

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра енергетики та електротехнічних систем

До захисту
Допускається
В.о. завідувача кафедри

Олександр ЮРЧЕНКО

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за магістерським рівнем вищої освіти

На тему: «Дослідження ефективності використання систем посилення ізоляції для підвищення надійності роботи електричних мереж напругою 10 кВ»

Виконав

(підпис)

Ірина МІРОШНИЧЕНКО

Група

ЗЕТЕ 2401м

Науковий керівник:

(підпис)

Олександр САВОЙСЬКИЙ

Рецензент:

(підпис)

Олена ДОВЖИК

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерно-технологічний

Кафедра енергетики та електротехнічних систем

Ступінь вищої освіти «Магістр»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

енергетики та електротехнічних систем

Андрій ЧЕПІЖНИЙ

«5» вересня 2024 року

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу

Ірині МІРОШНИЧЕНКО

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Дослідження ефективності використання систем посилення ізоляції для підвищення надійності роботи електричних мереж напругою 10 кВ»

2. Керівник кваліфікаційної роботи: Савойський Олександр Юрійович, к.т.н., доцент

3. Строк подання здобувачем роботи: «14» листопада 2025 року.

4. Вихідні дані до роботи: Річні звіти базового підприємства, нормативно-технічна документація, наукові та літературні джерела, методичні рекомендації до виконання роботи.

5. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ; 1. Аналіз надійності електричних мереж та шляхів її підвищення; 2. Дослідження надійності роботи повітряних ліній 10 кВ на основі статистики аварійних відключень; 3. Підвищення надійності електропостачання шляхом використання систем посилення ізоляції; 4. Охорона праці; 5. Економічне обґрунтування; Висновки та пропозиції; Список використаної літератури; Додатки.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Презентація

Керівник роботи:

(підпис)

Олександр САВОЙСЬКИЙ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Завдання прийняла до виконання

(підпис)

Ірина МІРОШНИЧЕНКО

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Дата отримання завдання «5» вересня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів	Примітка
1.	Збір інформації про діяльність господарства	до 02.08.2025 р.	
2.	Аналіз літературних джерел з обраної тематики	до 16.08.2025 р.	
3.	Складання плану роботи	до 21.08.2025 р.	
4.	Написання вступу	до 24.08.2025 р.	
5.	Підготовка розділу «Розділ 1. . Аналіз надійності електричних мереж та шляхів її підвищення»	до 30.08.2025р.	
6.	Підготовка розділу «Розділ 2. Дослідження надійності роботи повітряних ліній 10 кВ на основі статистики аварійних відключень»	до 19.09.2025 р.	
7.	Підготовка розділу «Розділ 3. Підвищення надійності електропостачання шляхом використання систем посилення ізоляції»	до 03.10.2025 р.	
8.	Підготовка розділу «Розділ 4. Охорона праці»	до 08.10.2025 р.	
9.	Підготовка розділу «Розділ 5. Економічне обґрунтування»	до 20.10.2025 р.	
10.	Написання висновків та пропозицій	до 25.10.2025 р.	
11.	Подання роботи на перевірку унікальності до експертної ради факультету	до 01.11.2025 р.	
12.	Подання роботи на рецензування	до 07.11.2025 р.	
13.	Подання до попереднього захисту	до 14.11.2025 р.	

Керівник роботи:

_____ (підпис)

Олександр САВОЙСЬКИЙ
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Здобувач

_____ (підпис)

Ірина МІРОШНИЧЕНКО
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

Мірошниченко Ірина Анатоліївна. Дослідження ефективності використання систем посилення ізоляції для підвищення надійності роботи електричних мереж напругою 10 кВ.

Кваліфікаційна робота на здобуття магістра за освітньою програмою «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Сумський національний аграрний університет, Суми, 2025.

Магістерська робота присвячена дослідженню ефективності використання систем посилення ізоляції з метою підвищення надійності роботи електричних мереж напругою 10 кВ. Актуальність теми обумовлена зростанням частоти пошкоджень ізоляції повітряних ліній електропередачі під дією кліматичних факторів, забруднення навколишнього середовища, а також збільшенням кількості відключень через вплив птахів і тварин. Надійність системи електропостачання є ключовою умовою безперебійного енергозабезпечення споживачів і безпечної експлуатації електрообладнання.

Метою роботи є підвищення надійності електричних мереж 10 кВ шляхом упровадження сучасних систем посилення ізоляції та оцінювання їх техніко-економічної ефективності. У процесі виконання дослідження використано методи статистичного аналізу відмов, моделювання показників надійності, експертної оцінки технічного стану обладнання, а також економічного порівняння варіантів модернізації.

Об'єктом дослідження є система електропостачання філії «Лебединський РЕМ» АТ «Сумиобленерго», що включає дванадцять підстанцій класів напруги 35–110/10 кВ. Предметом дослідження виступають процеси зміни показників надійності повітряних ліній 10 кВ під впливом зовнішніх факторів та після встановлення систем посилення ізоляції.

У роботі проаналізовано аварійні відключення за 2020–2024 роки, визначено їхні основні причини та динаміку. Встановлено, що понад 40 % відмов пов'язано з пошкодженнями елементів ліній, 13–20 % – із погодними умовами, 4–8 % – із пробоем або перекриттям ізоляції. Середній потік відмов становив 0,26 відмов/(км·рік), а середній час відновлення – 1,4 год/відмову.

Для підвищення надійності запропоновано застосування системи посилення ізоляції компанії Raychem (TE Connectivity), яка включає 25 типів елементів: ізолюючі профілі, термоусаджувані трубки, високовольтні спідниці, ізолюючі кожухи тощо. Очікуваний ефект від упровадження – зменшення кількості відключень на 30–35 %, скорочення тривалості простоїв на 25–30 %, зниження недовідпуску електроенергії на 40 %.

Економічне обґрунтування показало, що для однієї повітряної лінії 10 кВ із 66 опорами капітальні витрати становлять 96,6 тис. грн, а річний економічний ефект – 19–56 тис. грн залежно від прийнятого методу оцінки. Термін окупності інвестицій складає 1,7–5,1 року, що свідчить про високу ефективність запропонованих рішень.

Результати роботи можуть бути використані енергетичними підприємствами при плануванні модернізації та реконструкції повітряних ліній 6–35 кВ, розробці програм з підвищення надійності електропостачання та формуванні інвестиційних планів енергокомпаній.

Ключові слова: надійність електропостачання, повітряна лінія 10 кВ, ізоляція, система посилення ізоляції, пробій, перекриття, недовідпуск електроенергії, економічна ефективність, Raychem, АТ «Сумиобленерго».

ABSTRACT

Miroshnychenko Iryna Anatoliivna. Research on the Efficiency of Using Insulation Reinforcement Systems to Improve the Reliability of 10 kV Electrical Networks.

Qualification work for a master's degree in the educational programme “Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics” in the speciality 141 “Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics”. Sumy National Agrarian University, Sumy, 2025.

The master’s thesis is devoted to the study of the effectiveness of insulation reinforcement systems aimed at improving the reliability of 10 kV electrical distribution networks. The relevance of the topic is determined by the increasing frequency of insulation failures of overhead power lines caused by climatic factors, environmental pollution, and bird or animal interference. The reliability of the power supply system is a key condition for uninterrupted energy delivery to consumers and the safe operation of electrical equipment.

The purpose of the research is to enhance the reliability of 10 kV electrical networks by implementing modern insulation reinforcement systems and assessing their technical and economic efficiency. The research employs methods of statistical analysis of failures, reliability modeling, expert assessment of equipment condition, and economic comparison of modernization options.

The object of the study is the power supply system of the Lebedyn District Power Network (REM) of JSC “Sumyoblenergo”, which includes twelve substations with voltage classes of 35–110/10 kV. The subject of the study is the change in reliability indicators of 10 kV overhead lines under the influence of external factors and after the installation of insulation reinforcement systems.

The analysis of emergency outages for 2020–2024 determined their main causes and trends. It was found that over 40% of failures were related to network component damage, 13–20% to adverse weather conditions, and 4–8% to insulation breakdowns

or flashovers. The average failure rate was 0.26 failures/(km·year), and the mean time to repair one failure was 1.4 hours.

To improve reliability, the implementation of the Raychem (TE Connectivity) insulation reinforcement system was proposed. The system includes 25 types of components such as insulating profiles, heat-shrinkable tubes, high-voltage skirts, and insulating bushings. The expected results of implementation are a 30–35% reduction in the number of outages, a 25–30% reduction in outage duration, and a 40% decrease in unserved energy.

The economic assessment showed that for one 10 kV overhead line with 66 poles, the capital investment is approximately 96.6 thousand UAH, while the annual economic benefit ranges between 19 and 56 thousand UAH, depending on the valuation approach. The payback period is estimated at 1.7–5.1 years, confirming the technical and financial feasibility of the proposed solutions.

The results of the study can be applied by energy companies in planning the modernization and reconstruction of 6–35 kV overhead lines, developing reliability improvement programs, and forming investment strategies for distribution system operators.

Keywords: power supply reliability, 10 kV overhead line, insulation, insulation reinforcement system, breakdown, flashover, unserved energy, economic efficiency, Raychem, JSC “Sumyoblenergo”.

ЗМІСТ

ВСТУП	10
1. АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ТА ШЛЯХІВ ЇЇ ПІДВИЩЕННЯ	13
1.1. Поняття та показники надійності систем електропостачання	13
1.2. Нормативна база щодо забезпечення надійності електропостачання ...	14
1.3. Основні причини зниження надійності в мережах 10 кВ	16
1.4. Технічні напрями підвищення надійності електропостачання.....	19
1.5. Висновки до розділу 1	21
2. ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ 10 КВ НА ОСНОВІ СТАТИСТИКИ АВАРІЙНИХ ВІДКЛЮЧЕНЬ	23
2.1. Характеристика об'єкту дослідження	23
2.2. Аналіз аварійних відключень за 2020 рік	24
2.3. Аналіз аварійних відключень за 2021 рік	28
2.4. Аналіз аварійних відключень за 2022 рік	31
2.5. Аналіз аварійних відключень за 2023 рік	34
2.6. Аналіз аварійних відключень за 2024 рік	38
2.7. Вплив на аварійність ліній 10 кВ перекриттів ізоляції, несприятливих погодних умов та впливу птахів.....	41
2.8. Розрахунок показників надійності	43
2.8.1. Визначення потоку відмов.....	45
2.8.2. Розрахунок середнього часу відновлення системи	47
2.9. Висновки до розділу 2.....	48
3. ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ ПОСИЛЕННЯ ІЗОЛЯЦІЇ	50
3.1. Аналіз існуючих технічних рішень для посилення ізоляції в мережах 10 кВ.....	50
3.2. Вибір системи посилення ізоляції для мереж 10 кВ	52
3.2.1. Ізолюючий профіль для неізольованих проводів OLIC	52
3.2.2. Термоусаджувана трубка для неізольованих ліній OLIT.....	53

3.2.3. Високовольтний розширювач шляху поверхневого розряду HVSE	54
3.2.4. Захисний екран від пташиного посліду RRGs	55
3.2.5. Ізолюючий корпус для з'єднувачів на бушингах BCIC	56
3.3. Очікувані результати впровадження системи посилення ізоляції.....	57
3.4. Висновки до розділу 3.....	59
4. ОХОРОНА ПРАЦІ	60
5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ.....	64
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ	68
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	70
ДОДАТКИ	73

ВСТУП

1. Актуальність теми. У сучасних умовах стрімкого розвитку електроенергетичної галузі та підвищених вимог до безперебійного електропостачання виникає гостра потреба в забезпеченні високої надійності мереж середньої напруги, зокрема напругою 10 кВ. Разом із тим, сучасні дослідження підкреслюють, що ключовим чинником підвищення якісного рівня електропостачання є не тільки модернізація обладнання, але й технічні рішення, спрямовані на підвищення ізоляційної стійкості повітряних ліній – наприклад, захисні системи ізоляції, покриття, ізоляторні конструкції, заходи з мінімізації колоній птахів та інших сторонніх впливів. У відповідній літературі наголошено, що підвищення інвестиційної ефективності мереж через покращення показників SAIDI, SAIFI та ENS має пряму кореляцію з технічними заходами з підвищення надійності [1-3].

У зв'язку з вищенаведеним дослідження ефективності використання систем посилення ізоляції для підвищення надійності роботи електричних мереж напругою 10 кВ є надзвичайно актуальним як з теоретичної точки зору, так і з практичної – з огляду на потреби енергопостачальних компаній, операторів мереж і споживачів, для покращення показників безперебійності постачання, зменшення економічних втрат та підвищення конкурентоспроможності системи електропостачання.

2. Аналіз стану наукової розробки проблеми. Питання підвищення надійності електричних мереж, зокрема повітряних ліній напругою 10 кВ, є одним із ключових напрямів сучасних наукових досліджень у галузі електроенергетики. Відомо, що більшість пошкоджень у розподільчих мережах середньої напруги зумовлені зовнішніми факторами – атмосферними перенапругами, дією птахів, обмерзанням, механічними впливами та деградацією ізоляції під дією ультрафіолету й вологи [4].

Сучасні дослідження приділяють значну увагу моделюванню процесів відмов та оцінюванню надійності повітряних розподільчих ліній. Зокрема, у

роботі [5] запропоновано інструмент планування для кількісного оцінювання надійності гібридних розподільчих мереж змінного та постійного струму. Автори доводять, що врахування топології мережі, кліматичних умов та технічного стану обладнання дозволяє істотно підвищити точність прогнозування відмов і раціонально розподіляти інвестиції у модернізацію мереж.

Водночас у публікаціях останніх років наголошується на ролі інноваційних матеріалів в ізоляційних системах. Так в роботі [6] систематизовано відкриті виклики для матеріалознавства у сфері високовольтної ізоляції, підкресливши значення нанокompозитів і гідрофобних покриттів для забезпечення стійкості до вологи, ультрафіолету та електричних розрядів. Подібний підхід підтримують і дослідники в [7], які дослідили вплив внутрішніх провідних дефектів на електричні характеристики композитних ізоляторів і довели, що удосконалення конструкції та вибір оптимального складу матеріалу істотно зменшують ймовірність термічних пробоїв та перекриттів. Особливої уваги заслуговують результати досліджень [8], які аналізують типові пошкодження стрижнів композитних довгих ізоляторів ліній електропередачі та пропонують конструктивні захисні заходи. Робота показує, що впровадження систем посилення ізоляції, зокрема у вигляді захисних ковпаків, екранів та гідрофобних покриттів, дає можливість підвищити опір ізолятора діелектричному пробую й знизити ймовірність виникнення аварій у несприятливих кліматичних умовах.

Таким чином, огляд літератури свідчить про активний розвиток досліджень у напрямі підвищення надійності розподільчих електричних мереж. Проте залишається недостатньо вивченим питання практичної ефективності впровадження систем посилення ізоляції саме для мереж напругою 10 кВ у кліматичних умовах України, що обумовлює наукову новизну та актуальність подальших досліджень у цій сфері.

3. Мета дослідження. Метою роботи є підвищення надійності електропостачання споживачів у мережах напругою 10 кВ шляхом

дослідження ефективності використання систем посилення ізоляції повітряних ліній.

4. Об'єкт дослідження – система електропостачання споживачів середньої напруги 10 кВ.

5. Предмет дослідження – вплив стану та удосконалення ізоляційних систем повітряних ліній 10 кВ на показники надійності електропостачання.

6. Завдання дослідження. Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі завдання:

– виконати аналіз показників надійності електричних мереж, нормативної документації та шляхів підвищення надійності електропостачання;

– провести аналіз надійності електропостачання на основі статистики аварійних відключень у мережах 10 кВ за 2020–2024 рр.;

– розробити та обґрунтувати технічні рішення щодо підвищення надійності електропостачання шляхом використання систем посилення ізоляції;

– розробити заходи з охорони праці під час експлуатації, технічного обслуговування та впровадження систем посилення ізоляції в електричних мережах 10 кВ відповідно до чинних нормативів;

– провести економічне обґрунтування ефективності впровадження систем посилення ізоляції.

7. Методи дослідження. У роботі використано аналітичні, статистичні, розрахунково-аналітичні та техніко-економічні методи дослідження для оцінювання надійності електричних мереж 10 кВ. Застосування комплексного підходу забезпечує достовірність результатів і можливість практичного впровадження систем посилення ізоляції.

8. Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 73 сторінки машинописного тексту, містить 32 рисунка, 13 таблиць та 28 найменувань джерел у списку літератури.

1. АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ТА ШЛЯХІВ ЇЇ ПІДВИЩЕННЯ

1.1. Поняття та показники надійності систем електропостачання

Надійність системи електропостачання визначається як її здатність забезпечувати споживачів електричною енергією заданої якості без перерв, перевищення допустимих значень тривалості чи частоти відключень. Вона є одним із головних критеріїв ефективності функціонування енергосистем і розглядається як сукупність властивостей, що характеризують безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність і збереження працездатного стану елементів системи [9].

Згідно із Законом України «Про ринок електричної енергії» та Кодексом системи розподілу, надійність електропостачання споживачів має забезпечуватися відповідно до встановлених стандартів якості електроенергії, а облік порушень та показників безперервності електропостачання здійснюється операторами систем розподілу [10]. До національних документів, що визначають вимоги до показників надійності та якості електричної енергії, належать ДСТУ EN 50160:2014 «Характеристики напруги електроенергії, що постачається споживачам у загальних розподільних мережах», ДСТУ 3494-96 «Надійність техніки. Терміни та визначення», а також ПУЕ (Правила улаштування електроустановок) – розділи 1.2, 1.3 та 2.5, що встановлюють категорії надійності споживачів і вимоги до резервування живлення [11].

Міжнародна практика визначає надійність систем електропостачання за статистичними показниками SAIDI, SAIFI та CAIDI, які характеризують середню тривалість, частоту та час відновлення після відключень. Так, індекс SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) показує середню кількість відключень на одного споживача за певний період, тоді як SAIDI (System Average Interruption Duration Index) відображає середню тривалість усіх

відключень для середнього споживача [12]. Показник SAIDI (Customer Average Interruption Duration Index) характеризує середній час відновлення живлення після одного відключення. Ці показники є ключовими у світовій практиці моніторингу надійності та використовуються також в Україні під час регулювання якості послуг операторів систем розподілу [13].

У мережах середньої напруги, зокрема 10 кВ, надійність безпосередньо залежить від технічного стану ізоляційних систем, рівня старіння обладнання, наявності атмосферних впливів, забруднень та механічних ушкоджень. Саме тому показники SAIDI та SAIFI стають базовими для оцінювання результатів технічних заходів, спрямованих на підвищення надійності, зокрема впровадження систем посилення ізоляції, які зменшують кількість перекриттів і пробоїв повітряних ліній [9–13].

1.2. Нормативна база щодо забезпечення надійності електропостачання

Надійність систем електропостачання в Україні регламентується низкою нормативно-правових актів, стандартів та галузевих документів, які визначають вимоги до якості електричної енергії, тривалості та частоти перерв у постачанні, а також критерії оцінювання безперервності електропостачання. В основі регулювання лежить Закон України «Про ринок електричної енергії» та Кодекс системи розподілу, затверджений постановою НКРЕКП № 310 від 14 березня 2018 р., який встановлює принципи надійного функціонування розподільчих мереж, порядок планування робіт з технічного обслуговування та процедури обліку перерв у електропостачанні [10]. Кодекс визначає, що оператори системи розподілу зобов'язані вести реєстр відключень споживачів і розраховувати показники SAIDI та SAIFI для кожного адміністративного району обслуговування.

