей енергетичної трансформації.

Суттєвий стрибок відбувся у 2020 р.; так, у 2022 році частка відновлюваних джерел енергії у валовому споживанні енергії становила 23,1 %, а у 2023 році досягла 24,6 %. Загалом за 2012–2023 роки цей показник зріс на 10,4 відсоткового пункта, що свідчить про значний прогрес Європейського Союзу в напрямі енергетичної трансформації та зменшення залежності від викопних палив. Отже, країни ЄС демонструють тенденцію до розширення використання відновлюваних джерел енергії. Це є результатом реалізації довгострокової кліматичної та енергетичної політик, спрямованих на декарбонізацію економіки, підвищення енергетичної безпеки та досягнення цілей сталого розвитку.

Ці зміни безпосередньо впливають на регіональний розвиток, знижуючи вуглецевий слід і відкриваючи нові можливості для України. Саме тому подальше регіональне програмування розвитку відновлюваних джерел енергії має стати ключовим елементом національної стратегії забезпечення як енергетичної безпеки України.

Так, в Україні у 2022 р. було встановлено 312 МВт нових об'єктів, з яких: 220 МВт – СЕС (в т.ч. домашні – 206 МВт); 82 МВт – ВЕС; 6,3 МВт – БіоТЕС; 1,2 МВт – мГЕС. У 2023 році побудовано близько 350 МВт нових ВДЕ, з яких: 150 МВт – СЕС; 145 МВт – ВЕС; 40 МВт – біоТЕС; 1 МВт – біогазові станції. Протягом 2024 року було встановлено всього 945 МВт нових потужностей розподіленої генерації (включно з ВДЕ), при цьому ВЕС – 44 МВт, СЕС домогосподарств – 28,5 МВт, всього СЕС для власного споживання 587 МВт [24].

Більшість проектів у галузі розподіленої ВДЕ генерації становлять сонячні електростанції. За даними реєстру НКРЕКП, станом на квітень 2024 року в Україні нараховувалося 1369 сонячних електростанцій, що належать 931 ліцензіату. Сонячні електростанції є найбільш популярним типом генерації порівняно з вітровими, гідро- та біоелектростанціями, складаючи 75 % від усіх об'єктів ВДЕ. Найбільша кількість сонячних електростанцій спостерігається в Івано-Франківській, Дніпропетровській, Вінницькій, Хмельницькій, Київській та Миколаївській областях, що пояснюється сприятливими умовами для розвитку сонячної енергетики. Найменша кількість сонячних електростанцій розташована у Луганській, Донецькій, Сумській та Полтавській областях [26, с. 86].

Аналіз сучасних тенденцій розвитку енергетичного сектору свідчить, що інтеграція відновлюваних джерел енергії та розвиток розподіленої генерації поступово змінюють структурну модель функціонування енергосистем. У таких умовах традиційна централізована архітектура енергетичної інфраструктури вже не може повною мірою забезпечити необхідний рівень гнучкості, стійкості та адаптивності енергосистеми до нових викликів. Це обумовлює потребу у формуванні концептуальної моделі організації енергетичної системи, яка б передбачала інтегроване функціонування великих централізованих генеруючих потужностей та локальних систем розподіленої генерації.

У межах дослідження запропоновано концепцію гібридної архітектури енергетичної системи України, яка передбачає формування багаторівневої структури генерації з активним використанням потенціалу розподілених енергетичних ресурсів, тобто поєднання централізованої та децентралізованої моделей виробництва електроенергії у межах єдиної інтегрованої системи.

В умовах хронічного дефіциту фінансування великих проектів генерації та мереж саме розподілена генерація стає основним джерелом приросту нових потужностей у найближчі 5–7 років, а не «залишковим» елементом ринку. Гібридна багатоканальна модель розподіленої генерації поєднує в одному технологічному ланцюгу одночасно:

- виробництво та споживання тепла й електроенергії (когенерація + електробойлери);
- два-три джерела палива (природний газ + біометан + побутові відходи);
- децентралізоване ВДЕ-покоління з можливістю паралельного підключення до централізованої мережі через Smart Grid.

