

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2026-16-1-27>

УДК 621.3

О. М. Сайко, аспірант

ORCID: 0009-0002-6509-9729

Сумський національний аграрний університет

e-mail: oleksii.saiko.20@gmail.com

ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ ЗА РАХУНОК ДЕЦЕНТРАЛІЗАЦІЇ

Анотація: У роботі розглянуто проблему низької стійкості традиційних централізованих енергосистем, історично орієнтованих на використання викопного палива та вразливих до екстремальних подій і пошкодження окремих критичних елементів, зокрема високовольтних трансформаторних підстанцій. Проведено огляд сучасних підходів до підвищення резильєнтності енергосистем шляхом впровадження децентралізованих архітектур на основі мікромереж (Microgrid), технологій Smart Grid та розподілених енергетичних ресурсів, що забезпечують двосторонній обмін енергією та інформацією й сприяють інтеграції відновлюваних джерел. На основі аналізу статистики структури генерації електроенергії в Україні за 2020–2024 рр. показано збереження домінування вуглеводневих енергоносіїв та окреслено потенціал розширення частки відновлюваних джерел у складі децентралізованих енергосистем. Запропоновано концептуальний комплексний підхід до підвищення стійкості енергосистеми, який поєднує децентралізацію мережевої архітектури з інженерно-технічними засадами фізичного захисту критичних елементів інфраструктури та заходами щодо підвищення надійності генеруючих вузлів.

Ключові слова: Microgrid, децентралізована система, стійкість, резильєнтність.

Постановка проблеми: Історично, більшість енергосистем національного рівня створені централізовано та повністю залежні від викопних ресурсів. Глобальні тенденції сталого розвитку, необхідність зменшення впливу на довкілля та все нові виклики до мереж вимагають зменшення цієї частки. Це можна здійснити через інтеграцію розподіленої мережі відновлювальних джерел енергії.

Разом з екологічними і ресурсними викликами, традиційні мережі є надзвичайно вразливими до екстремальних подій. Це можуть бути як і погодні катаклізми, так і пошкодження на магістральних елементах системи. Як показує практика, пошкодження одного, але критично важливого елемента, наприклад високовольтної трансформаторної підстанції, може призвести до відключення в кількох населених пунктах або цілої області. Кількість дестабілізуючих факторів з часом тільки зростає, тому формування науково-технічних засад для збільшення резильєнтності системи (особливо здатність системи швидко реагувати на пошкодження або протистояти загрозам) є пріоритетним практичним завданням.

Аналіз останніх досліджень. Підвищення ефективності, надійності та екологічності енергосистем через впровадження розподілених мереж та енергетичних ресурсів активно досліджується у світовій науці. Впровадження технологій Microgrid та Smart Grid забезпечує двосторонній обмін інформацією та енергією, що сприяє інтеграції відновлювальних джерел енергії, що розглянуто у статті [2]. Однією з особливостей цих мереж є робота як з магістральною мережею, так і робота в ізольованому режимі.

Загальні архітектурні та ринкові аспекти функціонування локальних мікромереж (Microgrid), включно з використанням різних систем для управління в умовах конкурентного ринку також були розглянуті в роботі [7].

Для ефективного управління множиною розподілених ресурсів науковці [1] пропонують концепції віртуальних електростанцій (VPP). VPP дозволяє агрегувати різноманітні генеруючі системи, кероване навантаження та системи накопичення в одну систему.

Окрему частину досліджень було проведено в напрямку резильєнтності, а саме, здатності системи протистояти та швидко адаптуватися після екстремальних подій. Автори [6] структурують підходи на дві групи: оптимальне формування мікромереж, та оптимальне планування/енергоменеджмент, що задає методичну основу для досліджень децентралізованої стійкості.

Водночас, в дослідженні [9] мереж США зазначено, що децентралізація не усуває повністю вразливості до фізичних впливів. Аналіз мережі в США демонструє, що менше 3 % трансформаторів передають 60–70 % електроенергії, залишаючись критичними й водночас найбільш вразливими елементами.

Проаналізовані джерела формують узгоджену картину: перехід до децентралізованої архітектури на базі мікромереж, підтриманий накопичувачами та розподіленою генерацією, Smart Grid та VPP знизить вуглецеву інтенсивність, але одним з основних невирішених питань залишається комплексна фізична резильєнтність інфраструктури.