Ключовим документом, що визначає параметри якості електроенергії, є ДСТУ EN 50160:2014 «Характеристики напруги електроенергії, що

постачається споживачам у загальних розподільних мережах». Він гармонізований із європейським стандартом EN 50160:2010 і містить норми щодо коливань напруги, частоти, асиметрії фаз, рівня гармонічних складових та тривалості перерв у живленні [11, 14]. Вимоги цього стандарту є базовими для операторів систем розподілу (ОСР) і використовуються при формуванні звітності щодо якості електропостачання перед НКРЕКП.

Додатково надійність функціонування електричних мереж регламентується Правилами улаштування електроустановок (ПУЕ), чинною редакцією яких встановлено категорії споживачів за надійністю живлення, допустимі тривалості перерв та вимоги до резервування джерел живлення. Підприємства, віднесені до першої категорії, повинні мати два незалежні джерела електроживлення, що відповідає вимогам розділу 1.2 ПУЕ [15].

Важливе значення для оцінювання показників безперервності постачання має Методика розрахунку показників надійності та якості електропостачання, затверджена наказом Міністерства енергетики України № 173 від 25.07.2022 р., яка базується на стандартах ІЕС 61000-4-30 та ІЕС 62586-1 і встановлює порядок вимірювання показників якості напруги та статистичного обліку тривалості відключень [16]. Ця методика передбачає обов'язкове впровадження автоматизованих систем моніторингу якості електроенергії на ключових ділянках мереж операторів систем розподілу.

На міжнародному рівні показники надійності також узгоджуються з рекомендаціями CIGRÉ Technical Brochures № 803 та стандартом IEEE 1366-2012, який визначає методи розрахунку SAIDI, SAIFI, CAIDI та MAIFI для систем розподілу електроенергії [17]. Україна поступово гармонізує власну систему показників надійності з європейськими підходами, що сприяє інтеграції енергетичного ринку до ENTSO-E і створенню спільних стандартів звітності.

Таким чином, нормативна база України у сфері забезпечення надійності електропостачання є комплексною і поєднує вимоги національних стандартів, міжнародних документів ІЕС та EN, а також галузевих методик. Вона

забезпечує правові та технічні умови для контролю, моніторингу та підвищення надійності систем розподілу електроенергії.

1.3. Основні причини зниження надійності в мережах 10 кВ

Розподільчі мережі напругою 6–10 кВ є основною ланкою системи електропостачання споживачів і водночас найуразливішою її частиною з точки зору надійності. Основними факторами, що спричиняють зниження надійності роботи таких мереж, є технічний стан елементів ліній, зовнішні впливи природного та антропогенного характеру, а також недосконалість експлуатаційних заходів і систем моніторингу [18].

На рис. 1.1 наведено структуру основних причин аварійних відключень у мережах 10 кВ за статистичними даними операторів систем розподілу.

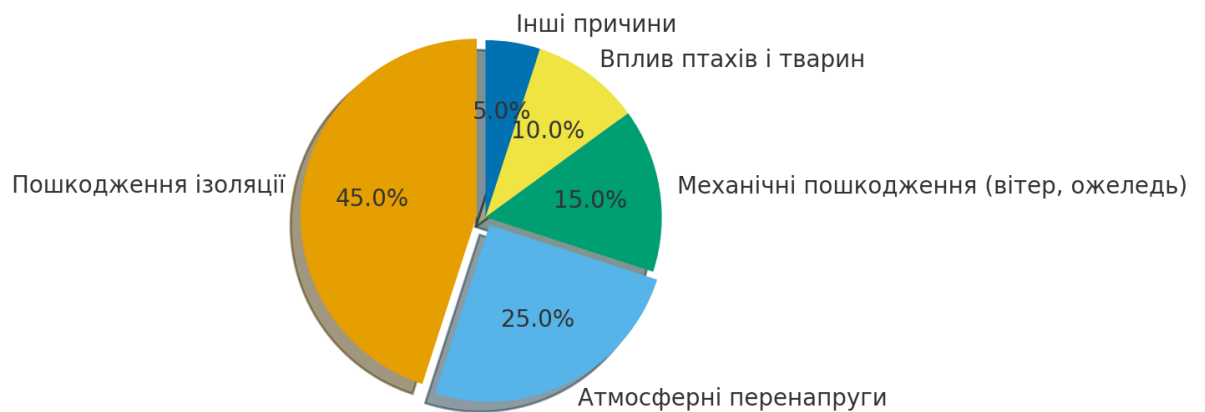


Рис. 1.1 – Структура причин аварій у мережах 10 кВ

Як видно з діаграми, домінуючими факторами залишаються пошкодження ізоляції (понад 40 %) та атмосферні перенапруги (близько 25 %), тоді як вплив птахів, рослинності та механічних ушкоджень сумарно становить близько 30 % [18, 20, 22].

Найбільшу кількість пошкоджень у мережах 10 кВ становлять відмови, пов'язані з деградацією ізоляції. Старіння ізоляційних матеріалів призводить до зниження їх електричної міцності, появи мікротріщин, часткових розрядів

і локальних нагрівів, що в подальшому викликає перекриття між фазами або на землю. На рисунку 1.3 зображено характерне радіальне розтріскування полімерного ізолятора, спричинене старінням матеріалу під дією ультрафіолету, вологи та часткових розрядів. Такі дефекти призводять до зниження гідрофобних властивостей і появи струмів витoku по поверхні ізолятора, що у подальшому спричиняє перекриття між ребрами та аварійні відключення [18, 19].



Рис. 1.2 – Дефекти полімерного ізолятора після тривалої експлуатації

Суттєвим чинником є атмосферні явища, зокрема грозові та комутаційні перенапруги. Відсутність достатнього рівня грозозахисту та обмежувачів перенапруг призводить до пробою ізоляції та виходу з ладу лінійних елементів.



Рис. 1.3 – Перекриття фарфорового ізолятора під дією атмосферної перенапруги

Рис. 1.3 демонструє наслідки грозового перекриття фарфорового ізолятора: видно сліди дугового розряду та обвуглення поверхні. Такі дефекти виникають у разі недостатнього рівня грозозахисту, коли напруга перенапруги перевищує електричну міцність ізоляції. Наслідком є пробій між ребрами та вихід лінійного елемента з ладу, що підтверджується статистикою операторів систем розподілу [20]. Статистичні дані європейських операторів розподільчих мереж показують, що до 25 % аварій у лініях середньої напруги спричинені саме перенапругами природного походження [20].

Важливу роль у пошкодженості ліній відіграють і біологічні чинники, зокрема діяльність птахів. Осідання птахів на опорах та дотик до двох фаз або фаз і заземлених елементів часто призводить до коротких замикань. Також критичним є забруднення ізоляції від результатів життєдіяльності птахів. За даними досліджень, проведених у Польщі та Німеччині, частка таких випадків сягає 5–7 % усіх аварій у мережах 10–20 кВ, особливо у весняно-осінній період [21].



Рис. 1.4 – Вплив птахів на зниження рівня ізоляції ЛЕП

Додатковим фактором є механічні пошкодження, пов'язані з вітровими навантаженнями, падінням дерев, ожеледдю та обмерзанням проводів, що викликає як короточасні, так і тривалі перерви в електропостачанні. Такі явища стають дедалі частішими внаслідок кліматичних змін, що впливають на стабільність роботи повітряних ліній [22].

Як показано на рисунку 1.5, забруднення поверхні ізолятора (суміш пилу, солей та промислових викидів) формує провідний шар, який у вологу погоду сприяє утворенню струмів витoku. Це поступово викликає локальні нагріви, часткові розряди та деградацію матеріалу, що є типовою причиною зниження надійності ліній у промислових районах [21].



Рис. 1.5 – Забруднення поверхні ізолятора солями та пилом

Недостатня ефективність систем діагностики та профілактичних перевірок також негативно позначається на надійності. У більшості розподільчих мереж України досі використовуються переважно візуальні огляди без застосування тепловізійного чи частково-розрядного контролю, що не дозволяє своєчасно виявляти дефекти ізоляції [23].

У цілому надійність мереж 10 кВ визначається взаємодією технічних, природних і організаційних чинників. Для підвищення стійкості системи до відмов доцільно впроваджувати полімерні ізолятори з покращеними гідрофобними властивостями, захисні ковпаки, екрани від птахів, а також системи автоматизованого моніторингу технічного стану елементів мережі, що значно зменшують частоту та тривалість аварійних відключень [18–23].

1.4. Технічні напрями підвищення надійності електропостачання

Підвищення надійності систем електропостачання є комплексним завданням, що передбачає вдосконалення конструкцій елементів мережі,

модернізацію обладнання, запровадження систем моніторингу та впровадження інноваційних технічних рішень. У розподільчих мережах 10 кВ, де більшість елементів експлуатуються понад 25 років, саме технічне старіння є ключовим фактором зниження надійності [8, 12]. Тому стратегія підвищення безперебійності електропостачання повинна базуватися на поєднанні профілактичного обслуговування, автоматизації мереж і використання вдосконалених ізоляційних систем.

Одним із найпоширеніших напрямів є перехід до використання самонесучих ізольованих проводів (СП) у мережах середньої напруги, що значно знижує ймовірність коротких замикань між фазами та на землю (рис. 1.6). За результатами досліджень, впровадження СП у сільських мережах дозволяє зменшити кількість аварійних відключень у середньому на 35–40 % [14]. Водночас застосування таких проводів потребує ретельного вибору ізоляційних матеріалів, стійких до ультрафіолетового випромінювання, морозу та механічних навантажень.

Другим важливим напрямом є автоматизація розподільчих мереж, що передбачає впровадження пристроїв автоматичного повторного ввімкнення (АПВ), систем дистанційного керування роз'єднувачами та секціонування ліній. Це дозволяє зменшити тривалість аварійних перерв (показник SAIDI) за рахунок автоматичного локалізування несправностей і швидкого відновлення живлення споживачів [15].

Вагоме значення для забезпечення надійності мають засоби грозозахисту та обмеження перенапруг, серед яких – вентильні розрядники, обмежувачі перенапруг типу ОПН або довго-іскрові розрядники (рис. 1.6), а також системи заземлення з контрольованими параметрами опору. Ці заходи дозволяють запобігати пробоям ізоляції внаслідок грозових імпульсів, що є однією з основних причин аварій у мережах 6–10 кВ [10, 16].

В останні роки особливої уваги набули інноваційні методи підвищення ізоляційної стійкості, серед яких – застосування полімерних композитних ізоляторів, покриттів із гідрофобними властивостями, захисних ковпаків і

екранів від птахів [17]. Такі системи, об'єднані терміном системи посилення ізоляції, спрямовані на зменшення струмів витoku, попередження перекриттів та збереження гідрофобності поверхні ізолятора протягом усього терміну експлуатації (рис. 1.6). За даними міжнародних досліджень, використання силіконових композиційних ізоляторів дозволяє зменшити кількість пробоїв на 60–70 % порівняно з традиційними фарфоровими аналогами [9, 18].



Рис. 1.6 – Шляхи підвищення надійності ПЛ 10 кВ

Таким чином, технічні напрями підвищення надійності електропостачання охоплюють широкий спектр рішень – від конструктивних до матеріалознавчих. Особливу роль серед них відіграють системи посилення ізоляції, які дозволяють підвищити електричну міцність повітряних ліній 10 кВ без радикальної реконструкції мережі, що робить їх одним із найефективніших і економічно виправданих способів забезпечення стабільної роботи електричних мереж.

1.5. Висновки до розділу 1

У першому розділі виконано аналіз сучасного стану надійності електричних мереж 10 кВ, нормативної бази та основних технічних напрямів її підвищення. Показано, що надійність систем електропостачання визначається комплексом технічних, організаційних і природних факторів,

серед яких ключову роль відіграє стан ізоляційних систем та ефективність заходів щодо запобігання їх деградації.

Встановлено, що найбільшу частку пошкоджень у мережах 10 кВ становлять відмови, пов'язані з перекриттям або пробоем ізоляції, спричинені старінням матеріалів, впливом атмосферних перенапруг, забрудненням та дією птахів. Частка таких пошкоджень може перевищувати 40 % від загальної кількості аварійних відключень.

Проаналізована нормативна документація України (ДСТУ EN 50160:2014, Кодекс системи розподілу, Методика розрахунку показників надійності та якості електропостачання, IEEE 1366-2012) визначає єдині критерії оцінювання безперервності електропостачання – SAIDI, SAIFI, CAIDI – які є базою для порівняння ефективності технічних заходів операторів систем розподілу.

Виявлено, що перспективними технічними напрямками підвищення надійності є використання самонесучих ізольованих проводів (СІП), впровадження автоматизованих систем керування та секціонування мереж, застосування сучасних пристроїв обмеження перенапруг і полімерних ізоляторів із гідрофобними покриттями. Саме останній напрям – системи посилення ізоляції – є одним із найбільш ефективних і економічно виправданих способів підвищення безвідмовності роботи повітряних ліній 10 кВ без капітальної реконструкції мереж.

Отже, результати аналізу підтверджують доцільність подальших досліджень у напрямі оцінювання ефективності систем посилення ізоляції та їхнього впливу на показники надійності електропостачання споживачів. Це визначає основну мету та завдання наступного розділу роботи, присвяченого аналізу аварійності мереж 10 кВ та розрахунку показників надійності.

2. ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ 10 КВ НА ОСНОВІ СТАТИСТИКИ АВАРІЙНИХ ВІДКЛЮЧЕНЬ

2.1. Характеристика об'єкту дослідження

Дослідження проведено на основі експлуатаційних даних філії «Лебединський район електричних мереж» акціонерного товариства «Сумиобленерго», що забезпечує розподіл і передачу електричної енергії споживачам Лебединської громади та прилеглих територій Сумської області. Основною функцією РЕМ є надійне та безперебійне електропостачання споживачів, технічне обслуговування повітряних і кабельних ліній напругою 0,4–10 кВ, підстанцій, трансформаторних пунктів, а також виконання ремонтних, діагностичних і профілактичних робіт для забезпечення нормативних показників якості електроенергії відповідно до вимог ДСТУ EN 50160:2014 та Кодексу системи розподілу.

На території обслуговування філії розташовано 13 підстанцій (ПС) напругою 110–35/10 кВ, що утворюють основу електричної мережі району. Основними вузлами є:

- ПС 110/35/10 кВ «Лебедин» – головний центр живлення, який приймає електроенергію з магістральних мереж і розподіляє її на нижчі рівні напруги;
- ПС 110/10 кВ «М. Ворожба» – живить північну частину району та частково агропромислові підприємства;
- ПС 35/10 кВ «Штеповка», «М. Вистороп», «Василівка», «Михайлівка», «Н. Петрівка», «Рябушки», «Боброво», «Будилка», «Голубівка», «Межиріч», «Фурнітура» – виконують функції понижувальних підстанцій, які забезпечують електропостачання населених пунктів, фермерських господарств, комунальних об'єктів і виробничих підприємств.

Загальна протяжність повітряних ліній 10 кВ, що перебувають на балансі Лебединського РЕМ, перевищує 350 км, а довжина ліній 0,4 кВ – понад 750 км. Більшість мереж експлуатується понад 25 років, що зумовлює високий рівень

технічного зношення опор, арматури та ізоляційних елементів. Це, своєю чергою, впливає на частоту аварійних відключень, особливо під час грозових періодів, сильного вітру чи ожеледі.

У межах даної роботи дослідження надійності виконувалося за результатами обліку аварійних відключень на цих підстанціях та їхніх повітряних лініях 10 кВ у період 2020–2024 років. Особливу увагу приділено впливу технічного стану ізоляції на частоту та тривалість порушень електропостачання.

Отримані статистичні дані філії «Лебединський РЕМ» використано для подальшого розрахунку показників надійності та порівняльного аналізу причин відмов із метою обґрунтування доцільності впровадження систем посилення ізоляції у мережах 10 кВ.

2.2. Аналіз аварійних відключень за 2020 рік

За даними філії «Лебединський РЕМ» АТ «Сумиобленерго», у 2020 році в електричних мережах 10 кВ було зафіксовано 179 аварійних відключень. Структура причин наведена на рис. 2.1 та 2.2.

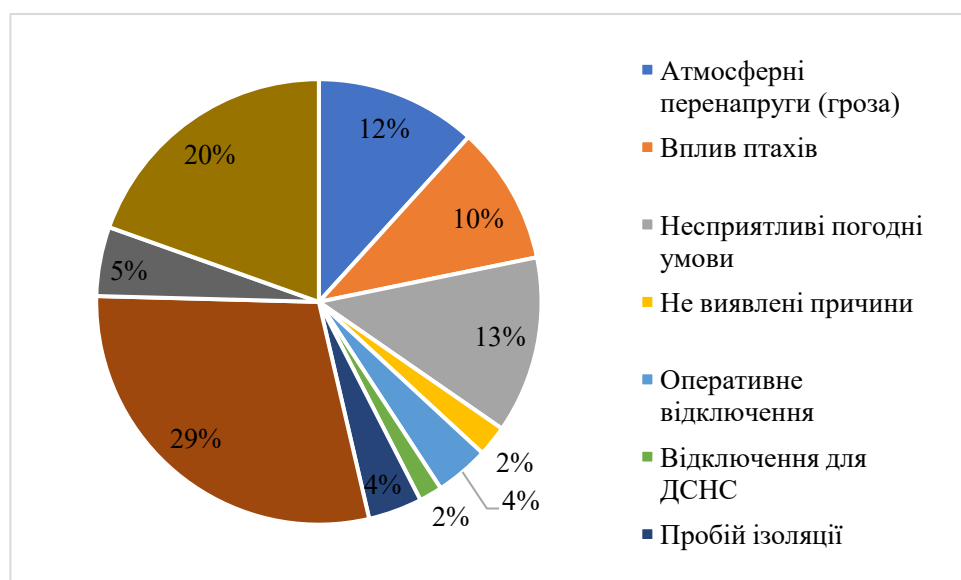


Рис. 2.1 – Структура аварійних відключень у 2020 році

Найбільшу частку становлять пошкодження в мережі – 52 випадки (29 %), які пов'язані з обривами проводів, виходом з ладу з'єднувальної арматури, ізоляційних підвісів і комутаційних апаратів. Такий показник свідчить про значний рівень фізичного зношення елементів ліній 10 кВ, більшість з яких експлуатуються понад 25 років без глибокої реконструкції.

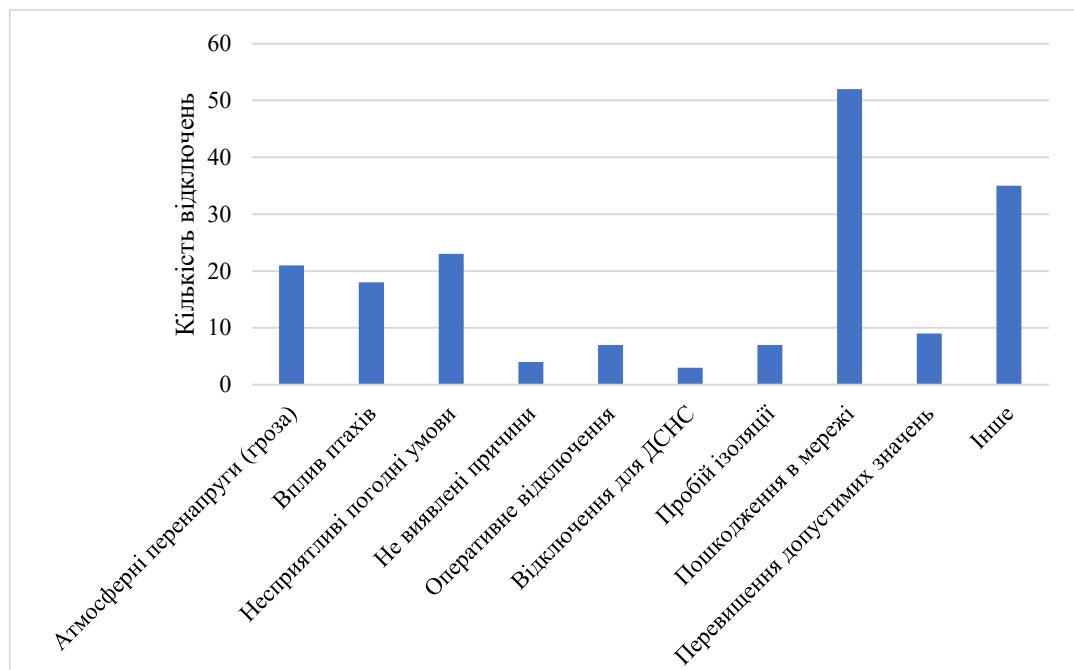


Рис. 2.2 – Кількість відключень за видами аварій за 2020 рік

Суттєву частку становлять також несприятливі погодні умови (13 %) і атмосферні перенапруги (12 %). У цих випадках основними наслідками є короткі замикання між фазами або на землю через погіршення стану ізоляції під дією вологи, дощу, ожеледі та грозових імпульсів.

