

Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій і систем

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

АНАЛІЗ ОСНОВНИХ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ СТАНУ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ
ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Виконав: студент 4 курсу групи ІЕСМ-216
спеціальності 141 – «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
за ОП «Електричні системи і мережі»
Сорокати́й П.М. _____

Керівник: к.т.н., доцент, доцент каф. ЕСС
Малого́лко Ю.В. _____

« 03 » серпня 2025 р.

Рецензент: к.т.н., доцент каф. ЕССЕМ
(наук.ступінь, вч.звання, назва кафедри)
_____ Малого́лко Ю.В.
« _____ » _____ 2025 р.

Допущено до захисту
завідувач кафедри ЕСС
д.т.н., професор Комар В. О.

« 06 » серпня 2025 р.

Вінниця ВНТУ - 2025 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій та систем
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань – 14 «Електрична інженерія»
Спеціальність – 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітня програма – Електричні системи і мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕСС

д.т.н., професор Комар В. О.

«20» Квітня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Сорокати́й Павло Микола́йович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Аналіз основних методів контролю стану кабельних ліній електропередавання в розподільних електричних мережах»

Керівник роботи к.т.н., доцент, доцент каф. ЕСС Малогулко Ю. В.

затверджена наказом вищого навчального закладу від 20.03.2025 року № 97

2. Термін подання студентом роботи 3 червня 2025 року

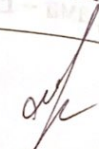
3. Вихідні дані до роботи: Перелік літературних джерел за тематикою роботи. Посилання на періодичні видання.

4. Зміст текстової частини: Вступ. 1. Стан та особливості експлуатації кабельних ліній у розподільних електричних мережах. 2. Аналіз основних методів контролю стану кабельних ліній розподільних електричних мереж. 3. Практичні аспекти впровадження методів діагностики в умовах експлуатації розподільних мереж. 4. Охорона праці. Висновки. Список використаної літератури. Додатки

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 1. Титульний лист. 2. Актуальність та задачі дослідження. 3. Стан та особливості експлуатації кабельних ліній у розподільних електричних мережах. 4. Типові пошкодження та причини виходу з ладу кабельних ліній електропередавання. 5. Проблематика технічного обслуговування та контролю стану кабельних ліній. 6. Аналіз основних методів контролю стану кабельних ліній розподільних електричних мереж. 7. Класифікація методів контролю та діагностики КЛ у розподільних електричних мережах. 8. Практичні аспекти застосування методів контролю в умовах розподільних мереж України. 9.

Методи контролю в різних енергокомпаніях України. 10. Перспективи впровадження систем прогнозного технічного обслуговування. 11. Оцінка якості праці. 12. Висновок.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата завдання видав	
		Підпис	Дата
Спеціальна частина	Керівник роботи Малогулко Ю. В., к.т.н., доцент, доцент кафедри ЕСС		
Охорона праці	Кобилянський О.В., д.пед.н., проф., завідувач каф. БЖДПБ		

7. Дата видачі завдання « 20 » березня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва та зміст етапів	Термін виконання етапів роботи	
		початок	кінець
1	Вступ. Огляд літературних джерел	20.03.25	27.03.25
2	Стан та особливості експлуатації кабельних ліній у розподільних електричних мережах	28.03.25	31.03.25
3	Аналіз основних методів контролю стану кабельних ліній розподільних електричних мереж	01.04.25	10.04.25
4	Практичні аспекти впровадження методів діагностики в умовах експлуатації розподільних мереж	11.04.25	21.04.25
5	Перспективи впровадження систем прогнозного технічного обслуговування	22.04.25	04.05.25
6	Охорона праці	05.05.25	14.05.25
7	Формування висновків по роботі. Оформлення пояснювальної записки	15.05.25	24.05.25
8	Виконання ілюстративної частини та оформлення презентації	25.05.25	27.05.25
9	Перевірка БКР на плагіат.	28.05.25	31.05.25
10	Попередній захист БКР. Рецензування БКР.	01.06.25	03.06.25
11	Захист БКР	За графіком	

Студент

Керівник

підпис

підпис

Сорокати П.М.

Малогулко Ю.В.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.316.925

Сорокати́й Павло Микола́йович «Аналіз основних методів контролю стану кабельних ліній електропередавання в розподільних електричних мережах». Бакалаврська кваліфікаційна робота за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітня програма – «Електричні системи та мережі». Вінниця: ВНТУ, 2025. 80 с.

Укр. мовою. Бібліогр.: 36 назв; рис.: 10, табл. 9.

У бакалаврській кваліфікаційній роботі було досліджено стан, особливості експлуатації та методи діагностики кабельних ліній у розподільних електричних мережах. У першому розділі розглянуто загальну характеристику кабельних ліній електропередавання, їхню структуру, класифікацію, типові пошкодження та проблематику технічного обслуговування.

У другому розділі проведено аналіз основних методів контролю стану кабельних ліній, зокрема неруйнівних методів діагностики, вимірювання характеристик часткових розрядів, діелектричних характеристик, струму нульової послідовності та теплових процесів.

Третій розділ присвячено практичним аспектам впровадження діагностичних методів в умовах експлуатації українських розподільних мереж. Наведено приклади впровадження на об'єктах ДТЕК, НЕК «Укренерго» та регіональних обленерго, а також сформульовано рекомендації щодо вибору методів контролю та перспективи впровадження систем прогнозного технічного обслуговування.

У четвертому розділі розглянуто питання охорони праці при експлуатації кабельних ліній: технічні рішення для безпечної організації робочих місць, електробезпека, гігієна праці, виробниче освітлення, шум і пожежна безпека.

Результати дослідження можуть бути використані для підвищення надійності та ефективності експлуатації кабельних ліній у розподільних електричних мережах України.

Ключові слова: кабельні лінії електропередавання, методи діагностування, методи контролю стану, часткові розряди.

ABSTRACT

Sorokaty Pavlo “Analysis of the main methods of monitoring the condition of cable transmission lines in distribution electrical networks”. Bachelor's qualification work in the specialty 141 – “Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics”, educational program – “Electrical systems and networks”. Vinnytsia: VNTU, 2025. 80 p.

In Ukrainian. Bibliography: 36 titles; Fig.: 10, Tab.: 9.

The bachelor's qualification work investigated the condition, features of operation and methods of diagnostics of cable lines in distribution electrical networks. The first section considers the general characteristics of cable transmission lines, their structure, classification, typical damages and maintenance issues.

The second section analyzes the main methods of monitoring the condition of cable lines, in particular non-destructive diagnostic methods, measurement of partial discharge characteristics, dielectric characteristics, zero-sequence current and thermal processes.

The third section is devoted to practical aspects of implementing diagnostic methods in the operating conditions of Ukrainian distribution networks. Examples of implementation at DTEK, NEK «Ukrenergo» and regional oblenergo facilities are given, and recommendations are formulated regarding the choice of control methods and the prospects for implementing predictive maintenance systems.

The fourth section considers the issue of labor protection during the operation of cable lines: technical solutions for the safe organization of workplaces, electrical safety, occupational hygiene, industrial lighting, noise and fire safety.

The results of the study can be used to increase the reliability and efficiency of the operation of cable lines in the distribution electrical networks of Ukraine.

Keywords: power transmission cable lines, diagnostic methods, condition monitoring methods, partial discharges.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1 СТАН ТА ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ У РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ	8
1.1 Загальна характеристика розподільних електричних мереж з кабельними лініями електропередавання	8
1.1.1 Прокладання кабельних ліній у траншеях	9
1.1.2 Розробка траси прокладання	9
1.1.3 Складання плану	12
1.1.4 Вибір кабелю	12
1.1.5 Копання траншеї	13
1.1.6 Доставка кабелю до місця прокладання та перевірка його ізоляції на електричну міцність	15
1.1.7 Гофра	16
1.1.8 Розкатка кабелю	16
1.1.9 Захист кабелів від механічних пошкоджень	18
1.2 Структура та класифікація кабельних ліній за напругою, типом ізоляції та середовищем прокладання	21
1.3 Типові пошкодження та причини виходу з ладу кабельних ліній електропередавання	22
1.4 Проблематика технічного обслуговування та контролю стану кабельних ліній	28
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ОСНОВНИХ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ СТАНУ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ	29
2.1 Види та причини пошкоджень кабельних розподільних електричних мереж	30

2.2 Аналіз надійності розподільчих електричних мереж	34
2.3 Неруйнівні методи діагностики силових кабелів	38
2.4 Метод вимірювання характеристик часткових розряд	39
2.5 Метод вимірювання діелектричних характеристик	42
2.6 Метод вимірювання струму нульової послідовності	44
2.7 Температурний метод реєстрації ЧР	45
2.8 Аналіз характеристик та дослідження теплових процесів у кабельних лініях, спричинених частковими розрядами	47
РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ МЕТОДІВ ДІАГНОСТИКИ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ	51
3.1 Аналіз реального стану кабельних ліній в українських розподільних мережах	53
3.2 Приклади впровадження діагностичних методів на об'єктах ДТЕК, НЕК «Укренерго» та регіональних Обленерго	54
3.3 Рекомендації щодо вибору методів контролю для КЛ з урахуванням локальних особливостей	57
3.4 Перспективи впровадження систем прогнозного технічного обслуговування	59
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ	62
4.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкту	62
4.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць	62
4.1.2 Електробезпека	66

4.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії	68
4.2.1 Мікроклімат	68
4.2.2 Склад повітря робочої зони	69
4.3 Виробниче освітлення	70
4.4 Виробничий шум	70
4.5 Пожежна безпека	71
ВИСНОВОК	75
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	76
ДОДАТКИ	80

ВСТУП

У сучасних умовах функціонування енергетичної системи України, особливо на фоні зростаючих вимог до надійності електропостачання, питання ефективного контролю технічного стану кабельних ліній електропередавання (КЛ) у розподільних електричних мережах набуває особливої актуальності. Кабельні лінії, що забезпечують передачу та розподіл електроенергії споживачам, відіграють ключову роль у забезпеченні безперебійної та якісної роботи електричних мереж, особливо в умовах урбанізованого середовища, де застосування повітряних ліній є обмеженим або неможливим [1].

Особливість КЛ полягає в їхній прихованості, що значно ускладнює процеси виявлення та локалізації пошкоджень. У порівнянні з повітряними лініями, кабельні траси більш вразливі до внутрішніх дефектів, термічного старіння ізоляції, часткових розрядів, впливу вологи, механічних пошкоджень тощо. У зв'язку з цим виникає потреба в запровадженні ефективних методів діагностики, які дозволяють вчасно виявляти потенційно небезпечні зміни стану кабелів, запобігаючи аваріям та скорочуючи витрати на ремонт [2].

Сучасні методи контролю технічного стану КЛ базуються на різних фізичних принципах і включають як традиційні вимірювання опору ізоляції та ємності, так і складніші підходи, такі як діагностика за допомогою часткових розрядів, імпульсного рефлектометричного аналізу, тепловізійного контролю, а також новітні цифрові рішення із застосуванням сенсорних технологій, моніторингу в режимі реального часу та методів машинного навчання. Вибір того чи іншого методу залежить від типу кабелю, умов його експлуатації, рівня напруги, а також техніко-економічної доцільності [3-4].

Дослідження й систематизація основних методів контролю КЛ у розподільних мережах дають змогу визначити найефективніші стратегії діагностики та профілактичного обслуговування, сприяючи підвищенню надійності роботи мережі, продовженню строку експлуатації обладнання та забезпеченню енергетичної безпеки на регіональному рівні. Таким чином, системний аналіз методів контролю стану кабельних ліній не лише сприяє

технічному вдосконаленню систем електропостачання, а й має вагоме значення у контексті сталого розвитку енергетичного сектору загалом.

Силові кабельні лінії є одним із основних елементів електричних мереж систем електропостачання міст, промислових підприємств і значною мірою визначають їх перспективний розвиток.

Щорічне зростання електроспоживання на 2–5 % по регіонах зумовлене впровадженням сучасних технологій і вдосконаленням існуючого промислового виробництва, розширенням сфери послуг для населення, підвищенням екологічних вимог. Це призводить до збільшення протяжності мереж передавання та розподілення електричної енергії. Кабельні лінії становлять значну частину систем електропостачання промислових підприємств, міст і сільського господарства: на великих підприємствах і в містах вони стали практично єдиним способом передавання та розподілення електроенергії. КЛ є дороговартісними, відповідальними і довговічними елементами систем електропостачання [5].

Більшість об'єктів таких галузей промисловості, як хімічна, нафтохімічна, металургійна, а також споживачі багатьох організацій і служб житлово-комунального господарства, за вимогами до електропостачання належать до споживачів першої категорії. Тому підвищення надійності силових КЛ є одним із найважливіших завдань забезпечення надійного електропостачання споживачів. Електрообладнання складних розподільних систем (СРС) характеризується значним перевищенням нормативних строків його експлуатації, що свідчить про високий рівень зносу електрообладнання.

У розподільчих електричних мережах середньої напруги 6–35 кВ систем електропостачання найбільшого поширення набули силові кабелі напругою 6–10 кВ (наприклад, для внутрішньозаводських мереж і живлення потужних споживачів) [6].

Більше половини виробленої електроенергії розподіляється споживачам промислових і міських систем електропостачання через кабельні мережі напругою 6–10 кВ. Для підстанцій глибокого вводу великих міст, де

спорудження повітряних ліній ускладнене, актуальним є питання переведення частини повітряних ліній у кабельне виконання, а також будівництво закритих підстанцій на базі комплектних розподільчих пристроїв з елегазовою ізоляцією.

Кабельне господарство, що забезпечує електропостачання сучасних промислових підприємств, організацій і міст, має протяжність у десятки та сотні кілометрів і повинно працювати надійно й економічно.

Вихід із ладу розподільних мереж становить близько 70 % усіх порушень електропостачання промислових і побутових споживачів, що зумовлює необхідність їх періодичної діагностики та пошуку пошкоджень [7]. Основною причиною пошкоджень усіх класів силових кабельних ліній (СКЛ) є старіння кабелю. Аналіз статистичних даних старіння електричних мереж показує, що рівень зносу КЛ перевищує 40 %.

У процесі експлуатації ізоляція зазнає теплових, електричних, хімічних, механічних, атмосферних та інших впливів, у результаті чого змінюються її електричні властивості, а отже, змінюються й технічні характеристики ізоляційних конструкцій. Наприклад, підвищення температури навколишнього середовища призводить до зменшення електричного опору діелектриків, що викликає пропорційне зростання потужності при заданому значенні напруги. Перегрів діелектрика за таких умов підвищує ймовірність зниження електричної міцності ізоляції, що згодом може призвести до її пробію. Тому головним завданням експлуатаційного персоналу є контроль і підтримання ізоляційних властивостей на рівні, що унеможливує її аварійний вихід із ладу.

Успішне вирішення цієї проблеми неможливе без розуміння фізичних процесів і чинників, що спричиняють виникнення та розвиток часткових розрядів (ЧР) в ізоляційних матеріалах (ІМ) [8-9].