Така модель дає змогу подолати ключовий недолік малих об'єктів – вищі питомі капітальні витрати – за рахунок гарантованої стабільної оплати від прив'язаного платоспроможного споживача та мінімальних витрат на транспортування. Водночас вона трансформує розподілену генерацію з «локального острівця» на масштабований елемент нової енергосистеми, здатного працювати в ринковому середовищі і водночас забезпечувати власні потреби споживача.

На відміну від традиційної централізованої моделі, де всі ключові функції енергосистеми зосереджені у великих електростанціях, запропонована концепція базується на багаторівневій структурі організації енергетичної інфраструктури.

Перший рівень представлений національною централізованою енергосистемою, до складу якої входять великі генеруючі об'єкти, що забезпечують базове навантаження енергосистеми. До таких об'єктів належать атомні електростанції, великі гідроелектростанції, гідроакумулюючі станції, великі вітрові та сонячні електростанції, а також теплоелектростанції.

Другий рівень формують локальні енергетичні системи, основу яких становлять об'єкти розподіленої генерації. Ці системи функціонують у межах окремих територіальних енергетичних вузлів і можуть забезпечувати виробництво, споживання та накопичення енергії на локальному рівні.

Ключовою особливістю запропонованої моделі є наявність двостороннього енергетичного обміну між централізованою та локальними енергетичними системами. У разі надлишку виробництва локальні системи можуть передавати електроенергію до національної енергосистеми, тоді як у разі дефіциту вони можуть отримувати необхідні обсяги електроенергії з централізованої мережі. Тобто відбувається формування багаторівневої структури енергосистеми, у якій централізована та розподілена генерація функціонують у взаємодоповнюючому режимі.

Енергетична інфраструктура енергетичної системи має такі складові:

- мережева інфраструктура, котра забезпечує інтеграцію централізованих та розподілених джерел генерації;
- цифрова інфраструктура, яка представлена інтелектуальними системами управління енергетичними потоками, технологіями Smart Grid та системами моніторингу;
- інфраструктура накопичення енергії, що передбачає акумуляторні системи, гідроакумуляючі станції та інші технології балансування;
- інституційна інфраструктура, що охоплює нормативно-правове забезпечення, механізми ринкового регулювання та систему управління енергетичним сектором.

Основним структурним елементом запропонованої моделі є локальні енергетичні хаби – інтегровані енергетичні комплекси, що поєднують декілька джерел енергії, системи накопичення та споживачів у межах єдиної енергетичної інфраструктури. Функціонування таких хабів ґрунтується на принципах мультиенергетичної інтеграції, що передбачає взаємопов'язане управління виробництвом, перетворенням, накопиченням і споживанням різних видів енергії (електричної, теплової, газової та водневої). Це забезпечить підвищення гнучкості енергетичної системи, оптимізацію енергетичних потоків та підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів. Локальні енергетичні хаби виконуватимуть функцію децентралізованих центрів управління енергетичними потоками, забезпечуючи балансування попиту і пропозиції енергії на локальному рівні. Завдяки інтеграції розподіленої генерації, систем накопичення енергії та інтелектуальних систем управління вони здатні функціонувати як напівавтономні енергетичні системи, що знижуватимуть залежність територій від централізованої генерації та підвищуватимуть стійкість енергопостачання в умовах зовнішніх ризиків.

Важливою характеристикою локальних енергетичних хабів є можливість інтеграції з інтелектуальними електромережами (Smart Grid), що забезпечить двосторонній обмін енергетичними та інформаційними потоками між локальними системами та централізованою енергосистемою. Це дасть змогу здійснювати оперативне балансування енергетичних навантажень, оптимізувати режими роботи генерації та накопичення енергії, а також підвищувати ефективність використання відновлюваних джерел енергії.

