

Семененко Юрій Олександрович, к.т.н., доц., доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, +38(068)129-03-44, semenenko_jo@kart.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9422-3528

*Український державний університет залізничного транспорту
майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, Україна, 61050*

Середа Олександр Григорійович, д.т.н., доц., професор кафедри електричних апаратів, +38(050)605-19-70, Oleksandr.Sereda@khpі.edu.ua, ORCID ID: 0009-0003-5243-3828

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002*

Семененко Олександр Іванович, к.т.н., доц., доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, +38(057)730-10-74, semenenko_oi@kart.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8885-6783

*Український державний університет залізничного транспорту
майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, Україна, 61050*

Середа Олена Геннадіївна, к.т.н., доцент кафедри електричних апаратів, +38(066)635-20-68, Olena.Korol@khpі.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-4658-9554

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002*

Семененко Ольга Діонісівна, асистент кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, o.semenenko@khai.edu, ORCID ID: 0009-0001-8425-562X

*Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»
вул. Вадима Манька, 17, м. Харків, Україна, 61070*

АНАЛІЗ ПРИЧИН ПОШКОДЖЕННЯ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ В ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ

Анотація. Проаналізована можливість вирішення актуальної проблеми підвищення надійності функціонування систем електропостачання, зокрема електромереж напругою 6(10)-35 кВ. Здійснено порівняльний аналіз причин високої аварійності повітряних ліній електропередачі в об'єднаній енергосистемі України за наявності аналогічних проблем на світовому рівні, коли основними чинниками пошкодження повітряних ліній середньої напруги були або зношене обладнання, або технологічні порушення від впливу природних явищ, або їх спільна дія. З'ясовано, що тривалі перерви в електропостачанні, регламентовані Законом України «Про ринок електричної енергії», який регулює правові та економічні відносини, пов'язані з виробництвом, передачею, розподілом, купівлею-продажем електроенергії задля забезпечення надійного та безпечного її постачання споживачам, розвитку ринкових відносин, а також мінімізації витрат та негативного впливу на навколишнє природне середовище, призводять до значних економічних збитків у споживачів, а тому мають велику соціально-економічну значимість. Статистичні дані, отримані з літературних джерел підтвердили, що від надійного та ефективного функціонування повітряних ліній суттєво залежить надійність електропостачання споживачів електроенергії в цілому. Доведено, що обрив повітряних ліній напругою 6(10)-35 кВ через чисельні природні явища, особливо при ізольованому режимі нейтралі, спричиняє однофазні замикання на землю, які мають вкрай негативний вплив на

довкілля і вкрай небезпечні для людей і тварин, що опинились поруч.

Ключові слова: енергосистема, енергоефективність, природні явища, кліматичні чинники, цільова функція, однофазні замикання на землю, недопоставлена електроенергія, ідентифікація місця пошкодження, тепловий режим, умовна оптимізація параметрів.

Semenenko Yurii, Ph.D, Docent, Associate Professor at the Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics Department, +38(068)129-03-44, semenenko_jo@kart.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9422-3528

Ukrainian State University of Railway Transport
7, Feuerbach Square, Kharkiv, Ukraine, 61050

Sereda Oleksandr, Sc.D, Docent, Professor at the Electrical Devices Department, +38(050)605-19-70, Oleksandr.Sereda@khpi.edu.ua, ORCID ID: 0009-0003-5243-3828

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»
2, Kirpychova, St., Kharkiv, Ukraine, 61002

Semenenko Oleksandr, Ph.D, Docent, Associate Professor at the Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics Department, +38(057)730-10-74, semenenko_oi@kart.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8885-6783

Ukrainian State University of Railway Transport
7, Feuerbach Square, Kharkiv, Ukraine, 61050

Sereda Olena, Ph.D, Associate Professor at the Electrical Devices Department, +38(066)635-20-68, Olena.Korol@khpi.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-4658-9554

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»
2, Kirpychova, St., Kharkiv, Ukraine, 61002

Semenenko Olha, Assistant at the Theoretical Mechanics, Machine Science and Robotic Systems Department, o.semenenko@khai.edu, ORCID ID: 0009-0001-8425-562X

National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute»
17, Vadyma Manko, St., Kharkiv, Ukraine, 61070

DAMAGE CAUSES ANALYSIS TO OVERHEAD POWER TRANSMISSION LINES IN MEDIUM-VOLTAGE ELECTRICAL NETWORKS

Abstract. *The paper analyzes the possibility of solving the pressing problem of improving the reliability of power supply systems, in particular electrical networks with voltages of 6(10)-35 kV. A comparative analysis of the causes of the high failure rate of overhead power transmission lines in the Integrated Power System of Ukraine is carried out in the context of similar problems worldwide, where the main factors of damage to medium-voltage overhead lines are either worn-out equipment, technological disturbances caused by natural phenomena, or their combined effect. It has been established that prolonged interruptions in electricity supply, regulated by the Law of Ukraine “On the Electricity Market,” which governs legal and economic relations related to the generation, transmission, distribution, and purchase and sale of electricity in order to ensure its reliable and safe supply to consumers, the development of market relations, as well as the minimization of costs and negative environmental impact, lead to significant economic losses for consumers and therefore have high socio-economic significance. Statistical data obtained from the literature confirm that the reliability of electricity supply to consumers largely depends on the reliable and efficient operation of overhead lines. It has been proven that the breakage of overhead lines with voltages of 6(10)-35 kV*

due to numerous natural phenomena, especially in isolated-neutral networks, causes single-phase-to-ground faults, which have an extremely negative impact on the environment and are extremely dangerous for people and animals in the vicinity.

