

РОЗПОДІЛЬНІ ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ В УМОВАХ ВІДНОВЛЕННЯ ЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ: ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ, СТІЙКОСТІ ТА АДАПТИВНОСТІ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Метою дослідження є обґрунтування технічних, організаційних та цифрових рішень для підвищення стійкості та надійності розподільних електричних мереж України в умовах відновлення енергетичної інфраструктури після воєнних руйнувань. Встановлено, що протяжність мереж 0,4–10 кВ зменшилась з 7,8 тис. км у 2022 році до 2,4 тис. км у 2025 році, а кількість трансформаторних підстанцій скоротилась з 340 до 120, що призвело до значного перевантаження мереж у окремих регіонах. Показники надійності у 2022 році перевищували середньоєвропейські у 7–9 разів, а повне відновлення їх нормативних значень станом на 2025 рік не досягнуто.

Ключові слова: розподільні електричні мережі, надійність, стійкості енергетичної інфраструктури.

Abstract

The purpose of the study is to substantiate technical, organizational, and digital solutions aimed at increasing the resilience and reliability of Ukraine's electricity distribution networks during the restoration of energy infrastructure after war-related damage. It was determined that the length of 0.4–10 kV networks decreased from 7.8 thousand km in 2022 to 2.4 thousand km in 2025, while the number of transformer substations decreased from 340 to 120, which led to significant network overloading in certain regions. Reliability indicators in 2022 exceeded the European average by 7–9 times, and their full restoration to standard values had not been achieved as of 2025.

Keywords: electricity distribution networks, reliability, energy infrastructure resilience.

Дослідження

Унаслідок повномасштабного вторгнення російської федерації в Україну розподільні електричні мережі зазнали значних пошкоджень, що призвело до погіршення показників надійності та стійкості електропостачання [1]. Ситуація ускладнювалася високим рівнем фізичного зносу обладнання, недостатнім резервом потужності, залежністю від централізованих вузлів живлення та обмеженим впровадженням сучасних технологій керування. У результаті значення показників SAIDI та SAIFI суттєво перевищили середньоєвропейські, що свідчить про критичний стан мережевої інфраструктури. Підвищення надійності можливе шляхом інтеграції відновлюваних джерел енергії, впровадження систем накопичення та використання технологій Smart Grid, які забезпечують гнучкість роботи мереж і зменшення кількості перерв електропостачання.

Аналіз наукових досліджень показав, що сучасні підходи до розвитку розподільних мереж пов'язані з цифровізацією, збільшенням частки розподіленої генерації та застосуванням інтелектуальних систем керування [2–4]. Доведено ефективність використання систем накопичення енергії разом із відновлюваними джерелами для підвищення стійкості мереж, а також доцільність застосування методів штучного інтелекту для діагностики пошкоджень і оптимізації режимів роботи. Водночас відзначається необхідність поєднання традиційних інженерних рішень із сучасними цифровими технологіями, що дозволяє підвищити точність керування та надійність функціонування енергосистем.

Окремий напрям досліджень присвячений відновленню енергетичної інфраструктури України в умовах війни. Показано, що відбудова не повинна обмежуватися простим відновленням зруйнованих об'єктів, а має передбачати модернізацію мереж, впровадження відновлюваних джерел енергії, систем накопичення та цифрових технологій керування. Встановлено також тісний взаємозв'язок між енергетичною, транспортною та телекомунікаційною інфраструктурою, що підвищує вимоги до комплексного підходу до реконструкції.

Узагальнення результатів досліджень показало, що недостатньо вивченим залишається вплив пошкоджень розподільних мереж на загальну стійкість енергосистеми, а також ефективність впровадження технологій Smart Grid і цифрових двійників у процесі післявоєнного відновлення. У

зв'язку з цим актуальним є формування комплексної моделі реконструкції, що враховує технічні, організаційні та безпекові чинники.