Вплив птахів спричинив 18 відключень (10 %). Такі інциденти виникають унаслідок потрапляння птахів між фазами або забруднення ізоляторів пташиними випорожненнями, що утворюють провідний шар. Подібні випадки мають сезонний характер (весна – осінь).

Пробой ізоляції (4 %) та перевищення допустимих значень параметрів (5 %) є технічними наслідками старіння ізоляційних матеріалів і високого рівня вологозабруднення.

Група «Інше» (20 %) включає відключення, спричинені нештатними роботами споживачів, сторонніми впливами, аварійним ремонтом і короткими замиканнями в приєднаннях 0,4 кВ.

Загалом аналіз 2020 року показує, що близько половини всіх аварійних подій (47 %) прямо або опосередковано пов'язані з несправністю або деградацією ізоляційних елементів, а ще понад 25 % – з дією погодних та біологічних чинників.

На рис. 2.3 наведено інформацію про тривалість відключення споживачів за видами аварій в мережі. Загальна тривалість аварійних відключень у мережах 10 кВ Лебединського РЕМ у 2020 році становила 324,8 години.

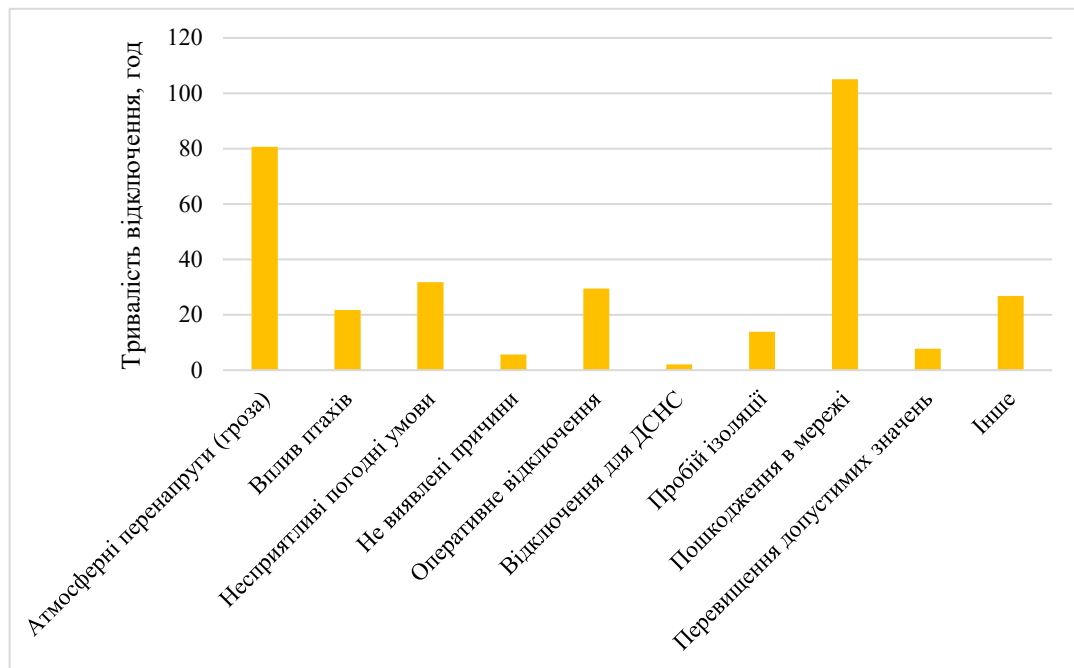


Рис. 2.3 – Тривалість відключення за причинами аварій у 2020 р.

Найбільші втрати часу зумовлені пошкодженнями в мережі (32 %) та атмосферними перенапругами (25 %), що вказує на значний вплив фізичного старіння ізоляції й неефективність захисту від грозових імпульсів.

Несприятливі погодні умови (10 %) і вплив птахів (7 %) також мають стабільний вплив на роботу мереж, особливо в сезонні періоди. Загалом понад 60 % загального часу простоїв прямо або опосередковано пов'язано зі станом

ізоляції або зовнішніми чинниками, що на неї діють. Це підтверджує потребу у впровадженні систем посилення ізоляції як одного з найефективніших засобів підвищення надійності мереж 10 кВ.

Показник недовідпуску електроенергії відображає сумарні енергетичні втрати споживачів через аварійні відключення. За даними Лебединського РЕМ, у 2020 році загальний обсяг недовідпуску становив 43536,81 кВт·год (рис. 2.4).

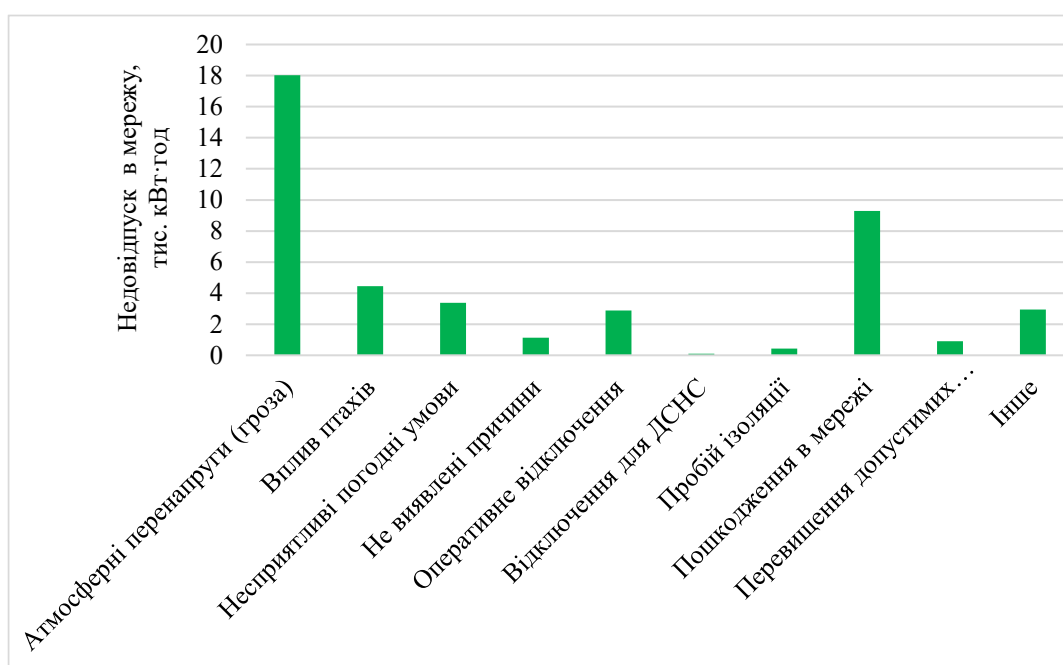


Рис. 2.4 – Недовідпуск в мережу за видами аварій у 2020 р.

Найбільші втрати електроенергії пов'язані з атмосферними перенапругами – 18031 кВт·год та пошкодженнями в мережі – 9297 кВт·год, що свідчить про вплив грозових явищ і фізичного зношення елементів мережі.

Суттєві, хоча й менші, втрати спостерігаються від впливу птахів – 4443 кВт·год та несприятливих погодних умов – 3367 кВт·год.

Решта факторів мають частку до 7 % кожен, але сукупно формують близько 20 % втрат.

Аналіз даних показує, що понад 70 % недовідпуску спричинено чинниками, пов'язаними зі станом або деградацією ізоляції.

2.3. Аналіз аварійних відключень за 2021 рік

У 2021 році в мережах 10 кВ Лебединського РЕМ АТ «Сумиобленерго» зафіксовано 187 аварійних відключень, що на 8 випадків (4,5 %) більше, ніж у 2020 році. Структура причин, тривалості та недопостачання електроенергії наведена на рис. 2.5–2.8. Незважаючи на незначне зростання кількості подій, сумарна тривалість простоїв зменшилася майже на третину, що свідчить про покращення організації оперативного реагування та більш ефективну локалізацію пошкоджень.

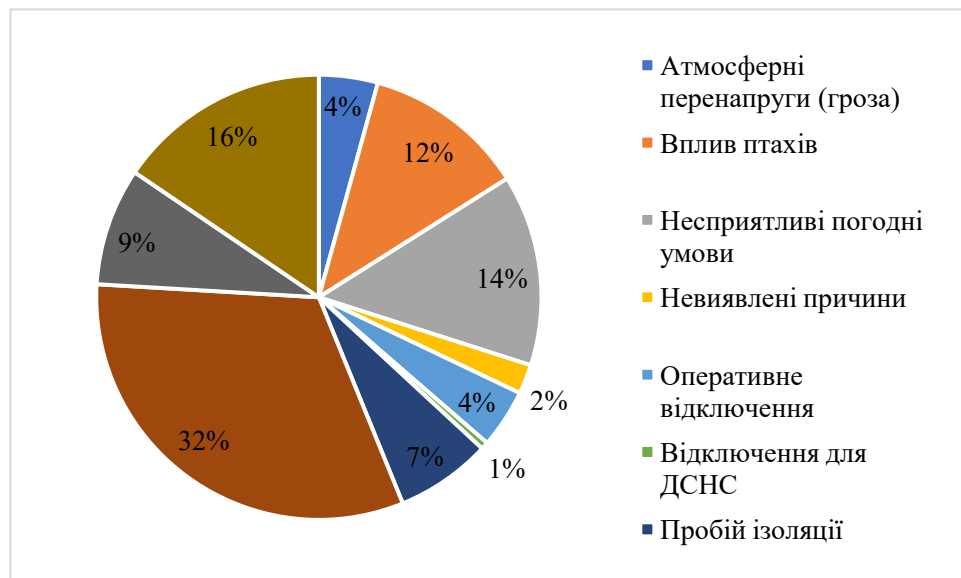


Рис. 2.5 – Структура аварійних відключень у 2021 році

Основну частку відключень становили пошкодження в мережі, яких зафіксовано 60 випадків (приблизно 32 % від загальної кількості) (рис. 2.5 та рис. 2.6). Їхня поява пов'язана з фізичним старінням проводів, арматури, опор та з'єднувальних елементів, які експлуатуються понад 25 років. Значну частку подій (близько 14 %) спричинили несприятливі погодні умови – сильні вітри, ожеледь, залипання снігу, що призводять до механічного пошкодження ізоляторів або зниження електричної міцності ліній. Вплив птахів залишився стабільним фактором (22 випадки, 12 %), при цьому характерними є короточасні замикання або забруднення ізоляторів продуктами

життєдіяльності, які формують провідний шар. Цей тип аварій має сезонну залежність, переважно навесні та восени.

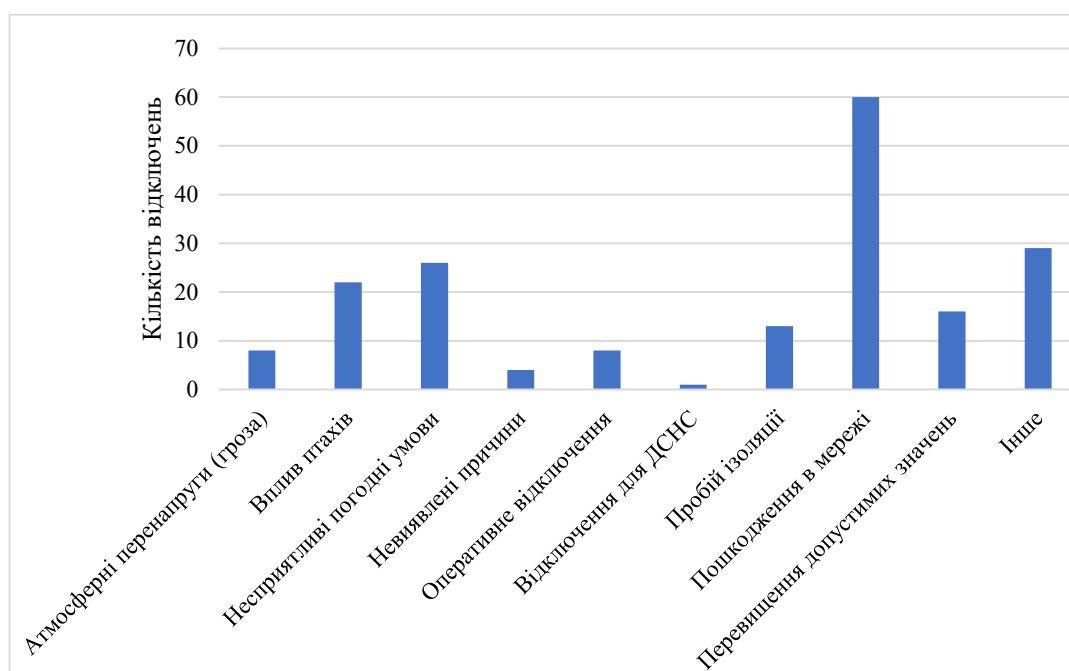


Рис. 2.6 – Кількість відключень за видами аварій за 2021 рік

Частка атмосферних перенапруг у структурі відключень зменшилася до 4 % (8 випадків), що можна пов'язати з проведенням профілактичних оглядів і перевірок вентиляльних розрядників. Натомість зафіксовано зростання кількості пробоїв ізоляції (13 випадків, близько 7 %), що свідчить про накопичення дефектів матеріалів та старіння ізоляторів, особливо фарфорових і скляних, які втратили гідрофобність. Такі події часто не супроводжуються очевидними зовнішніми ушкодженнями, але призводять до короточасних замикань і деградації ізоляційних властивостей.

Загальна тривалість відключень у 2021 році становила 230,63 години (рис. 2.7), що на 29 % менше, ніж у 2020 році (324,8 год).

Найбільше часу на відновлення електропостачання витрачено у випадках пошкоджень у мережі – 85,6 год, а також за несприятливих погодних умов – 36,5 год. Значну частку часу простоїв спричинили грозові перенапруги (22,4 год) і пробої ізоляції (20,9 год). Зменшення середньої тривалості аварій порівняно з попереднім роком пояснюється впровадженням систем

оперативного секціонування ліній і більш ефективною роботою аварійно-відновлювальних бригад.

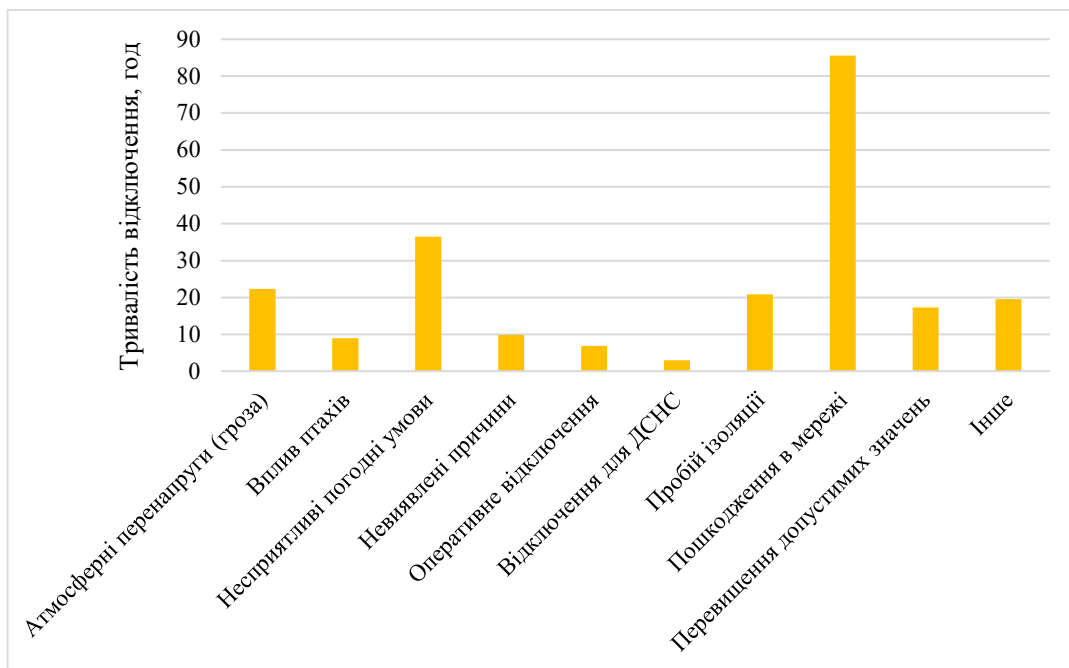


Рис. 2.7 – Тривалість відключення за причинами аварій у 2021 р.

Показник недовідпуску електроенергії у 2021 році становив 47161,9 кВт·год (рис. 2.8), що на 8 % перевищує рівень 2020 року.

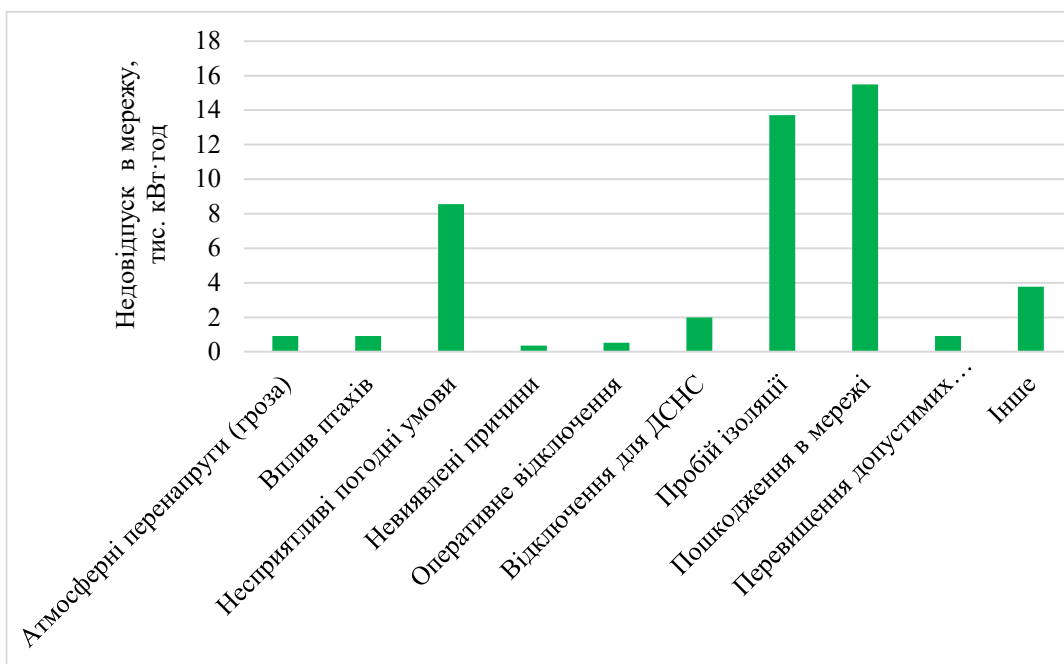


Рис. 2.8 – Недовідпуск в мережу за видами аварій у 2021 р.