Формування мети статті (постановка завдання). Метою роботи є обґрунтування підходів до побудови децентралізованої енергосистеми, здатної забезпечити підвищення фізичної резильєнтності, надійності та стійкості електропостачання в умовах зовнішніх загроз і пошкодження критичних елементів інфраструктури.

Основна частина. Статистичні дані [11] щодо динаміки структури виробництва електроенергії останніх років (рис. 1) показують, що Україна досі здебільшого покладається на викопні енергоносії, наприклад, за даними 2024 року генерація електроенергії за рахунок вуглеводнів в Україні продовжує бути основою виробітку та становить майже 80 %, хоча збільшення використання відновлювальних джерел енергії також має місце.

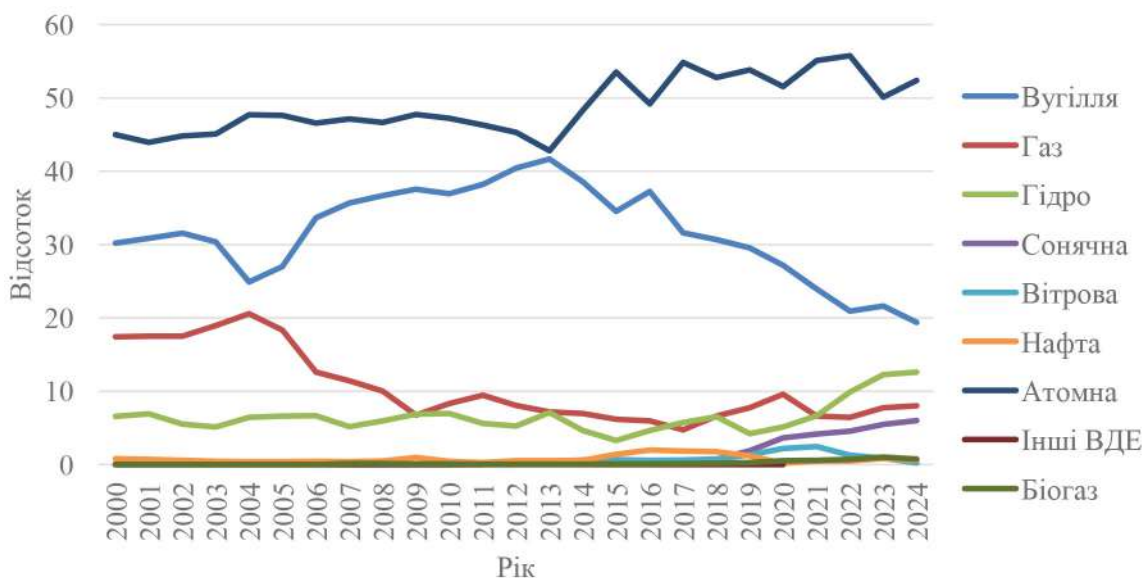


Рис. 1. Динаміка структури виробництва електроенергії за джерелами за 2020–2024 рр. [11]

Не зважаючи на збільшення частки використання відновлювальних джерел енергії в виробництві, вуглецева ємність виробництва електроенергії в Україні (рис. 2) тільки збільшується.

Це свідчить про пропорційне збільшення використання вуглецевих енергоресурсів відносно відновлювальних джерел енергії. Одним з шляхів зменшення вуглецевого сліду є перехід до децентралізованих мереж. Децентралізація енергосистеми вже не один рік є предметом