Keywords: *power system, energy efficiency, natural phenomena, climatic factors, objective function, single-phase-to-ground faults, non-supplied energy, fault location identification, thermal regime, conditional parameter optimization.*

Вступ. Тривалі перерви в електропостачанні обов'язково призводять до економічних втрат у споживачів електроенергії, а тому суворо регламентовані Законом України «Про ринок електричної енергії» [1]. Цей Закон визначає правові, економічні та організаційні засади функціонування ринку електроенергії, регулює відносини, пов'язані з виробництвом, передачею, розподілом, купівлею-продажем електроенергії для забезпечення надійного та безпечного її постачання споживачам з урахуванням їх інтересів, розвитку ринкових відносин, мінімізації витрат на електропостачання та мінімізації негативного впливу на довкілля. Соціально-економічна значущість надійного та ефективного функціонування повітряних ліній електропередачі (ПЛ) підтверджується статистичними даними щодо кількості постраждалих та обсягів економічної шкоди через відсутність подачі електроживлення споживачам електроенергії. Тобто, тривала відсутність електропостачання має великий негативний соціальний ефект, який притаманний більшості енергетичних комплексів, особливо в сучасних реаліях правового статусу «воєнного стану» в Україні. Прикладом тривалого порушення роботи об'єднаної енергетичної системи може бути аварія в Індії, яка сталася в січні 2001 року. Кількість постраждалих досягла чверті мільярда осіб. Основними чинниками вважаються погодні умови та застаріле або вкрай зношене електрообладнання. Наприкінці липня 2012 Індія знову пережила техногенну катастрофу. Через аварію на електромережах без світла залишилися 700 млн. людей – більш як половина населення країни. Наявність високих дерев і їх вплив на ПЛ призвели до аварії у США та Канаді в середині серпня 2003 року з кількістю постраждалих понад п'ятдесяті мільйонів осіб. Зовнішні кліматичні чинники, що мають суттєвий вплив на ПЛ, присутні і в Україні. Ожеледь та снігопади в центральній частині України, що сталися 17–20 грудня 2010 року, залишили без електрики понад 1200 населених пунктів. Відновлення

електропостачання тривало протягом трьох, а в деяких місцях п'яти діб. «Сніговий колапс» у Києві та області 22–24 березня 2013 року потрапив до «Книги рекордів України», коли за добу випало пів метри мокрого снігу при швидкості вітру 25 м/с. Внаслідок були пошкоджені десятки кілометрів ПЛ напругою 10–35 кВ. Через падіння дерев з подальшими короткими замиканнями (КЗ) були знеструмлені понад 150 населених пунктів. Відновити електропостачання в перші 12 годин вдалося лише для 40 % споживачів від загальної кількості постраждалих. Повне відновлення електропостачання тривало протягом трьох діб, а в деяких вузлах до п'яти.

Постановка проблеми. Найбільш поширеними і, як наслідок, найбільш вразливими до впливу несприятливих чинників довкілля є ПЛ напругою 6(10)–35 і 110–220 кВ, які є практично у всіх окремих енергосистемах України в складі розподільних електромереж, що і підтверджує їх високу соціально-економічну значимість та необхідність підвищення ефективності їх функціонування, і в першу чергу їх надійності [1–5]. Перерви в електропостачанні, що призводять до значних прямих та непрямих економічних втрат, з метою підвищення надійності роботи електричних мереж об'єднаної енергетичної системи України регламентуються наступними нормативними документами:

- ✓ Про ринок електричної енергії : Закон України від 13 квітня 2017 року № 2019-VIII (поточна редакція від 01 січня 2026 р.). *Відомості Верховної Ради*, 2017, № 27–28, ст. 312;
- ✓ Положення про Міністерство енергетики України : затверджене постановою Кабінету Міністрів України від 17 червня 2020 р. № 507;
- ✓ Правила роздрібного ринку електричної енергії : затверджені постановою Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг 14 березня 2018 р. № 312;
- ✓ Інструкція про складання і застосування графіків погодинного відключення електроенергії : затверджена наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України 15 жовтня 2015 року № 654 (у редакції наказу Міністерства енергетики України від 27 листопада 2024 року № 439).

Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 28 листопада 2024 року № 1804/43149.

Отже, суттєва соціально-економічна значимість надійного та ефективного функціонування ПЛ розподільних електромереж напругою 6(10)–35 кВ, яка зазначена у наведених вище нормативних документах і підтверджена статистичними даними щодо кількості постраждалих та економічної шкоди від відсутності електроенергії, особливо на критично важливих підприємствах, пов'язаних з безпекою країни [6–9], створює необхідність розробки додаткових систем моніторингу цілісності ПЛ середньої напруги.

Мета роботи. Аналіз причин аварійності та ймовірності виникнення пошкодження повітряних ліній електропередачі в розподільних електромережах середньої напруги.

Виклад основного матеріалу дослідження. Основні причини технологічних порушень в роботі електромереж були проаналізовані за період 2020–2024 років у розрізі основних порушень. За оновленим енергетичним ринком в Україні всі права та обов'язки учасників розподілені та закріплені в нормативно-правових актах розроблених Міністерством енергетики та Національною комісією, що здійснює державне регулювання в сфері енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП), яка створена та діє у відповідності до [8]. НКРЕКП визначає основні показники надійності електропостачання, що характеризуються кількістю, тривалістю та частотою перебоїв в електропостачанні.