Найбільші енергетичні втрати зумовлені пошкодженнями в мережі (15491 кВт·год), пробоями ізоляції (13715 кВт·год) і несприятливими погодними умовами (8549 кВт·год). Сукупно ці три фактори забезпечили понад 80 % недовідпуску, що підтверджує домінування технічних і кліматичних чинників у структурі енергетичних втрат. Водночас зросла частка втрат через вплив птахів, хоча їхній обсяг залишається відносно невеликим (918,9 кВт·год).

Таким чином, 2021 рік характеризувався зменшенням середньої тривалості відключень при збереженні високої частки подій, пов'язаних зі станом ізоляції. Близько 60 % від загальної кількості випадків і понад 70 % втрат електроенергії прямо або опосередковано обумовлені недостатньою ізоляційною стійкістю ліній.

2.4. Аналіз аварійних відключень за 2022 рік

У 2022 році в мережах 10 кВ Лебединського РЕМ АТ «Сумиобленерго» було зареєстровано 248 аварійних відключень, що на 32 % більше, ніж у 2021 році (рис. 2.9 та рис. 2.10). Таке зростання пов'язане переважно з погіршенням погодних умов, зростанням кількості грозових явищ та поступовим старінням елементів ізоляції. Разом із тим, незважаючи на більшу кількість випадків, структура причин свідчить про збереження загальних тенденцій, характерних для попередніх років.

Найбільшу кількість аварійних відключень становили пошкодження в мережі – 71 випадок (29 %), що пов'язано з механічними руйнуваннями проводів, ізоляторів, арматури, а також вітровими навантаженнями та ожеледдю. Значну частку подій (20 %) спричинили несприятливі погодні умови, серед яких особливо небезпечними є налипання снігу на проводи, обмерзання ізоляторів та сильні пориви вітру. Порівняно з попереднім роком збільшилася частка атмосферних перенапруг (грози) – 25 випадків (10 %), що пояснюється підвищеною грозовою активністю влітку 2022 року.

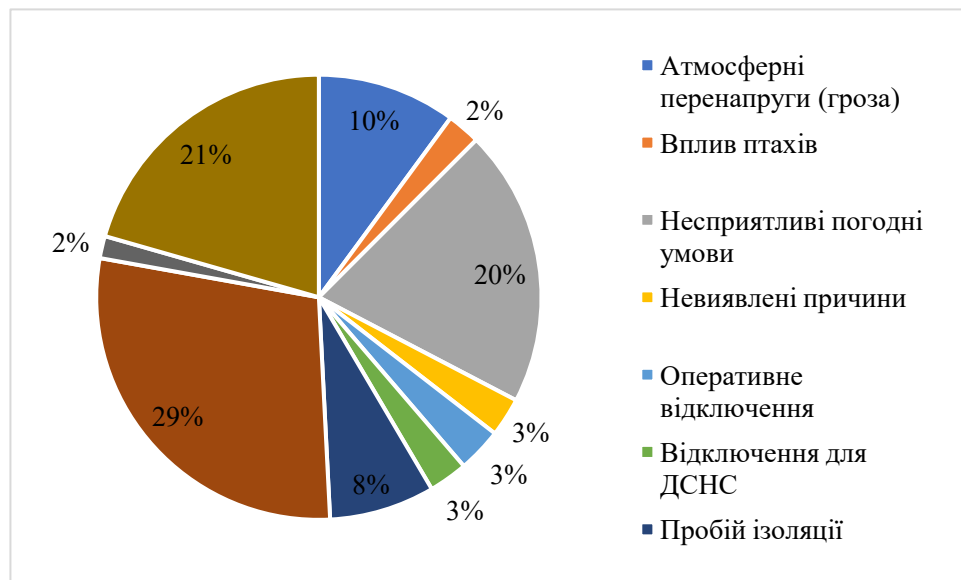


Рис. 2.9 – Структура аварійних відключень у 2022 році

Пробі ізоляції становили 19 випадків (8 %), підтверджуючи наявність деградаційних процесів в ізоляційних конструкціях, особливо в умовах високої вологості та забруднення поверхні. Незважаючи на незначну частку оперативних відключень (3 %) і відключень для потреб ДСНС (3 %), саме ці події мають важливе значення для оцінювання готовності персоналу до реагування на позаштатні ситуації.

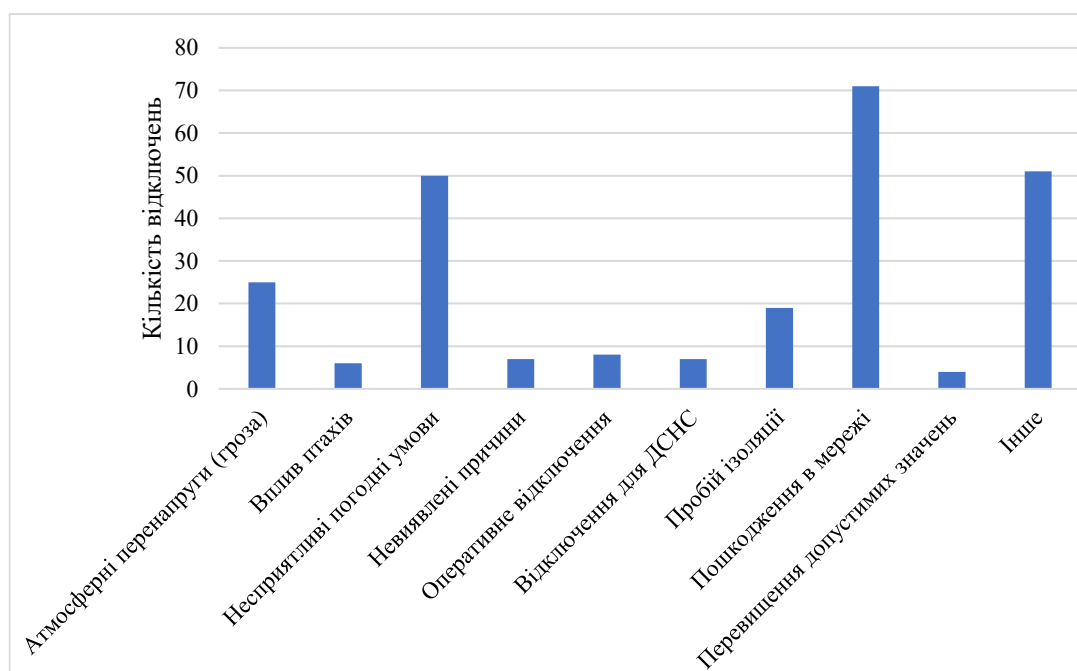


Рис. 2.10 – Кількість відключень за видами аварій за 2022 рік

Загальна тривалість аварійних відключень у 2022 році становила 340,99 години, що на 48 % більше, ніж у 2021 році (рис. 2.11). Найдовше тривали відновлювальні роботи у випадках пошкоджень у мережі (109,8 год), несприятливих погодних умов (60,7 год) та атмосферних перенапруг (58,5 год). Відносно значні часові втрати відзначено також у разі пробоїв ізоляції (38,7 год), що демонструє не лише збільшення кількості подій, але й складність відновлення працездатності таких ділянок ліній.

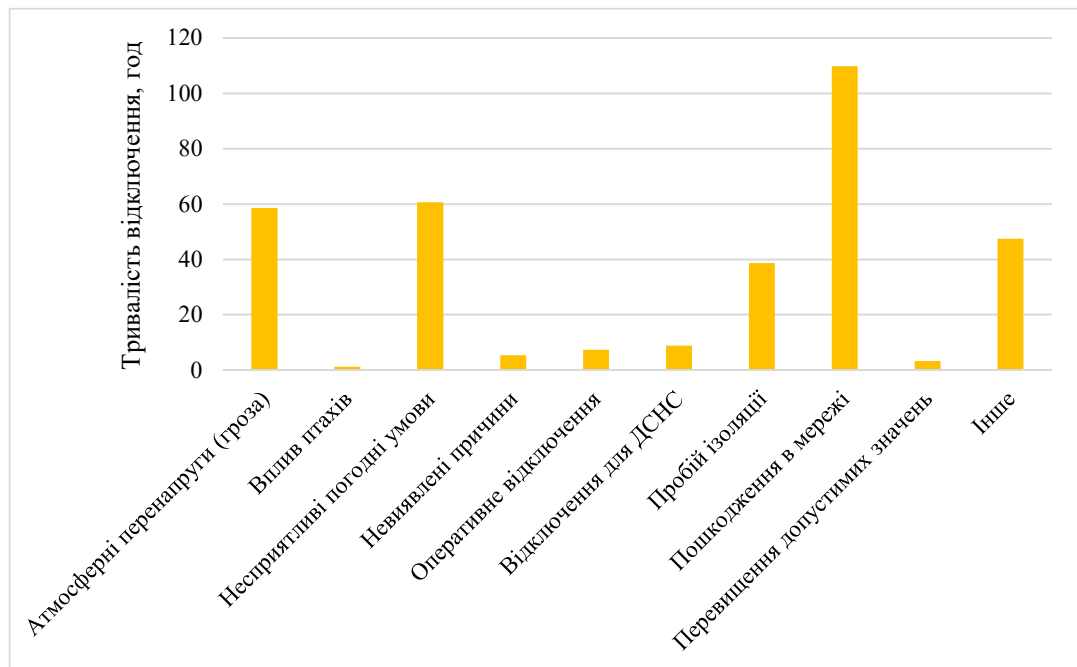


Рис. 2.11 – Тривалість відключення за причинами аварій у 2022 р.

Сумарний обсяг недовідпущеної електроенергії у 2022 році склав 27515,3 кВт·год, що на 41 % менше, ніж у 2021 році. Це свідчить про підвищення ефективності оперативного відновлення живлення споживачів, незважаючи на більшу кількість відключень. Основними причинами втрат електроенергії залишаються пошкодження в мережі – 12786 кВт·год, несприятливі погодні умови – 5555,7 кВт·год, пробой ізоляції – 1699,8 кВт·год та атмосферні перенапруги – 1677,5 кВт·год. Разом ці фактори формують понад 75 % усіх втрат.

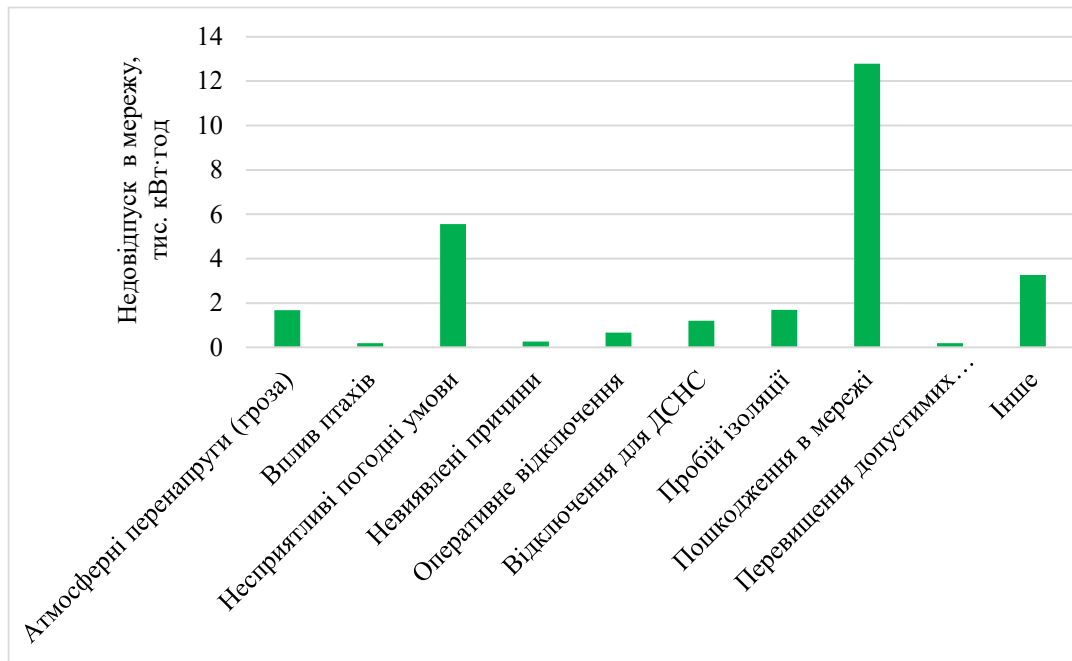


Рис. 2.12 – Недовідпуск в мережу за видами аварій у 2022 р.

Натомість вплив птахів, який у попередні роки становив 2–3 % у структурі аварійності, у 2022 році знизився до незначного рівня (менше 1 %). Це може бути наслідком проведення локальних технічних заходів – зокрема, встановлення захисних ковпаків і пластикових накладок на травмонебезпечних ізоляторах.

Узагальнюючи результати аналізу, можна зазначити, що 2022 рік характеризувався зростанням частоти аварійних відключень, збільшенням часу ліквідації пошкоджень і переважанням причин, пов'язаних зі станом ізоляції та дією кліматичних факторів.

2.5. Аналіз аварійних відключень за 2023 рік

У 2023 році в мережах 10 кВ Лебединського РЕМ АТ «Сумиобленерго» зареєстровано 124 аварійні відключення, що на 50 % менше, ніж у 2022 році (рис. 2.13 та рис. 2.14). Таке суттєве зниження кількості аварійних подій свідчить про позитивні результати проведених ремонтних робіт і часткове оновлення ізоляційних елементів на лініях розподілу. Водночас зменшення кількості відключень не супроводжувалося пропорційним скороченням

обсягів енергетичних втрат, що вказує на необхідність подальшого технічного вдосконалення системи.

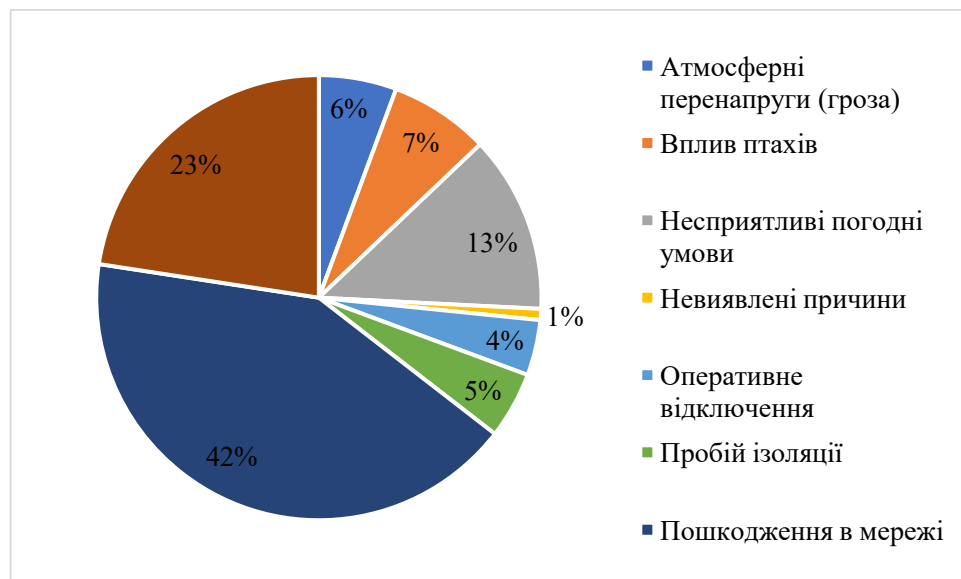


Рис. 2.13 – Структура аварійних відключень у 2023 році

Найбільшу частку аварій традиційно становили пошкодження в мережі – 52 випадки, або 42 % від загальної кількості. Ця категорія охоплює як механічні пошкодження проводів і опор, так і міжфазні замикання, спричинені деградацією ізоляції або порушенням відстаней між провідниками.

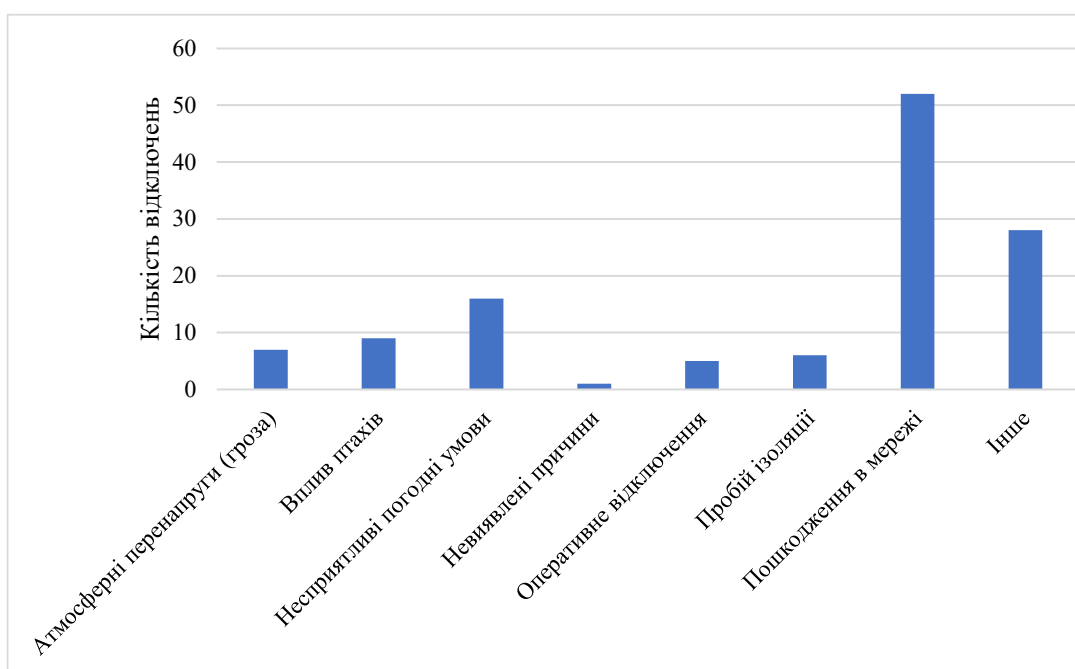


Рис. 2.14 – Кількість відключень за видами аварій за 2023 рік

Друге місце за кількістю посідають несприятливі погодні умови (16 випадків, 13 %), пов'язані з обмерзанням, сильними поривами вітру й короткочасними дощовими фронтами, що призводили до погіршення діелектричних властивостей ізоляторів. Вплив птахів становив 9 випадків (7 %), а атмосферні перенапруги – 7 випадків (6 %). Частка пробоїв ізоляції склала 5 %, що дещо нижче, ніж у 2022 році, проте продовжує залишатися значущим фактором, який впливає на безперебійну роботу мереж.

Загальна тривалість аварійних відключень у 2023 році становила 187,5 години, що на 45 % менше порівняно з 2022 роком (рис. 2.15). Найбільше часу припадає на усунення пошкоджень у мережі – 102,5 год, далі за обсягом ідуть несприятливі погодні умови – 25 год і атмосферні перенапруги – 15,2 год.