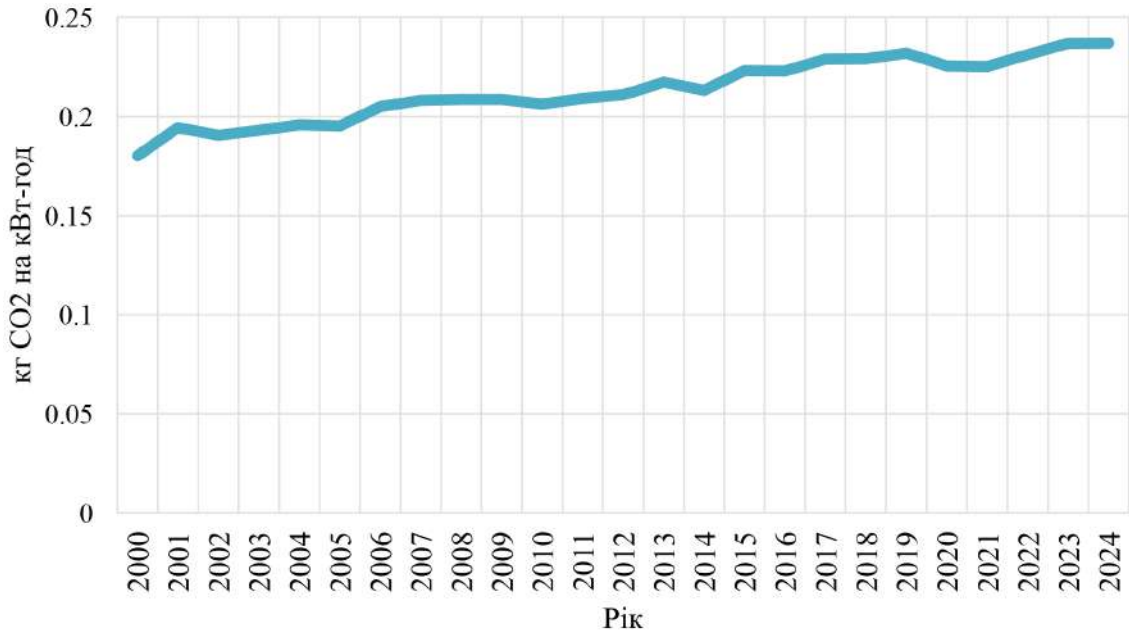


Рис. 2. Динаміка вуглецевої ємності енергії в Україні 2000–2024 рр. [11]

активних дискусій та базується на впровадженні такої одиниці як мікромережа (Microgrid), саме вона є тією автономною одиницею яка надає ту саму гнучкість енергосистемі та може зменшити вуглецевий слід [7].

Мікромережа являє собою комплекс систем, які здатні функціонувати як синхронно з централізованою мережею, так і в автономному (ізолюваному) режимі. Структурно, сучасні мікромережі можна поділити на п'ять ключових елементів, які взаємопов'язані між собою.

Першим елементом є власне сама мережа, тобто інфраструктура з ліній постійного і змінного струму, лінії електропередач та комутація. Це є фізичним з'єднанням усіх компонентів системи, яке відповідає як за передачу, так і за відключення від магістралі у точці спільного підключення (Point of Common Coupling), у разі виникнення непередбачуваних ситуацій та аварій.

Другим елементом є розподілена генерація (Decentralized Energy Resources – DER), це є основним джерелом виробництва електроенергії в мікромережі. Тут якраз і зосереджена вся частина відновлювальних джерел енергії, згідно умов сталого розвитку, від сонячних панелей, до біогазових установок та вітряків. Для підвищення загальної термодинамічної ефективності

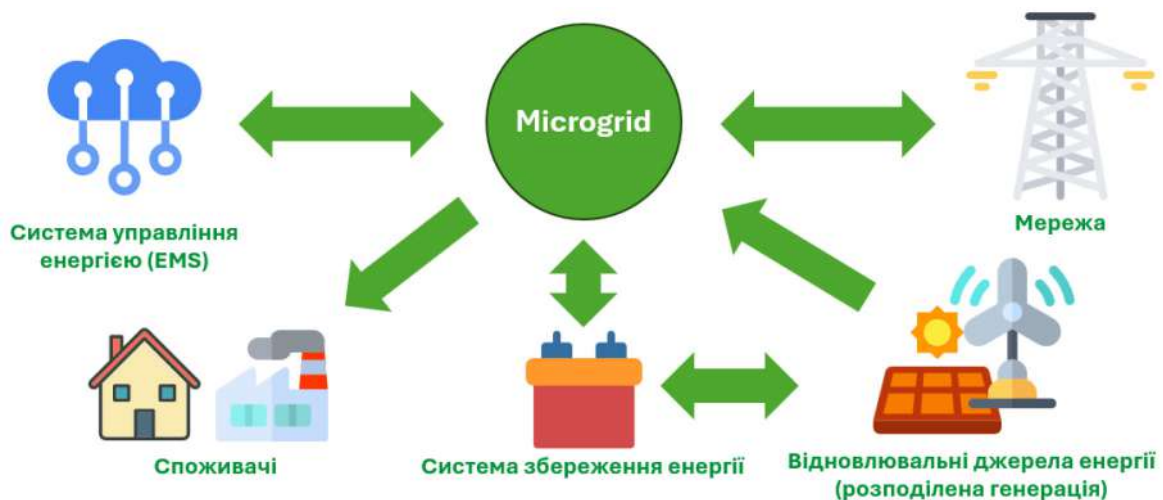


Рис. 3. Схема мережі Microgrid



дана генерація може доповнюватися когенераційними установками, що дозволить мінімізувати втрати та виробляти теплову енергію з електричної [4].