Основними показниками надійності електропостачання є:

✓ *System Average Interruption Duration Index (SAIDI)* – це індекс середньої тривалості (в хвилинах або годинах) перебоїв в електропостачанні, який показує, скільки часу в середньому кожен споживач залишався без електрики протягом визначеного періоду (найчастіше протягом року) [14]. Цей індекс є ключовим показником надійності енергосистеми для операторів. Він розраховується [14] як відношення сумарної тривалості відсутності електропостачання в точках комерційного обліку електроенергії, де було припинене електропостачання, за звітний період до загальної кількості точок комерційного обліку електроенергії:

$$SAIDI = \sum_{i=1}^k t_i \cdot n_i / n, \quad (1)$$

де t_i – тривалість i -ї перерви в електропостачанні, хв.; n_i – точка комерційного обліку електроенергії; n – кількість точок комерційного обліку електроенергії, де було припинене електропостачання в результаті i -ї перерви в електропостачанні, шт.; k – кількість перерв в електропостачанні протягом звітного періоду; i – номер тривалої перерви в електропостачанні, $i = 1, 2, 3, \dots k$.

Чим менший показник *SAIDI*, тим надійнішою вважається електромережа, оскільки споживачі менше часу залишаються без електрики (індикатор надійності). Оператори системи розподілу електроенергії використовують цей індекс, щоб оцінити ефективність своєї роботи та необхідність впровадження заходів її покращення (наприклад, встановлення реклоузерів).

✓ *System Average Interruption Frequency Index (SAIFI)* – це індекс середньої частоти перебоїв в електропостачанні, який показує, скільки разів в середньому кожен споживач зазнає відключення електроенергії за визначений період (найчастіше за рік) [15]. Цей індекс також використовується для оцінки надійності енергосистеми, де нижчий показник свідчить про вищу надійність. Цей індекс розраховується як відношення сумарної кількості точок комерційного обліку електричної енергії, в яких було припинене електропостачання внаслідок усіх тривалих перерв в електропостачанні протягом звітного періоду, до загальної кількості точок комерційного обліку електричної енергії:

$$SAIFI = \sum_{i=1}^k n_i / n; \quad (2)$$

Індекс *SAIFI* допомагає енергетичним компаніям (як ДТЕК) та споживачам зрозуміти рівень безперебійності електропостачання, а також дозволяє порівняти надійність різних енергосистем або відстежити покращення/погіршення показників з часом.

✓ *Non-Supplied Energy (ENS)* – це недопоставлена електроенергія, або обсяг її попиту, який не вдалося задовольнити через технічні проблеми, аварії чи недостатність генерації. Цей показник важливий для операторів енергосистем

розраховується як сума добутків кількості точок комерційного обліку електричної енергії, в яких було припинене електропостачання, на тривалість перерви та на середнє споживання електроенергії на відповідному рівні напруги віднесених до кількості точок комерційного обліку електроенергії:

$$ENS = \sum_{i=1}^k \frac{n_i^Z \cdot t_i \cdot Q^Z}{n}, \quad (3)$$

де Z – ознака рівня напруги та відповідної території ($Z_1 = 0,4$ кВ або $Z_3 = 6-20$ кВ для міських населених пунктів, $Z_2 = 0,4$ кВ або $Z_4 = 6-20$ кВ для сільських населених пунктів, Z_5 для мереж напругою 27,5-35 кВ, Z_6 для мереж напругою 110/154 кВ); n_i^Z – кількість точок комерційного обліку електроенергії, в яких було припинене електропостачання внаслідок i -ї перерви із Z -ю ознакою рівня напруги та відповідної території, шт.; Q^Z – середньомісячне споживання електроенергії попереднього року на одну точку комерційного обліку електроенергії із Z -ю ознакою рівня напруги та відповідної території, тис. кВт·год; T – звітний період часу (середньомісячний за рік), хв.

Динаміку щодо показників *SAIDI* (хв.) та *ENS* (тис. кВт·год) за період 2020-2024 років наведено на рис. 1, *SAIFI* – на рис. 2 [6]. У 2024 році індекс *SAIDI* становив: з вини компанії (внаслідок технологічних порушень у мережах компанії та запланованих перерв без попередження споживачів) – 502 хв.; внаслідок запланованих перерв з попередженням споживачів – 597 хв.; внаслідок форс-мажорних обставин та вини інших осіб – 29210 хв.

Слід зазначити, що для більш об'єктивної картини потрібно зважати на військовий стан, тимчасову окупацію частини територій України, активні воєнні дії та постійні ракетні обстріли цивільної та воєнної інфраструктури на всій території України, які суттєво вплинули як на господарську діяльність ліцензіатів і їх можливості надавати якісні послуги, так і зумовили складнощі у проведенні моніторингу показників якості електропостачання, а по багатьох показниках в низці областей та територій такий моніторинг став взагалі неможливим. Зокрема, це стосується Херсонської, Луганської, Донецької, Харківської та Запорізької областей. У зв'язку з цим наведено на рис. 1 та 2 дані за 2020-2024 роки

сформовано на основі наявних у НКРЕКП даних, наданих ліцензіатами в рамках звітування за відповідними реєстрами та формами звітності.