Отже, локальні енергетичні хаби відіграватимуть роль ключових елементів інфраструктурної трансформації енергетичної системи, оскільки забезпечуватимуть інтеграцію централізованої та розподіленої генерації, сприятимуть підвищенню гнучкості енергетичної інфраструктури та формуватимуть передумови для зміцнення енергетичної безпеки національної економіки й створення мультивекторної енергетичної стійкості, яка передбачає забезпечення стабільності функціонування енергосистеми за рахунок диверсифікації джерел генерації та децентралізації виробництва електроенергії. Завдяки цьому енергетична стійкість системи визначається не лише обсягом генеруючих потужностей, але й структурою їхнього розміщення та ступенем диверсифікації джерел енергії. Зростання частки розподіленої генерації дасть змогу зменшити ризики масштабних порушень у функціонуванні енергосистеми, оскільки пошкодження окремих елементів централізованої інфраструктури не призведе до повної втрати енергопостачання.

Запропонована концепція гібридної архітектури енергосистеми має низку важливих практичних переваг.

По-перше, вона дасть змогу значно підвищити стійкість енергетичної інфраструктури, оскільки наявність великої кількості локальних енергетичних систем зменшує ризики масштабних відключень електроенергії.

По-друге, розвиток розподіленої генерації сприятиме скороченню втрат електроенергії під час транспортування, що є важливим фактором підвищення енергоефективності енергосистеми.

По-третє, локальні енергетичні системи можуть використовувати місцеві енергетичні ресурси, включаючи біометан, біомасу та інші відновлювані джерела енергії, що впливатиме на розвиток регіональної економіки.

У контексті повоєнного відновлення України стратегічним завданням є швидке відновлення та модернізація енергетичної інфраструктури, що зазнала значних руйнувань. Відновлення енергосистеми має ґрунтуватися не лише на відновленні пошкоджених централізованих об'єктів, але й на прискореному розвитку розподіленої генерації та локальних енергетичних хабів, що

забезпечать стійкість і автономність територій. Таке поєднання дасть змогу одночасно відновлювати критичні потужності та формувати гнучку мережу, здатну швидко адаптуватися до змін у попиту та забезпечувати безперебійне енергопостачання навіть у разі локальних аварій.

Повоєнне відновлення створює унікальні можливості для впровадження інноваційних технологій та енергетичних рішень, що раніше розглядалися як перспективні. Використання мультиенергетичних систем, комбінованих джерел палива та інтеграції відновлюваних ресурсів удосконалює структуру енергетичної системи та сприяє підвищенню її стійкості на національному рівні. Отже, повоєнне відновлення енергетичної інфраструктури України не лише сприятиме відновленню втраченого потенціалу, а й надасть подальшого розвитку концепції гібридної архітектури енергосистеми, яка формує основу для нової, стійкої, гнучкої та безпечної енергетичної моделі країни.

Висновки з проведеного дослідження. В умовах аварійних відключень електроенергії та постійних ракетно-шахедних атак на енергетичну інфраструктуру України, що призвели до суттєвих пошкоджень генеруючих потужностей, магістральних мереж та об'єктів розподільчої інфраструктури, а також втрати значної частини маневрових генеруючих потужностей, суттєво загострилась проблема забезпечення стабільності та надійності функціонування національної енергосистеми. За таких умов особливої актуальності набуває необхідність перегляду стратегічних підходів до подальшого розвитку та трансформації енергетичного сектору України. У цьому контексті важливого значення набуває модернізація структури генерації електричної енергії з урахуванням сучасних глобальних тенденцій декарбонізації, цифровізації та розвитку розподіленої генерації. Одним із ключових напрямів такої трансформації є активізація розвитку відновлюваної енергетики, зокрема сонячної, вітрової, біоенергетики та інших видів альтернативних джерел енергії. Розбудова об'єктів відновлюваної генерації, особливо у форматі розподілених енергетичних установок, дозволяє диверсифікувати джерела енергопостачання, зменшити залежність від обмеженої кількості великих генеруючих об'єктів та підвищити стійкість енергетичної системи до зовнішніх загроз.