Третім компонентом виступають споживачі. В концепті мікромереж споживачі перестають бути пасивними учасниками, вони можуть мати профіль споживання і змінювати його в залежності від потреб системи. Такий механізм управління попиту (demand-side-management) дозволяє зміщувати години роботи некритичного навантаження, або знижувати його в залежності від обсягів генерації, що є надзвичайно важливим в умовах роботи мережі в острівному режимі.

Четвертим досить важливим елементом всієї системи є акумуляторні системи накопичення енергії. Через стохастичну природу відновлювальних джерел енергії, акумуляторні системи виступають в ролі енергетичного буфера, реалізуючи функції згладжування піків навантаження (peak shaving) та підтримуючи стабільну напругу та частоту. Найбільш широкого застосування зараз набули акумуляторні системи на базі літій-залізо-фосфатних (LiFePO₄) акумуляторів, вони характеризуються високою термічною стабільністю та великим ресурсом [8].

П'ятим, останнім елементом, що поєднує та синхронізує роботу всієї системи є система управління енергією (Energy Management System – EMS) – це програмно-апаратний комплекс який у реальному часі здійснює збір даних, прогнозує споживання та оптимізує потоки електроенергії. Апаратною частиною цього елемента є двонаправлені інверторні групи та передові системи управління батареями (Battery Management System – BMS). Передові BMS здійснюють постійний моніторинг стану заряду (State of Charge – SOC) та стану деградації (State of Health – SOH), на основі цих даних вони виконують балансування комірок і забезпечують термічні контроль запобігаючи перегріву акумуляторів під час інтенсивних навантажень.

Microgrid є фундаментальною основою для переходу від традиційної централізованої мережі до децентралізованих архітектур. Ці архітектури зараз спираються на дві взаємопов'язані концепції, а сам інтелектуальні мережі (Smart Grid) та віртуальні електростанції (Virtual Power Plant – VPP).

Концепція Smart Grid виступає як наступний крок переходу від локальних мереж до об'єднаних енергосистем. Вона, на відміну від класичних мереж з однонаправленим потоком передачі енергії, передбачає двосторонній обмін як потужністю, так і інформаційними потоками, це забезпечується впровадженням систем телеметрії та сучасними інформаційно-комунікаційними технологіями. Ключовою роллю такої мережі є її здатність гнучко інтегрувати відновлювальні джерела енергії, компенсуючих їх стохастичну природу шляхом автоматизованого перерозподілу потоків та здатністю до самовідновлення та автоматизації. Завдяки телеметрії та обміну інформацією між елементами мережі, система оперативно локалізує аварійні ділянки та змінює маршрути постачання, мінімізуючи тривалість перерв в мережі.

Smart Grid є важливим інфраструктурним елементом який фізично об'єднує мікромережі і дозволяє їм комунікувати на більш високому рівні.

Найвищий рівень взаємодії виконують віртуальні електростанції (VPP), це хмарний програмно-апаратний комплекс який агрегує розосереджені джерела генерації, системи накопичення енергії та кероване навантаження в один великий інформаційний блок. Завдяки такій агрегації для оператора множина децентралізованих об'єктів функціонує та керується як єдина класична електростанція великої потужності [1].

Ці станції класифікуються, в залежності від цільової функції, на комерційні (CVPP) та технічні (TVPP). Де комерційні віртуальні електростанції зосереджені на підвищення та оптимізації економічних показників, об'єднуючі потужності для спільної участі на ринках електроенергії. Алгоритми CVPP спрямовані на аналіз ринку та максимізації прибутку визначаючи оптимальні період експорту або акумуляції електроенергії [1].