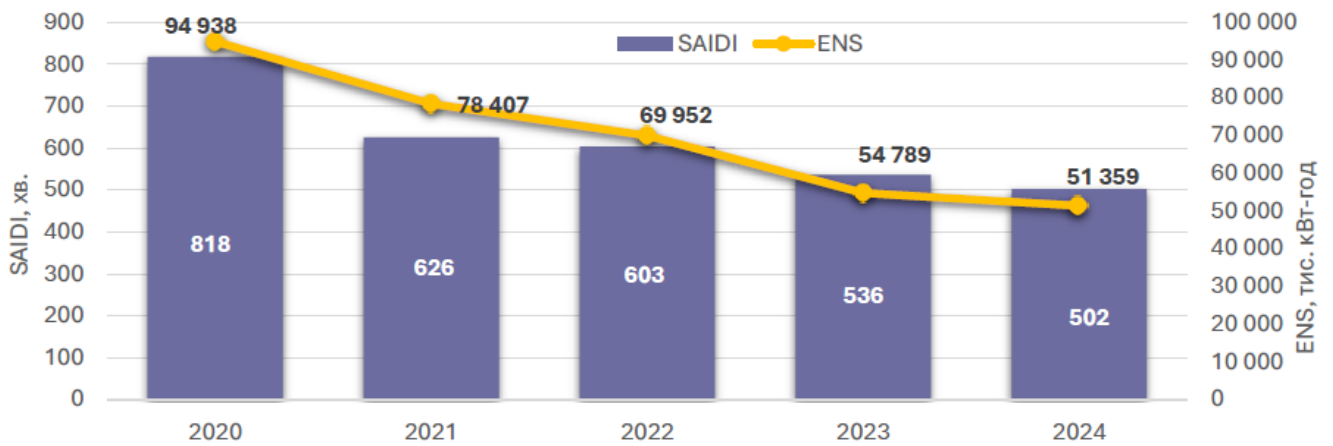


Рисунок 1 – Динаміка щодо показників SAIDI та ENS за період 2020-2024 років відповідно до відкритих даних взятих з звіту НКРЕКП

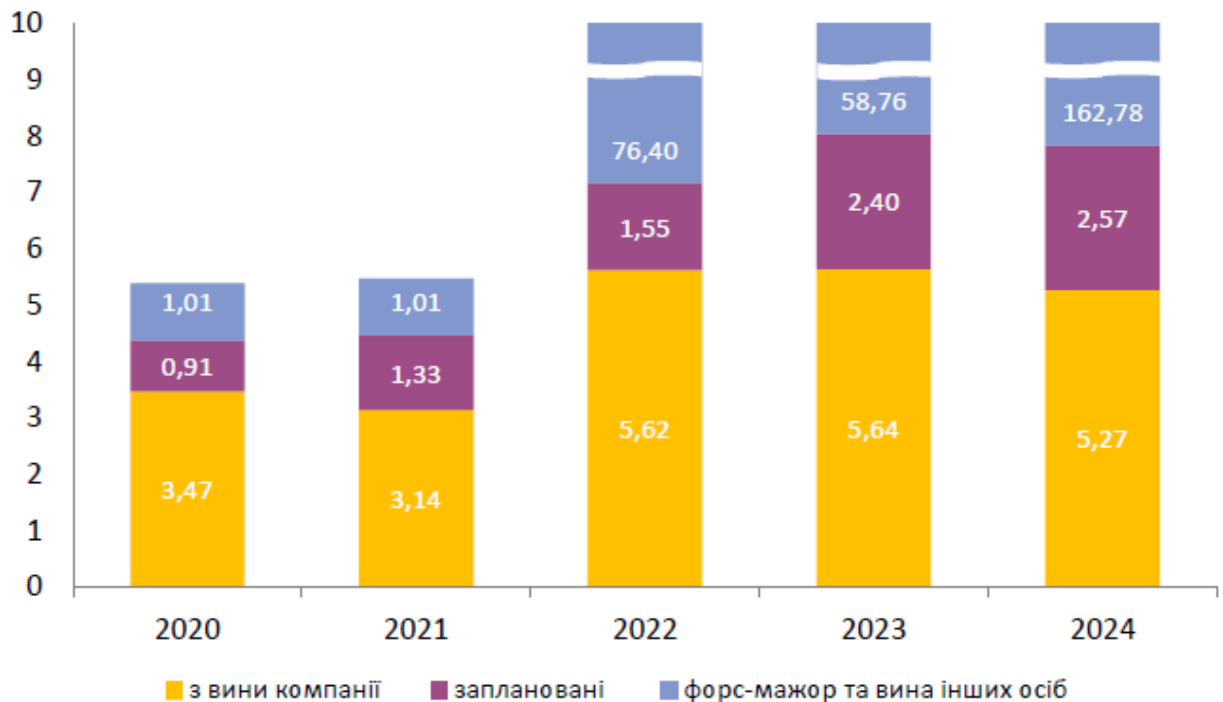


Рисунок 2 – Показники SAIFI за період 2020-2024 років відповідно до відкритих даних взятих з звіту НКРЕКП

В поданому аналізі за основні порушення роботи ПЛ напругою 6(10)–35 кВ в електромережах з ізольованим режимом нейтралі взяті чисельні впливи від природних явищ, зокрема падіння дерев під впливом потужного вітру, що призводять до появи однофазних замикань на землю (ОЗЗ) і як наслідок прояву

зовнішнього впливу природного характеру, що є однією з найважливіших причин технологічних порушень ПЛ напругою 6–35 кВ.

Типова градація причин природних впливів, що спричиняють ОЗЗ:

- ✓ прямі удари блискавки (у 50 % викликають коротке замикання);
- ✓ потужний вітер (у 30 % спричиняє коливання ліній і контакт з деревами);
- ✓ обмерзання (у 20 % може призвести до провисання та розривів);
- ✓ торкання тварин (біля 1–5 %, контакт з лініями викликає замикання).