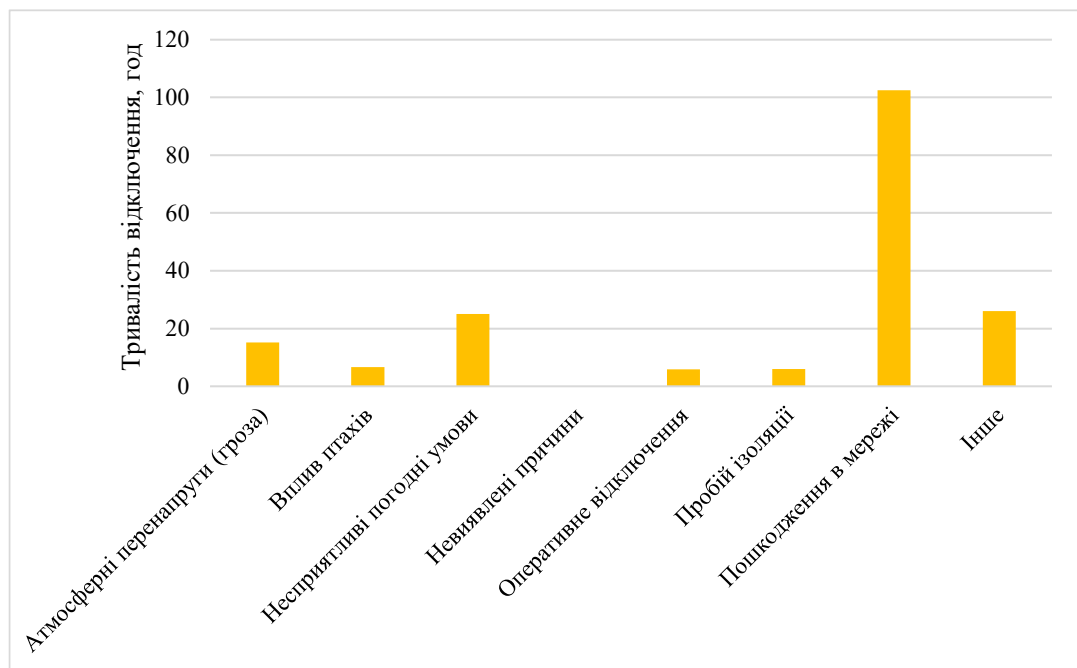


Рис. 2.15 – Тривалість відключення за причинами аварій у 2023 р.

Зменшення середнього часу відновлення пояснюється підвищенням ефективності дій оперативно-виїзних бригад, використанням систем віддаленого моніторингу стану ліній і застосуванням більш сучасних методів локалізації пошкоджень.

Недовідпуск електроенергії у 2023 році склало 34794,6 кВт·год, що на 26 % більше, ніж у 2022 році (рис. 2.16). Основну частку втрат, як і раніше, забезпечують пошкодження в мережі, які призвели до недовідпуск 25676 кВт·год. Значні втрати також зумовили несприятливі погодні умови – 3301 кВт·год, атмосферні перенапруги – 1835 кВт·год і пробой ізоляції – 1563,1 кВт·год. Частка інших причин у структурі втрат не перевищує 8 %.

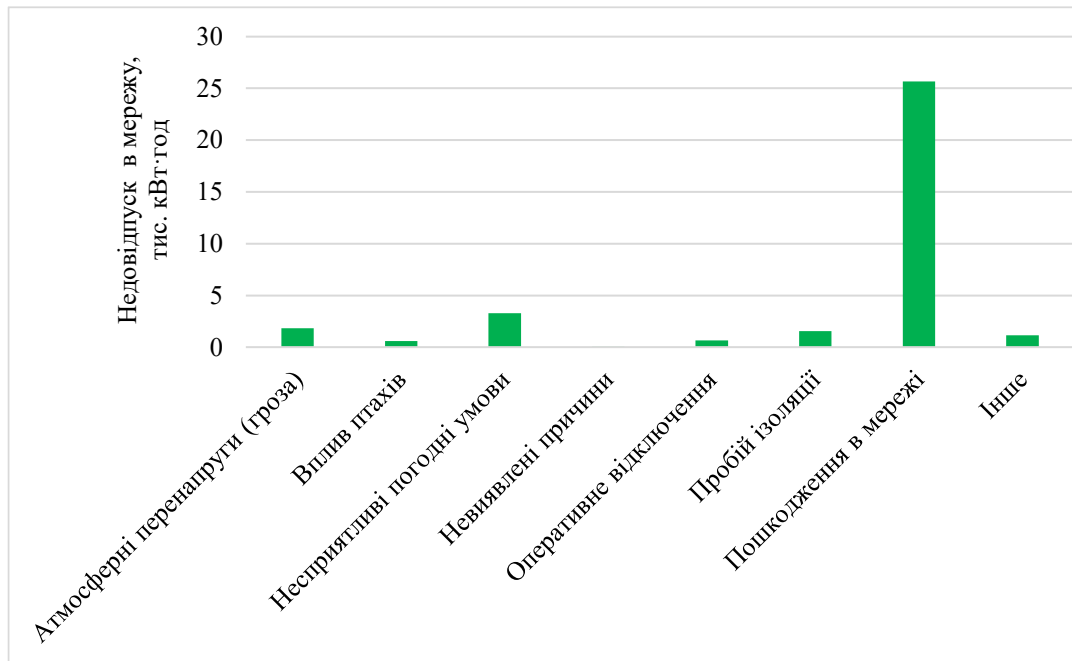


Рис. 2.16 – Недовідпуск в мережу за видами аварій у 2023 р.

Порівняльний аналіз за 2021–2023 роки показує поступове зменшення кількості відключень, але стабільно високу частку подій, пов'язаних із пошкодженням ізоляції та зовнішніми кліматичними факторами. Це вказує на системну проблему технічного стану елементів ПЛ 10 кВ, особливо на ділянках, що експлуатуються понад 20 років.

Таким чином, 2023 рік засвідчив покращення показників оперативності ліквідації аварій, але водночас підтвердив, що ключовим напрямом підвищення надійності електропостачання залишається посилення ізоляційних систем.

2.6. Аналіз аварійних відключень за 2024 рік

У 2024 році в мережах 10 кВ Лебединського РЕМ АТ «Сумиобленерго» зафіксовано 93 аварійні відключення (рис. 2.17 та рис. 2.18), що на 25 % менше, ніж у 2023 році, і є найнижчим показником за останні п'ять років спостережень. Зниження кількості подій свідчить про позитивний ефект від проведених планових ремонтів, часткової заміни ізоляторів і впровадження заходів із технічного обслуговування елементів повітряних ліній.

Основною причиною відключень у 2024 році залишаються пошкодження в мережі, яких зареєстровано 44 випадки (47 %). Вони пов'язані переважно з фізичним зносом проводів і арматури, розгерметизацією з'єднань, старінням опор і впливом механічних факторів. Значна частка аварій припадає на несприятливі погодні умови – 19 випадків (20 %), які зумовлені поривами вітру, сильними дощами, ожеледдю й короткочасними буревіями, що створюють додаткові навантаження на ізолятори та проводи.

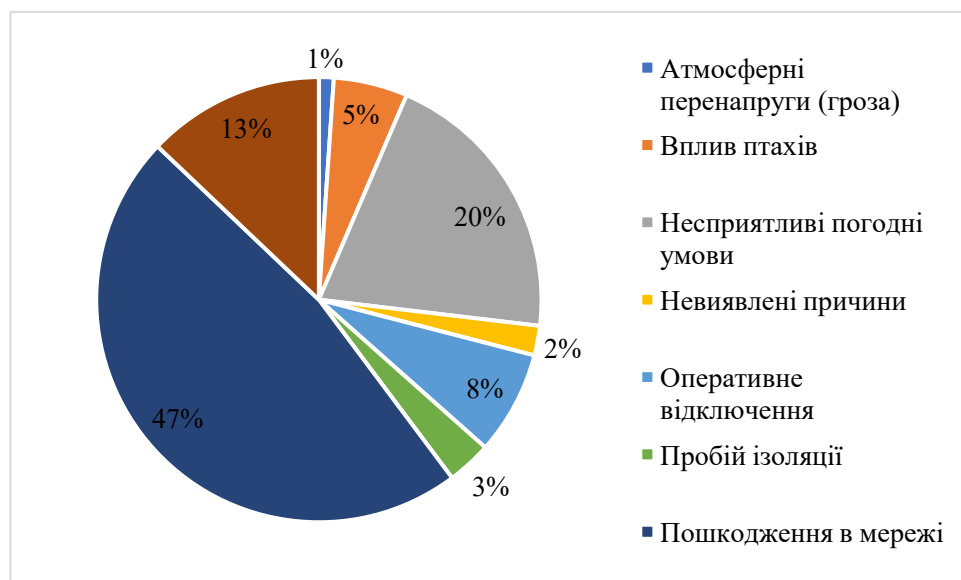


Рис. 2.17 – Структура аварійних відключень у 2024 році

Вплив птахів становить 5 % від загальної кількості, а пробі ізоляції – 3 %, що свідчить про зменшення їхньої частоти порівняно з попереднім роком.

Це може бути наслідком модернізації частини мереж і заміни застарілих фарфорових ізоляторів на полімерні з гідрофобним покриттям.

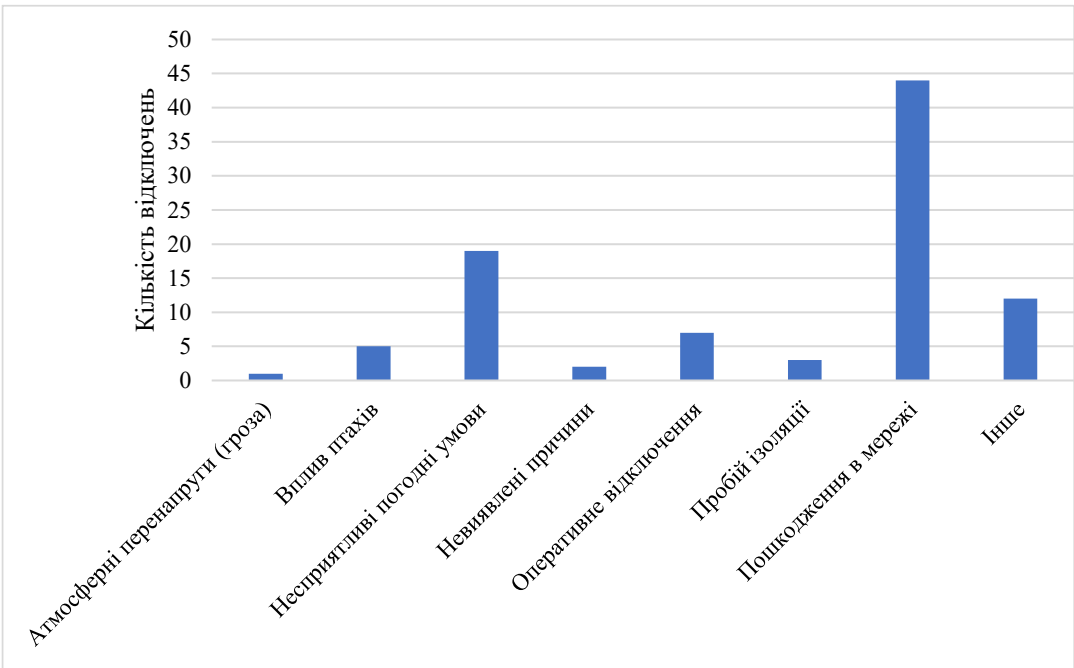


Рис. 2.18 – Кількість відключень за видами аварій за 2024 рік

Сумарна тривалість відключень у 2024 році склала 109,6 години (рис. 219), що на 41 % менше, ніж у 2023 році (187,5 год).

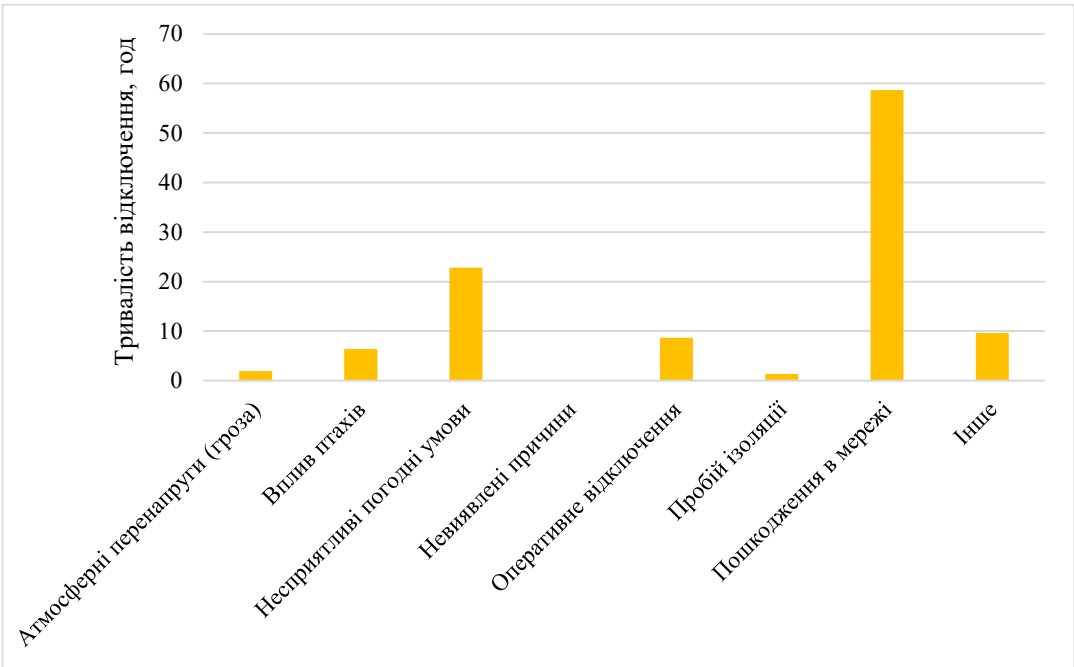


Рис. 2.19 – Тривалість відключення за причинами аварій у 2024 р.

Найбільший внесок у загальний час простоїв припадає на пошкодження в мережі – 58,7 год, несприятливі погодні умови – 22,8 год і оперативні відключення – 8,7 год. Для інших категорій відключень тривалість не перевищує 10 годин сумарно, що вказує на ефективне реагування персоналу та покращення діагностики місць пошкоджень.

Показник недовідпуску електроенергії у 2024 році становив 20050,4 кВт·год (рис. 2.20), що майже вдвічі менше, ніж у 2023 році (34794,6 кВт·год).

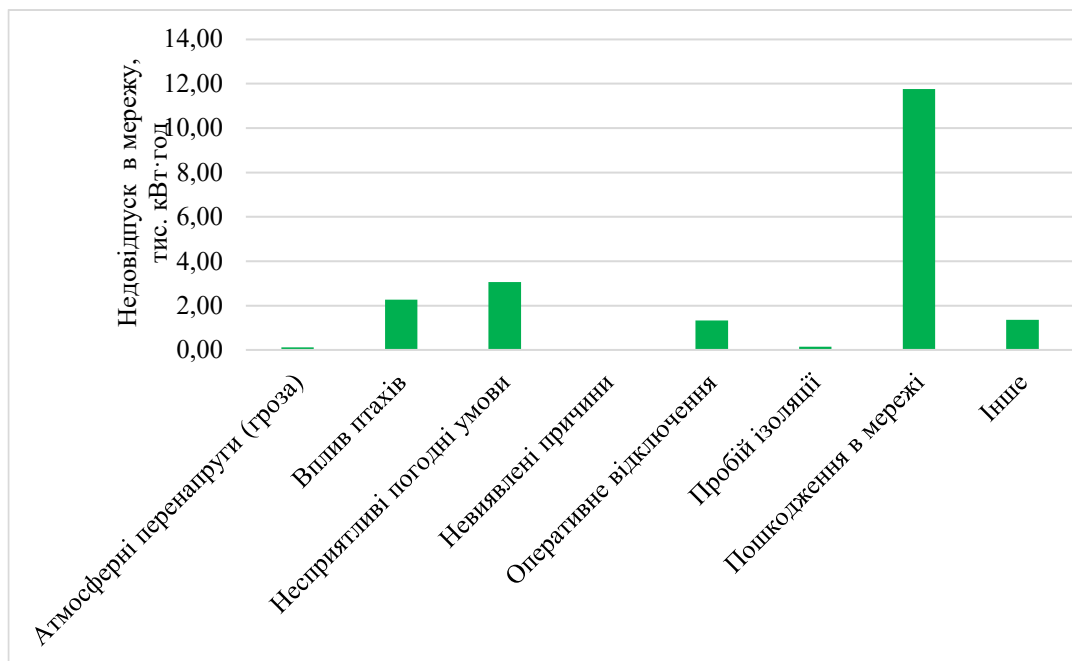


Рис. 2.20 – Недовідпуск в мережу за видами аварій у 2024 р.

Основні втрати енергії спричинені пошкодженнями в мережі, які забезпечили 11752,8 кВт·год загального недовідпуску. Значними залишаються втрати через несприятливі погодні умови – 3068,2 кВт·год та вплив птахів – 2277 кВт·год. Решта категорій – атмосферні перенапруги, пробой ізоляції та оперативні відключення – мають незначну енергетичну вагу, не перевищуючи 2–3 % кожна.

Порівняно з 2022–2023 роками, 2024 рік відзначається не лише зменшенням кількості та тривалості відключень, а й зниженням загальних

енергетичних втрат майже на 40 %. Це свідчить про покращення технічного стану мереж, що досягнуто завдяки системним ремонтам, очищенню трас ПЛ, установленню захисних пристроїв від птахів і частковому впровадженню систем посилення ізоляції. Водночас зберігається домінування факторів, пов'язаних зі станом ізоляції та дією погодних умов, що вимагає продовження цільових програм з модернізації ліній 10 кВ.

Таким чином, 2024 рік став роком стабілізації показників надійності: зменшилась кількість відключень, скоротилася їх тривалість, а обсяг недопостачання електроенергії наблизився до мінімального рівня за п'ятирічний період. Для збереження цієї позитивної динаміки необхідним є подальше впровадження технічних заходів щодо підвищення електричної міцності ізоляції, заміни зношених елементів ПЛ, використання гідрофобних покриттів і вдосконалення систем діагностики стану обладнання.

2.7. Вплив на аварійність ліній 10 кВ перекриттів ізоляції, несприятливих погодних умов та впливу птахів

Упродовж п'ятирічного періоду 2020–2024 рр. проведено аналіз структури причин аварійних відключень у мережах 10 кВ Лебединського РЕМ АТ «Сумиобленерго». Особливу увагу приділено трьом групам чинників, які мають системний характер і безпосередньо впливають на надійність електропостачання: перекриття та пробої ізоляції, несприятливі погодні умови, а також вплив птахів.

Пробої ізоляції становили від 3 до 8 % усіх аварійних відключень, однак їх вплив є непропорційно більшим щодо енергетичних втрат. У 2021–2022 роках, коли спостерігалось підвищення вологості повітря та старіння ізоляторів, частка цієї причини досягала 7–8 %, а обсяги недовідпуск перевищували 13–17 тис. кВт·год на рік. Це свідчить про накопичення мікротріщин у фарфорових і скляних ізоляторах, що знижують їхню поверхневу міцність. У 2023–2024 роках частота пробоев зменшилася до

3–5 %, а енергетичні втрати – до 1,5–1,7 тис. кВт·год, що підтверджує ефективність заміни частини елементів на полімерні ізолятори з гідрофобним покриттям. Загалом за 2020–2024 рр. спостерігається тенденція до зменшення кількості відключень через пробої ізоляції більш ніж удвічі, що є прямим наслідком реалізації заходів із підвищення електричної міцності ліній.

Вплив погодних умов залишається одним із головних зовнішніх факторів аварійності. Частка таких відключень у загальній структурі коливалася в межах 13–20 %, із піковими значеннями у 2022 році, коли було зафіксовано 50 випадків (20 % від загальної кількості). Тривалість простоїв, спричинених погодними умовами, стабільно перевищує 30–60 годин на рік, що свідчить про складність проведення ремонтних робіт у періоди гроз, ожеледі та буревіїв. Енергетичні втрати через несприятливі метеоумови за п'ять років склали понад 25 тис. кВт·год, або близько 13 % від загального недопостачання. Водночас від 2023 року спостерігається зменшення як кількості, так і тривалості таких подій – з 60,6 год (2022 р.) до 22,8 год (2024 р.), що пояснюється розчищенням трас ліній від дерев і встановленням опор із підвищеною механічною міцністю.