РОЗДІЛ 1 СТАН ТА ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ У РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

1.1 Загальна характеристика розподільних електричних мереж з кабельними лініями електропередавання

Розподільні електричні мережі є складовою частиною електроенергетичної системи, що забезпечує передачу електричної енергії від підстанцій до кінцевих споживачів. Їх основне призначення — надійне та безперервне електропостачання населення, промислових підприємств, громадських і соціально важливих об'єктів.

Розподільні мережі охоплюють напруги від 0,4 кВ до 35 кВ і можуть бути виконані як у вигляді повітряних ліній, так і у вигляді кабельних трас (рис. 1.1). У міських умовах, де існують обмеження щодо використання повітряних ліній через естетичні, екологічні та безпекові вимоги, пріоритетним є застосування кабельних ліній електропередавання (КЛЕП).



Рисунок 1.1 – Кабельні траса

1.1.1 Прокладання кабельних ліній у траншеях

Монтаж кабельних ліній у земляних траншеях вважається одним із найнадійніших методів організації систем електропостачання. Водночас це один із найвитратніших і найтрудомісткіших способів, що потребує дотримання спеціальних технологічних прийомів і нормативних відстаней, а також є одним із найскладніших у реалізації.

Цей метод застосовують як професійні електромонтажники для укладання ліній різних рівнів напруги, так і власники приватних будинків для підключення житла й господарських об'єктів на дачних ділянках.

У порівнянні з іншими варіантами підземного укладання, траншейний метод вважається найбільш економічним, адже передбачає одноразові витрати та майже не потребує подальшого технічного обслуговування. Він забезпечує високу надійність і тривалий термін експлуатації; знижує ризик випадкового обриву кабелю й електротравм; створює кращі умови охолодження кабелю, що дозволяє проводити більшу потужність, і не погіршує естетичного вигляду навколишнього простору, позбавляючи необхідності у повітряних лініях.

Монтаж у ґрунті виконується відповідно до вимог Правил улаштування електроустановок (ПУЕ), затверджених наказом № 476 Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 21.07.2017 року, що базуються на шостому виданні ПУЕ. Також дотримуються норм СНиП, положень ДБН та інших нормативно-технічних документів.

Процес прокладання кабелів у траншеях може бути механізованим або ручним і включає кілька обов'язкових етапів:

1.1.2 Розробка траси прокладання

Першочерговим етапом виконання робіт є визначення та проєктування маршруту, яким буде прокладено кабель. Вибір траси має враховувати наявну забудову, інженерні мережі, дорожню інфраструктуру та характеристики ґрунту, включаючи можливість наявності підземних пустот або ґрунтових вод.

Траншейний спосіб доцільно використовувати у зонах, де відсутнє асфальтове покриття, а ймовірність пошкодження кабельної лінії незначна. Не

рекомендується укладання на ділянках із наявністю блукаючих струмів. У випадках, коли уникнути цього неможливо, слід застосовувати кабелі з підвищеною стійкістю до електрохімічної корозії та використовувати захисні пластмасові труби.

Прокладені в траншеях кабелі повинні бути віддалені від фундаментів споруд, зелених насаджень, трубопроводів різного призначення, а також залізничних чи трамвайних колій на нормативно визначені відстані.

Траса повинна проходити не ближче ніж за 1,5 м від дерев та за 75 см від кущів. В обхід великих дерев слід передбачити обхідну ділянку або прокладку труби під кореневою системою з подальшим протягуванням кабелю через неї.

У разі прокладання уздовж фундаменту будівель необхідно дотримуватись відстані не меншої за 60 см. Прокладати кабелі безпосередньо під фундаментами будівель категорично забороняється.

Слід уникати перехрещень із вже існуючими кабелями або трубопроводами. Також необхідно оминати ділянки з підвищеним навантаженням на ґрунт – такі як паркувальні зони, шляхи руху асенізаційної техніки, пішохідні доріжки тощо.

Якщо уникнути перетину не вдається, кабелі повинні бути розміщені на різних рівнях, при цьому між ними має бути дотримана мінімальна відстань у 15 см. У місцях перетину обидва провідники мають бути поміщені в захисні футляри з пластику або азбоцементу, які з обох боків повинні виступати щонайменше на 1 м від зони перетину.

Під час перетину кабелів напругою до 35 кВ із водопровідними, каналізаційними або газовими трубами необхідно забезпечити вертикальну відстань не менше 50 см, якщо кабель прокладається без додаткового захисту. Якщо ж у межах перетину на відстані по 2 м з кожного боку кабель укладено у захисні труби, допустима мінімальна відстань скорочується до 15 см.

Для високовольтних кабелів (110–330 кВ), що перетинають трубопроводи, вертикальний інтервал має становити щонайменше 1 м. Якщо кабелі укладені в

трубах або захищені бетонними лотками з кришками – ця відстань може бути зменшена до 50 см.

При перетині з інфраструктурними об'єктами – залізницею, трамвайними коліями, автошляхами, проїздами у двори, потоками чи канавами – кабелі повинні укладатися в тунелі, блоках або трубах. При цьому мінімальна відстань від місця прокладання до залізничного чи дорожнього полотна має бути не меншою 1 м, а до трамвайних рейок – не менше 3 м.

У разі паралельного прокладання кабельної лінії поряд із трубопроводами, відстань від неї повинна становити:

- не менше 50 см – до водогонів Ø до 300 мм, каналізації, дренажів, водостоків;
- не менше 1 м – до водогонів Ø понад 300 мм, безканалних трубопроводів із рідинами та газопроводів низького тиску;
- не менше 1,5 м – до газопроводів середнього тиску;
- не менше 2 м – до газопроводів високого тиску (0,294–0,588 МПа);
- не менше 3 м – до газопроводів високого тиску (0,588–1,177 МПа).

У випадку наближення до теплотрас (гаряче водопостачання та опалення) слід дотримуватись відстані мінімум 1 м до стінок теплових каналів, за умови їх належної ізоляції.

Для паралельного прокладання з іншими об'єктами діють такі вимоги:

- з залізничними коліями – не менше 3 м до осі; для електрифікованих – не менше 10,75 м;
- з трамвайними коліями – щонайменше 2,75 м;
- з автошляхами – не менше 1 м від брівки або 1,5 м від бортового каменю;
- до ПЛ понад 1 кВ з тросовим захистом – мінімум 7 м; безтросові – 6 м;
- до опор ПЛ до 1 кВ – щонайменше 1 м до опор контактної мережі або зв'язку.

У щільно забудованих зонах ці відстані можуть бути зменшені, якщо кабелі укладено в труби, блоки або лотки.

Відстань від стінок тунелів та колекторів до кабелю має бути не меншою за 50 см.

1.1.3 Складання плану

Після остаточного визначення траси майбутньої кабельної лінії складається відповідний проєкт. Він представляє собою схему ділянки, на якій позначено всі основні об'єкти інфраструктури: споруди, мережі водопостачання, каналізації тощо. Також на цій схемі відображається передбачуване розміщення кабелю з урахуванням усіх необхідних нормативних відступів.

У разі самотійного прокладання кабельної лінії, наприклад на дачній ділянці, рекомендовано обирати прямолінійний маршрут траншеї. Якщо це неможливо, слід максимально уникати різких вигинів траси. Далі здійснюється розмітка — в землю вбиваються дерев'яні або металеві кілки по заданій траєкторії, між якими натягується шнур для візуального орієнтування.

Після викопування траншеї, у неї тимчасово вкладають кабель, щоб здійснити вимірювання відстаней до об'єктів благоустрою, які можуть бути використані як орієнтири. Ці відстані фіксують на плані. Такий детальний план стане у пригоді при подальшому переплануванні території або у випадку необхідності проведення ремонтних робіт на лінії електропередачі.

1.1.4 Вибір кабелю

Згідно з чинними державними стандартами, для траншейного укладання в ґрунт найдоцільніше застосовувати кабелі з броньованим захистом. Їх металеві оболонки повинні мати зовнішнє покриття, яке захищає кабель від впливу агресивних хімічних речовин, що можуть міститися у ґрунті. До найбільш розповсюджених марок таких кабелів належать: АВБШв, ВБШв, ПвБШв.

Кабелі марок АВБШв і ВБШв зазвичай використовуються для підключення об'єктів на дачних ділянках, а також для організації паркового освітлення. ПвБШв є придатним для експлуатації в складних умовах — у вологих районах, болотистій місцевості, а також у ґрунтах із високим вмістом агресивних речовин або в кліматичних зонах з суворими зимами.

У разі прокладання в землі з підвищеною хімічною активністю — солончакових ділянках, ґрунтах із високим рівнем кислотності, місцях із великою кількістю шлаків або будівельного сміття — слід використовувати кабелі зі свинцевою бронею або алюмінієвою оболонкою. У таких умовах застосовують марки АВБбШв, АВБбШп, АПвБбШв, ААБл, АСПл, ААШп тощо.

У районах Крайньої Півночі для підземної прокладки використовують спеціалізовані кабелі, розраховані на наднизькі температури, наприклад ПвКШп.

Дозволено також прокладати в землі неброньовані кабелі марок АВВГ та ВВГ. Такі кабелі характеризуються достатньою міцністю та герметичністю, тому широко застосовуються для підключення дачних будиночків, лазень, господарських споруд на приватних ділянках. Проте для підвищення їх надійності прокладку необхідно здійснювати у захисних трубах із ПВХ, поліетилену або азбоцементу.

Переріз обраного кабелю повинен відповідати прогнозованому навантаженню на лінію, з урахуванням усіх електроприймачів, що до неї підключаються.

1.1.5 Копання траншеї

Перед початком земляних робіт необхідно завчасно отримати письмовий дозвіл від організацій або установ, на території яких планується виконання прокладання кабельної лінії. Крім того, обов'язково потрібно з'ясувати точне розташування вже наявних комунікацій — ліній зв'язку, газопроводів, водогонів тощо.

До початку копання слід очистити трасу від усіх перешкод: будівельного сміття, залишків дорожнього покриття, дерев, великих каменів та інших об'єктів, які можуть ускладнити проведення робіт. Після очищення території відповідно до розмітки викопують траншею. Це можна зробити вручну — у разі невеликих обсягів робіт або в умовах, де використання механізмів неможливе, — або з застосуванням екскаваторів та іншої важкої техніки.

Існує п'ятнадцять стандартних типорозмірів траншей, вибір яких визначається кількістю, діаметром та класом напруги кабелів, а також особливостями умов укладання.

Мінімально допустима глибина траншеї становить:

- 70 см – для ліній із напругою до 20 кВ;
- 1 м – для ліній напругою 27–35 кВ;
- 1,5 м – для кабелів класу 110–330 кВ.

Якщо довжина лінії становить менше 5 м, а сам кабель додатково захищено трубою, допускається прокладання на глибині від 50 см.

Під час перетину кабелів із проїжджою частиною або при укладанні через орні землі, глибина має бути не меншою за 1 м. У такому випадку кабель повинен бути прокладений у захисній трубі, щоб не порушити дорожнє покриття. Для цього застосовують технології горизонтального направленої буріння або інші безтраншейні методи.

У зонах вводу до будівель та в місцях перетину підземних споруд дозволено зменшення глибини укладання, але лише на ділянках довжиною до 5 м та за умови захисту від механічних ушкоджень. Зокрема:

- до 50 см – для кабелів до 35 кВ;
- до 1 м – для кабелів класу 110–330 кВ.

Ширина траншеї також залежить від кількості кабелів і їхньої напруги. Наприклад:

- 20 см – для одного кабелю з напругою до 10 кВ;
- 30 см – для одного кабелю з напругою до 35 кВ.

Щоб уникнути осипання стінок траншеї, їх формують з незначним нахилом. Після завершення земляних робіт необхідно ретельно очистити дно траншеї від будь-яких предметів, які можуть пошкодити оболонку кабелю: уламків цегли, коріння дерев, каміння, металевих залишків, скла тощо. Якщо видалити сторонній об'єкт неможливо, наприклад, залишки бетонної плити, необхідно влаштувати спеціальний захисний футляр.

Дно траншеї вирівнюють, ущільнюють і влаштовують так звану "подушку" – шар просіяного піску або мілкої землі товщиною 10 см. Цей шар має бути очищеним від сміття, уламків скла, каміння, і повністю покривати дно траншеї рівномірним шаром.

1.1.6 Доставка кабелю до місця прокладання та перевірка його ізоляції на електричну міцність

Після транспортування кабелю до місця проведення робіт необхідно виконати ретельний візуальний огляд зовнішнього покриття та перевірити стан ізоляції. Насамперед слід зняти зовнішнє пакування з барабана та оглянути крайні витки кабелю на наявність ушкоджень — розривів, проколів, зміщень або просвітів між броньовими стрічками. Усі пошкоджені частини зовнішніх витків слід видалити.

Наступним етапом є вимірювання електричної міцності ізоляції. Для цього застосовують підвищену напругу, що дозволяє впевнитися у відсутності коротких замикань між жилами або між жилами та бронею (якщо вона присутня).

Перед укладанням у траншею на кабель надягають захисні елементи: труби або футляри. Їх установлюють у зонах, де можливий підвищений механічний тиск на ґрунт, на перехрестях із трубопроводами, поблизу дерев, на в'їздах транспорту та інших критичних ділянках.

У тих місцях, де не передбачено зовнішніх впливів, дозволяється укладання броньованого кабелю без додаткового захисту. Проте прокладка в трубах має низку переваг:

- підвищує рівень захисту провідника від вологи, атмосферних явищ та агресивних середовищ;
- істотно знижує ризик загоряння завдяки обмеженому доступу кисню всередині труби та в товщі ґрунту, що особливо актуально поблизу дерев'яних споруд;
- полегшує проведення ремонтних робіт — для заміни кабелю достатньо відкопати ділянку з трубою й виконати заміну без використання важкої техніки.

1.1.7 Гофра

Захисні гофровані футляри необхідні на тих ділянках кабельної траси, де існує ймовірність механічного пошкодження або де неможливо повністю усунути потенційно небезпечні для кабелю предмети. Такі футляри також обов'язково встановлюються поблизу дерев, у місцях перетину кабельної лінії з газо- та водопроводами, каналами, лотками, під'їзними шляхами автотранспорту, а також там, де глибина укладання є меншою за 50 см.

Гофровані труби забезпечують додаткову амортизацію, захист від деформацій та дії вологи. Вони дозволяють зменшити ризики пошкодження оболонки кабелю при просіданні ґрунту або у разі проведення додаткових земляних робіт у майбутньому.

1.1.8 Розкатка кабелю

Після підготовки траншеї та перевірки кабелю розпочинається етап його розклатки. Існує два основних способи розмотування кабелю та укладання його в траншею:

1. Із рухомого барабана, що пересувається вздовж траси.
2. Із нерухомо встановленого барабана, закріпленого на одному з кінців маршруту.

Перший спосіб є більш продуктивним і зазвичай використовується на великих об'єктах. Кабельний барабан монтують на спеціальній платформі або транспортері, який переміщується вздовж траншеї. Один або кілька працівників обертають барабан вручну, а інші слідом за транспортером приймають кабель і рівномірно укладають його на дно траншеї.

Другий метод застосовується на об'єктах із незначною довжиною кабельної лінії. У такому випадку барабан встановлюють у нерухомому положенні на спеціальному домкраті, що утримує його у підвішеному стані. Розмотування та укладання кабелю проводяться вручну з використанням роликів для полегшення руху кабелю, а також лебідки для контролю натягу.