Метою дослідження є обґрунтування технічних, організаційних та цифрових рішень для підвищення стійкості та надійності розподільних електричних мереж України в умовах післявоєнної відбудови. Для цього виконано аналіз стану та вразливості мереж за статистичними даними та показниками SAIDI і SAIFI, визначено умови інтеграції відновлюваних джерел енергії та систем накопичення, а також досліджено можливості використання технологій Smart Grid і цифрових двійників як основи формування нової архітектури енергетичної інфраструктури.

Для кількісної оцінки масштабів пошкоджень узагальнено статистичні дані щодо основних елементів розподільних мереж за 2022–2025 роки, що дозволило простежити динаміку руйнувань і відновлення, визначити найбільш уразливі елементи та оцінити ефективність відновлювальних заходів. Представлення результатів у табличній формі створює основу для подальшого аналізу та прогнозування розвитку мережевої інфраструктури.

У таблиці 1 наведено кількість пошкоджених об'єктів розподільних електричних мереж за типами та роками, що дає змогу не лише визначити характер впливу бойових дій на енергетичну інфраструктуру, але й сформувати основу для прогнозування темпів її відновлення та розвитку у середньостроковій перспективі.

Таблиця 1. Пошкодження мереж розподілу електроенергії України у 2022–2025 роках

Рік	ЛЕП 0,4–10 кВ, км	ЛЕП 35–150 кВ, км	Трансформаторні підстанції (шт.)	Розподільні пункти (шт.)
2022	7.800	2.450	340	210
2023	5.200	1.900	275	185
2024	3.600	1.300	190	140
2025	2.400	900	120	95

Аналіз узагальнених даних свідчить про поступове зменшення кількості нових пошкоджень після максимального рівня, зафіксованого у 2022 році. Найбільші втрати спостерігаються в сегменті ліній електропередачі низької та середньої напруги (0,4–10 кВ), що зумовлено їх значною протяжністю, високою щільністю розміщення та підвищеною вразливістю до зовнішніх впливів. Водночас найбільш критичними залишаються пошкодження трансформаторних підстанцій та розподільчих пунктів, оскільки навіть незначна кількість відмов цих елементів призводить до масштабних порушень у роботі локальних енергосистем. Зменшення кількості пошкоджень у 2024–2025 роках пояснюється як частковим відновленням мережевої інфраструктури, так і зміною характеру атак на енергетичні об'єкти, що спричинило перерозподіл ризиків. Отримані результати підтверджують необхідність комплексного підходу до відбудови розподільних мереж із пріоритетним підвищенням рівня резервування та автоматизації в найбільш уразливих ділянках.

Для системного обґрунтування технічних характеристик пошкоджень доцільно використовувати міжнародні підходи до класифікації, зокрема стандарти IEEE та CIGRÉ, які забезпечують уніфікований опис різних типів відмов і пошкоджень [5–6]. Використання таких підходів дозволяє порівнювати результати спостережень в Україні з міжнародною практикою та забезпечує коректну інтерпретацію впливу пошкоджень на технічні параметри функціонування енергосистеми. Представлення класифікаційних ознак у табличній формі (табл. 2) дає змогу систематизувати інформацію та сформувати практичні рекомендації щодо визначення пріоритетів відновлення найбільш критичних елементів енергетичної інфраструктури.

Аналіз даних, наведених у таблиці 2, показує, що найбільш критичними для функціонування енергосистеми є повні руйнування та системні відмови, оскільки вони призводять до масштабних відключень електропостачання та потребують повної заміни обладнання, що супроводжується значними часовими і фінансовими витратами. Часткові пошкодження та функціональні відмови мають менший рівень руйнівного впливу, проте суттєво знижують стійкість мереж, підвищують імовірність каскадних відключень і погіршують показники надійності електропостачання. Вторинні пошкодження мають складний характер, виникають під впливом супутніх факторів і ускладнюють локалізацію аварійних ситуацій, що сповільнює процес відновлення мережевої інфраструктури. Використання міжнародної класифікації відповідно до стандартів IEEE та CIGRÉ дозволяє не лише систематизувати український досвід відновлення, але й інтегрувати його у світову практику аналізу технічних

пошкоджень, створюючи основу для подальшого вдосконалення рішень у сфері розвитку енергетичної інфраструктури.