Відповідно, рання діагностики ОЗЗ не втрачає своєї актуальності через масовість даного типу ушкоджень та варіативності причин його виникнення. Одночасно актуальною залишається проблема визначення безпосередньо відстані до місця ОЗЗ. У разі неможливості визначення місця ОЗЗ доцільним стає процес його локалізації шляхом відпаювання ділянки ПЛ з пошкодженням. Це дозволяє суттєво знизити витрати та матеріальні ресурси на пошук місця пошкодження [4, 5] та одночасне недоотримання електроенергії кінцевим споживачем [16]. В ряді літературних джерел подані різні підходи до вирішення проблеми визначення ОЗЗ на ПЛ напругою 6(10)–35 кВ [17–22], проте досі не знайдено єдиний ефективний й універсальний спосіб ідентифікації місця ОЗЗ. Відсутність єдиного способу ідентифікації ОЗЗ та широка різноманітність і варіативність параметрів як режим нейтралі, й аварійних режимів електромереж напругою 6(10)–35 кВ у разі виникнення ОЗЗ, накладає певні труднощі при виборі єдиного параметра як критерію для ідентифікації факту й місця ОЗЗ.

На ПЛ напругою 6–35 кВ з ізольованим режимом нейтралі значення струмів ОЗЗ істотно менші за значення струмів навантаження, що є першим ускладнюючим фактором для визначення місця пошкодження. Другий фактор – це значний діапазон добової зміни навантаження в районних електромережах напругою 6(10)–35 кВ. Наслідком цього фактора в ряді випадків виявляється перевищення значень струму ОЗЗ над значеннями струмів навантаження. Особливо часто це проявляється в години нічного мінімуму навантаження.

Значення струмів ОЗЗ значною мірою залежать від сумарної протяжності ПЛ для районних електромереж з ізольованим режимом нейтралі і знаходяться в

діапазоні від 1 до 5 А [4, 5], які є меншими за значення робочих струмів, але можуть бути зіставними в години нічного мінімуму навантаження. Також відзначимо відмінність процесів протікання ОЗЗ в мережах з ізолюваним та заземленим режимами нейтралі. Рис. 3, *а* ілюструє осцилограму струму ОЗЗ без резистора в нейтралі [11]. Відповідно, на рис. 3, *б* зображена осцилограма струму ОЗЗ із резистором в нейтралі [11]. Принципових відмінностей розвитку ОЗЗ за різних умов режиму нейтралі (рис. 2, *а* та *б*) немає. Відтак виникає необхідність пошуку єдиної універсальної діагностичної ознаки ОЗЗ.

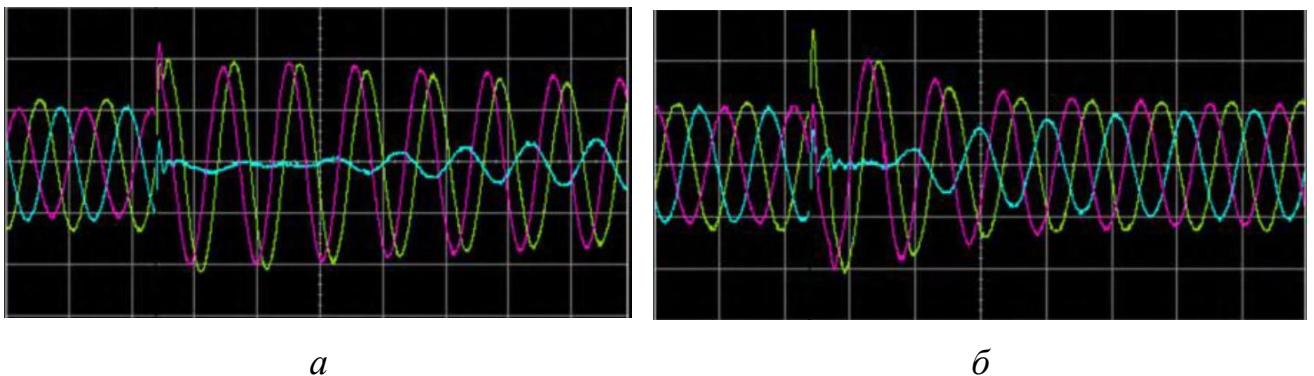


Рисунок 3 – Осцилограми в режимі миттєва «земля»:
а – без резистора в нейтралі; *б* – без резистора в нейтралі

Дослідженням різних видів ОЗЗ, і захистів від цього виду пошкоджень присвячено значну кількість робіт [4-5, 16-22]. З аналізу наукових підходів [16-22] з оцінки відомих методів визначення ОЗЗ сформувані наступну можливу класифікацію найбільш часто виникаючих видів замикань:

- ✓ короточасні ОЗЗ через самоусувні пошкодження ізоляції;
- ✓ металеві ОЗЗ з малим опором в місці замикання;
- ✓ дугові ОЗЗ;
- ✓ ОЗЗ з великим перехідним опором в місці замикання.

Аналіз проведених досліджень довів, що ОЗЗ починаються у ряді випадків із одноразових короточасних ушкоджень ізоляції. Час перерви між одноразовими короточасними ОЗЗ може становити до десяти діб і більше [17–22]. Одноразові короточасні ОЗЗ є одним із найбільш складно діагностованих видів ОЗЗ внаслідок відсутності будь-яких часових закономірностей їх появи.

Металеві ОЗЗ із малим опором у місці замикання є одним з найбільш легко діагностованих видів ОЗЗ внаслідок малого значення опору у місці ОЗЗ. Відомий типовий захист від ОЗЗ на підстанціях у переважній більшості випадків виявляє цей вид ОЗЗ. Багато відомих розрахункових методик дозволяють визначати його, наприклад, типовою методикою визначення ОЗЗ може бути спосіб [18].