Після завершення підготовчих робіт кабель укладається безпосередньо в траншею на шар просіяного ґрунту або піску (так звану "подушку") завтовшки

не менше 10 см. Цей шар має бути очищеним від будь-яких твердих включень — каміння, уламків будівельного сміття, шлаку тощо. Відстань від кабелю до стінок траншеї також повинна становити щонайменше 10 см.

Якщо передбачено використання додаткових захисних елементів (футляри, гофровані труби, полімерні шланги тощо), їх встановлюють на кабель до моменту укладання в траншею. Кабель необхідно монтувати із запасом по довжині у межах 1–2 %, щоб компенсувати можливі зсуви ґрунту та температурне розширення. Такий запас реалізується шляхом хвилеподібного укладання — заборонено створювати кільця чи витки.

Укладання повинно забезпечити уникнення перехрещень між кабелями, а також із трубопроводами чи іншими комунікаціями.

На початку, у кінці лінії та на поворотах кабель обов’язково фіксується для запобігання зсувам.

Відстань між кабелями в траншеї повинна відповідати технічним нормам, щоб уникнути перегріву в процесі експлуатації, що може призвести до виходу лінії з ладу:

- не менше 10 см – між двома силовими кабелями до 10 кВ або між силовим та контрольним кабелем;
- не менше 25 см – між силовими кабелями напругою 20–35 кВ, а також між ними та кабелями з нижчим класом напруги;
- не менше 50 см – між силовими кабелями класу 110–330 кВ та кабелями, що належать до різних власників чи організацій;
- відстань між контрольними кабелями або кабелями зв’язку не нормується.

У межах однієї траншеї рекомендовано прокладати не більше шести силових кабелів напругою до 35 кВ або двох кабелів на напругу 110–330 кВ. Поруч із ними дозволено укладати не більше одного пучка контрольних кабелів. Якщо потрібно прокласти більшу кількість кабелів, слід створити паралельні траншеї на відстані щонайменше 50 см між крайніми кабелями.

Далі здійснюється монтаж з'єднувальних муфт. Якщо прокладається декілька кабелів, місця встановлення муфт розташовують зі зсувом не менше 2 м. На трасах із крутим ухилом встановлення муфт небажане. Якщо ж уникнути цього неможливо — під місцем встановлення слід облаштувати горизонтальні майданчики.

У разі самостійного укладання кабелю на приватній ділянці, рекомендовано уникати муфт узагалі, прокладаючи цільні відрізки кабелю. Якщо це неможливо, слід використати надземну сполучну коробку, що дозволить уникнути помилок при герметизації.

Також доцільно створити план укладки кабелю з нанесенням точних відстаней до будівель, дерев, меж ділянки тощо. Варто позначити на стінах будівель точки виходу кабелю з ґрунту. Такий план допоможе швидко локалізувати кабель при обслуговуванні або ремонті.

На всіх етапах монтажу важливо перевіряти цілісність оболонки кабелю. Пошкоджені ділянки у подальшому буде надзвичайно складно замінити. Для контролю використовують мегаомметр — пристрій, що вимірює опір ізоляції.

Після завершення укладання кабель присипають таким самим матеріалом, із якого виконана подушка, — просіяним піском або м'якою землею. Товщина шару також повинна становити не менше 10 см. Засипку виконують з легким ущільненням.

Завершальний шар формується із раніше вибраного ґрунту без твердих домішок. Поверхню вирівнюють і ущільнюють. Оскільки ґрунт має властивість просідати, засипку варто завершити створенням невеликого насипу по всій довжині траншеї.

1.1.9 Захист кабелів від механічних пошкоджень

Під час траншейного укладання кабельної лінії надзвичайно важливо завчасно подбати про її захист від можливих механічних пошкоджень, які можуть виникнути під час майбутніх земляних або будівельних робіт. Існує кілька перевірених способів забезпечення такого захисту:

- використання залізобетонних плит;

- укладання глиняної цегли;
- застосування полімерних захисних листів **або** сигнальних (сигнально-захисних) стрічок.

Для кабелів, що мають напругу від 35 кВ до 330 кВ, зазвичай використовують залізобетонні плити завтовшки не менше 5 см. Їх укладають поверх початкового шару ґрунту так, щоб вони перекривали крайні кабелі мінімум на 5 см із кожного боку. Над плитами, по осі траншеї, укладається сигнальна стрічка — на висоті 25 см над рівнем плит.

Для захисту кабельних ліній з напругою до 20 кВ допускається використання одного з наступних варіантів:

- один поперечний шар глиняної цегли (без порожнин);
- полімерні листи достатньої міцності;
- сигнальна стрічка.

Усі ці захисні матеріали також укладаються поверх первинного шару засипки — на висоті 25 см від зовнішньої поверхні кабелю. Використовувана цегла має бути повнотілою. Застосування пустотілої (силікатної або дірчастої) цегли для захисту заборонено.

Захисні елементи з цегли або полімерів рекомендовано використовувати на тих ділянках траси, де висока ймовірність проведення додаткових земляних робіт, зокрема через наявність інших підземних комунікацій.

Сигнальна стрічка — це поліетиленова плівка завтовшки 3,5–5 мм, зазвичай яскравого червоного, жовтого або помаранчевого кольору. На її поверхні розміщується попереджувальний напис, що інформує про наявність кабелю під землею. Така стрічка є ефективним способом інформування робітників при виконанні розкопувань.

У разі, якщо в траншеї прокладено лише один кабель, стрічку розміщують строго по його осі, щоб її центр збігався з розташуванням кабелю. Якщо прокладено кілька кабелів, краї стрічки повинні виступати за крайні кабелі мінімум на 5 см.

Не допускається прокладка сигнальної стрічки:

- у зонах перетину кабельної лінії з іншими інженерними мережами — по 2 м у кожен бік від місця перетину;

- над муфтами — також по 2 м з обох боків;
- поблизу розподільчих пунктів, підстанцій — у радіусі 5 м;
- над кабелями понад 1 кВ, що живлять споживачів I категорії.

Стрічки можуть бути односторонніми, тому важливо стежити, щоб попереджувальний напис був спрямований догори на всій довжині траси.

Після укладання захисних елементів засипку траншеї продовжують. Верхній шар ґрунту має бути сформований із певним надлишком, оскільки земля з часом просідає.

Останній етап перед увімкненням живлення — перевірка електричних параметрів кабельної лінії. Необхідно переконатися у відсутності коротких замикань як між жилами, так і між жилами та бронею (за наявності), а найважливіше — у відсутності пробоїв на землю. У разі виявлення таких дефектів усі роботи з укладання доведеться переробити.

Якщо електричні параметри відповідають нормі — кабельна лінія вважається готовою до експлуатації.

Прокладання кабельних ліній у траншеях є одним із найбільш надійних і довговічних способів монтажу електромереж, що забезпечує високий рівень безпеки, захисту від зовнішніх впливів та стабільність експлуатації. Попри трудомісткість і потребу у дотриманні великої кількості технічних норм, саме цей метод широко застосовується як у промисловості, так і в побутовому секторі.

До основних переваг траншейного способу належать:

- високий рівень механічного та електричного захисту кабелів;
- відсутність візуального забруднення простору — лінії непомітні й не потребують опор;
- відсутність необхідності постійного обслуговування в період експлуатації;
- зменшення ризику ураження струмом при випадковому контакті;

- разовість витрат у порівнянні з повітряними мережами, які потребують регулярного догляду;

- кращі умови охолодження, що дає змогу передавати більшу потужність.

Водночас цей спосіб має і низку обмежень:

- складність та висока вартість початкових робіт (проектування, земляні роботи, погодження з комунальними службами);

- відсутність візуального доступу до кабелю, що ускладнює діагностику й локалізацію пошкоджень;

- трудомісткий ремонт, який часто потребує повного розкриття ділянки.

Успішне виконання траншейного прокладання вимагає точного дотримання всіх вимог нормативної документації (ПУЕ, ДБН, СНіП), правильного вибору типу кабелю з урахуванням умов експлуатації, а також передбачення належного захисту на всіх критичних ділянках.

Таким чином, при грамотному проектуванні та якісному виконанні робіт, прокладання кабельних ліній у траншеях забезпечує тривалий термін експлуатації, високу надійність електропостачання та зниження експлуатаційних витрат у майбутньому.

З розвитком урбанізації та зростання енергоспоживання роль кабельних електричних мереж постійно зростає. Проте для підтримки їхньої надійності необхідним є впровадження сучасних методів моніторингу та діагностики.

1.2 Структура та класифікація кабельних ліній за напругою, типом ізоляції та середовищем прокладання

Кабельна лінія електропередавання — це електротехнічний пристрій, який складається з одного або кількох кабелів, що прокладаються безперервно між двома точками (зазвичай електрообладнанням) і забезпечують передачу електричної енергії. Вони можуть мати різну конструкцію, довжину, тип ізоляції та способи прокладання.

Класифікація КЛ за основними ознаками:

- **За рівнем напруги:**

- Низьковольтні (до 1 кВ),
- Середньої напруги (6–20(35) кВ),
- Високовольтні (понад 35 кВ).

• **За типом ізоляції:**

- Із паперово-імпрегнованою ізоляцією (ПІЗ),
- З поліетиленовою ізоляцією (XLPE),
- З гумовою або іншими видами полімерної ізоляції.

• **За середовищем прокладання:**

- Підземне прокладання (у ґрунті, каналах, колекторах),
- Надземне (на кабельних естакадах або стінах будівель),
- Підводне прокладання (через річки, озера, порти тощо).

Кожен тип кабелю має свої експлуатаційні особливості, вимоги до монтажу та обслуговування, а також характерні потенційні дефекти.

1.3 Типові пошкодження та причини виходу з ладу кабельних ліній електропередавання

Кабельні лінії є складними технічними об'єктами, які зазнають дії багатьох факторів, що впливають на їх довговічність. Серед найбільш поширених причин пошкодження КЛ можна виділити:

1. Теплове старіння ізоляції

Теплове старіння — одна з найпоширеніших причин деградації ізоляційного матеріалу (рис. 1.2).

Виникає внаслідок:

• **довготривалого перевантаження кабельної лінії**, коли через кабель передається струм, що перевищує допустимі значення;

• **поганого тепловідведення**, зокрема через надто щільне укладання кабелів без дотримання мінімальних відстаней, що порушує нормальні умови охолодження;

• **укладання у ґрунти з низькою теплопровідністю** (наприклад, сухі піски або пористі насипні суміші), де тепло погано розсіюється.



Рисунок 1.2 - Теплове старіння ізоляції

У результаті підвищення температури ізоляція старіє, втрачає еластичність, знижується її електрична міцність, з'являються мікротріщини, які можуть призвести до пробою.

2. Порушення герметичності оболонки

Зовнішня оболонка кабелю призначена для захисту від вологи, агресивного середовища та механічних впливів. Причини втрати герметичності:

- **механічні ушкодження** під час монтажу або експлуатації (наприклад, необережне розмотування, удари);
- **заводський брак** або старіння матеріалу;
- **проникнення кореневої системи рослин**, особливо при неглибокому прокладанні.



Рисунок 1.3 - Порушення герметичності оболонки КЛ

При порушенні герметичності **волога проникає всередину кабелю**, у шар ізоляції, що призводить до її гідратації та часткової провідності. Така ситуація особливо небезпечна в кабелях із паперово-масляною ізоляцією та старих зразках.

3. Часткові розряди

Часткові розряди — це мікроскопічні електричні пробої, які виникають у газових включеннях, тріщинах або пустотах в ізоляційному матеріалі (рис. 1.4).

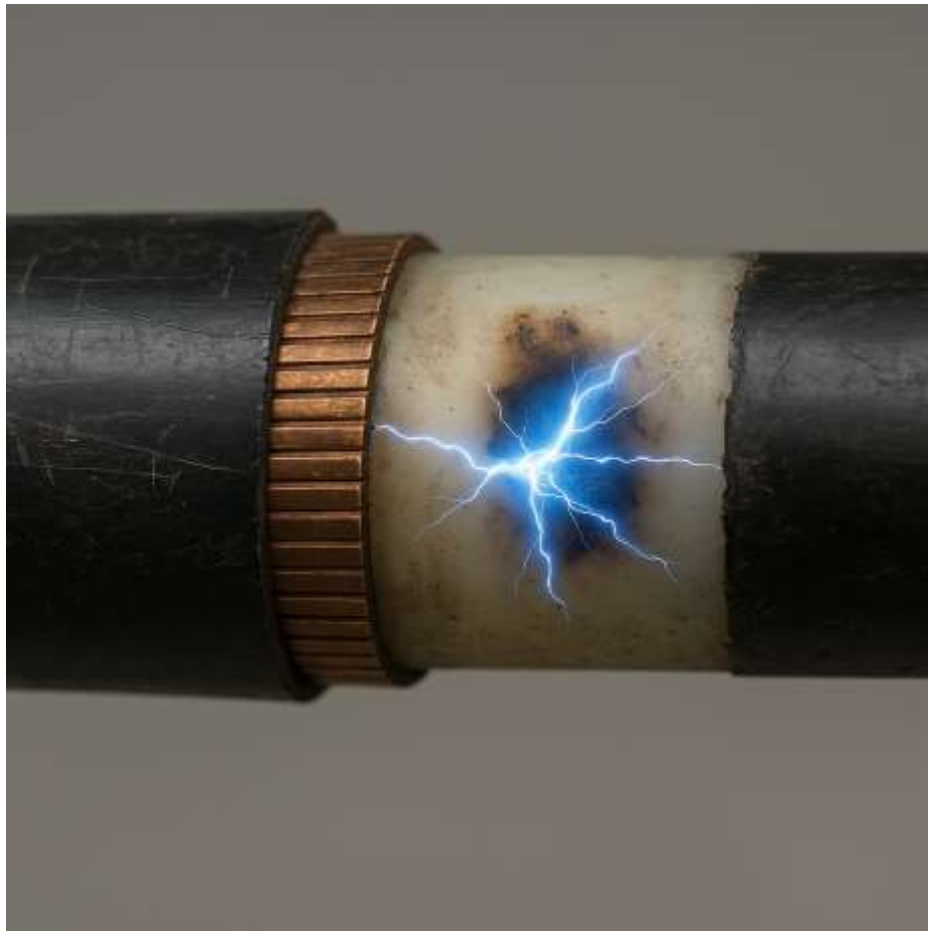


Рисунок 1.4 – Часткові розряди в КЛ

Часткові розряди:

- **не призводять до миттєвого пробою**, але з часом руйнують структуру ізоляції;
- **утворюються при наявності дефектів** у матеріалі, нерівномірному електричному полі, порушенні цілісності шару;
- **характерні для ізоляції, що вже частково деградувала**, наприклад, через вологу або старіння.

Найбільш вразливі до часткових розрядів кабелі середнього та високого класу напруги, особливо при експлуатації понад 20 років.