Таблиця 2. Класифікація пошкоджень розподільних електричних мереж згідно зі стандартами IEEE та CIGRÉ з прикладами застосування для України

Категорія пошкодження (за стандартами IEEE/CIGRÉ)	Характер пошкодження	Типові випадки для України (2020–2025)	Технічні наслідки
Повне руйнування	Повна втрата функціональності елемента, необхідність його заміни	Руйнування трансформаторних підстанцій у центральних та північних регіонах	Відключення електропостачання на великих територіях, необхідність заміни обладнання
Часткове пошкодження	Пошкодження конструктивних елементів або ізоляції, можливість ремонту	Порушення ізоляції та пошкодження на лініях 35–150 кВ	Тимчасове зниження пропускної здатності, збільшення аварійності
Функціональні відмови	Порушення режиму роботи без видимих механічних пошкоджень	Відмова комутаційних апаратів через перевантаження	Нестабільність мережі, підвищення ризику каскадних аварій
Системні порушення	Масове відключення елементів під впливом зовнішніх факторів	Однотимчасове пошкодження кількох ліній унаслідок масованих обстрілів	Дестабілізація локальних та регіональних енергосистем
Вторинні пошкодження	Пошкодження, спричинені непрямими факторами (пожежі, перевантаження)	Пожежі на розподільчих пунктах після ударів по суміжних об'єктах	Додаткові втрати обладнання, ускладнення відновлювальних робіт

Висновок

Узагальнення отриманих результатів підтверджує, що відновлення розподільних електричних мереж не може обмежуватися лише ліквідацією наслідків воєнних руйнувань. Визначальними залишаються внутрішні технічні обмеження, закладені у структурі мереж ще до початку повномасштабного вторгнення. Значний фізичний знос обладнання, недостатні резерви пропускної здатності та висока залежність від централізованих вузлів електропостачання зумовлюють необхідність перегляду підходів до реконструкції та модернізації мереж. Зазначені фактори формують вимоги до нових параметрів надійності та технічних рішень, здатних забезпечити підвищення стійкості розподільних електричних мереж у середньо- та довгостроковій перспективі. За такого підходу процес відбудови слід розглядати не як відтворення існуючої системи, а як створення більш адаптивної, гнучкої та технологічно стійкої енергетичної інфраструктури.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Режим доступу: https://ursamedia.com.ua/novyny/shho-vidbuvayetsya-z-energosystemoyu-ukrayiny-ta-yaki-rishennya-mozhlyvi/?utm_source=chatgpt.com
2. Малогулко Ю.В., Тептя В.В., Остра Н.В., Сікорська О.В., Затхей К.О. КЛЮЧОВА РОЛЬ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ У ПІСЛЯВОЄННІЙ ВІДБУДОВІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 36 (75) № 6 частина 1, 2025. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/18>.
3. Javid, Z., Kocar, I., Holderbaum, W., Karaagac, U. 2024. Future distribution networks: A review. *Energies*, 17(8), 1822. <https://doi.org/10.3390/en17081822>
4. Fatima, S., Püvi, V., Arshad, A., Pourakbari-Kasmaei, M., Lehtonen, M. 2021. Comparison of economical and technical photovoltaic hosting capacity limits in distribution networks. *Energies*, 14(9), 2405. <https://doi.org/10.3390/en14092405>
5. International Energy Agency (IEA). (2023). Ukraine's energy security and the coming winter. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/cec49dc2-7d04-442f-92aa-54c18e6f51d6/UkrainesEnergySecurityandtheComingWinter.pdf>
6. Energy Charter Secretariat. 2023. Ukrainian energy sector evaluation and damage assessment. https://www.energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/Occasional/2023_05_24_UA_sectoral_evaluation_and_damage_assessment_Version_X_final.pdf

Малогулко Юлія Володимирівна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: juliya_malogulko@ukr.net

Malohulko Yuliia V. - Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the department of electric power stations and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: juliya_malogulko@ukr.net