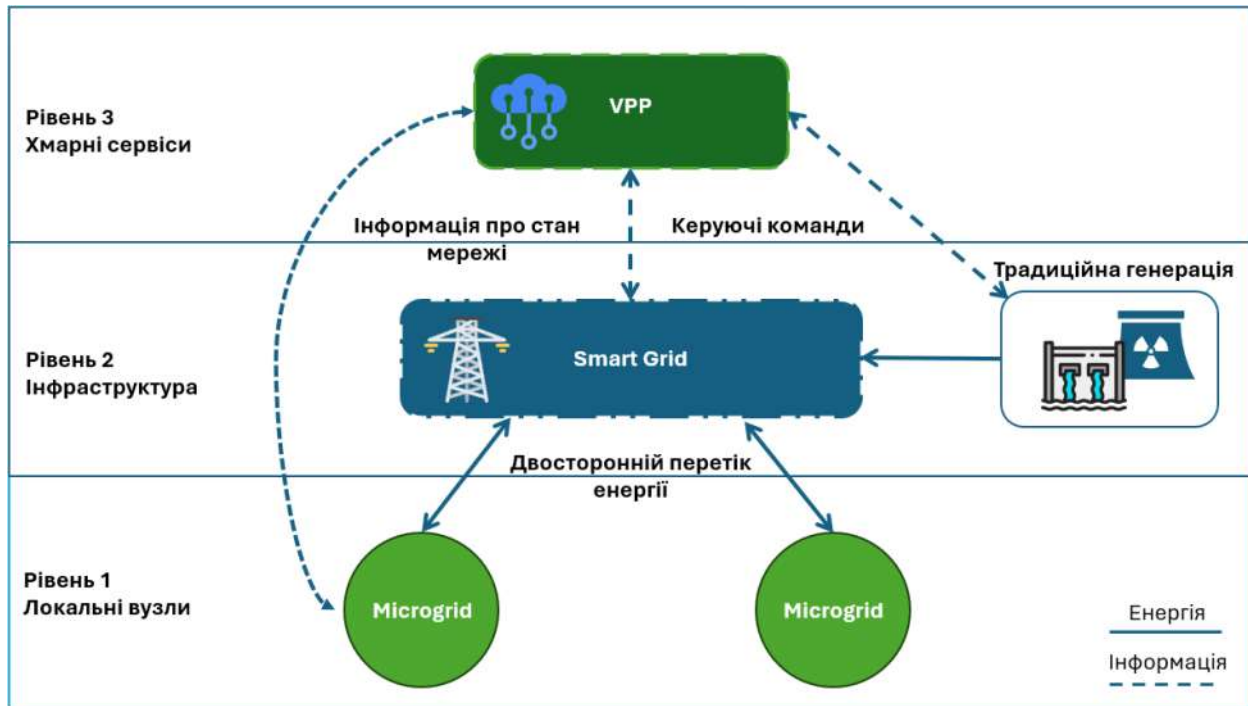


Рис. 4. Схема децентралізованої мережі

Технічні TVPP сфокусовані на забезпеченні фізичної стабільності та надійності мережі. Вони безпосередньо взаємодіють з оператором системи розподілу та передачі, надаючи допоміжні послуги, реагуючи на технічні обмеження пропускну здатності та здійснюючи балансування параметрів мережі. Перевагами VPP є управління попитом, підтримка стабільної частоти напруги в системі та оперативне надання резервів потужності через акумуляторні системи [1].

Впровадження такої децентралізованої архітектури дозволить фундаментально перерозподілити наявні ризики централізованої системи з невеликої кількості великих об'єктів на територіально розосереджений масив автономних мікромереж. Однак, для досягнення фізичної резильєнтності системи, яка буде стійкою до природніх катаклізмів та зовнішніх впливів простого розосередження недостатньо. Для практичного переходу від традиційної енергосистеми до децентралізованої архітектури необхідна комплексна тривірнева методологія розбудови мережі.

Першим, топологічно-функціональним рівнем, є просторове планування контурів ізольованих мікромереж та визначення їхньої апаратної конфігурації. На даному етапі визначається кількість критично важливих споживачів (об'єктів медичної, комунальної, комунікаційної та військової інфраструктури), де перебої з живленням є неприпустимі за будь-яких сценаріїв. Відповідно до їхнього прогнозованого профілю навантаження розраховується необхідна потужність локальної розподіленої генерації, основу якої формують стійкі до перебоїв відновлювальні джерела енергії та вискоелективні когенераційні установки. Визначається розрахункова ємність для акумуляторних систем накопичення електроенергії, яка має гарантувати роботу об'єкта протягом часу відновлення мережі.

Другий рівень, апаратно-інженерний, є фундаментальним для забезпечення фізичного захисту вузлів. Вимогою стає перехід до парадигми інженерного захисту інфраструктури, що реалізується через обов'язкове застосування методів захисного будівництва. У контексті децентралізованої мережі це передбачає майже повну відмову від відкритого розташування критичного обладнання. Інженерні споруди зводяться в підземних або напівпідземних приміщеннях або в залізобетонних укриттях. Специфіка обмеженого простору висуває досить жорсткі вимоги до експлуатаційної та пожежної безпеки для приладів що розташовуються всередині.