4. Механічні пошкодження

Механічні дефекти (рис. 1.5) виникають через:

- **випадкове порушення цілісності під час земляних або будівельних робіт**, коли викопування або буріння виконується без інформації про розташування КЛ;

- **просідання ґрунту**, що створює розтягуючі або згинаючі навантаження на оболонку кабелю;

- **удари або надмірний згин** під час транспортування, розмотування чи монтажу.



Рисунок 1.5 - Механічні дефекти КЛ

Такі пошкодження можуть одразу призвести до короткого замикання або, у випадку прихованих дефектів, до поступового зниження надійності лінії.

5. Корозія броні та металевих оболонок

Кабелі, що мають металеву броню або алюмінієві/свинцеві оболонки, з часом можуть піддаватися корозії (рис. 1.6), особливо:

- у вологих або болотистих ґрунтах, де спостерігається підвищена електропровідність середовища;
- у місцях з високим вмістом солей, кислот або промислових забруднень;
- при наявності блудних струмів (наприклад, поблизу електрифікованих залізниць або трамвайних колій).



Рисунок 1.6 - Корозія броні та металевих оболонок КЛ

Корозія може призвести до порушення герметичності, оголення оболонок і, зрештою, до електричних дефектів.

6. Порушення технології монтажу

Неправильне встановлення кабельних муфт або кінцевих з'єднань — ще одна поширена причина пошкоджень. До типових помилок належать:

- погана підготовка ізоляції перед монтажем муфти;
- нещільне затискання жил або використання непридатних матеріалів;

- **використання муфт не за призначенням** (наприклад, муфти внутрішнього монтажу у вологому середовищі);

- **відсутність компенсаційного запасу по довжині кабелю**, що призводить до механічного натягу у місцях з'єднання.

Такі дефекти часто не проявляються одразу, але з часом стають джерелом гріючих з'єднань, локального нагріву та часткових розрядів.

Більшість дефектів у кабельних лініях є кумулятивними — вони розвиваються поступово, а не виникають миттєво. Це відкриває можливості для їх превентивного виявлення за допомогою сучасних методів діагностики, таких як вимірювання часткових розрядів, термографія, аналіз ізоляції тощо. Регулярний моніторинг і профілактика здатні значно продовжити строк служби КЛ і знизити аварійність.

1.4 Проблематика технічного обслуговування та контролю стану кабельних ліній

Контроль технічного стану КЛ ускладнюється їх прихованим прокладанням і відсутністю візуального доступу. Це потребує використання спеціалізованого обладнання та методів, які здатні діагностувати стан ізоляції, виявляти дефекти на ранніх етапах та запобігати аваріям.

Проблемні аспекти обслуговування КЛ включають:

- Високу вартість профілактичних випробувань і діагностики;
- Необхідність відключення лінії при деяких видах випробувань;
- Недостатню кількість висококваліфікованих фахівців та обладнання;
- Обмеженість у впровадженні автоматизованих систем онлайн-моніторингу в існуючих мережах.

Відсутність своєчасного контролю часто призводить до раптових аварій, зростання експлуатаційних витрат та зниження якості електропостачання. У зв'язку з цим зростає потреба у впровадженні ефективних, економічно доцільних і сучасних методів діагностики, що будуть розглянуті у наступних розділах.

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ОСНОВНИХ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ СТАНУ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

Ізоляція високовольного обладнання та кабелів згідно з чинними правилами та керівними документами має періодично випробовуватись підвищеною напругою постійного струму. Такі випробування призводять до посилення процесу іонізації, що, у свою чергу, прискорює старіння ізоляції. Метод лише підтверджує здатність ізоляції витримати напругу, але не дає змоги виявити дефекти або спрогнозувати залишковий ресурс кабелю. Позитивні результати випробувань не гарантують безаварійну роботу обладнання. Так, у «проблемних» місцях після випробувань інтенсивно руйнується ізоляція через часткові розряди, що призводить до скорочення строку служби КЛ.

Цей фактор надає перевагу методам неруйнівного контролю, адже під час таких випробувань кабель не піддається прискореному старінню. Це визначає необхідність розробки нових методів виявлення включень в ізоляції електрообладнання.

Проведення комплексних діагностичних випробувань методами неруйнівного контролю дозволяє оцінити ступінь старіння ізоляції та залишковий ресурс обладнання. Розробка таких методів є перспективним завданням, яке сприятиме підвищенню надійності електропостачання. Надійність електропостачання споживачів безпосередньо залежить від надійності ізоляції КЛ. Згідно з ДСТУ, надійність — це здатність об'єкта зберігати у часі працездатність за заданих умов експлуатації, обслуговування, зберігання та транспортування. Це комплексна властивість, яка охоплює безвідмовність, ремонтпридатність і довговічність.

Одним із перспективних напрямів вирішення вказаної проблеми є дослідження параметрів ЧР, термофлуктуаційних процесів в ізоляції кабельних ліній, що перебувають в експлуатаційному режимі, з використанням характеристик внутрішніх часткових розрядів.

Механічні напруження знижують енергію активації цього процесу, а термічні флуктуації — активують його. Таким чином, розриви зв'язків спричинені тепловими флуктуаціями, а напруження створюють спрямованість цього процесу. До причин такого процесу належать:

- наявність технологічних дефектів у ізоляційних матеріалах КЛ, що призводить до локальних перенапружень;
- підвищення температури, яке прискорює руйнування через збільшення кількості теплових флуктуацій.

Часткові розряди в ізоляції виникають через неоднорідності у структурі діелектрика та напругу, що на нього впливає. Вважається, що саме ЧР є головною причиною старіння ізоляції, особливо полімерної. Таким чином, виникнення струмів нульової послідовності можливе через імпульси ЧР в ізоляції КЛ. Оскільки інтенсивність ЧР зростає з підвищенням температури, переважно через збільшення їх кількості в одиницю часу, це може спричиняти зниження порогової напруги початку ЧР при зростанні температури.

Надійність системи електропостачання значною мірою залежить від безаварійної роботи розподільчих електричних мереж напругою 6–35 кВ.

2.1 Види та причини пошкоджень кабельних розподільних електричних мереж

За характером пошкоджень у кабельних лініях електричних мереж розрізняють такі їх види:

- пошкодження ізоляції, що викликають замикання однієї фази на землю;
- пошкодження ізоляції, що викликають замикання двох або трьох фаз на землю;
- пошкодження ізоляції, що викликають замикання двох або трьох фаз між собою;
- обрив однієї, двох або трьох фаз без заземлення;
- обрив однієї, двох або трьох фаз із заземленням обірваних жил;

- обрив однієї, двох або трьох фаз із заземленням не обірваних жил; повзучий пробій ізоляції;

- пошкодження ліній одночасно в двох або більше місцях, кожне з яких може належати до однієї з наведених вище груп.

У розподільних електричних мережах найпоширенішим видом пошкоджень є однофазні замикання в силових кабельних лініях напругою 1–10 кВ. Вони найчастіше виникають при погіршенні стану ізоляції, що призводить до її пробою. У цьому випадку одна з жил кабелю замикається на екранувальну оболонку. Відомо, що в мережах з ізолюваною нейтраллю замикання фази на землю не є коротким замиканням і не потребує негайного відключення. Це дозволяє зберегти працездатність таких мереж за тривалих замикань фази на землю шляхом виявлення, локалізації та відключення місця пошкодження, а також створення тимчасової схеми живлення споживачів без їх знеструмлення. Проте не можна недооцінювати небезпеку однофазних замикань, головною з яких є ймовірність виникнення переривчастих дугових замикань фази на землю, що супроводжуються значними перенапругами в елементах мережі.

За даними експлуатаційного досвіду, 60–80 % однофазних замикань у мережах 6–10 кВ переходять у міжфазні короткі замикання або багатоточкові пробої ізоляції. Близько 40 % з них відбуваються через термічну дію дуги в мережах із підвищеним струмом замикання на землю, а понад 60 % — внаслідок пробою ізоляції під дією дугових перенапруг, що особливо характерно для мереж із струмом замикання на землю до 10 А, призначених для мереж власних потреб електростанцій.

Міжфазні пошкодження становлять приблизно 20 % усіх пошкоджень кабельних ліній. Їх поділяють на дві групи:

1. Пошкодження з перехідним опором у місці дефекту, близьким до нуля. У цьому випадку всі три жили можуть зваритися між собою і з екранувальною оболонкою. При великому струмі короткого замикання кабель може розгорітися на дві частини.

2. Пошкодження з опором від одиниць кілоом до сотень мегаом. У таких випадках між жилами та оболонкою є перехідний опір, а замикання між двома жилами відбувається через оболонку.

Замикання між двома жилами без контакту з оболонкою трапляється рідко. Обриви жил зазвичай виникають унаслідок переміщення шарів ґрунту в місцях розташування муфт, що призводить до витягування жил і, як правило, до їх розриву (розтягнення) у муфтах.

Замикання фази на землю супроводжується перенапругами в 2,4–3,5 рази більшими за фазну напругу, що може спричинити пробій ізоляції непошкоджених фаз і перехід однофазного замикання у двоточкове або двофазне замикання на землю — за характеристиками подібне до двофазного короткого замикання.

Ризик виникнення таких подвійних замикань останнім часом зріс через старіння ізоляції енергетичних об'єктів і відсутність достатнього фінансування на їх модернізацію або заміну.

Погіршення стану ізоляції кабельних ліній призводить до зростання струмів витоку, які можуть викликати замикання на землю через пошкоджений ізолятор, створюючи електронебезпечну ситуацію в мережі. Персонал, який обслуговує ці мережі, у разі аварії може зазнати дії струмів витоку. Тому необхідний безперервний контроль ізоляції мережі, що дозволяє запобігати небезпечним ситуаціям, пов'язаним з її погіршенням.

Для підвищення надійності функціонування електричних систем необхідне впровадження експлуатаційного моніторингу, технічної діагностики та прогнозування залишкового ресурсу енергетичного обладнання.

На перший план виходять методи діагностики, які забезпечують контроль поточного стану обладнання безпосередньо на місці його встановлення, під робочою напругою та в реальних умовах експлуатації. Діагностична система дозволяє визначити, чи можлива подальша безпечна експлуатація обладнання.

Причини пошкоджень:

◆ Проектні дефекти:

- погіршення властивостей ізоляції внаслідок перегріву струмами навантаження через занижене перерізання жил кабелю;

- пошкодження в аварійних режимах через неправильно підібрану захисну апаратуру тощо.

◆ **Заводські дефекти:**

- тріщини або наскрізні отвори в оболонці;
- задирки на дротах струмопровідних жил тощо.

◆ **Дефекти прокладання кабелю:**

- круті вигини на поворотах траси;
- механічні пошкодження (заломлення, вм'ятини, порізи, перекручування кабелю);

- порушення допустимих відстаней до об'єктів, що негативно впливають на кабелі (тепломережа, рейки електротранспорту) тощо.

◆ **Дефекти монтажу муфт:**

- пошкодження або забруднення ізоляції під час монтажу;
- неповне заливання муфти мастикою;
- погана опресовка з'єднувальних гільз тощо.

◆ **Пошкодження в процесі експлуатації:**

- природне старіння ізоляції;
- механічні пошкодження (наприклад, у траншеях під час земляних робіт технікою);
- обриви жил через просідання ґрунту тощо.

Тому завдання забезпечення ефективного та безперервного контролю стану ізоляції і, на його основі, своєчасного виявлення та усунення дефектів є актуальним.

Відомі методи визначення параметрів ізоляції мають ті чи інші недоліки. Одні вимагають встановлення додаткового високовольтного обладнання або застосування оперативного струму, що змінює робочий режим мережі та впливає на її безпеку та надійність. Інші — лише фіксують зниження опору

ізоляції, не визначаючи його абсолютне значення. Методи, засновані на вимірюванні режимних параметрів мережі без втручання у її роботу, потребують подальшого розвитку, адже наразі не забезпечують необхідної точності.

Розвиток і дослідження таких методів є актуальним завданням, що забезпечить безперервний моніторинг стану ізоляції кабельних мереж.

2.2 Аналіз надійності розподільчих електричних мереж

Важливим показником надійності та безпеки експлуатації розподільчих електричних мереж (РЕМ) напругою 6–35 кВ, а також безперебійності систем електропостачання споживачів, є стан матеріалу електричної ізоляції (ЕІ).

Електрична мережа — це сукупність електроустановок для передавання та розподілу електричної енергії між споживачами. Зазвичай вона включає підстанції, розподільчі пристрої, струмопроводи, повітряні та кабельні лінії електропередачі рис. 2.1.

Кабельні лінії є одними з основних елементів систем електропостачання міст, промислових підприємств і значною мірою визначають їх перспективний розвиток. Одне з ключових місць посідає питання проведення й організації обов'язкових енергетичних обстежень організацій і підприємств, зокрема й енерготехнологічних процесів у системах споживання електроенергії, через діагностику.

Під час аналізу ефективності використання енергії в системах споживання слід враховувати технічний стан усіх елементів, оскільки вони впливають на втрати енергії. Технічна діагностика — це галузь знань, що охоплює теорію, методи й засоби визначення технічного стану об'єкта. Технічний стан визначається значеннями параметрів при заданому навантаженні (потужності) та зовнішніх умовах, встановлених у технічній документації на об'єкт. Процес визначення стану об'єкта називається діагностуванням.