Небезпека короточасних замикань полягає в тому, що частина їх перетворюється на міжфазні замикання. ОЗЗ з великим перехідним опором у місці замикання становлять найскладніший випадок виявлення пошкодження, що зазначається в [4–5, 17–22]. Подібний вид ОЗЗ виникає при падінні дроту на сухий або мерзлий ґрунт із високим значенням опору розтіканню струму. Основна проблем ідентифікації ОЗЗ з великим перехідним опором у місці замикання полягає у високих значеннях цього опору, близько 5–7 кОм, і, як наслідок, малих значеннях струмів ОЗЗ, що досить складно визначаються штатним релейним захистом, встановленим на підстанції. У випадку ОЗЗ з великим перехідним опором у місці замикання струм замикання носить ємнісний характер, що може виступати як діагностична ознака через наявності резонансних властивостей ПЛ, описаних різними джерелами, наприклад, [17–22].

Дугові ОЗЗ, так само, як і ОЗЗ з великим перехідним опором в місці замикання, належать до виду пошкоджень в електромережі, що часто спостерігаються [4–5, 17–22]. Даний вид замикання характерний при пробі ізоляції ПЛ. Проблема виявлення цього виду замикань ускладнена через нестабільний режим горіння дуги і, як наслідок, нестабільність значення опору дугового розряду, що, у свою чергу, є перешкодою для спрацювання штатного релейного захисту на підстанції.

Висновки.

✓ Здійснено порівняльний аналіз причин високої аварійності повітряних ліній електропередачі в об'єднаній енергосистемі України за наявності аналогічних проблем на світовому рівні, коли основними чинниками пошкоджень повітряних ліній середньої напруги були або зношене обладнання, або технологічні порушення від впливу природних явищ, або їх спільна дія.

✓ З'ясовано, що тривалі перерви в електропостачанні, регламентовані Законом України «Про ринок електричної енергії», який регулює правові та економічні відносини, пов'язані з виробництвом, передачею, розподілом, купівлею-продажем електроенергії задля забезпечення надійного та безпечного її постачання споживачам, розвитку ринкових відносин, а також мінімізації витрат та негативного впливу на довкілля, призводять до значних економічних збитків у споживачів, а тому мають велику соціально-економічну значимість.

✓ Статистичні дані, отримані з літературних джерел підтвердили, що від надійного та ефективного функціонування повітряних ліній суттєво залежить надійність електропостачання споживачів електроенергії в цілому.

✓ Доведено, що обрив повітряних ліній напругою 6(10)–35 кВ через чисельні природні явища, особливо при ізольованому режимі нейтралі, спричиняє однофазні замикання на землю, які мають вкрай негативний вплив на довкілля і вкрай небезпечні для людей і тварин, що опинились поруч.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Про ринок електричної енергії : Закон України від 13 квітня 2017 року № 2019-VIII (поточна редакція від 01 січня 2026 р.). *Відомості Верховної Ради*, 2017, № 27–28, ст. 312.

2. Про затвердження Правил взаємовідносин між Державним підприємством «Національна енергетична компанія «Укренерго» та суб'єктами (об'єктами) електроенергетики в умовах паралельної роботи в складі Об'єднаної енергетичної системи України : Наказ М-ва палива та енергетики України від 02 червня 2008 р. № 303 : поточна редакція від 29 листопада 2016 р. Зареєстровано Міністерством юстиції України 23 липня 2008 р. № 673/15364. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0673-08#Text> (дата звернення 09.01.2026).

3. Правила улаштування електроустановок : видання офіційне / Міненерговугілля України. Харків : Видавництво «Форт», 2017. 760 с.

4. Аналіз причин неселективної дії захисту електромереж середньої напруги при однофазних замиканнях на землю / Ю. О. Семененко, О. Г. Серета, О. Г. Серета, О. Д. Семененко. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*, 2025. № 9 (212). С. 17–27. DOI: 10.20998/2313-8890.2025.09.02.

5. Серета О. Г. Теоретичні основи розвитку цифрових технологій в системах автоматизації, діагностики, контролю та захисту електротехнічних комплексів : дис. ... д-ра техн. наук : 05.09.03 / Націон. техн. ун-т «ХПІ». Харків, 2021. 320 с.

6. Звіт з якості надання послуг ліцензіатами у сферах електропостачання і централізованого водопостачання та водовідведення за 2024 рік. Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, 2024. URL: https://www.nerc.gov.ua/storage/app/sites/1/Docs/Monitoring/Zvit_yakist_poslulh/Zvit_yakist_poslulh_2024.pdf (дата звернення 10.01.2026).

7. Кодекс систем розподілу : затверджений постановою Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг від 14 березня 2018 р. № 310 : поточна редакція від 02 січня 2026 р.