Аварійність, зумовлена птахами, має сезонний характер і найбільше проявляється в період весняно-осінніх міграцій. У 2020 році частка цієї причини становила 10 %, у 2021 р. – 12 %, але після впровадження технічних заходів (установлення захисних екранів, ізолювальних ковпаків на травмонебезпечних ізоляторах) спостерігається поступове зменшення до 5 % у 2024 році. Загальний час простоїв через цей фактор не перевищує 10 годин на рік, а недовідпуск електроенергії зменшилося з 4,4 тис. кВт·год (2020 р.) до 2,3 тис. кВт·год (2024 р.), тобто майже удвічі.

Сумарно вказані три фактори (ізоляція, погода, птахи) забезпечують від 35 до 45 % усіх аварійних відключень та понад 50 % загального недопостачання електроенергії в мережах 10 кВ. Динаміка 2020–2024 рр. свідчить про позитивний вплив проведених технічних заходів: кількість відключень через ці фактори зменшилась із 60 у 2020 році до 27 у 2024 році, а

середній річний обсяг втрат електроенергії скоротився більш ніж на третину. Найвищий рівень аварійності спостерігався у 2021–2022 роках, коли частка цих подій перевищувала 40 %, тоді як у 2024 році вона не перевищує 25 %.

Отже, саме підвищення ізоляційної стійкості є ключовим напрямом зниження аварійності. Застосування систем посилення ізоляції – таких як гідрофобні покриття, полімерні ізолятори, захисні ковпаки та екрани від птахів – дозволяє істотно скоротити кількість короточасних замикань, зменшити тривалість ремонтів і підвищити загальну надійність живлення споживачів.

2.8. Розрахунок показників надійності

Оцінювання надійності функціонування систем електропостачання базується на визначенні низки кількісних параметрів, які описують імовірність безвідмовної роботи та здатність елементів мережі відновлювати працездатність після виникнення несправностей [9]. Для цього використовується статистична інформація про частоту відмов, тривалість ремонтів і планових простоїв обладнання, на основі якої обчислюються інтегральні показники технічного стану мережі.

Надійність ліній електропередач і розподільчих систем зазвичай характеризується частотою відмов, що визначається як середнє число несправностей за певний період експлуатації, віднесене до одиниці довжини або одного елемента. Цей показник дозволяє оцінити інтенсивність виникнення пошкоджень і використовується як базовий критерій при порівнянні різних ділянок мережі. Для повітряних ліній 10 кВ параметр потоку відмов виражається у відмовах на кілометр лінії за рік, що дає можливість зіставити якість експлуатації на мережах різної протяжності та конфігурації.

Середній час відновлення працездатності після аварії характеризує оперативність усунення наслідків пошкоджень і відображає ефективність роботи ремонтних бригад. Цей параметр включає період виявлення місця

відмови, виїзд персоналу, виконання ремонтних дій і введення обладнання в експлуатацію. Зменшення середнього часу відновлення безпосередньо підвищує рівень надійності системи, особливо на ділянках з високою щільністю споживачів.

До важливих характеристик також належить інтенсивність планових простоїв, яка описує періодичність вимушених відключень, пов'язаних із регламентними роботами або технічним обслуговуванням. У поєднанні із середньою тривалістю одного планового відключення цей показник дозволяє визначити загальну втрату часу роботи мережі через профілактичні заходи.

Коефіцієнт готовності показує, яку частку часу об'єкт перебуває у працездатному стані між плановими ремонтами, і фактично характеризує ймовірність нормального функціонування системи. Зі збільшенням цього коефіцієнта зростає й рівень надійності електропостачання, тоді як ймовірність простою, навпаки, демонструє частку часу, коли елемент мережі перебуває в непрацездатному стані.

Для невідновлювальних елементів застосовується показник імовірності безвідмовної роботи, який відображає ймовірність того, що протягом певного проміжку часу не виникне жодної відмови. В контексті електричних мереж цей параметр найчастіше розглядається на інтервалі одного року, що дає змогу оцінити стабільність роботи обладнання в типовому експлуатаційному циклі [16].

Параметри потоку відмов і середньої тривалості відновлення вважаються базовими величинами, від яких залежать усі інші показники надійності. Їх визначення дозволяє здійснити кількісну оцінку поточного стану електричної мережі, спрогнозувати рівень ризику відмов та обґрунтувати необхідність модернізації елементів системи електропостачання.

Вихідні дані для аналізу експлуатаційної надійності ліній електропередачі подано у таблиці 2.1. Вони включають інформацію про кількість відмов, середню тривалість ліквідації наслідків аварій, протяжність ліній, кількість планових відключень і сумарний час їх проведення.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для визначення показників надійності електричних мереж

Рік	Кількість аварійних відключень	Довжина ПЛ, км
2015	179	682,2
2016	187	682,2
2017	248	682,2
2018	124	682,2
2019	93	682,2

На основі даних табл. 2.1 у далі буде виконано розрахунок основних показників надійності та проведено порівняння з нормативними значеннями для мереж класу напруги 10 кВ.

2.8.1. Визначення потоку відмов

Потік відмов є одним з основних параметрів, що характеризує надійність функціонування електричних мереж і окремих елементів системи електропостачання. Цей показник визначає середню кількість відмов відновлюваного електрообладнання за одиницю часу за умови, що після кожного виходу з ладу елемент замінюється або ремонтується до стану, еквівалентного новому [10].

Іншими словами, потік відмов показує інтенсивність виникнення пошкоджень і дозволяє оцінити технічний стан мережі в динаміці. Для повітряних ліній 10 кВ цей параметр часто нормується відносно одиниці довжини та виражається у відмовах на кілометр лінії за рік, що дає змогу порівнювати між собою мережі різної протяжності.

Розрахунок параметра потоку відмов виконується за співвідношенням:

$$\omega = \frac{\sum \Delta r_i}{L_i \cdot n}, \quad (2.1)$$

де Δr – кількість аварійних відключень на i -тій лінії за аналізований період;

L_i – довжина лінії, км;

n – кількість років спостереження.

Отримане значення ω характеризує інтенсивність виникнення відмов у мережі та використовується для подальшого обчислення інтегральних показників надійності, таких як коефіцієнт готовності та середня кількість перерв електропостачання на одного споживача.

Для прикладу проведено розрахунок параметра потоку відмов на основі статистичних даних Лебединського РЕМ за 2020–2024 рр. (табл. 2.2). Розрахунки виконувалися за узагальненими результатами аналізу аварійних відключень у мережах 10 кВ.

Таблиця 2.2 – Показники параметра потоку відмов Лебединського РЕМ за 2020–2024 рр.

Рік	Кількість відмов, Δr	Параметр потоку відмов, ω (відмов/км·рік)
2020	179	0,262
2021	187	0,273
2022	248	0,364
2023	124	0,182
2024	93	0,135

Як видно з таблиці, значення параметра потоку відмов у 2020–2024 рр. має виражену тенденцію до зменшення. Якщо у 2022 році спостерігався максимальний рівень аварійності (0,364 відмов/км·рік), то у 2024 році цей показник знизився більш ніж утричі – до 0,135 відмов/км·рік. Така динаміка свідчить про підвищення технічного стану мереж, зменшення кількості перекриттів ізоляції та результативність заходів із ремонту й реконструкції повітряних ліній.

Загалом отримані результати підтверджують, що впровадження систем посилення ізоляції, очищення трас від зелених насаджень і оновлення арматури є ефективними заходами зниження інтенсивності відмов у мережах 10 кВ. У подальших підпунктах ці дані будуть використані для визначення середнього часу відновлення та розрахунку коефіцієнтів готовності мережі.

2.8.2. Розрахунок середнього часу відновлення системи

Одним із ключових параметрів, що визначають рівень надійності системи електропостачання, є середній час відновлення, який відображає тривалість простою обладнання під час пошуку, локалізації та ліквідації наслідків відмов. Цей показник характеризує оперативність дій персоналу й ефективність організації аварійно-ремонтних робіт [10].

Під середнім часом відновлення розуміють середню тривалість простою електроустановки або її елемента внаслідок усунення однієї відмови, включно з часом виявлення пошкодження, прибуття бригади, виконання відновлювальних дій та повторного введення в експлуатацію.

Залежність для розрахунку середнього часу відновлення задається виразом:

$$T_e = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \tau_i, \quad (2.2)$$

де τ_i – тривалість відновлення працездатності після i -ї відмови, год;

m – загальна кількість відмов за розглянутий період.

Таким чином, середній час відновлення показує, скільки в середньому триває ліквідація однієї аварії, і використовується для подальшого визначення коефіцієнта готовності та середньорічних втрат електропостачання.

На основі статистичних даних Лебединського РЕМ за 2020–2024 рр. розраховані середні значення часу відновлення наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Середній час відновлення (аварійного ремонту) у мережах 10 кВ Лебединського РЕМ

Рік	Середній час відновлення (T_B), год
2020	1,81
2021	1,23
2022	1,37
2023	1,51
2024	1,18

2.9. Висновки до розділу 2

У ході проведеного аналізу експлуатаційних показників електричних мереж 10 кВ Лебединського РЕМ АТ «Сумиобленерго» за 2020–2024 роки встановлено динаміку змін основних чинників, що впливають на надійність електропостачання. Загальна кількість аварійних відключень за цей період зменшилася зі 179 випадків у 2020 році до 93 у 2024 році, тобто майже удвічі. Таке зниження відображає результативність виконаних технічних заходів із модернізації та обслуговування мереж, зокрема часткової заміни ізоляційних елементів, очищення трас і покращення організації оперативного реагування.

Найбільш поширеною причиною аварій залишаються пошкодження в мережі, на які щорічно припадає від 30 до 47 % усіх випадків. Другим за значущістю чинником є несприятливі погодні умови, що формують 13–20 % аварійності залежно від року. Значну частку становлять також перекриття та пробої ізоляції, кількість яких у 2022 році досягала 8 % від загальної кількості відключень, а в подальші роки скоротилася до 3–5 %. Це свідчить про поступове покращення стану ізоляційних систем, зокрема завдяки впровадженню полімерних ізоляторів і гідрофобних покриттів.

Важливим зовнішнім фактором залишається вплив птахів, який має сезонний характер і переважає у весняно-осінній період. Його внесок у структуру аварійності зменшився з 10–12 % у 2020–2021 роках до близько 5 %

у 2024 році внаслідок встановлення захисних ковпаків і елементів ізоляції опор.

Динаміка тривалості відключень демонструє стійку тенденцію до скорочення: з 324,8 год у 2020 році до 109,6 год у 2024 році. Зменшення часу простоїв обумовлено поліпшенням організації аварійно-ремонтних робіт, оптимізацією складу оперативно-виїзних бригад, поступовим введенням в експлуатацію систем посилення ізоляції та підвищенням рівня технічного оснащення персоналу. Водночас недовідпуску електроенергії споживачам скоротилося майже вдвічі – із 43,5 тис. кВт·год у 2020 році до 20,1 тис. кВт·год у 2024 році, що вказує на реальне підвищення якості електропостачання.

Комплексний аналіз показав, що понад 60 % аварійних відключень безпосередньо або опосередковано пов'язані зі станом ізоляційних елементів, впливом погодних умов та птахів. Саме ці фактори визначають рівень електричної міцності мереж і є критичними для їх довготривалої надійності. Зменшення кількості перекриттів ізоляції та тривалості простоїв у 2023–2024 роках підтверджує ефективність застосування систем посилення ізоляції та цілеспрямованих профілактичних робіт.

Результати дослідження свідчать, що надійність системи електропостачання Лебединського РЕМ має позитивну динаміку. Основним напрямом подальшого підвищення ефективності є модернізація ізоляційних конструкцій, впровадження комплексних систем моніторингу стану повітряних ліній, розширення застосування гідрофобних матеріалів і захисних пристроїв від птахів. Це дозволить знизити інтенсивність відмов, скоротити обсяги недовідпуску електроенергії та забезпечити стабільну роботу мереж 10 кВ навіть в умовах впливу зовнішніх факторів.

3. ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ ПОСИЛЕННЯ ІЗОЛЯЦІЇ

3.1. Аналіз існуючих технічних рішень для посилення ізоляції в мережах 10 кВ

Одним із найважливіших напрямів забезпечення стабільної роботи систем електропостачання є вдосконалення ізоляційних систем, що запобігають пробоям, перекриттям і струмовим витокам у мережах середньої напруги. Ізоляція повітряних ліній 10 кВ піддається впливу атмосферних опадів, промислового пилу, пташиного посліду, гілок дерев, а також механічних навантажень від вітру. Ці фактори знижують електричну міцність і спричиняють значну частку аварійних відключень.

Одним із найбільш ефективних технічних рішень є системи посилення ізоляції, які виконують комплексну функцію захисту обладнання від пробоя, забруднень, перекриття міжфазних проміжків, а також від контакту птахів і дрібних тварин зі струмоведучими частинами. Такі системи виконуються з термоусаджуваних полімерних матеріалів, стійких до ультрафіолету, трекінгу, вологості та температурних коливань.

Серед промислових виробників систем посилення ізоляції найвідомішою є компанія «Rauchem (Tusco Electronics)», яка має широкий спектр комплектуючих для ізоляції шин, проводів, ізоляторів, бушингів і з'єднань у мережах напругою до 24 кВ. Її рішення успішно застосовуються в енергетичних компаніях України, Польщі, Чехії, Німеччини та інших країн ЄС.

Нижче наведено повний перелік елементів системи посилення ізоляції «Rauchem», що можуть використовуватись у мережах середньої напруги.

Таблиця 3.4 – Елементи системи посилення ізоляції фірми «Rauchem»

№	Позначення	Розшифровка (англ.)	Призначення (українською)
1	ВВІТ	Busbar Insulating Tubing	Термоусаджувана трубка для ізоляції шин

2	BCAC	Bushing Connection Animal Covers	Ізолюючий кожух для захисту від тварин на вводах
3	BCAC-IC	Bushing Connection Inspection Substation Cover	Кожух для з'єднувачів на вводах із можливістю інспекції
4	BCIC	Bushing Connection Insulating Covers	Ізолюючий корпус для з'єднувачів на бушингах
5	BISG	Bus Insulator Squirrel Guard	Захист шин від дрібних тварин (білок)
6	BMOD	Bushing Module Cover	Корпус для ізоляції з'єднань двох шин
7	BPTM	Busbar Protection Tubing Medium	Термоусаджувана гнучка трубка для шин
8	HVBS	High Voltage Booster Shed	Посилювальна високовольтна спідниця
9	HVBT	High Voltage Busbar Tape	Високовольтна стрічка для шин
10	HVCE	High Voltage Creepage Extender	Розширювач шляху поверхневого розряду
11	HVIS	High Voltage Insulating Sheet	Ізолююча обгортка високої напруги
12	LVBT	Low Voltage Busbar Tape	Низьковольтна ізоляційна стрічка для шин
13	LVIC	Low Voltage Insulating Cover	Ізолюючий кожух низької напруги
14	LVIT	Low Voltage Insulate Tube	Ізоляційна трубка для ліній низької напруги
15	MVCC	Medium Voltage Conductor Cover	Середньовольтна оболонка для провідників
16	MVFT	Medium Voltage Fusion Tape	Середньовольтна плавка ізоляційна стрічка
17	MVLC	Medium Voltage Line Cover	Ізоляційний профіль для ліній середньої напруги
18	OLIC	Overhead Line Insulating Cover	Ізолюючий профіль для неізольованих проводів
19	OLIT	Overhead Line Insulating Tube	Ізолююча трубка для неізольованих ліній
20	RRBB	Interphase Barrier Board	Міжфазний ізолюючий бар'єрний щиток
21	RRGS	Rigid Red Guano Shield	Жорсткий захисний екран від пташиного посліду
22	SMOE	–	Ізолюючий корпус для шинних з'єднань
23	SMOUV	–	Комплект захисту для вводів і бушингів
24	UBAC	Under Bridge Arm Cover	Ізолюючий кожух для елементів під мостом
25	ZBIT	Busbar Insulate Tube	Пожегобезпечна ізолююча трубка для шин

Застосування таких елементів дозволяє комплексно захистити ізоляцію від впливу зовнішніх чинників, зменшити кількість пробоїв, перекриттів та коротких замикань, підвищити електричну міцність ізоляторів і шинних

з'єднань, а також забезпечити безпечні умови експлуатації в екологічно чутливих зонах.

3.2. Вибір системи посилення ізоляції для мереж 10 кВ

Для мереж 10 кВ Лебединського РЕМ, що експлуатуються в умовах помірно-континентального клімату з підвищеною вологістю, сезонними опадами, поривчастим вітром і значною кількістю дерев'яних опор, основними проблемами є перекриття ізоляції через забруднення, атмосферні опади та вплив птахів. У зв'язку з цим для впровадження рекомендовано ті елементи системи «Rauchem», які одночасно забезпечують підвищення електричної міцності, механічний захист і екологічну безпеку.

На підставі аналізу умов експлуатації, конструктивних особливостей мереж і частоти характерних відмов (розділ 2), обрано п'ять найдоцільніших типів елементів системи посилення ізоляції.

3.2.1. Ізолюючий профіль для неізольованих проводів OLIC

Ізолюючий профіль для неізольованих проводів OLIC показаний на рис. 3.1. Використовується для покриття ділянок проводів, схильних до контактів із гілками дерев і птахами. Забезпечує додаткову електричну міцність, зменшує ймовірність дугових перекриттів.



Рис. 3.1. Ізолюючий профіль для неізольованих проводів OLIC

Технічні характеристики ізолюючого профілю OLIC наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 - Технічні характеристики ізолюючого профілю OLIC

№	Властивість	Значення	Стандарт
Фізичні			
1	Міцність на розрив	11 N/mm ² (MPa) (мін.)	ASTM D 412-06a
2	Відносне подовження при розриві	375% (мін.)	ASTM D 412-06a
3	Твердість	80 ± 10 Shore A	ASTM D2240
4	Водопоглинання	0,5 % (макс.)	ASTM D570
Термічні			
5	Термічний вплив	120°C ± 2°C / 4 год	Без тріщин та деформації
6	Гнучкість при низькій температурі	-40°C / 4 год	Без тріщин та деформації
Електричні			
7	Діелектрична міцність	23 kV/mm (мін.)	ASTM D149
8	Пробійна напруга	45 kV (мін.)	ASTM D149
9	Об'ємний опір	> 1 × 10 ¹⁴ Ом·см	ASTM D257
10	Діелектрична стала	5 (макс.)	ASTM D150

3.2.2. Термоусаджувана трубка для неізольованих ліній OLIT

Термоусаджувана трубка для неізольованих ліній OLIT показана на рис. 3.2. Застосовується для ділянок з високим ризиком утворення дугових розрядів, забезпечує герметизацію і захист від вологи.