Впровадження розподіленої генерації у поєднанні з системами накопичення енергії та сучасними інтелектуальними системами управління енергомережами створює передумови для формування більш гнучкої та адаптивної енергосистеми. Такий підхід сприятиме підвищенню енергетичної безпеки держави, забезпеченню безперебійності енергопостачання та ефективнішому використанню локальних енергетичних ресурсів. Сформована концепція гібридної архітектури енергосистеми з активною розподіленою генерацією, яка передбачає поєднання централізованих і децентралізованих джерел енергії у межах єдиної інтегрованої системи базується на формуванні мережі локальних енергетичних хабів, здатних забезпечувати виробництво, споживання та балансування енергії на територіальному рівні. Тобто, розвиток розподіленої генерації має розглядатися як один із ключових напрямів трансформації енергетичного сектору України та формування стійкої, гнучкої та енергонезалежної енергосистеми.

В умовах сучасних викликів та загроз трансформація енергетичного сектору України повинна передбачати не лише відновлення існуючої інфраструктури, а й стратегічну переорієнтацію на розвиток децентралізованих енергетичних систем, активне впровадження відновлюваних джерел енергії та підвищення ролі розподіленої генерації як важливого елемента забезпечення енергетичної стійкості та безпеки держави.

Література

1. Денисюк С., Базюк Т. Аналіз впливу джерел розосередженої генерації на електромережу та особливості побудови віртуальних електростанцій. *Електрифікація транспорту*. 2012. № 4. С. 23-29.
2. Розвиток розподіленої газової генерації в Україні: стратегія і тактика. DIXI GROUP ALERT. 2023. URL: <https://dixigroup.org/analytic/rozvytok-rozpodilenoj-gazovoyi-generacziyi-v-ukrayini-strategiya-i-taktyka/> (дата звернення: 02.04.2025).
3. Стратегія розвитку розподіленої генерації на період до 2035 року : схвал. розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18 липня 2024 р. № 713-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/713-2024-%D1%80#Text> (дата звернення: 02.04.2025).
4. Розподілене виробництво енергії. *Вікіпедія*. URL: <https://surl.li/dtnvtn> (дата звернення: 02.04.2025).
5. Гвоздів В. Чому Україні варто розвивати розподілену генерацію. *Економічна правда*. 2 жовтня 2024. URL: <https://epravda.com.ua/columns/2024/10/02/720089/> (дата звернення: 03.04.2025).
6. Кириленко О. В., Павловський В. В., Лук'яненко Л. М. Технічні аспекти впровадження джерел розподільної генерації в електричних мережах. *Технічна електродинаміка*. 2011. № 1. С. 46-53.
7. Григорук І. Розподілена генерація є важливою складовою енергетичної безпеки України у воєнний і в мирний час. *Energy Club*. 21 січня 2025. URL: <https://divi.iclub.energy/blog/rozpodilena-generatsiia-ie-vazhlyvoiu-skladovoiu-enerhetychnoi-bezpeky-ukrainy-u-voiennyy-i-v-myrnyy-chas/> (дата звернення: 04.04.2025).
8. Ackermann T. Distributed resources and re-regulated electricity markets. *Electric Power Systems*

Research. 2007. Vol. 77. Issue 9. P. 1148-1159.

9. Network integration of distributed power generation / Dondi P., Bayoumi D., Haederli C., Julian D., Suter M. *Journal of Power Sources*. 2002. № 106. P. 1-9.

10. Momoh J., Boswell G. D. Improving Power Grid Efficiency Using Distributed Generation. *IEEE Power Systems Conference and Exposition* : Proceedings of the 7th international conference on power system. 2006. P. 295-300.

11. Chambers A. Distributed generation: a nontechnical guide. PennWell, 2001. 283 p.

12. International Council on Large Electricity Systems. *CIGRE*. URL: <http://www.cigre.org> (дата звернення: 05.05.2025).