Третій, інтеграційний рівень, забезпечує перетворення ізольованих і фізично захищених мікромереж на повноцінну національну систему. На цьому рівні забезпечується кіберфізичне об'єднання локальних об'єктів за допомогою протоколів Smart Grid та підключення до хмарних платформ віртуальних електростанцій (VPP).

Висновки. У результаті проведених досліджень встановлено, що трансформація класичної енергомережі шляхом переходу до децентралізованої архітектури є фундаментальною умовою до забезпечення її комплексної резильєнтності. Наведено аргументи, що класична мережа з домінуванням великих теплових електростанцій і високовольтних підстанцій формує високі системні ризики і що базовим гарантом стабільності функціонування системи в умовах екстремальних загроз виступає захисне будівництво. Наведено приклад методології розбудови мережі, яка враховує забезпечення фізичної резильєнтності.

Подальший напрям наукового пошуку доцільно сфокусувати на розробці комплексних рішень, які об'єднують методи будівельної інженерії для фізичного захисту об'єктів розподіленої генерації та на створенні математичних моделей, які дозволять розрахувати необхідний рівень інженерного захисту вузлів мікромереж в залежності від їх критичності в межах енергосистеми.

Список використаних джерел

1. Saboori H., Mohammadi M., Taghe R. Virtual Power Plant (VPP), *Definition, Concept, Components and Types*. 2011 *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. 2011. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2011.5749026>
2. Лободзинський В. Ю., Бурик М. П., Петрученко О. В., Ілліна О. О. *Вплив системи Smart Grid на національну енергетичну мережу*. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2022. № 1. С. 57–64. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2022.259182>
3. Ediriweera W. E. P., Lidula N. W. A. Design and protection of microgrid clusters: A comprehensive review. *AIMS Energy*. 2022. Vol. 10, No. 3. P. 375–411. DOI: <https://doi.org/10.3934/energy.2022020>
4. Akorede M. F., Hizam H., Pouresmaeil E. Distributed energy resources and benefits to the environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. Vol. 14, No. 2. P. 724–734. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.025>
5. Anvari P., Tousi B., Talavat V., Farhadi-Kangarlu M. A Smart integrated framework for resilience enhancement in distribution networks using multi-energy microgrids and distributed energy resources. *Results in Engineering*. 2025. Vol. 27. Art. 105635. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105635>
6. Hamidieh M., Ghassemi M. Microgrids and Resilience: A Review. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 106059–106080. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3211511>
7. Jiayi H., Chuanwen J., Rong X. A review on distributed energy resources and MicroGrid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008. Vol. 12, No. 9. P. 2472–2483. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.06.004>
8. Nyamathulla S., Dhanamjayulu C. A review of battery energy storage systems and advanced battery management system for different applications: Challenges and recommendations. *Journal of Energy Storage*. 2024. Vol. 86. Art. 111179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111179>
9. Parfomak P. W. Physical Security of the U.S. Power Grid: High-Voltage Transformer Substations. *Congressional Research Service*. 2014. 26 p.
10. Thilak Raja N., Iniyan S., Goic R. A review of renewable energy based cogeneration technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol. 15, No. 8. P. 3640–3648. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.06.003>
11. Hannah Ritchie and Pablo Rosado (2025) – “Energy” Published online at OurWorldinData.org. URL: <https://ourworldindata.org/profile/energy/ukraine>

Дата першого надходження статті до видання: 17.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 18.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)





O. Saiko
Sumy National Agrarian University

ENHANCING POWER SYSTEM RESILIENCE THROUGH DECENTRALIZATION

Summary

This paper addresses the problem of low resilience in traditional centralized power systems, which are historically reliant on fossil fuels and vulnerable to extreme events and damage to individual critical elements, particularly high-voltage transformer substations. A review of modern approaches to enhancing power system resilience is conducted, focusing on the implementation of decentralized architectures based on microgrids, Smart Grid technologies, and distributed energy resources (DERs). These technologies enable two-way energy and information exchange and facilitate the integration of renewable energy sources. Based on a statistical analysis of Ukraine's electricity generation structure for 2020–2024, the continued dominance of hydrocarbon energy sources is demonstrated, and the potential for expanding the share of renewables within decentralized power systems is outlined. A conceptual comprehensive approach to improving power system resilience is proposed, combining the decentralization of network architecture with engineering and technical principles for the physical protection of critical infrastructure elements, alongside measures to enhance the reliability of generating nodes.

Keywords: microgrid, decentralized system, stability, resilience.