8. Про Національну комісію, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг : Закон України від 22 вересня 2016 р. № 1540-VIII (поточна редакція від 28 серпня 2025 р.). *Відомості Верховної Ради*, 2016. № 51. С. 833.
9. СОУ-Н ЕЕ 35.514:2007. Технічне обслуговування мікропроцесорних пристроїв, релейного захисту, протиаварійної автоматики, електроавтоматики, дистанційного керування та сигналізації від 0,4 кВ до 750 кВ. Правила : видання офіційне / Мінпаливенерго України. Київ. 2008. 85 с.
10. Підвищення чутливості максимального струмового захисту до струмів віддалених коротких замикань / О. Г. Серета, О. С. Кобозев. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, 2013. № 09 (85). С. 57–64.
11. Sereda Oleksandr G. Identification of starting currents of induction motors in a branched power network and its protection from remote short circuit. *Acta Technica*, 2014. Vol. 59, № 2. С. 135–147.
12. Improving the protective properties of electrical equipment in low-voltage cabinets of complete transformer substations auxiliaries NPP / O. G. Sereda, L. B. Zhorniak, O. G. Sereda. *Electrical Engineering and Power Engineering*, 2025. No 2. P. 37–48. URL: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2025-2-4>.
13. Improvement of Fuses to Increase the Efficiency of Medium Voltage Instrument Transformers Protection / O. M. Grechko, Y. I. Baida, O. H. Sereda, O. H. Sereda, M. H. Pantelyat, S. I. Dryvetskyi. *IEEE 6th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine*, 2025. P. 1–4, doi: 10.1109/KhPIWeek61436.2025.11288696.
14. Вплив розосередженого генерування на надійність роботи електричних мереж / В. О. Комар, І. О. Котилко, С. В. Кравчук, П. Д. Лежнюк : збірник наукових праць ІІ Всеукраїнської науково-технічної конференції «Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (ЕЕЕС-2018)». Харків : «Друкарня Мадрид», 2018. 102 с.
15. Особливості комбінованих енергосистем з відновлюваними джерелами енергії : монографія / М. П. Кузнецов. Київ : ІВЕ, 2024. 152 с. ISBN 978-617-8268-20-6.
16. Спосіб захисту однофазних споживачів електроенергії від перенапруг, що викликані обривом нейтрального провідника : пат. 122365 Україна : МПК (2020.01) H02H 3/08 (2006.01), H02H 7/00, H01H 73/00, H02H 7/26 (2006.01). № а 2018 12180 ; заявл. 10.12.2018 ; опубл. 26.10.2020, Бюл. № 20.
17. A.R. Sultan, M.W. bin Mustafa, M. Saini, A. Gaffar. Single line to ground-fault detection for unit generator-transformer based on wavelet transform and neural networks. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2018. № 12. С. 28–32. DOI:10.15199/48.2018.12.07.
18. Wenquan Shao, Jie Bai, Yuan Cheng, Zhihua Zhang and Ning Li. Research on a Faulty Line Selection Method Based on the Zero-Sequence Disturbance Power of Resonant Grounded Distribution Networks. *Energies*, 2019. 12(5). 846. URL: <https://doi.org/10.3390/en12050846>.
19. Jie Li, Gang Wang, Dehui Zeng, Haifeng Li. High-impedance ground faulted line-section location method for a resonant grounding system based on the zero-sequence current's declining periodic component. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020. Vol. 19. 105910.
20. G. Li, W. Liu, T. Joseph, J. Liang, Z. Song. Double-Thyristor-Based Protection for Valve-Side Single-Phase-to-Ground Faults in HB-MMC-Based Bipolar HVDC Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020. Vol. 67, no. 7. P. 5810–5815. DOI: 10.1109/TIE.2019.2931502.
21. Kangli Liu, Sen Zhang, Baorun Li, Chi Zhang, Biyang Liu, Hao Jin and Jianfeng Zhao. Faulty Feeder Identification Based on Data Analysis and Similarity Comparison for Flexible Grounding System in Electric Distribution Networks. *Sensors*, 2021. 21 (1). 154. URL: <https://doi.org/10.3390/s21010154>.
22. Jia-Min Li, Shu-Chuan Chu, Xiang Shao, Jeng-Shyang Pan. A single-phase-to-ground fault location method based on convolutional deep belief network. *Electric Power Systems Research*, 2022. Vol. 209. URL: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108044>.

REFERENCES:

1. Pro rynek elektrychnoi enerhii : Zakon Ukrainy vid 13 kvitnia 2017 roku № 2019-VIII (potochna redaktsiia vid 01 sichnia 2026 r.). Vidomosti Verkhovnoi Rady, 2017. № 27–28, st. 312.
2. Pro zatverdzhennia Pravyl vzaiemovidnosyn mizh Derzhavnym pidpriemstvom «Natsionalna enerhetychna kompaniia «Ukrenerho» ta subiektamy (obiektamy) elektroenerhetyky v umovakh paralelnoi roboty v skladi Obiednanoi enerhetychnoi systemy Ukrainy : Nakaz M-va palyva ta enerhetyky Ukrainy vid 02 chervnia 2008 r. № 303 : potochna redaktsiia vid 29 lystopada 2016 r. Zareieistr. M-vom yustytsii Ukrainy 23 lypnia 2008 r. № 673/15364. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0673-08#Text> (дата звернення 09.01.2026).
3. Pravyla ulashtuvannia elektroustanovok : vydannia ofitsiine / Minenerhovuhillia Ukrainy. Kharkiv : Vydavnytstvo «Fort», 2017. 760 s.
4. Analiz prychnyn neselektyvnoi dii zakhystu elektromerezh serednoi napruhy pry odnofaznykh zamykanniakh na zemliu / Yu. O. Semenenko, O. H. Sereda, O. H. Sereda, O. D. Semenenko. *Enerhozberezhennia. Enerhetyka. Enerhoaudyt*, 2025. № 9 (212). С. 17–27. DOI: 10.20998/2313-8890.2025.09.02.
5. Sereda O. H. Teoretychni osnovy rozvytku tsyfrovyykh tekhnolohii v systemakh avtomatyzatsii, diahnostyky, kontroliu ta zakhystu elektrotekhnichnykh kompleksiv : dys. ... d-ra tekhn. nauk : 05.09.03 / Natsion. tekhn. un-t «KhPI». Kharkiv, 2021. 320 с.
6. Zvit z yakosti nadannia posluh litsenziatamy u sferakh elektropostachannia i tsentralizovanoho vodopostachannia ta vodovidvedennia za 2024 rik. Natsionalnoi komisii, shcho zdiisniue derzhavne rehuliuвання u sferakh enerhetyky ta komunalnykh posluh. 2024. URL: https://www.nerc.gov.ua/storage/app/sites/1/Docs/Monitoring/Zvit_yakist_posluh/Zvit_yakist_posluh_2024.pdf (дата звернення 10.01.2026).
7. Kodeks system rozpodilu : zatverdzhenyi postanovoioi Natsionalnoi komisii, shcho zdiisniue derzhavne rehuliuвання u sferakh enerhetyky ta komunalnykh posluh vid 14 bereznia 2018 r. № 310 : potochna redaktsiia vid 02 sichnia 2026 r.
8. Pro Natsionalnu komisiuu, shcho zdiisniue derzhavne rehuliuвання u sferakh enerhetyky ta komunalnykh posluh : Zakon Ukrainy vid 22 veresnia 2016 r. № 1540-VIII (potochna redaktsiia vid 28 serpnia 2025 r.). *Vidomosti Verkhovnoi Rady*, 2016. № 51. S. 833.
9. SOU-N EE 35.514:2007. Tekhnichne obsluhovuvannia mikroprotsektornykh prystroiv, releinoho zakhystu, protyavariinoi avtomatyky, elektroavtomatyky, dystantsiinoho keruvannia ta syh-nalizatsii vid 0,4 kV do 750 kV. Pravyla : vydannia ofitsiine / Minpalyvenerho Ukrainy. Kyiv, 2008. 85 s.
10. Pidvyshchennia chutlyvosti maksymalnoho strumovoho zakhystu do strumiv viddalenykh korotkykh zamykan / O. H. Sereda, O. S. Koboziev. *Elektrotekhnichni ta kompiuterni systemy*, 2013. № 09 (85). S. 57–64.
11. Sereda Oleksandr G. Identification of starting currents of induction motors in a branched power network and its protection from remote short circuit. *Acta Technica*. 2014. Vol. 59, № 2. С. 135-147.
12. Improving the protective properties of electrical equipment in low-voltage cabinets of complete transformer substations auxiliaries NPP / O. G. Sereda, L. B. Zhorniak, O. G. Sereda. *Electrical Engineering and Power Engineering*, 2025. No 2. P. 37–48. URL: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2025-2-4>.
13. Improvement of Fuses to Increase the Efficiency of Medium Voltage Instrument Transformers Protection / O. M. Grechko, Y. I. Baida, O. H. Sereda, O. H. Sereda, M. H. Pantelyat, S. I. Dryvetskyi. *IEEE 6th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 2025*. P. 1–4, doi: 10.1109/KhPIWeek61436.2025.11288696.
14. Vplyv rozoseredzhenoho heneruvannia na nadiinist roboty elektrychnykh merezh / V. O. Komar, I. O. Kotylo, S. V. Kravchuk, P. D. Lezhniuk : zbirnyk naukovykh prats II Vseukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Enerhoefektyvnist ta enerhetychna bezpeka elektroenerhetychnykh system (EEES-2018)». Kharkiv : «Drukarnia Madryd», 2018. 102 s.
15. Osoblyvosti kombinovanykh enerhosystem z vidnovliuvanymy dzherelamy enerhii : monohrafiia / M. P. Kuznietsov. Kyiv : IBE, 2024. 152 s. ISBN 978-617-8268-20-6.

16. Sposib zakhystu odnofaznykh spozhyvachiv elektroenerhii vid perenapruh, shcho vyklykani obryvom neitralnoho providnyka : pat. 122365 Ukraina : МПК (2020.01) N02N 3/08 (2006.01), N02N 7/00, N01N 73/00, N02N 7/26 (2006.01). № а 2018 12180 ; zaiavl. 10.12.2018 ; opubl. 26.10.2020, Biul. № 20.

17. A.R. Sultan, M.W. bin Mustafa, M. Saini, A. Gaffar. Single line to ground-fault detection for unit generator-transformer based on wavelet transform and neural networks. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2018. № 12. С. 28–32. DOI:10.15199/48.2018.12.07.

18. Wenquan Shao, Jie Bai, Yuan Cheng, Zhihua Zhang and Ning Li. Research on a Faulty Line Selection Method Based on the Zero-Sequence Disturbance Power of Resonant Grounded Distribution Networks. *Energies*, 2019. 12(5). 846. URL: <https://doi.org/10.3390/en12050846>.

19. Jie Li, Gang Wang, Dehui Zeng, Haifeng Li. High-impedance ground faulted line-section location method for a resonant grounding system based on the zero-sequence current's declining periodic component. *International Journal of Electrical Power & Energy System*, 2020. Vol. 19. 105910.

20. G. Li, W. Liu, T. Joseph, J. Liang, Z. Song. Double-Thyristor-Based Protection for Valve-Side Single-Phase-to-Ground Faults in HB-MMC-Based Bipolar HVDC Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020. Vol. 67, no. 7. P. 5810–5815. DOI: 10.1109/TIE.2019.2931502.

21. Kangli Liu, Sen Zhang, Baorun Li, Chi Zhang, Biyang Liu, Hao Jin and Jianfeng Zhao. Faulty Feeder Identification Based on Data Analysis and Similarity Comparison for Flexible Grounding System in Electric Distribution Networks. *Sensors*, 2021. 21 (1). 154. URL: <https://doi.org/10.3390/s21010154>.

22. Jia-Min Li, Shu-Chuan Chu, Xiang Shao, Jeng-Shyang Pan. A single-phase-to-ground fault location method based on convolutional deep belief network. *Electric Power Systems Research*, 2022. Vol. 209. URL: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108044>.

Стаття надійшла до редакції: 18.10.2025; рецензування: 28.10.2025;

прийнята до публікації 02.11.2025. Автори прочитали и дали згоду рукопису.

The article was submitted on 18.10.2025; revised on 28.10.2025; and accepted for publication on 02.11.2025. The authors read and approved the final version of the manuscript.