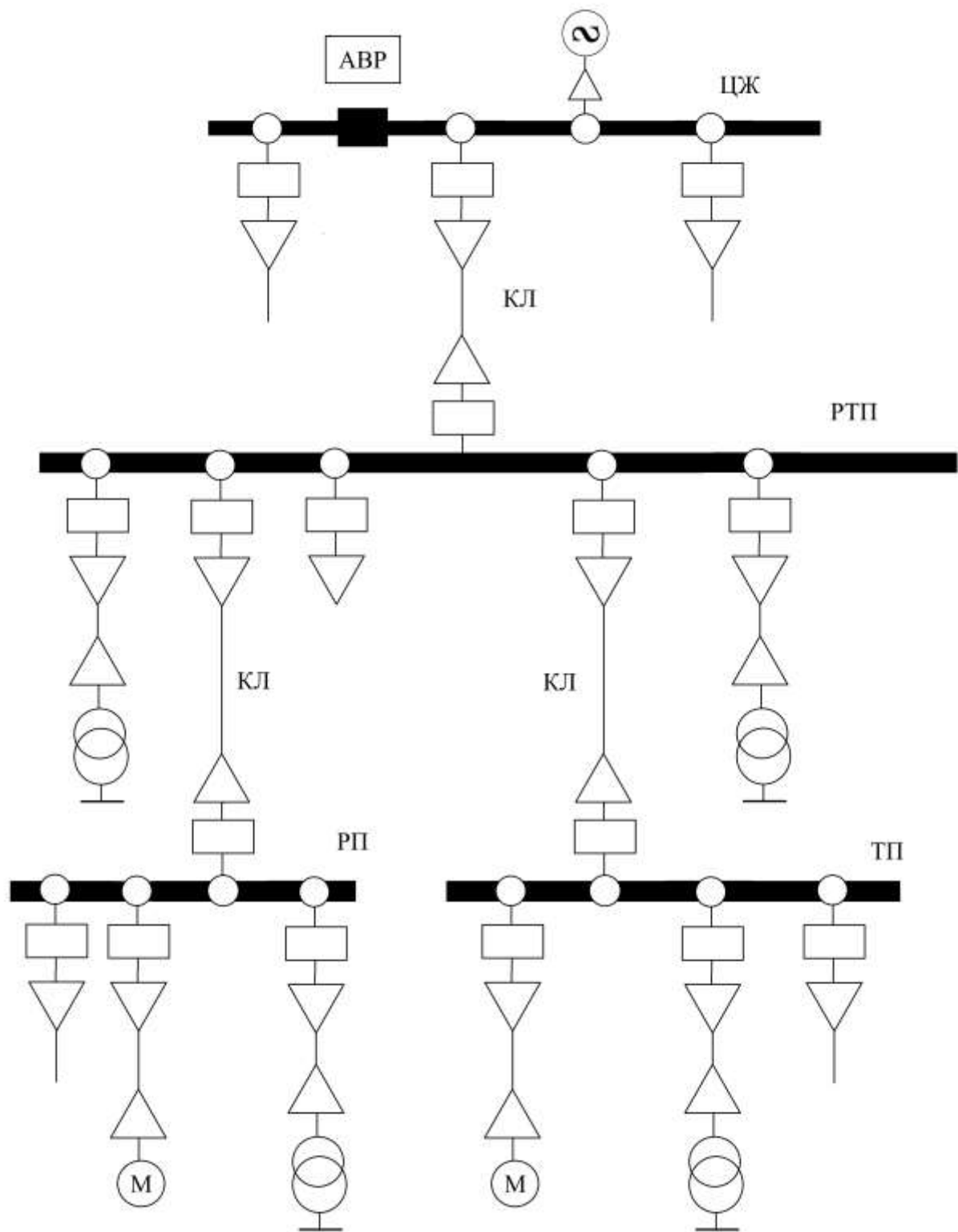


Рисунок 2.1 – Узагальнена електрична схема кабельної мережі

Технічну діагностику поділяють на:

- **робочу** — оцінювання стану об'єкта за вихідними параметрами при подачі на вхід робочих впливів;

- **тестову** — оцінювання реакції об'єкта на спеціально сформовані тестові впливи;

- **експрес-діагностику** — оцінювання за обмеженою кількістю параметрів за заданий проміжок часу.

Під час технічної діагностики стан елементів оцінюють за різними ознаками: нагрів окремих частин, електромагнітне поле, високочастотне випромінювання, вібрації тощо. Зміна цих параметрів свідчить про зміну стану елементів.

Проте технічна діагностика не дозволяє оцінити енергетичні показники кожного елемента енерготехнологічного процесу, які впливають на ефективність роботи енергосистеми.

Стан КЛ, як правило, контролюється за станом ізоляції. Найбільше поширення отримали методи, засновані на випробуваннях ліній підвищеною напругою. Але варто враховувати, що такі випробування:

- скорочують ресурс експлуатації КЛ або можуть спричинити їх пробій;
- не дають інформації про реальний технічний стан ліній, розташування дефектних ділянок, рівень їх небезпеки та залишковий ресурс експлуатації.

Вихід із ситуації підказує світовий досвід експлуатації КЛ: неруйнівними методами випробувань проводиться діагностика кабельних ліній 6–10 кВ з метою прогнозування залишкового ресурсу та своєчасного планового виведення кабелю в ремонт, що дозволяє уникнути раптових аварійних відключень (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 - Класифікація методів контролю та діагностики КЛ у розподільчих електричних мережах

Для забезпечення економічного й надійного електропостачання, продовження строку служби кабельних ліній і зменшення руйнівного впливу постійного струму, необхідно замінити випробування КЛ підвищеною напругою постійного струму на сучасні неруйнівні методи діагностики.

Завдяки таким методам, які передбачають періодичні вимірювання найбільш інформативних характеристик ізоляційного матеріалу (ІМ), можна отримувати інформацію не лише про поточний стан ізоляції без її пошкодження, а й прогнозувати залишковий термін служби кабелів з тривалим строком експлуатації. Ці дані дозволяють коригувати графіки профілактичних випробувань КЛ і формувати стратегію заміни кабелів із критичними включеннями або вичерпаним ресурсом ізоляції.

Неруйнівні методи діагностики є показником прогресивності технічних рішень для перспективного розвитку кабельних електричних мереж. Їх застосування — перспективне завдання, реалізація якого дозволить збільшити термін придатності КЛ і підвищити надійність електропостачання споживачів.

Особливості не руйнівних методів випробувань:

- Діагностика є превентивним заходом, який дозволяє запобігти аваріям, не пов'язаним із механічними пошкодженнями КЛ;
- Мета — не домогтися пробою ізоляції у слабкому місці, а спрогнозувати його появу;
- Застосування нижчих напруг зменшує рівень старіння ізоляції КЛ;
- Видимий результат — інформація про поточний стан ізоляції та її залишковий ресурс. Збереження даних дозволяє відстежувати динаміку змін у часі.

У ізоляційних матеріалах КЛ можливі такі види пробойів: електричний, іонізаційний та тепловий. Під час експлуатації кабелю найчастіше виникають теплові або іонізаційні пробойи. Під час випробування високою напругою через короткочасне її прикладення можуть відбуватися електричні або іонізаційні пробойи. Під час випробувань підвищеною випрямленою напругою процеси іонізації посилюються в декілька разів, що за регламентований час випробування (5 хв) спричиняє прискорене старіння ізоляції. При цьому пробій може не статися, і включення не буде виявлено.

Тому головною перевагою не руйнівних методів є те, що кабель не піддається прискореному старінню під час діагностики.

2.3 Неруйнівні методи діагностики силових кабелів

Неруйнівна діагностика — це нова концепція технічного обслуговування за фактичним технічним станом, заснована на прогнозуванні залишкового ресурсу надійності. До неруйнівного методу діагностики силових кабелів (СК) висуваються такі основні вимоги:

- діагностика повинна проводитись без погіршення експлуатаційних характеристик кабельної лінії;
- метод повинен бути простим у застосуванні в реальних умовах експлуатації, включно з обробкою результатів;
- за результатами діагностики має бути гарантована безаварійна робота СК до наступного контролю з достатнім рівнем імовірності;
- можливість застосування до СК різної конструкції та з різними ізоляційними матеріалами (ІМ);
- низька собівартість використання.

На сьогодні не існує методу, який би повністю задовольняв усім цим вимогам, однак пошук нових і вдосконалення існуючих методів активно ведеться у Німеччині, США, Японії та інших країнах з метою впровадження ефективних неруйнівних методів діагностики ІМ КЛ в умовах реальної експлуатації.

Найбільш уразливою ланкою КЛ є саме ізоляційні матеріали: паперова ізоляція, просочена маслом (ОІР), поліетилен (РЕ), зшитий поліетилен (XLPE). Основні типи їхнього старіння та руйнування: теплове старіння, електричні трекінги, водні трекінги.

Аналіз і класифікація методів контролю та діагностики КЛ дозволили виокремити перспективні напрямки досліджень: методи вимірювання характеристик часткових розрядів (ЧР) за допомогою затухаючих осцилюючих напруг; методи контролю струму нульової послідовності; вимірювання діелектричних характеристик ізоляції ($\text{tg}\delta$); температурні методи контролю термофлуктуаційних процесів у КЛ.

2.4 Метод вимірювання характеристик часткових розрядів

Основні причини зниження електричної міцності ІМ КЛ напругою до 35 кВ — це підвищена температура та наявність ЧР. Характеристики ЧР залежать від прикладеної напруги, температури, локалізації дефекту та змінюються з

часом. Методи діагностики поділяються на: акустичні (датчики звуку); оптичні (фотоелектронні підсилювачі); електричні (реєстрація імпульсів напруги ЧР).

Найефективнішими визнані електричні методи, оскільки вони дозволяють:

- виявити ділянки з включеннями на ранніх етапах старіння;
- підвищити достовірність діагностики;
- оцінити процес розвитку ЧР;
- фіксувати як множинні, так і поодинокі імпульси;
- оцінити локальні зміни електричних властивостей.

Часткові розряди — це локалізовані електричні пробої в діелектрику, що не замикають між собою струмопровідні елементи. Вони виникають у:

- газових включеннях (порожнинах) в ізоляції,
- на межі «ізоляція–електрод»,
- при механічних дефектах чи вологих ділянках кабелю.

ЧР є **ранніми маркерами** старіння кабелю: якщо їх не виявити вчасно — вони з часом призводять до повного пробою ізоляції.

Параметри, які характеризують часткові розряди:

- q — заряд імпульсу (пКл);
- U_e — порогова (початкова) напруга появи ЧР;
- n — частота виникнення імпульсів (імпульсів/с);
- φ — фаза імпульсу відносно синусоїдальної напруги (фазо-резольвінг);
- $\Delta q/\Delta t$ — швидкість зростання активності ЧР (індикатор розвитку дефекту);
- **локалізація дефекту** (напр., між жилами, поблизу екрану або оболонки).

Методи ЧР-діагностики поділяються на:

1. Акустичні

- Принцип: перетворення механічної хвилі (ультразвуку), викликаного розрядом, у електричний сигнал.
- Засоби: п'єзодатчики, ультразвукові сенсори.
- Переваги: можливість локалізації дефекту.

- Недоліки: слабкий сигнал, значна втрата енергії у товстих оболонках, чутливість до шумів.

2. Оптичні

- Принцип: реєстрація світлових імпульсів, які виникають під час ЧР.
- Засоби: фотоелектронні підсилювачі, оптоволоконні сенсори.
- Переваги: застосовуються для лабораторного аналізу зразків, кабелів у полімерних трубках.

- Недоліки: обмежене застосування в польових умовах, складність у інтерпретації сигналів.

3. Електричні (найефективніші)

- Принцип: фіксація високочастотних імпульсів напруги або струму, спричинених частковими розрядами.

- Засоби:

- високочастотні трансформатори струму (**HFCT**);
- конденсаторні сенсори;
- волоконно-оптичні датчики електричного поля;
- системи типу PD-Live, Omicron MPD, Pry-Cam.

Часто використовується **фазово-резольвінгова діагностика ЧР**: реєстрація імпульсів по фазі прикладеної напруги (PRPD-графік).

Переваги електричних методів ЧР-контролю:

- Дозволяють виявити ранні ознаки деградації до пробою.
- Працюють як на відключеному, так і на живому обладнанні (on-line/off-line методи).

- Дають змогу:

- ідентифікувати тип дефекту за формою імпульсів та фазовою характеристикою;
- оцінити швидкість розвитку пошкодження;
- вести архів розрядів для прогнозного обслуговування;
- локалізувати місце дефекту методом триангуляції.

Недоліки та обмеження електричних методів:

- Складність інтерпретації сигналів у складних електромагнітних умовах.
- Не завжди можливо визначити геометричний розмір дефекту.
- Потреба у застосуванні фільтрації та цифрової обробки сигналів, оскільки в умовах підстанцій та міських мереж є багато джерел завад (коронні розряди, частотні перетворювачі, радіо/телеком канали, імпульсні джерела живлення).
- Обладнання високої точності є вартісним, потребує кваліфікованого персоналу.

Сучасні дослідження зосереджені на:

- розвитку нейромережевих систем аналізу ЧР;
- об'єднанні різних методів контролю в єдину платформу (гібридні системи);
- використанні датчиків нового покоління з оптоволоконними технологіями;
- безконтактній on-line діагностиці без зупинки живлення;
- розробці індикаторів залишкового ресурсу ізоляції на основі динаміки ЧР.

2.5 Метод вимірювання діелектричних характеристик

Діелектричні характеристики – це сукупність параметрів, які визначають електричну поведінку ізоляційного матеріалу під дією електричного поля. Для кабельної ізоляції ці характеристики мають ключове значення, адже від них залежить:

- електрична міцність,
 - рівень втрат,
 - стабільність роботи за різних температур та частот.
- **Метод імпульсного пробою** визначає електричну міцність за допомогою короткочасної імпульсної напруги. Перевага - імітує реальні аварійні умови. Недолік - деструктивний (пошкоджує зразок).
- **Метод тангенса втрат ($\text{tg}\delta$)** поширений on-line/off-line метод для

кабелів. Використовується мостова схема або метр $\text{tg } \delta$. Зіставляє струм, що випереджає напругу (реактивний), і струм втрат (активний). Переваги: дає змогу оцінити старіння полімерної ізоляції; виявляє вологість, забруднення, мікротріщини. Недолік: не дозволяє локалізувати дефекти, а лише оцінює загальний стан.

- **Метод вимірювання ємності** дає змогу оцінити діелектричну проникність (ϵ). Часто застосовується в комбінації з $\text{tg } \delta$. Перевага: дозволяє виявити зміни геометрії ізоляції чи пошкодження структури. Недолік: низька чутливість до незначних дефектів.

- **Метод частотної спектроскопії** (FDS – Frequency Domain Spectroscopy) - подається синусоїдальна напруга змінної частоти (від мілігерц до кілогерц). Досліджується залежність $\text{tg } \delta$ і ємності від частоти. Переваги: чутливий до вологи, старіння XLPE; висока інформативність; добре працює при оцінці залишкового ресурсу. Недолік - тривалий час вимірювання (години).

- **Метод поляризаційного струму** (PDC – Polarization/Depolarization Current) - ізоляція заряджається постійною напругою (10–1000 В), після чого вимірюється струм деполаризації. Побудова часової кривої струму дозволяє оцінити глибокі дефекти.

Переваги: ефективний для оливонаповнених та вологих кабелів; дозволяє відстежити динаміку старіння. Недолік: застосовується переважно off-line (при відключенні).

Типове обладнання: OMICRON DIRANA – для FDS та PDC; BAUR DPA – аналіз втрат і ємності; Megger IDAX – спектроскопічний аналіз; HV diagnostics, SeBAK, HIPOTRONICS – для $\text{tg } \delta$ та випробувань ізоляції.

Переваги методів вимірювання діелектричних характеристик: неdestructивність (окрім імпульсного пробою); інформативність щодо рівня старіння; можливість оцінки залишкового ресурсу; застосування для профілактичного моніторингу та планування ремонтів.

Недоліки та обмеження: не завжди дозволяють локалізувати дефект (особливо $\text{tg } \delta$); Чутливість до температури, вологості, якості контактів; не всі

методи підходять для on-line діагностики; потрібне кваліфіковане трактування результатів.

2.6 Метод вимірювання струму нульової послідовності

Зміни в ІМ призводять до збільшення активної та реактивної провідності, що фіксується як підвищення СНП. Для цього використовують трансформатори струму нульової послідовності (ТСНП). Метод дозволяє: оцінити наявність замикань на землю; відокремити робочі струми від струмів несправностей; потенційно оцінити фазу та відстань до дефекту.

Метод трансформатора струму нульової послідовності (ЗТНП / ТНП)

- Всі три фазні провідники пропускаються через кільцевий трансформатор струму.

- У нормальному режимі сума магнітних потоків дорівнює нулю → на вторинній обмотці відсутній струм.

- Якщо з'являється неспівпадіння фазних струмів (наприклад, замикання на землю) — збуджується магнітний потік → на вторинному боці з'являється сигнал, пропорційний I_0 .

Це найпоширеніший метод, зокрема в РЗА.