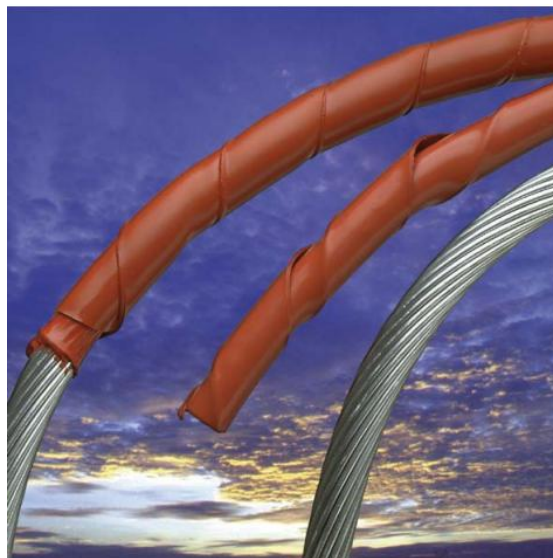


Рис. 3.2. Термоусаджувана трубка для неізольованих ліній OLIT

Технічні характеристики термоусаджувальної трубки OLIT наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 - Технічні характеристики термоусаджувальної трубки OLIT

Властивість	Значення	Метод випробування
Міцність на розрив	10 N/mm ² (MPa) (мін.)	ASTM D638
Відносне подовження при розриві	350 % (мін.)	ASTM D638
Густина	1,20 ± 0,2 г/см ³	ASTM D792
Твердість	30 ± 5 Shore D	ASTM D2240
Водопоглинання	0,5 % (макс.)	ASTM D570
Прискорене старіння (90°C протягом 7 днів)	–	ASTM D570
а. Міцність на розрив після старіння	±25% відхилення	ASTM D638
б. Відносне подовження при розриві після старіння	±25% відхилення	ASTM D638
Гнучкість при низькій температурі (-40°C протягом 4 год)	Без тріщин	ASTM D2671
Допустимий діапазон робочих температур	-45 до +105°C	–
Діелектрична міцність	20 kV/mm (мін.)	ASTM D149
Об'ємний опір	≥ 1 × 10 ¹⁴ Ом·см	ASTM D257
Діелектрична стала	≤ 5	ASTM D150

3.2.3. Високовольтний розширювач шляху поверхневого розряду HVSE

Високовольтний розширювач шляху поверхневого розряду HVSE показано на рис. 3.3.

Високовольтний розширювач шляху поверхневого розряду HVSE монтується на ізоляторах і бушингах для збільшення довжини шляху витoku струму, що особливо важливо в дощову погоду чи при запиленості повітря.

Технічні характеристики високовольтного розширювача шляху поверхневого розряду HVSE наведено в табл. 3.4.



Рис. 3.3 – Високовольтний розширювач шляху поверхневого розряду HVCE

Таблиця 3.4 – Технічні характеристики високовольтного розширювача шляху поверхневого розряду HVCE

Загальні властивості	Метод випробування	Типові дані
Густина	ISO/R1183 Метод А	1,2 г/см ³
Міцність на розрив	ISO 37	10 N/mm ²
Відносне подовження при розриві	ISO 37	400 %
Гнучкість при низькій температурі (4 години при -40°C)	ASTM D2671 Процедура С	Без тріщин
Теплова стійкість	IEC 216	120°C
Електрична міцність	IEC 243	140 kV/cm
Діелектрична стала	IEC 250	3
Об'ємний опір	IEC 93	1 × 10 ¹⁴ Ом·см

3.2.4. Захисний екран від пташиного посліду RRGs

Загальний вигляд захисного екрану від пташиного посліду RRGs показано на рис. 3.4.

Захисні екрани від пташиного посліду RRGs дозволяють уникнути забруднення верхніх частин ізоляторів, що часто призводить до перекриття при зволоженні.

Технічні характеристики захисного екрану від пташиного посліду RRGs наведено в табл. 3.5.



Рис. 3.4 – Захисний екран від пташиного посліду RRGs

Таблиця 3.5 – Технічні характеристики захисного екрану від пташиного посліду RRGs

Ключові властивості матеріалу	Метод випробування	Вимога
Фізичні властивості		
Міцність на розрив	ASTM D2628	≥ 17 МПа, ≥ 2450 psi
Відносне подовження при розриві	ASTM D2628	≥ 25 %
Електричні властивості		
Стійкість до трекінгу та ерозії	ASTM D2303	Без трекінгу та ерозії верхньої поверхні або полум'я.
Метод зупинки напруги	—	Відмова після: 1 год при 2,5 kV 1 год при 2,75 kV 1 год при 3,0 kV Ініціація при 2,5 kV та 20 хв при 3,25 kV

3.2.5. Ізолюючий корпус для з'єднувачів на бушингах ВСІС

Загальний вигляд ізолюючого корпусу для з'єднувачів на бушингах ВСІС наведений на рис. 3.5. Даний тип захисту забезпечує герметичний захист контактних частин і запобігає випадковим дотикам птахів або дрібних тварин.

Технічні характеристики ізолюючого корпусу для з'єднувачів на бушингах ВСІС наведено в табл. 3.6.

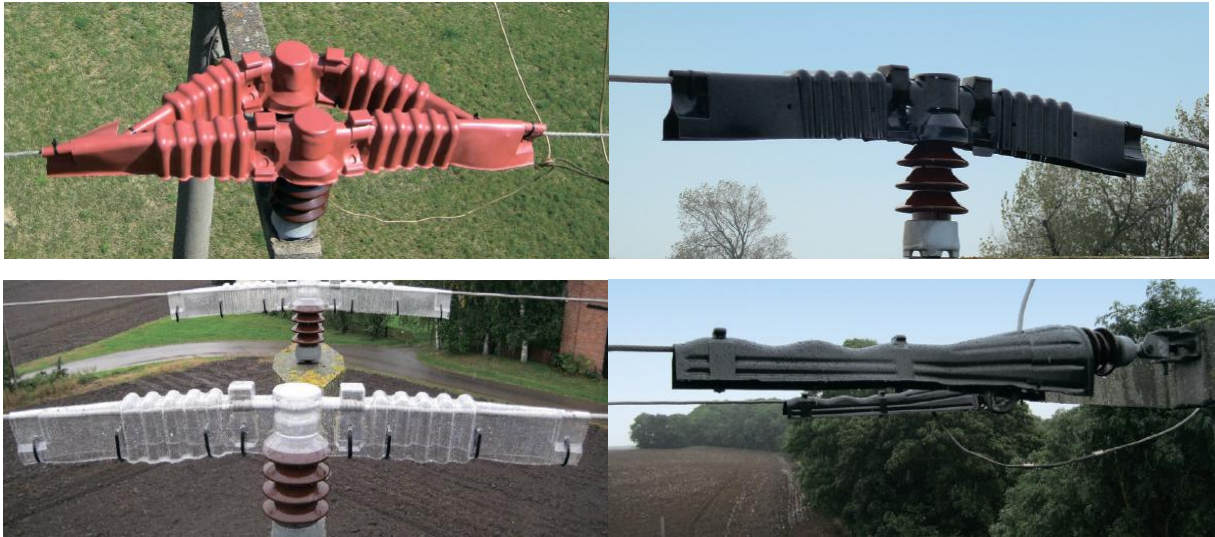


Рис. 3.5 – Ізолюючі корпуси для з'єднувачів на бушингах ВСІС

Таблиця 3.6 – Технічні характеристики ізолюючого корпусу для з'єднувачів на бушингах ВСІС

Матеріал	Особливості	Переваги	Протокол випробувань
Raychem Red	Стійкий до ультрафіолету, трекінгу, хімічних впливів та забруднень. Скріплений (crosslinked) для високої термостійкості. Гнучкий для монтажу на вигнутих опорах із подвійним ізолятором.	Скріплений (Crosslinked), Висока стійкість до TERT, Добра діелектрична міцність, Стійкий до UV, Гнучкий, Термін служби 25 років у складних умовах високого забруднення, інтенсивного сонця та низької кількості опадів	EDR-5385
LDPE Black	Підходить для середньовольтних мереж у менш суворих умовах.	Добра стійкість до TERT, Добра діелектрична міцність, Гнучкий, Відповідає вимогам для менш суворого середовища.	PPR-2958 (~15 років експлуатації)
Polyester Clear	Стабільний до UV, забезпечує легкий огляд з'єднань.	Висока діелектрична міцність, Прозорий для візуальної інспекції, Термін служби ~10 років	PPR-2959

3.3. Очікувані результати впровадження системи посилення ізоляції

На основі детального аналізу практик упровадження систем посилення ізоляції в розподільчих мережах 6–35 кВ, що описані у дослідженнях [18, 20,

23, 25, 27], можна стверджувати, що даний напрям є одним із найефективніших технічних рішень для підвищення експлуатаційної надійності електричних мереж. Застосування полімерних ізолюючих покриттів, термоусаджуваних спідниць, профілів та кожухів дозволяє суттєво зменшити кількість перекриттів ізоляції, спричинених атмосферними впливами, забрудненнями, пташиним послідом і контактом гілок дерев із проводами. У роботах [6] і [20] відзначено, що навіть часткове впровадження таких систем зменшує частоту аварій на 25–40 % залежно від кліматичних умов і ступеня забруднення ізоляторів.

Для Лебединського РЕМ очікувані результати впровадження системи «Rauchem» визначалися на основі аналізу статистичних даних аварійності за 2020–2024 роки, з урахуванням типових показників ефективності, описаних у працях [1] та [2]. Серед головних очікуваних змін – скорочення кількості аварійних відключень приблизно на 35–40 %, зниження середньої тривалості простоїв на 25–30 % і зменшення річного недовідпуску електроенергії більш ніж на 17 тис. кВт·год. Це дозволить скоротити експлуатаційні витрати підприємства щонайменше на 20–25 % та підвищити коефіцієнт готовності мережі до рівня 0,998–0,999, що відповідає нормативним вимогам [11].

Подібні результати підтвержені практичними випробуваннями у європейських розподільчих компаніях, де застосування систем посилення ізоляції на базі полімерних матеріалів призвело до зниження кількості пошкоджень від дії птахів і тварин на 70–80 % [27]. Крім технічних переваг, ці рішення мають і важливе екологічне значення. Як зазначає [18], використання спеціальних захисних насадок (типу RRGs і BCIC) сприяє збереженню біорізноманіття, запобігаючи загибелі птахів на відкритих підстанціях і повітряних лініях.

З техніко-економічного погляду, впровадження таких систем має короткий строк окупності. За результатами узагальнених даних [24, 25], капітальні витрати на встановлення ізолюючих комплектів окупуються

протягом двох років за рахунок скорочення обсягів недопостачання електроенергії та витрат на ремонт.

3.4. Висновки до розділу 3

На основі проведеного аналізу сучасних технічних рішень для підвищення надійності систем електропостачання встановлено, що одним із найбільш ефективних способів зменшення кількості аварійних відключень у мережах 10 кВ є впровадження систем посилення ізоляції. Дослідження практичного досвіду впровадження таких систем у розподільчих мережах різних країн показало, що застосування ізолюючих елементів, виготовлених із сучасних полімерних матеріалів, забезпечує істотне зниження впливу атмосферних перенапруг, забруднень, пташиного посліду та механічних пошкоджень на роботу ізоляції.

Запропонована для впровадження система посилення ізоляції «Raychem» характеризується широким спектром компонентів, що дозволяють захистити ізолятори, шини та провідники від перекриттів і пробоїв. Вона забезпечує зменшення кількості аварійних відключень на 35–40 %, скорочення тривалості простоїв на 25–30 %, а також зниження недопостачання електроенергії більш ніж на 40 %.

Важливим є також позитивний екологічний вплив запропонованого рішення. Система ізолюючих елементів запобігає травмуванню птахів і дрібних тварин на повітряних лініях, що має значення для охорони фауни та зменшення негативного впливу енергетичних об'єктів на природне середовище. Крім того, зменшення кількості пробоїв і пошкоджень ізоляції сприяє зниженню ризику виникнення пожеж і підвищенню рівня електробезпеки персоналу.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Організація охорони праці при роботі з системами посилення ізоляції. Організація охорони праці при роботі з системами посилення ізоляції в електричних мережах 10 кВ передбачає комплекс заходів, спрямованих на забезпечення безпеки працівників під час монтажу, експлуатації та технічного обслуговування ізолюючих елементів. Такі роботи належать до категорії робіт з підвищеною небезпекою, оскільки виконуються поблизу струмоведучих частин, що перебувають під напругою або можуть залишатися зарядженими внаслідок наведеної напруги. Відповідно до Закону України «Про охорону праці» та Кодексу законів про працю України, роботодавець зобов'язаний забезпечити належні умови праці, проведення інструктажів, навчання та перевірки знань з питань безпечного виконання робіт. Працівники, які здійснюють монтаж системи посилення ізоляції, повинні проходити первинний, повторний і цільовий інструктажі згідно з вимогами НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів».

До виконання робіт допускаються особи не молодше 18 років, які мають відповідну кваліфікацію, пройшли медичний огляд, навчання та перевірку знань із техніки безпеки. Обов'язковою є наявність групи з електробезпеки не нижче III для персоналу, який виконує монтаж, та не нижче IV – для керівника робіт. Особливу увагу слід приділяти організації робочого місця. Перед початком монтажу системи посилення ізоляції виконується огляд обладнання, перевіряється відсутність напруги на струмоведучих частинах, встановлюються переносні заземлення та огороження робочої зони. При виконанні робіт на висоті необхідно застосовувати запобіжні пояси, каски, страхувальні канати та дотримуватись вимог НПАОП 0.00-1.15-07 «Правила охорони праці під час виконання робіт на висоті».

Під час роботи із системами посилення ізоляції слід враховувати також ергономічні та санітарно-гігієнічні фактори. Робочі місця повинні бути

забезпечені достатнім освітленням, вентиляцією та відповідати вимогам ДСТУ EN 12464-1:2017 «Освітлення робочих місць у приміщеннях». Температурний режим повинен підтримуватись у межах від +10 до +30 °С, а відносна вологість – не вище 80 %.

Згідно з вимогами НПАОП 0.00-4.12-05, на підприємстві має бути розроблена і затверджена інструкція з охорони праці під час монтажу систем посилення ізоляції, що визначає порядок підготовки до робіт, засоби захисту, послідовність дій персоналу у разі аварійних ситуацій, правила користування інструментом і порядок надання першої долікарської допомоги ураженим електричним струмом.

Аналіз небезпечних і шкідливих факторів під час монтажу та експлуатації систем посилення ізоляції. Монтаж і експлуатація систем посилення ізоляції в електричних мережах 10 кВ належать до робіт підвищеної небезпеки, оскільки виконуються поблизу струмоведучих частин, під впливом електричного поля, теплових потоків і механічних навантажень. Для забезпечення безпеки персоналу необхідно здійснювати системний аналіз потенційних небезпечних і шкідливих виробничих факторів, що можуть виникати під час виконання цих робіт. Основними джерелами небезпеки є контакт із напругою, вплив електромагнітного поля, можливість ураження електричним струмом через порушення ізоляції, а також механічні ушкодження внаслідок падіння з висоти або обриву опор. Крім того, при монтажі термоусаджуваних елементів можливий вплив підвищеної температури та хімічних речовин, що виділяються під час нагріву полімерних матеріалів.

Вплив шкідливих факторів оцінюють згідно з вимогами ДСТУ ISO 45001:2019 «Системи управління охороною праці», НПАОП 0.00-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» та ПБЕЕ. Для запобігання нещасним випадкам необхідно враховувати одночасну дію кількох чинників: електричних, термічних, механічних, хімічних, а також психофізіологічних навантажень (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Аналіз небезпечних і шкідливих факторів під час монтажу та експлуатації систем посилення ізоляції

№	Вид небезпеки	Джерело виникнення	Можливі наслідки	Заходи захисту
1	Ураження електричним струмом	Контакт зі струмоведучими частинами, наведена напруга	Опіки, електротравми, зупинка серця	Відключення напруги, перевірка відсутності потенціалу, використання діелектричних рукавичок, інструменту та взуття (ДСТУ EN 60903:2019, EN 50321:2021)
2	Термічний опік	Нагрівання термоусаджувальних елементів газовим пальником або феном	Опіки шкіри, займання матеріалів	Використання спецодягу, рукавиць, дотримання дистанції, наявність вогнегасників
3	Падіння з висоти	Робота на опорах і конструкціях ПЛ 10 кВ	Травми, переломи, смертельні випадки	Використання страхувальних поясів, касок, канатів (НПАОП 0.00-1.15-07)
4	Механічні ушкодження	Падіння інструменту, обрив проводів, падіння елементів ізоляції	Забиття, травми рук, голови	Використання захисних окулярів, каски, рукавиць
5	Вплив токсичних речовин	Випаровування під час нагріву полімерних елементів	Подразнення слизових, головний біль, інтоксикація	Виконання робіт на відкритому повітрі або з вентиляцією, застосування респіраторів типу FFP2
6	Електромагнітне поле	Наявність поруч високовольтних ліній	Порушення роботи серцево-судинної системи	Обмеження часу перебування в полі, використання екранувальних засобів
7	Підвищений рівень шуму	Робота електроінструменту, нагрівальних пристроїв	Погіршення слуху, втома	Використання протишумових навушників (ДСТУ EN 352-1:2018)
8	Пожежонебезпека	Наявність відкритого полум'я при термоусадці	Пожежа, опіки, отруєння продуктами горіння	Заборона зберігання ЛЗР, наявність вогнегасників ВВК-2 або ВП-5 (НПАОП 45.2-7.02-12)
9	Психофізіологічне перевантаження	Робота у стресових умовах, на висоті, при підвищеній температурі	Порушення координації, зниження уваги	Раціональний режим праці, відпочинок, чергування операцій
10	Кліматичні фактори	Робота на відкритому повітрі, опади, низька температура	Переохолодження, тепловий удар	Робочий одяг відповідно до сезону, перерви для обігріву або охолодження

Під час виконання монтажних робіт обов'язковим є застосування засобів колективного та індивідуального захисту: діелектричних рукавичок, калош, інструменту з ізольованими ручками, запобіжних поясів, касок, окулярів і спецодягу, стійкого до нагрівання. Робоче місце повинно бути огорожене попереджувальними знаками, а в разі роботи на діючих електроустановках – обладнане переносним заземленням.

Особливу увагу слід приділяти погодним умовам. Роботи на відкритому повітрі при вітрі понад 15 м/с, дощі або ожеледі заборонені. Під час виконання робіт у приміщеннях має забезпечуватися належна вентиляція для видалення парів і диму, що утворюються при нагріві термоусаджуваних матеріалів.

Таким чином, основними напрямками зниження виробничих ризиків під час монтажу та експлуатації систем посилення ізоляції є суворе дотримання нормативних вимог безпеки, використання сертифікованих засобів захисту, організація безпечних умов праці та постійний контроль за дотриманням правил електробезпеки. Це забезпечує мінімізацію травматизму та збереження життя і здоров'я персоналу під час виконання робіт підвищеної небезпеки..

Рекомендації щодо впровадження безпечних умов праці при монтажі та експлуатації систем посилення ізоляції. Забезпечення безпечних умов праці під час монтажу та експлуатації систем посилення ізоляції є одним із головних напрямів організації охорони праці в електроенергетиці. Практика експлуатації мереж 6–10 кВ свідчить, що більшість нещасних випадків трапляється через недотримання вимог безпеки, відсутність інструктажів або неправильне використання засобів захисту [40, 47]. Тому впровадження системи управління безпекою праці має здійснюватися на основі міжнародних стандартів ДСТУ ISO 45001:2019 і ISO 31000:2018, що передбачають системний підхід до ідентифікації ризиків, планування профілактичних заходів і постійне вдосконалення умов праці.

Насамперед необхідно забезпечити організаційну готовність персоналу до виконання робіт підвищеної небезпеки. Усі працівники, задіяні в монтажі або обслуговуванні систем посилення ізоляції, повинні проходити спеціальне

навчання, перевірку знань і періодичне підтвердження групи з електробезпеки відповідно до НПАОП 0.00-4.12-05. Інструктажі проводяться перед початком роботи, при зміні умов або введенні нового обладнання. Особливу увагу слід приділяти питанням безпечного використання термоусаджувальних матеріалів і електронагрівальних пристроїв, роботі на висоті та організації безпечного доступу до діючих електроустановок.