13. Institute of Electrical and Electronics Engineers. *IEEE*. URL: <http://www.ieee.org> (дата звернення: 05.05.2025).

14. Distributed Generation in Liberalised Electricity Markets. *International Energy Agency*. 2002. URL: <http://www.iea.org> (дата звернення: 05.04.2025).

15. McDonald J. Adaptive intelligent power systems: world survey of decentralized energy. *WADE*. Edinburgh, 2005. 45 p. URL: http://www.localpower.org/documents_pub/report_worldsurvey05.pdf (дата звернення: 06.04.2025).

16. Distributed Generation in Liberalised Electricity Markets. *OECD*. 2002. DOI: <https://doi.org/10.1787/9789264175976-en>.

17. Уніговський Л. Розподілена генерація, енергетичний менеджмент і м. Долина: як є і як має бути. *Енергобізнес*. 2024. № 16(1329). URL: <https://e-b.com.ua/rozpodilena-generaciya-energeticnii-menedzment-i-m-dolina-yak-je-i-yak-maje-buti-6312> (дата звернення: 07.04.2025).

18. Ackermann T., Andersson G., Soder L. Distributed generation: a definition. *Electric Power Systems Research*. 2001. Vol. 57. P. 195-204.

19. Костенко Г., Згуровець О. Сучасний стан та перспективи розвитку відновлюваної розподіленої генерації в Україні. *Системні дослідження в енергетиці*. 2023. № 2(73). С. 4-17. DOI: <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.02.004>

20. Денисюк С. П., Гілевич К. М. Оптимізація використання розосереджених енергетичних ресурсів в локальних електроенергетичних системах за критерієм мінімуму втрат електроенергії. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2023. № 4(74). С. 7-21. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2023.290880>.

21. Рубаненко О. О. Підвищення енергоефективності відновлюваних джерел енергії : монографія. Вінниця : Влавке, 2024, 428 с.

22. Теліженко О., Шашков С. Напрямки діяльності з агрегації в електроенергетиці на основі розвитку розподіленої генерації. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2023. № 4(87). P. 299-304. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.4.36>.

23. Department of Energy of USA. URL: <https://www.energy.gov/> (дата звернення: 08.04.2025).

24. Кудря С. О., Зур'ян О. В. Відновлювана енергетика – відновлення України. URL: https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Presentation-Kudrya_Zuryan.pdf (дата звернення: 24.05.2025).

25. Share of renewable energy in the gross consumption of energy in the European Union from 2012 to 2023. *Statista*. URL: <https://www.statista.com/statistics/864900/share-of-renewable-energy-electricity-consumption-european-union-eu28/> (дата звернення: 09.04.2025).

26. Костенко Г. П., Запорожець А. О., Запорожець Н. В., Верпета В. О. Аспекти інтеграції відновлюваної розподіленої генерації в систему енергозабезпечення України. *Проблеми економіки*. 2024. № 2(60). С. 83-93. DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2024-2-83-93>.

References

1. Denysiuk, S. and Baziuk, T. (2012), "Analysis of the impact of distributed generation sources on the power grid and features of building virtual power plants", *Elektryfikatsiia transportu*, no. 4, pp. 23-29.

2. DIXI GROUP ALERT (2023), "Development of distributed gas generation in Ukraine: strategy and tactics", available at: <https://dixigroup.org/analytic/rozvytok-rozpodilenoyi-gazovoyi-generaciyi-v-ukrayini-strategiya-i-taktyka/> (access date April 02, 2025).

3. Cabinet of Ministers of Ukraine (2024), "Strategy for the development of distributed generation until 2035" approved by Resolution dated 18.07.2024 no. 713-r, available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/713-2024-%D1%80#Text> (access date April 02, 2025).

4. Wikipedia (2025), "Distributed energy generation", available at: <https://surl.li/dtnvtn> (access date April 02, 2025).