Метод сумування фазних струмів

- Застосовується у цифрових реле або вимірювальних пристроях, де струми знімаються з кожної фази окремо, а потім арифметично підсумовуються програмно:

$$I_0 = I_A + I_B + I_C.$$

- Метод дозволяє гнучко налаштовувати логіку релейного захисту та контролювати динаміку струмів.

3. Метод використання трансформатора напруги з нульовою точкою

Якщо в обмотках трансформатора напруги є вивід середньої точки (нульової послідовності), можна виміряти напругу нульової послідовності й на основі неї визначити компоненту струму через імпеданс заземлення.

Типове обладнання: кільцеві трансформатори струму (ЗТНП) – Schneider,

ABB, Siemens, PACT, EKF; цифрові реле з функцією вимірювання I_0 – типу SEPAM, Micom, SIPROTEC, РЗЛ, ЕКРА; портативні аналізатори – Fluke 1730, Chauvin Arnoux C.A 8336, Metrel Eurotest.

Переваги методу

- **Висока чутливість** до замикань на землю навіть з малими струмами (декілька ампер).
- **Можливість використання у всіх типах мереж** (ізольованих, заземлених, компенсованих).
- **Компактність та надійність обладнання** (трансформатори кільцевого типу).
- **Придатність до on-line моніторингу.**

Обмеження та складнощі

- **Вимірювальна точність** залежить від симетрії фаз і калібрування трансформаторів.
- **Магнітне насичення сердечника ЗТНП** при великих аварійних струмах.
- **Вплив гармонік і паразитних струмів** (особливо в мережах з несиметричним навантаженням).
- **Не дозволяє визначити фазу з пошкодженням** без додаткової логіки.

Приклад практичного застосування

У мережі 10 кВ трансформаторного пункту встановлено ЗТНП на ввіді. При пошкодженні ізоляції одного з кабелів відбувається замикання на землю. Через ЗТНП протікає диференційний струм $I_0 \neq 0 \rightarrow$ сигнал подається на реле максимального струму нульової послідовності $\rightarrow$ спрацьовує відключення пошкодженої ділянки.

2.7 Температурний метод реєстрації ЧР

Базується на фіксації локального нагріву в місцях виникнення ЧР. Кожен ЧР супроводжується виділенням енергії, яка частково нагріває ізоляцію. Метод дозволяє: виявляти ділянки з активними ЧР; оцінити їх вплив на старіння.

Температурний метод ґрунтується на фіксації локального нагріву ізоляції внаслідок енерговиділення під час часткових розрядів. Кожен імпульс ЧР має невелику енергію, але в разі багаторазового повторення в одному й тому самому місці — виникає мікроскопічне локальне підвищення температури в матеріалі ізоляції.

Це допоміжний діагностичний метод, який дає змогу:

- виявляти місця скупчення ЧР,
- ідентифікувати розвиток дефекту ізоляції,
- оцінити вплив ЧР на перегрів ізоляції.

Кожен частковий розряд створює електричний пробій мікрооб'єму ізоляції. Цей пробій:

- супроводжується імпульсним струмом ($\sim$ нс) і виділенням енергії ($\sim$ мкДж);
- призводить до локального перегріву в точці розряду (підвищення температури на долі градуса).

Коли такі розряди повторюються тисячі разів, тепло не встигає розсіюватися → утворюється стійкий гарячий осередок.

Інфрачервона термографія (тепловізійний контроль)

- Використовуються тепловізори високої роздільної здатності, що можуть зафіксувати підвищення температури на 0,1–0,2 °С.
- Застосовується при обстеженні муфт, кінцевих з'єднань, кабелів у лотках.
- Особливо ефективно — в поєднанні з електричним методом ЧР: тепловізор показує «підозріле місце», а ЧР-аналізатор підтверджує активність.

Обладнання, що застосовується

- Fluke Ti400 / TiX560, Testo 883 — тепловізори з роздільністю до 640×480.
- FLIR T860, Keysight U5855A — промислові системи для обстеження електрообладнання.
- ІЧ-камери з мультиспектральним аналізом (можуть розрізняти відбиту та випромінену енергію).

- В кабелях з сенсорним волокном — інтегровані волоконно-оптичні температурні датчики (наприклад, PRY-CAM Fiber).

Переваги методу

- Безконтактність — дозволяє виконувати вимірювання без знеструмлення;
- Можливість просторової локалізації — видно точне місце перегріву;
- Підходить для on-line діагностики;
- Добре поєднується з електричним методом вимірювання ЧР;
- Дає змогу оцінити вплив ЧР на довгострокове старіння ізоляції.

Таблиця 2.1 - Обмеження та недоліки

Обмеження	Пояснення
Мала енергія ЧР	не завжди створює достатній нагрів, щоб фіксувати його стандартними тепловізорами.
Потрібна термоізоляція	у відкритому середовищі тепло розсіюється — потрібна ізоляція для накопичення температури.
Нечутливість до глибоких дефектів	метод фіксує лише поверхневий тепловий ефект.
Не дозволяє класифікувати тип ЧР	на відміну від фазово-резольвінгового аналізу, не дає електричної інформації.
Похибка в умовах інсоляції / вентиляції	вплив сонця, вітру, охолодження — спотворюють температуру.

Оптимальним вважається поєднання локальних і інтегральних методів діагностики з урахуванням термодинамічної моделі розвитку теплового пробою.

2.8 Аналіз характеристик та дослідження теплових процесів у кабельних лініях, спричинених частковими розрядами

Подальший розвиток методів визначення параметрів ізоляції передбачає реалізацію безперервного контролю ізоляції у вигляді діагностики на основі вимірювання режимних параметрів мережі в реальному часі. Така діагностика дозволить на ранній стадії виявити погіршення стану ізоляції, визначити відповідну ділянку та своєчасно усунути дефекти, тим самим запобігаючи аварійним ситуаціям у розподільчих мережах.

Одним із найефективніших методів діагностики електротехнічного обладнання під робочою напругою є метод діагностики за частковими розрядами (ЧР), який дозволяє виявляти швидко розвиваючі локальні дефекти.

В ізоляційному матеріалі (ІМ) кабельних ліній електричних мереж існують різноманітні неоднорідності у вигляді включень, прошарків між окремими шарами, мікротріщин, відшарувань ізоляції тощо. За рахунок перерозподілу електричного поля внаслідок різниці діелектричної проникності ϵ та питомої провідності γ , тобто $\epsilon_1 \cdot E_1 = \epsilon_2 \cdot E_2$ або $\gamma_1 \cdot E_1 = \gamma_2 \cdot E_2$, у місцях цих неоднорідностей виникає висока локальна напруженість поля. Розвиток розряду в області включення, де має місце висока локальна напруженість поля, викликає неповний пробій ізоляції — частковий розряд (ЧР). Практика показує, що на змінній напрузі відбувається найбільш небезпечний розвиток ЧР, який призводить до інтенсивного зношування ізоляції в області включення з подальшим пробоем усієї ізоляції. Це пов'язано з тим, що ЧР викликають підвищення локальної температури в зоні ЧР за рахунок виділення тут енергії. ЧР становлять велику небезпеку для ізоляції через швидке її руйнування в локальних зонах і подальший пробій ізоляційних проміжків. У процесі експлуатації відбувається погіршення діелектричних властивостей ізоляції та її відмова, що становить значну частину від усіх пошкоджень середньої розподільчої системи (СРС). Тому проблема утворення та розвитку ЧР в ІМ в умовах її експлуатації становить великий інтерес як для персоналу, що експлуатує обладнання, так і для розробників обладнання та дослідників електроізоляції.

Розробка фізичних принципів визначення включень в ІМ методом ЧР є одним із завдань дисертаційної роботи. Існує необхідність виділити такі типи старіння та руйнування електроізоляції (ЕІ) кабельних ліній: теплове старіння, електричні та водні трекінги. Послідовність і взаємозв'язок процесів, що призводять до старіння та пробоею ізоляції, можна подати у вигляді такої схеми, рисунок 2.3.

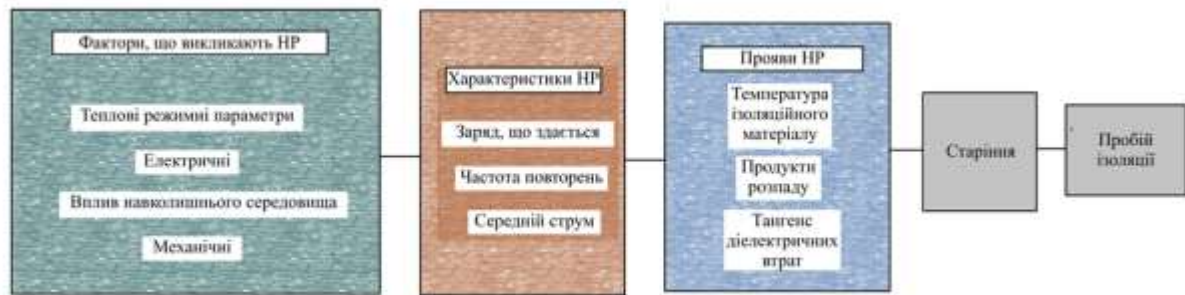


Рисунок 2.3 – Алгоритм процесу старіння та пробою ізоляції КЛ

Тепловий пробій пов'язаний із нагріванням діелектрика під час проходження струму провідності та розвитком діелектричних втрат. Розвиток теплового пробою в загальних рисах можна представити у вигляді такої послідовності (рисунок 2.2), де:

- U_B – напруга, що виникає у включенні;
- I_B – струм, який протікає у включенні;
- θ_B – температура у включенні;
- γ – провідність ізоляційного матеріалу (ІМ);
- $\text{tg}\delta$ – тангенс кута діелектричних втрат;
- P_B – потужність, що виділяється при утворенні включення;
- $W_{чр}$ – енергія, що виділяється при утворенні включення;
- Q_B – теплота, що виділяється у включенні.



Рисунок 2.4 – Розвиток теплового пробою

Проаналізовано існуючі неруйнівні методи визначення залишкового ресурсу кабельних систем в умовах реальної експлуатації. Показано, що більшість діагностичних методів не забезпечують достатньої надійності,

оскільки відсутні точні кількісні залежності між результатами випробувань та фізичними процесами, які відбуваються в електричній ізоляції кабелів.

Розроблено теоретичне обґрунтування процесів розвитку часткових розрядів (ЧР), механізмів старіння та електричного пробою ізоляційного матеріалу (ІМ).

Доведено, що основним чинником деградації електроізоляції кабельних ліній є термофлуктуаційні процеси, які виникають під час проходження струмів провідності, а також розвиток діелектричних втрат.

Запропоновано найбільш перспективні неруйнівні методи діагностики, адаптовані до режимних параметрів експлуатації кабельних ліній електричних мереж класу напруги 6–10 кВ.

Для підвищення ефективності технічної діагностики КЛ необхідна модифікація діагностичних підходів з урахуванням фізичних механізмів старіння, зокрема часткових розрядів та теплових флуктуацій. Надійне оцінювання залишкового ресурсу можливе лише при поєднанні експериментальних даних і теоретичних моделей, а також адаптації методів до реальних умов експлуатації.

РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ В УМОВАХ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ УКРАЇНИ

Застосування методів контролю технічного стану кабельних ліній у розподільних електричних мережах України має свої особливості, зумовлені як технічними, так і економічними чинниками. Попри обмежені ресурси, значна частина українських операторів системи розподілу (ОСР) впроваджує діагностичні підходи, спрямовані на зменшення аварійності та подовження терміну експлуатації КЛ.

Основні практичні аспекти, що впливають на реальне використання методів контролю.

Доступність технічних засобів діагностики - використання тих чи інших методів контролю часто визначається наявністю відповідного обладнання в обслуговуючих підприємствах. Найчастіше ОСР мають:

- Мегаомметри для вимірювання опору ізоляції кабелів;
- Портативні рефлектометри для виявлення та локалізації пошкоджень;
- Тепловізори, що застосовуються для огляду кабельних з'єднань та кінцевих муфт;
- Імпульсні випробувальні установки для проведення високовольтних випробувань ізоляції.

Проте застосування більш складних методів (наприклад, постійного моніторингу часткових розрядів або використання аналізу $\text{tg } \delta$) часто обмежене лише великими міськими компаніями через високу вартість обладнання.

Кадрове забезпечення та практичний досвід - одним із головних обмежень є нестача кваліфікованих спеціалістів, які володіють сучасними діагностичними методами. Особливо це актуально для середніх та малих підприємств, де обслуговування КЛ здійснюється здебільшого за «класичними» підходами:

- обстеження лише при підготовці до зими;
- випробування лише в разі введення в експлуатацію або після аварії;
- відсутність регулярного аналізу змін параметрів КЛ.

Оперативно-ремонтний персонал часто орієнтується на нормативи, а не на фактичні ознаки деградації, що обмежує ефективність діагностики.

Виробничі обмеження та енергетичні ризики - через обмежені можливості для відключення КЛ у щільно завантажених міських мережах, діагностичні роботи часто проводяться в короткі «вікна» між піковими навантаженнями або вночі. Це зменшує обсяг робіт і вимагає точного планування.

Також у багатьох ОСР відсутня повна цифрова карта прокладання КЛ, що ускладнює доступ до муфт і ділянок для діагностики, особливо в старих районах міст.

Економічна доцільність та пріоритезація - розподільні компанії змушені вибудовувати систему пріоритетів, де найбільш детально обстежуються:

- кабельні лінії, що живлять критичну інфраструктуру (лікарні, насоси, котельні);
- траси, на яких уже фіксувалися пошкодження;
- лінії з частими скаргами споживачів на якість електропостачання.

Менш критичні лінії обстежуються вибірково, в основному під час планових ремонтів або реконструкції.

Інтеграція з сучасними системами керування - у деяких енергокомпаніях розпочато інтеграцію результатів діагностики КЛ із SCADA-системами та базами обліку інцидентів. Це дозволяє:

- оперативно реагувати на виявлені аномалії;
- формувати звіти про стан КЛ у конкретних районах;
- прогнозувати потенційно аварійні ділянки на основі історії пошкоджень.

Хоча такі системи поки що діють локально, вони створюють передумови для переходу до прогнозного технічного обслуговування.

Практика використання мобільних лабораторій - у найбільших ОСР (наприклад, ДТЕК Київські електромережі, Львівобленерго) застосовуються мобільні діагностичні лабораторії, оснащені генераторами випробувальних імпульсів, рефлектометрами, системами для визначення PD та тепловізійним обладнанням. Вони дозволяють оперативно обстежити КЛ на місці та швидко

локалізувати пошкодження навіть у складних умовах.

3.1 Аналіз реального стану кабельних ліній в українських розподільних мережах

Сучасний стан кабельних ліній (КЛ) у розподільних електричних мережах України відображає наслідки тривалого періоду експлуатації, недостатнього рівня інвестицій в оновлення інфраструктури, а також складної соціально-економічної ситуації, що загострилася внаслідок воєнної агресії РФ. Більшість КЛ було прокладено у 1970–1990-х роках, і значна частина з них вже вичерпала або наближається до завершення свого нормативного ресурсу.