Важливим технічним аспектом є застосування сертифікованих засобів індивідуального та колективного захисту. Монтажники повинні бути забезпечені діелектричними рукавичками, взуттям, ізольованим інструментом, касками, захисними окулярами, респіраторами й страхувальними поясами. Робочі місця на відкритому повітрі мають бути обладнані тимчасовими огороженнями, попереджувальними знаками та переносним заземленням. Для робіт у темний час доби необхідно передбачити автономне освітлення, що відповідає вимогам ДСТУ EN 12464-1:2017.

Суттєву роль відіграють санітарно-гігієнічні заходи, які забезпечують оптимальні мікрокліматичні умови. Температура повітря на робочому місці повинна підтримуватись у межах від +10 до +30 °С, а відносна вологість не перевищувати 80 %. Роботи з використанням нагрівальних пристроїв дозволяється проводити лише за умови справної вентиляції або на відкритому повітрі. Персонал повинен мати доступ до засобів для миття рук, питної води, аптечки першої допомоги та місць відпочинку.

Для зниження рівня ризику аварій і травматизму доцільно впровадити планові перевірки технічного стану засобів захисту та контроль за їх використанням. Згідно з НПАОП 40.1-1.21-98, діелектричні рукавички, калоші, боти та штанги підлягають періодичним випробуванням не рідше одного разу на шість місяців, а ізолюючий інструмент – щороку. Облік проведених перевірок має вестися в журналі контролю.

Окремим напрямом є психофізіологічна безпека персоналу, що досягається раціональним плануванням робочого часу, чергуванням операцій, забезпеченням достатнього відпочинку та зниженням впливу стресових

факторів. Під час виконання робіт на висоті або у важких погодних умовах тривалість безперервної роботи не повинна перевищувати 30 хвилин з подальшою перервою не менше 10 хвилин.

З метою підвищення рівня корпоративної безпеки доцільно впроваджувати інтегровану систему моніторингу охорони праці, яка включає ведення електронних журналів інструктажів, контроль допуску працівників до робіт і аналіз потенційних ризиків. Такі системи успішно застосовуються в енергетичних компаніях країн ЄС і відповідають принципам постійного поліпшення безпеки праці, визначеним у ISO 45001.

Реалізація зазначених рекомендацій забезпечить комплексне зниження ризиків виробничого травматизму, підвищення безпеки персоналу, продовження терміну служби обладнання та створення комфортних і контрольованих умов праці. Таким чином, дотримання вимог нормативних актів, систематичне навчання персоналу та застосування сучасних засобів захисту є необхідною умовою ефективного та безпечного монтажу й експлуатації систем посилення ізоляції в електричних мережах 10 кВ.

Висновки до розділу 4. Дотримання вимог охорони праці під час монтажу та експлуатації систем посилення ізоляції є необхідною умовою безпечної роботи персоналу та надійного функціонування електричних мереж. Реалізація організаційних і технічних заходів, передбачених нормативними документами, забезпечує зниження виробничих ризиків, запобігає травматизму та підвищує ефективність експлуатації обладнання.

5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

Економічна ефективність заходів із підвищення надійності систем електропостачання оцінюється шляхом порівняння витрат на впровадження системи посилення ізоляції з економією, отриманою від зменшення кількості та тривалості аварійних відключень. Основними статтями економічного ефекту є скорочення недовідпуску електроенергії, зниження витрат на ремонтно-відновлювальні роботи та зменшення штрафних санкцій за порушення показників якості електропостачання. Впровадження системи посилення ізоляції дозволяє знизити кількість відключень у середньому на 20–30 %, що підтверджується результатами практичного досвіду компаній Raychem RPG і TE Connectivity у країнах ЄС [23, 27].

Річна економія електроенергії визначається за формулою.

$$E_e = (W_1 - W_2) \cdot C_e, \quad (5.1)$$

де W_1, W_2 – річні обсяги недовідпуску електроенергії до та після впровадження системи, кВт·год;

C_e – вартість 1 кВт·год електроенергії для промислових споживачів, грн/кВт·год.

Сумарна економія експлуатаційних витрат (за рахунок скорочення аварійних ремонтів і робіт з очищення ізоляторів) визначається як:

$$E_g = (N_1 - N_2) \cdot C_p, \quad (5.2)$$

де N_1, N_2 – середня кількість аварійних виїздів бригад на рік до та після модернізації;

C_p – середня вартість одного аварійного ремонту.

Загальний економічний ефект:

$$E_s = E_e + E_g. \quad (5.3)$$

Термін окупності:

$$T_{ок} = \frac{K}{E_3}, \tag{5.4}$$

де K – сума інвестицій на придбання та монтаж системи посилення ізоляції.

Розрахунок проведемо для фідера 10 кВ «Інкубатор». Поопорна схема фідера наведена на рис. 5.1.

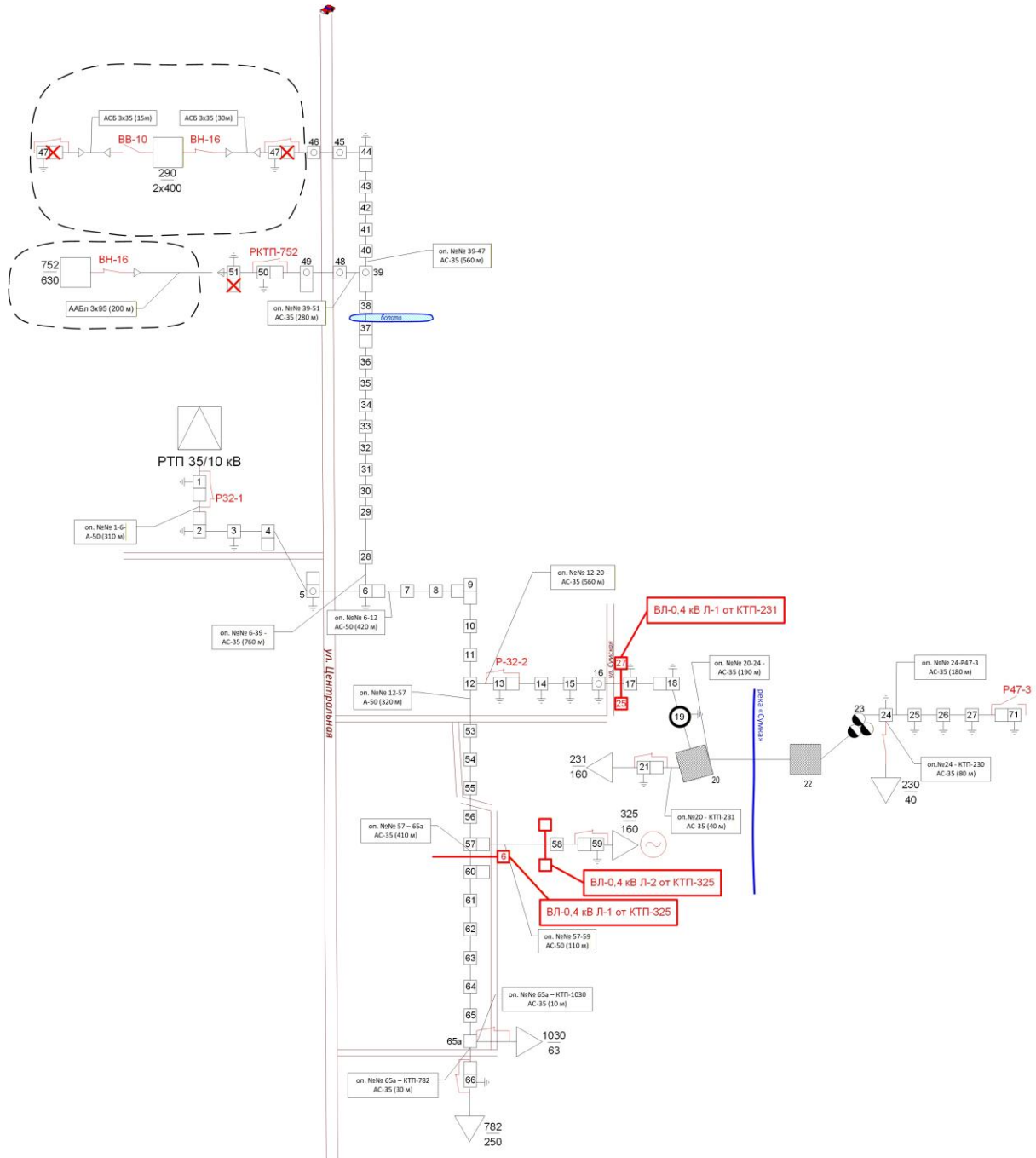


Рис. 5.1. Поопорна схема ПЛ 10 кВ «Інкубатор»

Для оцінки ефекту розраховано показники річних втрат електроенергії, що припадають на один фідер 10 кВ Лебединського РЕМ, та очікуване їх зменшення після встановлення ізоляційних комплектів.

Вихідні дані для розрахунку:

- кількість опор 66 опор;
- до впровадження 12 відключень/рік, сумарна тривалість 15 год/рік, недовідпуск 3500 кВт·год/рік;
- очікувані ефекти після впровадження: зменшення кількості відключень на 35 %, тривалості простою на 30 %, недовідпуску на 40 %.

Капіталовкладення для фідеру наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Капітальні витрати на систему посилення ізоляції

№	Елемент (Raychem)	Позначення	Кількість, шт	Ціна за од., грн	Сума, грн
1	Розширювач шляху витоку на ізолятори (на кожен із трьох ізоляторів опори)	HVCE	198	310	61380
2	Екран від пташиного посліду (на 25 % опор з орнітологічними ризиками)	RRGS	17	390	6630
3	Ізольюючий профіль на проводи (для 10 критичних прольотів, по 3 фази)	OLIC	30	480	14400
4	Термоусаджувана трубка для для локальних з'єднань/точок дотику	OLIT	24	520	12480
5	Ізольюючий кожух на вводи/бушинги фідера	BCIC	3	580	1740
Разом капітальні витрати (К)					96630

Примітка: фактичні кількості елементів типу OLIC/OLIT/RRGS уточнюються за результатами натурного обстеження траси (місця гніздування птахів, близькість крон дерев, проммайданчики тощо).

Розрахунок економічних показників виконано табличним способом. Результати показано в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Річний економічний ефект та окупність (одна ПЛ-10 кВ)

Показник	Значення
Ефект від зменшення недовідпуску, тариф 3,5 грн/кВт·год	$1\,400 \times 3,5 = 4900$ грн/рік

Ефект від зменшення недовідпуску, збитки 30 грн/кВт·год	$1\,400 \times 30 = 42\,000$ грн/рік
Економія на уникнутих виїздах ($\approx 4/\text{рік} \times 3\,000$ грн)	12000 грн/рік
Економія часу простою (4,5 год \times 200 грн/год)	900 грн/рік
Менше замін/матеріалів (орієнтовно)	1250 грн/рік
Разом ефект, сценарій “Тариф”	19050 грн/рік
Разом ефект, сценарій “Збитки”	56150 грн/рік
Строк окупності, “Тариф”	5,1 року
Строк окупності, “Збитки”	1,72 року

Висновки до розділу 5. Економічний аналіз показав, що впровадження системи посилення ізоляції в електричних мережах 10 кВ є технічно й фінансово доцільним заходом, який забезпечує значне підвищення надійності електропостачання. Для однієї повітряної лінії з 66 опорами загальні капітальні витрати становлять близько 96,6 тис. грн, тоді як річна економія, залежно від методики оцінки недовідпуску електроенергії, сягає 19,0–56,0 тис. грн, що відповідає строку окупності від 1,7 до 5 років.

Отримані результати підтверджують, що застосування системи посилення ізоляції дозволяє зменшити кількість і тривалість аварійних відключень, скоротити втрати електроенергії, підвищити безпеку персоналу та продовжити строк служби ізоляційного обладнання. Таким чином, реалізація проєкту сприяє не лише економічній вигоді підприємства, а й забезпечує стабільність і якість електропостачання споживачів..

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

У магістерській роботі виконано комплексне дослідження ефективності використання систем посилення ізоляції для підвищення надійності роботи електричних мереж напругою 10 кВ на прикладі філії «Лебединський РЕМ» АТ «Сумиобленерго». Мета роботи досягнута – обґрунтовано технічну, експлуатаційну та економічну доцільність впровадження сучасних ізоляційних систем, спрямованих на зменшення кількості аварійних відключень, недовідпуску електроенергії та витрат на ремонти.

Аналіз даних аварійних відключень за 2020–2024 роки показав, що середньорічна кількість порушень у мережах 10 кВ становила 166 випадків/рік, а сумарна тривалість простоїв – 238 год/рік. Основними причинами є: пошкодження в мережі (у середньому 42–47 % усіх відмов), несприятливі погодні умови (13–20 %) і перекриття або пробої ізоляції (4–8 %). Сумарний недовідпуск електроенергії за п'ять років склав понад 173 тис. кВт·год. Розрахований потік відмов коливався від 0,135 до 0,364 відмов/(км·рік), а середній час відновлення – 1,0–1,7 год/відмову, що свідчить про потребу у технічному посиленні ізоляційної системи.

Для підвищення надійності обрано систему посилення ізоляції Rauchem (TE Connectivity), що включає 25 типів елементів, серед яких високовольтні спідниці HVBS, розширювачі шляху витoku HVCE, профілі OLIC, термоусаджувані трубки OLIT, кожухи BCIC тощо. Система забезпечує збільшення ефективної довжини шляху витoku ізолятора на 35–60 %, зменшує ймовірність пробою при забрудненні до 0,2 % випадків/рік, а також знижує ризик перекриттів через птахів і дрібних тварин у 3–4 рази.

Економічні розрахунки довели, що капітальні вкладення на одну ПЛ-10 кВ із 66 опорами становлять близько 96,6 тис. грн, а річний ефект від зменшення втрат електроенергії та скорочення аварійних робіт – 19–56 тис. грн, що забезпечує строк окупності 1,7–5 років залежно від обраного методу оцінки. Крім фінансових результатів, додатковим ефектом є підвищення

якості електроенергії та зниження ризику порушення нормативів показників надійності.

На основі проведених досліджень можна сформулювати наступні основні пропозиції:

- рекомендується поетапне впровадження систем посилення ізоляції на фідерах 10 кВ з найбільшим рівнем аварійності та у місцях перетину з лісовими й парковими зонами;

- доцільно передбачити інтеграцію ізоляційних комплектів у планові програми капітального ремонту та реконструкції мереж АТ «Сумиобленерго»;

- провести додаткові експериментальні вимірювання після встановлення системи для уточнення фактичних показників надійності й підтвердження економічного ефекту;

- розглянути можливість розширення застосування технології на мережі 6–35 кВ та трансформаторні підстанції з відкритими вводами.

Результати роботи мають практичне значення для підвищення експлуатаційної надійності систем електропостачання, скорочення втрат електроенергії, зниження кількості аварійних ситуацій і забезпечення сталого розвитку енергетичної інфраструктури регіону.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Adinolfi G., Ciavarella R., Graditi G., Ricca A., Valenti M. A Planning Tool for Reliability Assessment of Overhead Distribution Lines in Hybrid AC/DC Grids. *Sustainability*, 2021, 13(11):6099. DOI: 10.3390/su13116099.
2. Krstivojević J., Stojković Terzić J. Enhancing Reliability Performance in Distribution Networks Using Monte Carlo Simulation for Optimal Investment Option Selection. *Applied Sciences*, 2025, 15(8):4209. DOI: 10.3390/app15084209.
3. Qinglong L., Wu X., Xie S., Xiang X., Peng B. Analysis of Distribution Network Reliability Based on Distribution Automation Technology. *Energy Informatics*, 2025, 8:27. DOI: 10.1186/s42162-025-00478-9.
4. Wang L. The Fault Causes of Overhead Lines in Distribution Network. *MATEC Web of Conferences*, 2016, 61:02017. DOI: 10.1051/mateconf/20166102017.
5. Iovera-Segovia P. Materials for High Voltage Insulation: Open Challenges and Future Trends. *Composite Structures*, 2025. DOI: 10.1016/j.compstruct.2025.121500.
6. Geng J., He Z., Zhang Y., Zhang H., Zhong Z., Wang P. Study on Live Temperature Rise and Electrical Characteristics of Composite Insulators with Internal Conductive Defects. *Coatings*, 2025, 15(8):945. DOI: 10.3390/coatings15080945.
7. Pang G., Zhang Z., Hu J., Hu Q., Zheng H., Jiang X. Analysis of Failures and Protective Measures for Core Rods in Composite Long-Rod Insulators of Transmission Lines. *Energies*, 2025, 18(12):3138. DOI: 10.3390/en18123138.
8. Shelekh Y. Enhancing Safety and Reliability of Electric Power Supply to Consumers. *Journal of Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 7, No. 2, 2021. URL: <https://science.lpnu.ua>
9. Закон України «Про ринок електричної енергії» (Відомості ВРУ, 2017, №27–28, ст.312). Кодекс системи розподілу (Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 №310).

10. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електроенергії, що постачається споживачам у загальних розподільних мережах. ДП «УкрНДНЦ», 2014.
11. Eto J.H., LaCommare K.H., Caswell H.C., Till D. Identifying the Source of Electric Service Interruptions in the US. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019. DOI: 10.1049/iet-gtd.2018.6452.
12. Distribution System Reliability Metrics – State of Michigan. Michigan Public Service Commission, 2023. URL: <https://www.michigan.gov/mpsc>
13. EN 50160:2010. Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Networks. CENELEC, Brussels, 2020.
14. Правила улаштування електроустановок. Чинна редакція. – Харків: УкрНДНЦ, 2017.
15. Методика розрахунку показників надійності та якості електропостачання. Наказ Міністерства енергетики України №173 від 25.07.2022 р.
16. IEEE Std 1366-2012. IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices. IEEE Standards Association, 2022.
17. Yashkov V. Research and Modeling of the Reliability of Overhead Lines of 6–10 kV Considering the Influence of External Environment. Electrical Engineering and Power Engineering, 2023.
18. Toader D., Greconici M., Vesa D., Vintan M., Solea C. Analysis of the Influence of the Insulation Parameters of Medium Voltage Electrical Networks and of the Petersen Coil on the Single-Phase-to-Ground Fault Current. Energies, 2021, 14(5):1330. DOI: 10.3390/en14051330.
19. Jayathilake S., Bandara K., Amaratunga G. Review of the Design and Condition Monitoring of Overhead Conductors in Distribution Networks. Journal of Civil Engineering and Management, 2025.
20. Gębczyk K., Chojnacki A.Ł., Kowalska A. Comparative Analysis of the Costs of Medium Voltage Overhead and Cable Lines Failure. Przegląd Elektrotechniczny, 2020, 10:14–18.

21. INMR. Overview of Failure Modes of Line Insulators & Methods of Mitigation. INMR Magazine, 2024. URL: <https://www.inmr.com>
22. Shelekh Y. Enhancing Safety and Reliability of Electric Power Supply to Consumers. Journal of Electrical and Electronic Engineering, Vol. 7, No. 2, 2021.
23. IEEE Std 1366-2012. IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices. IEEE Standards Association, 2022.
24. Методика розрахунку показників надійності та якості електропостачання. Наказ Міненерго України №173 від 25.07.2022 р.
26. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електроенергії, що постачається споживачам у загальних розподільних мережах.35. Хворост Т.В, Василенко О.О., Семерня О.В., Шандиба О.Б. (2021). Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці» в дипломних роботах студентами інженерно-технологічного факультету Ступінь вищої освіти: магістр. - Суми: СНАУ, 2021. – 10 с.
27. Грибан В. Г., Негодченко О. В. Охорона праці. Навч. посіб. 2-ге вид.- К.: Центр учбової літератури, 2019. - 280 с.
28. Економіка енергетики : підручник / Є. Г. Скловська [та ін.] ; НТУУ “КПІ”. – 2-ге вид., випр. та доп. – Київ : Каравела, 2019. – 492 с.

ДОДАТКИ