5. Hvozdi, V. (2024), "Why Ukraine should develop distributed generation", *Ekonomichna pravda*, available at: <https://epravda.com.ua/columns/2024/10/02/720089/> (access date April 03, 2025).

6. Kyrylenko, O.V., Pavlovskiy, V.V. and Lukianenko, L.M. (2011), "Technical aspects of implementing distributed generation sources in electrical networks", *Tekhnichna elektrodynamika*, no. 1, pp. 46-53.

7. Hryhoruk, I. (2025), "Distributed generation as an important component of energy security of

Ukraine in wartime and peacetime”, *Energy Club*, available at: <https://divi.iclub.energy/blog/rozpodilena-heneratsiia-ie-vazhlyvoiu-skladovoiu-enerhetychnoi-bezpeky-ukrainy-u-voiennyi-i-v-myrnyy-chas/> (access date April 04, 2025).

8. Ackermann, T. (2007), “Distributed resources and re-regulated electricity markets”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 77, Issue 9, pp. 1148-1159.

9. Dondi, P., Bayoumi, D., Haederli, C. et al. (2002), “Network integration of distributed power generation”, *Journal of Power Sources*, no. 106, pp. 1-9.

10. Momoh, J. and Boswell, G.D. (2006), “Improving power grid efficiency using distributed generation”, *IEEE Power Systems Conference and Exposition : Proceedings of the 7th international conference on power system*, pp. 295-300.

11. Chambers, A. (2001), *Distributed generation: a nontechnical guide*, PennWell Publishing, USA, 283 p.

12. CIGRE (2025), International Council on Large Electric Systems, available at: <http://www.cigre.org> (access date May 05, 2025).

13. IEEE (2025), Institute of Electrical and Electronics Engineers, available at: <http://www.ieee.org> (access date May 05, 2025).

14. International Energy Agency (2002), *Distributed Generation in Liberalised Electricity Markets*, available at: <http://www.iea.org> (access date April 05, 2025).

15. McDonald, J. (2005), *Adaptive intelligent power systems: world survey of decentralized energy*, WADE, Edinburgh, UK, 45 p., available at: http://www.localpower.org/documents_pub/report_worldsurvey05.pdf (access date April 06, 2025).

16. OECD (2002), *Distributed Generation in Liberalised Electricity Markets*, DOI: <https://doi.org/10.1787/9789264175976-en>.

17. Unihovskiy, L. (2024), “Distributed generation, energy management and Dolyna city: current state and prospects”, *Enerhobiznes*, no. 16(1329), available at: <https://e-b.com.ua/rozpodilena-generaciya-energeticii-menedzment-i-m-dolina-yak-je-i-yak-maje-buti-6312> (access date April 07, 2025).

18. Ackermann, T., Andersson, G. and Soder, L. (2001), “Distributed generation: a definition”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 57, pp. 195-204.

19. Kostenko, H. and Zhurovets, O. (2023), “Current state and prospects for the development of renewable distributed generation in Ukraine”, *Systemni doslidzhennia v enerhetytsi*, no. 2(73), pp. 4-17. DOI: <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.02.004>

20. Denysiuk, S.P. and Hilevych, K.M. (2023), “Optimization of the use of distributed energy resources in local power systems according to the criterion of minimum electricity losses”, *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia*, no. 4(74), pp. 7-21, DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2023.290880>.

21. Rubanenko, O.O. (2024), *Pidvyshchennia enerhoefektyvnosti vidnovliuvanykh dzherel enerhii* [Improving energy efficiency of renewable energy sources], monograph, Vlavke, Vinnytsia, Ukraine, 428 p.

22. Telizhenko, O. and Shashkov, S. (2023), “Directions of aggregation activities in the electricity sector based on the development of distributed generation”, *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, no. 4(87), pp. 299-304, DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.4.36>.

23. Department of Energy of the USA, available at: <https://www.energy.gov/> (access date April 08, 2025).

24. Kudria, S.O. and Zurian, O.V. (2025), “Renewable energy – recovery of Ukraine”, available at: https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Presentation-Kudrya_Zuryan.pdf (access date May 24, 2025).