За даними профільних операторів систем розподілу (ОСР), середній вік кабельних ліній у міських електричних мережах становить понад 30 років, що значно перевищує допустимий термін експлуатації для паперово-ізольованих кабелів (ПІЗ) — близько 25 років. При цьому значна частина пошкоджень трапляється саме у лініях із застарілою ізоляцією, які є чутливими до вологи, механічних навантажень та температурних коливань.

До ключових проблем, що фіксуються в українських розподільних мережах, належать:

- **Підвищена аварійність** КЛ у періоди міжсезонного навантаження (осінь/весна), коли різко змінюються температурні умови й рівень ґрунтової вологи.

- **Невідповідність технічного стану документованим даним:** через відсутність актуалізованих схем та недостатній облік технічного зносу реальний стан траси може суттєво відрізнятись від паспортних характеристик.

- **Фрагментарність модернізації:** заміна старих кабелів виконується лише у випадках аварій, а не на основі планового обстеження чи прогнозової діагностики.

- **Недостатній рівень автоматизації моніторингу:** у більшості регіональних ОСР відсутні системи безперервного онлайн-контролю КЛ, через що основна діагностика проводиться в реактивному (аварійному) режимі.

• **Невелике поширення поліетиленових кабелів (XLPE)** нового покоління, що мають вищу стійкість до старіння, перегріву та часткових розрядів.

Актуальними залишаються й організаційно-економічні труднощі:

• відсутність централізованої системи обліку та аналізу пошкоджень КЛ по Україні;

• недостатнє фінансування планових обстежень та інвестицій у сучасне діагностичне обладнання;

• брак спеціалістів, що володіють сучасними методами контролю стану кабельних ліній.

У контексті післявоєнної відбудови інфраструктури, а також потреби у підвищенні надійності розподільних мереж, особливого значення набуває впровадження методів прогностичного технічного обслуговування КЛ. Це передбачає не лише заміну фізично зношених елементів, але й впровадження автоматизованих систем діагностики, аналізу історії відмов, застосування штучного інтелекту для оцінки ризиків та пріоритизації ремонтів.

Таким чином, аналіз сучасного стану кабельних ліній свідчить про наявність комплексної проблеми, що потребує системного підходу до діагностики, технічного обслуговування і модернізації розподільних електричних мереж в Україні.

Якщо потрібно, можу додати таблицю з прикладами пошкоджень, статистику (на основі відкритих джерел), або кейс з одного із регіональних ОСР.

3.2 Приклади впровадження діагностичних методів на об'єктах ДТЕК, НЕК «Укренерго» та регіональних Обленерго

На фоні зростаючих вимог до надійності електропостачання та потреби в зниженні експлуатаційних витрат, провідні енергетичні компанії України — зокрема ДТЕК, НЕК «Укренерго», а також регіональні оператори системи розподілу (ОСР) — поступово впроваджують сучасні методи діагностики та

моніторингу кабельних ліній електропередавання. Нижче наведено узагальнення прикладів впровадження технологій контролю технічного стану КЛ в окремих компаніях.

ДТЕК Мережі

Один із найактивніших інвесторів у модернізацію розподільної інфраструктури в Україні — група ДТЕК — впроваджує комплексні підходи до технічного обслуговування КЛ. Зокрема:

- Тепловізійне обстеження кабельних муфт і кінцевих з'єднань на підстанціях 6–35 кВ для виявлення локальних перегрівів і контактних дефектів.
- Використання рефлектометрів типу TDR для локалізації місць пошкодження КЛ у міських мережах Києва, Дніпра та Одеси.
- Пілотні проекти з впровадження онлайн-систем часткових розрядів на кабелях з ізоляцією з зшитого поліетилену (XLPE) на нових підстанціях.
- У 2022–2023 роках було реалізовано проекти цифрової паспортизації кабельних трас з ГІС-прив'язкою у Київських електромережах, що значно полегшило облік та обстеження.

НЕК «Укренерго»

Як оператор магістральних мереж, Укренерго впроваджує діагностику високовольтних КЛ (110–330 кВ), особливо на стратегічних напрямках:

- Використання високовольтних резонансних випробувальних установок для перевірки цілісності ізоляції перед введенням нових КЛ у роботу.
- **Діагностика часткових розрядів** у КЛ 330 кВ із використанням мобільних комплексів (наприклад, PD-Center).
- Інтеграція систем віддаленого моніторингу температури та струмового навантаження кабелів у підсистему SCADA.
- У деяких проектах, що фінансуються за рахунок міжнародних партнерів (наприклад, KfW чи EIB), застосовуються **передові діагностичні технології** з прогновною аналітикою.

Обленерго (наприклад, АТ «Львівобленерго», ПрАТ «Полтаваобленерго», АТ «Вінницяобленерго»)

Регіональні ОСР поступово запроваджують цільові діагностичні роботи, переважно в рамках планових або аварійних ремонтів:

- ПрАТ «Полтаваобленерго» застосовує портативні пристрої для вимірювання тангенса кута діелектричних втрат ізоляції старих кабелів 6–10 кВ, що дозволяє прогнозувати деградацію.

- АТ «Львівобленерго» регулярно виконує перевірку опору ізоляції кабелів 0,4–10 кВ при знеструмленні для виявлення дефектів перед підключенням до резервного живлення.

- АТ «Вінницяобленерго» впровадило електронну базу пошкоджень кабелів з класифікацією за причинами — це дозволяє проводити статистичний аналіз та оптимізувати технічне обслуговування.

- У кількох областях діють мобільні діагностичні лабораторії, оснащені генераторами випробувальних імпульсів, рефлектометрами, мегаомметрами та тепловізорами.

Таблиця 3.1 – Методи контролю в різних енергокомпаніях України

Компанія	Метод(и) контролю	Напруга КЛ	Особливості
ДТЕК Київські мережі	Рефлектометрія, тепловізія, PD-аналіз	6–35 кВ	Впровадження ГІС
Укренерго	Випробування високою напругою, PD, SCADA-моніторинг	110–330 кВ	Пріоритет — стратегічні об’єкти
Полтаваобленерго	Тангенс дельта, ізоляція	6–10 кВ	Станова діагностика
Львівобленерго	Вимірювання опору ізоляції	0,4–10 кВ	Рутинна діагностика
Вінницяобленерго	База пошкоджень, мобільна лабораторія	0,4–35 кВ	Статистичний аналіз

3.3 Рекомендації щодо вибору методів контролю для КЛ з урахуванням локальних особливостей

Вибір оптимального методу контролю технічного стану кабельних ліній електропередавання (КЛ) у розподільних електричних мережах має ґрунтуватися на комплексному аналізі низки факторів: технічного стану КЛ, типу їх ізоляції, віку, умов прокладання, критичності об'єкта, а також доступного бюджету. Нижче сформульовано практичні рекомендації для обґрунтованого вибору методів діагностики з урахуванням найпоширеніших локальних особливостей.

1. Вік кабелів і тип ізоляції

• Кабелі з паперово-імпрегнованою ізоляцією (ПІЗ), вік > 25 років:

- *Рекомендовані методи:* вимірювання тангенса кута діелектричних втрат ($\tan \delta$), випробування підвищеною напругою змінного/імпульсного струму, тепловізійна діагностика з'єднань і муфт.

- *Пояснення:* ПІЗ чутлива до вологи та старіння, тому важливо діагностувати втрату ізоляційних властивостей.

• Кабелі нового покоління (XLPE), вік < 20 років:

- *Рекомендовані методи:* моніторинг часткових розрядів (PD), термоконтроль, аналіз струмового навантаження.

- *Пояснення:* XLPE добре працюють у нормальних умовах, але можуть бути вразливими до локальних дефектів під час монтажу.

2. Тип середовища прокладання

• Прокладання в ґрунті:

- *Проблеми:* волога, хімічно активні ґрунти, просідання.
- *Рекомендовані методи:* періодичне вимірювання опору ізоляції, тепловізійне сканування муфт і виходів, рефлектометричний контроль у випадку аварій.

• Прокладання у каналах, тунелях або колекторах:

- *Переваги:* доступ до трас, стабільні умови.

- *Рекомендовані методи:* ручне тепловізійне обстеження, встановлення температурних датчиків, регулярний візуальний огляд з елементами автоматизації.

- **Підводне або підземне прокладання без доступу:**

- *Рекомендовані методи:* імпульсна рефлектометрія, дистанційне вимірювання струмів витоку, комплексна оцінка за допомогою мобільних діагностичних лабораторій.

3. Критичність об'єкта

- **Живлення лікарень, насосних станцій, комунальних підприємств:**

- *Рекомендовані методи:* застосування постійного моніторингу (PD-сенсори, температурні датчики), попереджувальні випробування ізоляції при відключеннях, електронні паспорти КЛ.

- *Пояснення:* необхідна висока надійність і прогнозування зносу.

- **Лінії резервного живлення або малонавантажені траси:**

- *Рекомендовані методи:* контроль у разі планового ремонту або після тривалого відключення, локальна перевірка опору ізоляції.

4. Обсяг фінансування та наявність обладнання

- **Обмежений бюджет:**

- *Мінімально необхідні методи:* періодичне вимірювання опору ізоляції (мегаомметром), візуальний огляд доступних ділянок, ручна тепловізійна зйомка критичних елементів.

- *Оптимізація:* обстеження проводиться за пріоритетністю (вікові КЛ, великі споживачі, лінії з частими відмовами).

- **Середній бюджет:**

- *Додаткові можливості:* закупівля переносного рефлектометра, локальний PD-аналіз, ведення бази даних КЛ.

- **Доступ до фінансування або інвестиційні проекти:**

- *Просунуті рішення:* впровадження систем безперервного моніторингу, аналітика з елементами машинного навчання, використання ГІС і цифрових моделей стану мережі.

Рекомендований алгоритм вибору діагностичного підходу

1. **Інвентаризація та паспортизація КЛ** (вік, тип, середовище, навантаження).
2. **Пріоритезація трас** за рівнем критичності та аварійністю.
3. **Оцінка бюджету та ресурсів** (кадрових і технічних).
4. **Вибір оптимального поєднання методів контролю** — з урахуванням вищенаведених умов.
5. **Аналіз результатів та формування плану обслуговування / модернізації.**

Таким чином, індивідуальний підхід до вибору методів контролю стану КЛ дозволяє ефективно використовувати ресурси, знижувати ризики відмов і продовжити термін експлуатації кабельної інфраструктури навіть за обмеженого фінансування. Це особливо актуально для енергетичної системи України в умовах її реконструкції та посилення стійкості.

3.4 Перспективи впровадження систем прогнозного технічного обслуговування

У світовій практиці експлуатації кабельних ліній електропередавання дедалі більше уваги приділяється переходу від реактивного та планово-профілактичного обслуговування до прогнозного технічного обслуговування (predictive maintenance, PdM). Цей підхід базується на аналізі фактичного технічного стану обладнання, використанні сучасних засобів моніторингу та цифрових технологій з метою завчасного виявлення ознак наближення до відмови. Для українських розподільних мереж така стратегія відкриває низку важливих перспектив.

1. Цифровізація енергетичної інфраструктури як основа PdM

Завдяки поступовій модернізації енергетичного сектору та впровадженню **розумних мереж (Smart Grid)** зростає потенціал для цифрового моніторингу кабельних ліній. Сучасні сенсорні системи, телеметричне обладнання, SCADA, а також інтернет речей (IoT) дозволяють:

- Збирати дані про температуру, струм, напругу, часткові розряди, опір ізоляції в реальному часі.

- Виявляти тренди деградації ізоляції ще до виникнення аварій.

- Формувати автоматизовані графіки обслуговування на основі реальних показників, а не за календарним принципом.

2. Переваги впровадження прогностного обслуговування кабельних ліній

- ✓ **Підвищення надійності мережі** — зменшення кількості аварійних відключень і скорочення середнього часу відновлення.

- ✓ **Зниження витрат** — планова заміна дефектних ділянок замість дорогих аварійних ремонтів.

- ✓ **Оптимізація ресурсів** — зниження навантаження на аварійні бригади, економія матеріалів.

- ✓ **Подовження строку служби кабельних ліній** — завдяки обслуговуванню лише там, де це дійсно потрібно.

- ✓ **Аналітика та планування** — створення баз даних для прогнозування деградації ізоляції, побудова ризик-орієнтованих моделей.

3. Технології, які забезпечують PdM для КЛ

- **PD-сенсори (часткові розряди)** — моніторинг локальних дефектів ізоляції.

- **Теплові датчики** — контроль температури муфт, з'єднань, ділянок із підвищеним навантаженням.

- **Онлайн-вимірювачі ізоляційного опору** — безперервне визначення витоку струму.

- **Рефлектометри нового покоління (OTDR)** — застосування у поєднанні з автоматичним аналізом.

- **Big Data та машинне навчання** — аналіз великих обсягів даних для побудови прогностичних моделей деградації.

4. Перешкоди на шляху впровадження PdM в Україні

- Недостатнє фінансування ОСР, особливо в регіонах.
- Відсутність уніфікованої інфраструктури цифрового моніторингу.
- Брак кваліфікованих фахівців у сфері data science для енергетики.
- Відсутність централізованого обліку історичних відмов та дефектів КЛ.

5. Перспективи розвитку в найближчі роки

З урахуванням курсу на відбудову енергетичної інфраструктури України, в тому числі за підтримки міжнародних партнерів, очікується:

- Активізація інвестицій у пілотні проєкти цифрової діагностики КЛ в містах-мільйонниках.
- Формування реєстрів технічного стану кабельних мереж у ГІС-системах.
- Інтеграція PdM у загальні стратегії енергетичної безпеки та децентралізації мереж.
- Розробка національних стандартів і методик прогнозного обслуговування кабельних ліній.

Таким чином, системи прогнозного технічного обслуговування є стратегічним напрямом для підвищення надійності, ефективності й довговічності кабельних мереж. Їх впровадження — це не лише технологічний виклик, а й важливий крок до енергетичної модернізації України, особливо в умовах післявоєнного відновлення критичної інфраструктури.

Загалом, практичне застосування методів контролю в умовах розподільних мереж України демонструє поступовий перехід від реактивного до проактивного підходу в обслуговуванні КЛ. Хоча існує низка обмежень, поєднання доступних технічних засобів, правильної пріоритизації об'єктів та базового рівня діагностики дозволяє суттєво зменшити кількість аварійних ситуацій. Подальший розвиток цієї сфери можливий лише за умови фінансування, підготовки кадрів та впровадження цифрових технологій.

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

У цьому розділі бакалаврської роботи розробляються заходи з охорони праці під час організації обслуговування та діагностування стану кабельних ліній електропередавання. Відтак, на оперативно-ремонтний персонал, що здійснює обслуговування та діагностування обладнання розподільних електричних мереж, впливають такі шкідливі виробничі фактори [21, 22]:

- фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна, загальна); освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо);

- хімічні фактори: речовини хімічного походження, аерозолі фіброгенної дії (пил);

- фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: інтелектуальні, сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

4.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкту

4.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць

Випробувальні електроустановки повинні задовольняти вимоги ПВЕ.

Обслуговування випробувальних установок провадиться спеціально підготовленими електротехнічними працівниками відповідно до [23].

На випробувальній станції і в лабораторії повинен бути повний комплект схем випробувальних стендів. Всі елементи повинні мати чітке маркування згідно зі схемами і кресленнями.