25. Statista (2025), Share of renewable energy in the gross consumption of energy in the European Union from 2012 to 2023, available at: <https://www.statista.com/statistics/864900/share-of-renewable-energy-electricity-consumption-european-union-eu28/> (access date April 09, 2025).

26. Kostenko, H.P., Zaporozhets, A.O., Zaporozhets, N.V. and Verpeta, V.O. (2024), “Aspects of integration of renewable distributed generation into the energy supply system of Ukraine”, *Problemy ekonomiky*, no. 2(60), pp. 83-93, DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2024-2-83-93>.

Пуцентейло П.Р., Шевчук С.Д., Вербіцька І.І.

ІНФРАСТРУКТУРНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОЗВИТКУ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ В КОНТЕКСТІ ПОСИЛЕННЯ КОНКУРЕНТНИХ ПЕРЕВАГ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ НАЦІОНАЛЬНОЇ ЕКОНОМІКИ

Мета. Обґрунтування ролі розподіленої генерації у зміцненні енергетичної безпеки національної економіки, визначення ключових елементів її інфраструктурного забезпечення та формування підходів до подальшого розвитку розподіленої генерації в Україні на засадах конкурентних переваг.

Методика дослідження. Методологічною основою дослідження є діалектичний метод наукового пізнання та системний підхід. В процесі дослідження використано комплекс наукових методів, що забезпечують аналіз розвитку розподіленої генерації, зокрема аналізу і синтезу, аналітичний – при опрацюванні літературних та Internet-джерел; статистичний аналіз – при оцінюванні динаміки розвитку розподіленої генерації на основі наведених даних, визначенні тенденцій та ключових напрямів у впровадженні розподіленої генерації та ВДЕ. Застосування трендового аналізу

дало змогу ідентифікувати основні чинники впливу на розвиток розподіленої генерації в світі та ЄС. Графічний метод застосовано для візуалізації статистичних даних і трендів, що забезпечує більш наочне представлення динаміки розвитку ВДЕ та спрощує інтерпретацію отриманих результатів.

Результати дослідження. Досліджено сутність, структуру та особливості функціонування розподіленої генерації. Розглянуто роль відновлюваних джерел енергії у її розвитку та визначено основні технічні характеристики джерел розподіленої генерації. Проаналізовано теоретичні й прикладні аспекти розвитку розподіленої генерації в сучасних енергетичних системах та її роль у трансформації енергетичної інфраструктури й підвищенні стійкості енергосистем. Визначено ключові елементи інфраструктурного забезпечення функціонування систем розподіленої генерації та уточнено їх значення у зміцненні енергетичної безпеки національної економіки. Обґрунтовано необхідність інтеграції централізованих і децентралізованих джерел енергії в межах сучасної енергетичної системи. Запропоновано концептуальні підходи до формування інфраструктурної моделі розвитку розподіленої генерації, спрямованої на підвищення гнучкості, енергоефективності та надійності функціонування енергетичної системи.

Наукова новизна результатів дослідження. Розроблено концепцію гібридної архітектури енергетичної системи України, яка базується на багаторівневій інтеграції централізованої та розподіленої генерації. На відміну від існуючих централізованих моделей, запропонована концепція дає змогу забезпечити двосторонній енергетичний обмін між локальними та національними системами, підвищити стійкість енергетичної інфраструктури та оптимізувати енергетичні потоки. Удосконалено підходи до функціонування розподіленої генерації шляхом створення локальних енергетичних хабів, які інтегрують виробництво, накопичення та споживання енергії різних видів, включаючи відновлювані джерела. Це сприятиме формуванню масштабованої, гнучкої та стійкої енергетичної системи, здатної працювати в ринковому режимі та забезпечувати енергетичну безпеку національної економіки.

Практична значущість результатів дослідження. Результати дослідження мають важливе прикладне значення для розвитку енергетичної системи України. Запропонована концепція гібридної архітектури та локальних енергетичних хабів дає змогу підвищити стійкість енергетичної інфраструктури, забезпечити інтеграцію централізованої та розподіленої генерації, а також оптимізувати використання відновлюваних джерел енергії. Результати можуть бути використані при розробці енергетичної політики, плануванні інвестицій у розподілену генерацію та формуванні стійкої мультивекторної енергетичної системи.

Ключові слова: інфраструктурне забезпечення, конкурентні переваги, розподілена генерація, енергетична безпека, відновлювані джерела енергії, національна економіка, локальні енергетичні хаби, Smart Grid, централізована енергетична система, інтеграція, енергетична стійкість, енергетичні ресурси, повоєнне відновлення.

Putsenteilo P.R., Shevchuk S.D., Verbitska I.I.

INFRASTRUCTURAL SUPPORT FOR THE DEVELOPMENT OF DISTRIBUTED GENERATION IN THE CONTEXT OF STRENGTHENING THE COMPETITIVE ADVANTAGES OF ENERGY SECURITY FOR THE NATIONAL ECONOMY

Purpose. The purpose of this article is to justify the role of distributed generation in strengthening the energy security of the national economy, to identify the key elements of its infrastructure, and to develop approaches for the further development of distributed generation in Ukraine based on competitive advantages.

Methodology of research. The methodological foundation of this study is the dialectical method of scientific inquiry and the systems approach. The research employs a range of scientific methods to analyze the development of distributed generation, including analysis and synthesis, as well as analytical methods – specifically, when reviewing literature and online sources; statistical analysis – when assessing the dynamics of distributed generation development based on the provided data, identifying trends and key directions in the implementation of distributed generation and renewable energy sources. The application of trend analysis made it possible to identify the main factors influencing the development of distributed generation globally and in the EU. Graphical methods were used to visualize statistical data and trends, providing a clearer representation of the dynamics of RES development and simplifying the interpretation of the results obtained.

Findings. The nature, structure, and operational characteristics of distributed generation have been examined. The role of renewable energy sources in its development has been considered, and the main technical characteristics of distributed generation sources have been identified. The theoretical and applied aspects of distributed generation development in modern energy systems and its role in transforming energy infrastructure and enhancing the resilience of power systems have been analyzed. The key elements of the infrastructure supporting the operation of distributed generation systems have been identified, and their significance in strengthening the energy security of the national economy has been clarified. The necessity of integrating centralized and decentralized energy sources within the modern energy system is

substantiated. Conceptual approaches to forming an infrastructure model for the development of distributed generation, aimed at increasing the flexibility, energy efficiency, and reliability of the energy system's operation, are proposed.

Originality. A concept for a hybrid architecture of Ukraine's energy system has been developed, based on the multi-level integration of centralized and distributed generation. Unlike existing centralized models, the proposed concept enables two-way energy exchange between local and national systems, enhances the resilience of the energy infrastructure, and optimizes energy flows. Approaches to the operation of distributed generation have been improved through the creation of local energy hubs that integrate the production, storage, and consumption of various types of energy, including renewable sources. This will contribute to the development of a scalable, flexible, and resilient energy system capable of operating in a market-based environment and ensuring the energy security of the national economy.

Practical value. The findings of this study have important practical implications for the development of Ukraine's energy system. The proposed concept of a hybrid architecture and local energy hubs makes it possible to enhance the resilience of the energy infrastructure, ensure the integration of centralized and distributed generation, and optimize the use of renewable energy sources. The results can be used in the development of energy policy, planning investments in distributed generation, and the formation of a resilient, multi-vector energy system.

Key words: infrastructure provision, competitive advantages, distributed generation, energy security, renewable energy sources, national economy, local energy hubs, Smart Grid, centralized energy system, integration, energy resilience, energy resources, post-war reconstruction.

Дата надходження рукопису: 05.06.2025

Дата прийняття рукопису до друку: 24.06.2025

Дата публікації: 30.06.2025