Всі зміни в схемах постійних електричних з'єднань випробувальної станції і лабораторії можуть провадитися тільки з дозволу особи, відповідальної за електроустановку, і мають відображатись на кресленнях і схемах.

Постійні огороження, відкриті зверху, повинні бути висотою не нижче 1,7 м, а тимчасові огороження (щити, ширми, ізолювальні накладки і огороження — клітки), виготовлені з ізоляційних матеріалів — не нижче 1,8 м. В разі проведення випробувань, під час яких допускається перебування людей всередині огороження, двері постійних огорожень випробувальних полів повинні відчинятися назовні або розсуватися. Замки дверей мають бути такими, що самі замикаються, а двері — відчинятися зсередини без ключа за допомогою рукоятки.

Пульти керування, встановлені у виробничих приміщеннях, слід обгородити. Пульти керування випробувальних станцій і лабораторій допускається не обгороджувати, якщо вони розташовані в окремих приміщеннях або конструкція пульта виключає доступ до його струмовідних частин без повного зняття напруги.

В разі влаштування проходів під пунктами підключення їх струмовідні частини слід обгороджувати знизу стаціонарними сітками або під час випробувань — переносними огороженнями.

В разі використання відкрито встановлених кенотронних ламп мають бути передбачені заходи захисту працівників від шкідливого впливу рентгенівського випромінювання металевими екранами товщиною не менше 0,5 мм.

На випробувальному стенді слід передбачити можливість відключення всіх джерел живлення загальним комутаційним апаратом. Особливу увагу слід звернути на можливість зворотної трансформації напруги.

Трансформатори для випробування електричної міцності ізоляції слід забезпечувати автоматичними вимикачами для зняття напруги в разі пробиття ізоляції і високоомним опором для обмежування струму КЗ.

Для забезпечення слід керуватись підвищеними нормами освітлення:

- шкали вимірювальних приладів – 150 лк; – комутаційна апаратура – 100 лк; – випробуваний об’єкт – 50 лк;

- на випробній станції і в лабораторії слід передбачити аварійне освітлення.

Біля дверей випробувальних полів встановлюються ліхтарі світлового сигналу і застережні плакати.

Пульт керування випробувальної станції має бути розміщений таким чином, щоб випробувальне поле знаходилося в зоні прямої видимості особи, що проводить випробування. Якщо у виробничих установках цю вимогу виконати не вдається, має бути передбачений телефонний зв’язок і попереджувальна звукова сигналізація.

Пульти керування випробувальних станцій і лабораторій слід забезпечувати сигнальними лампами, ввімкненими в коло:

- апаратів, які подають напругу на пункти керування;
- блокування дверей огорожень виробничих полів.

Металеві корпуси всього устаткування слід заземлювати. Якщо за умовами випробувань прилад або об’єкт випробування заземленню не підлягає, то його слід огородити.

Випробувальні установки, призначені для випробування засобів з великою ємністю, а також їх елементи (кабелі, конденсатори) слід забезпечувати пристроями для зняття залишкового заряду.

Розставлення і зняття переносних огорожень проводяться тільки за розпорядженням керівних робіт.

Збирання схеми слід проводити тільки за умови повного зняття напруги з пунктів підключення.

Перед початком випробувань керівник робіт зобов’язаний перевірити:

- правильність збирання схеми;
- наявність і надійність заземлень всіх елементів схеми;
- наявність захисних засобів;
- дію сигналів і блокувань;

- відсутність людей на випробувальному полі, якщо їх присутності не передбачено програмою випробувань.

Присутність працівників на виробничому полі допускається тільки за умови особистого нагляду керівника робіт за їх діями.

Перед подачею випробувальної напруги на випробувальне поле оператор повинен подати попереджувальний звуковий або світловий сигнал і оголосити усно: «Подаю напругу», та пересвідчитись, що його почули.

Проведення випробувань в разі несправного блокування або сигналізації забороняється. Дозволяється керівникові робіт закінчити розпочате випробування, якщо несправність блокування не становить небезпеки для працівників.

Переносні кабелі і проводи, що застосовуються для приєднання обладнання та виробів, які випробовуються, і складання тимчасових схем, повинні підлягати періодичному зовнішньому огляду і за необхідності випробовуватись з періодичністю, передбаченою інструкцією. Проводи і кабелі, що використовуються, слід забезпечити наконечниками.

Працівники випробувальної станції, лабораторії повинні знати місцезнаходження вимикача (рубильника, кнопки) аварійного зняття напруги зі всієї випробувальної станції і кожного стенду.

В колі живлення випробувальних електроустановок повинно бути не менше двох розривів, в тому числі один видимий.

Високовольтний вивід випробувального трансформатора в разі збирання випробувальної схеми слід заземлити включенням заземлювальних ножів в стаціонарних установках або встановленням гнучкого заземлювального провідника за допомогою штанги в тимчасових схемах.

Роботи на випробувальній станції, в лабораторії, на переносних випробувальних установках провадяться:

- в порядку масових контрольних випробувань за типовими програмами;
- за розпорядженням начальника випробувальної станції, лабораторії — з записом в журналі;

- за нарядами в діючих електроустановках;
- в порядку виконання наукових досліджень (за спеціальною програмою);
- в порядку виконання навчальної роботи.

Список робіт, які провадяться за типовими програмами, програми і посадові інструкції затверджуються керівником підприємства, навчальні роботи — керівництвом кафедри або предметною комісією.

Працівникам, які провадять випробування, забороняється залишати робоче місце до закінчення випробувань без дозволу керівника робіт, в тому числі і викладача.

Знаходження сторонніх осіб на території випробувальної станції, лабораторії допускається тільки з дозволу особи, відповідальної за електроустановку, і під наглядом особи, яка має кваліфікаційну групу III.

4.1.2 Електробезпека

Основні технічні рішення щодо запобігання електротравмам:

- 1) виконання технічних заходів під час підготовки робочого місця,
- 2) застосування під час обслуговування електроустановок електрозахисних засобів.

1) Під час підготовки робочого місця для роботи, яка вимагає знімання напруги, слід виконати у зазначеній послідовності такі технічні заходи:

- провести необхідні вимкнення і вжити заходів щодо запобігання помилковому або самочинному вмиканню комутаційної апаратури;
- вивісити заборонні плакати на приводах ручного і на ключах дистанційного керування комутаційної апаратури. За необхідності струмопровідні частини слід огорожувати;
- приєднати до "землі" переносні заземлення;
- перевірити відсутність напруги на струмопровідних частинах, на які слід встановити заземлення. Якщо переносні заземлення планується ставити поблизу струмопровідних частин, що не входять в зону робочого місця, то їх огороження слід встановити до перевірки відсутності напруги та заземлення;

- встановити заземлення (увімкнути заземлювальні ножі, приєднати до вимкнених струмопровідних частин переносні заземлення) безпосередньо після перевірки відсутності напруги та вивісити плакати "Заземлено" на приводах вимикальних комутаційних апаратів;

- огородити, у разі необхідності, робочі місця або струмопровідні частини, що залишились під напругою, і вивісити на огороженнях плакати безпеки. Залежно від місцевих умов струмопровідні частини огорожують до або після їх заземлення.

2) Під час обслуговування електроустановок повинні застосовуватись засоби захисту від ураження електричним струмом, від впливу електричного поля, а також засоби індивідуального та колективного захисту. Ізолювальні електрозахисні засоби поділяються на основні і додаткові. До основних ізолювальних електрозахисних засобів, які повинні застосовуватись в електроустановках напругою понад 1000 В, відносяться: ізолювальні штанги всіх видів, ізолювальні кліщі, електровимірювальні кліщі, показчики напруги, пристрої для створення безпечних умов праці під час проведення випробувань і вимірювань в електроустановках (показчики напруги для фазування, показчики пошкодження кабелів та ін.); до додаткових – діелектричні рукавички, діелектричне взуття, діелектричні килими, ізолювальні підставки, ізолювальні накладки, ізолювальні ковпаки, штанги для перенесення та вирівнювання потенціалу, сигналізатори напруги, захисні огороження (щити, ширми), переносні заземлення, плакати та знаки безпеки та інші засоби захисту.

Крім наведених вище засобів захисту в електроустановках повинні застосовуватись такі ЗІЗ: захисні каски – для захисту голови; захисні окуляри і щитки – для захисту очей і обличчя; протигази і респіратори – для захисту органів дихання; рукавиці – для захисту рук; запобіжні пояси та страхувальні канати.

Вибір необхідних електрозахисних засобів, засобів захисту від дії ЕП, а також ЗІЗ регламентується [23], а також іншими відповідними нормативними документами (НД) з урахуванням місцевих умов. У разі застосування основних

ізолювальних електрозахисних засобів достатньо використовувати один додатковий засіб, крім випадків, що обумовлені в цих Правилах. У разі необхідності захисту працівника від напруги кроку дозволяється використовувати діелектричне взуття без застосування основних засобів захисту.

Є неприпустимими:

- експлуатація кабелів та проводів з пошкодженою або такою, що втратила захисні властивості за час експлуатації, ізоляцією; залишення під напругою кабелів та проводів з неізольованими провідниками;

- застосування саморобних подовжувачів, які не відповідають вимогам до переносних електропроводок;

- застосування для опалення приміщення нестандартного (саморобного) електронагрівального обладнання або ламп розжарювання;

- користування пошкодженими розетками, розгалужувальними та з'єднувальними коробками, вимикачами та іншими електровиробами, а також лампами, скло яких має сліди затемнення або випинання.

- підвішування світильників безпосередньо на струмопровідних проводах, обгортання електроламп і світильників папером, тканиною та іншими горючими матеріалами, експлуатація їх зі знятими ковпаками (розсіювачами);

- використання електроапаратури та приладів в умовах, що не відповідають вказівкам (рекомендаціям) підприємств-виготовлювачів.

Металеві труби та гнучкі металеві рукави повинні бути заземлені. Заземлення повинно відповідати вимогам ДНАОП 0.00-1.21-98 "Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів". Для підключення переносної електроапаратури застосовують гнучкі проводи в надійній ізоляції.

4.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

4.2.1 Мікроклімат

Нормуються параметри мікроклімату в виробничих приміщеннях та гранично допустимі концентрації шкідливих речовин в повітрі робочої зони.

Тяжкість роботи розділяється на категорії залежно від загальних енерговитрат організму, ккал/с (Вт) [26]. Параметри мікроклімату в виробничих приміщеннях заводу наведено в таблиці 4.1.

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату на робочому місці технологічного персоналу передбачається [27]: в холодну пору року використання калорифера; в літню пору застосування вентиляторів обдуву; провітрювання приміщення.

Таблиця 4.1 – Нормування параметрів мікроклімату

Період року	Категорія робіт	Температура, °C	Відносна вологість	Швидкість руху
Теплий	Iб	22-28	55 при 28°C	0,1-0,2
Холодний	Iб	21-25	75 при 25°C	Не більше 0,1

4.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується концентраціями (ГДК) в мг/м. В умовах роботи на граничнодопустимих концентраціях можливими забруднювачами повітря робочої зони можуть бути пил та шкідливі гази, їх ГДК [26] наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони оператора лінії

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил нетоксичний	0.5	0.15	4

Для забезпечення складу повітря робочої зони передбачено [7]: провітрювання приміщення; цілісність вікон для перешкоджання попадання пилу в приміщення під час роботи лінії; встановлення пиловловлюючих засобів.

4.3 Виробниче освітлення

Характеристика зорових робіт – середньої точності. Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [28] розряд зорової роботи IV, підрозряд «г».

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують загальне штучне освітлення, що створюється за допомогою світлодіодних ламп E27 LED 15W NW A60 "SG". Висота підвісу світильників над робочою поверхнею 4,5 метра.

Таблиця 4.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Х-ка зорової роботи	Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Під розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Х-ка фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне $E_{н пр}$	Сумісне $E_{сум}$
						всього	у т. ч. від загального		
Середньої точності	Від 0,5 до 1,0 включно	IV	г	середній великий великий	світлий світлий середній	-	200	4	2,4

Світильники з світлодіодними лампами розміщують рядами; що дозволяє здійснювати їх послідовне включення (відключення) в залежності від величини природної освітленості. При експлуатації здійснюється контроль за рівнем напруги освітлювальної мережі, своєчасна заміна перегорілих ламп, забезпечується чистота повітря у приміщенні.

4.4 Виробничий шум

Для відносної логарифмічної шкали в якості нульових рівнів обрані показники, що характеризують мінімальний поріг сприйняття звуку людським вухом на частоті 1000 Гц. Нормативним документом, який регламентує рівні

шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є «ССБТ. Шум Загальні вимоги безпеки» [29] (таблиця 4.4).

Засоби боротьби із шумом в залежності від числа осіб, для яких вони призначені, поділяються на засоби індивідуального захисту і на засоби колективного захисту - «ССБТ. Засоби індивідуального захисту органів слуху. Загальні технічні умови і методи випробувань» і «Засоби і методи захисту від шуму. Класифікація». Для зниження шуму в приміщенні, необхідно:

- безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін, застосовувати підвісні звукопоглиначі;
- для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало шумові вентилятори.

Таблиця 4.4 – Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц								
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Постійні робочі місця в промислових приміщеннях	107	95	87	82	78	75	73	71	69

4.5 Пожежна безпека

Пожежну безпеку промислових і інших об'єктів регламентують Правила пожежної безпеки в Україні [21, 22]. Пожежо- вибухонебезпечність речовин і матеріалів визначається за ДСТУ 8829: 2019 [23], за якою визначається категорія приміщень за вибуховою та пожежною безпекою [24].

Основні приміщення п/ст за вибухонебезпекою та пожежонебезпекою відноситься до категорії Д – речовини і/або матеріали, що зазначені вище для категорій приміщень В (крім горючих газів, горючих пилу і/або волокон), а також негорючі речовини і/або матеріали в холодному стані (за температури

навколишнього середовища), за умов, що приміщення, в яких знаходяться (зберігаються, переробляються, транспортуються) зазначені вище речовини і/або матеріали, не відносяться до категорій А, Б або В з зонами П-Іа в приміщеннях, де є тверді горючі речовини чи матеріали (оболонки електрообладнання).

Будівля п/ст, в якій розташовано приміщення, характеризується III ступенем вогнестійкості. До III ступеня вогнестійкості відносяться будинки з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону. Для перекриттів дозволяється застосовувати дерев'яні конструкції, захищені штукатуркою або негорючими листовими, плитними матеріалами, або матеріалами груп горючості Г1 (низької горючості), Г2 (помірної горючості). До елементів покриттів не висуваються вимоги щодо межі вогнестійкості, поширення вогню, при цьому елементи горищного покриття з деревини повинні мати вогнезахисну обробку.

Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) та максимальні межі поширення вогню по них (см) за ДБН В.1.1.7-2016 [25] наведено в таблиці 3.5.

Межі вогнестійкості самонесучих стін, які враховуються в розрахунках жорсткості та стійкості будинку, приймають, як для несучих стін. Будівельні конструкції класифікують за вогнестійкістю та здатністю поширювати вогонь. Показником вогнестійкості є межа вогнестійкості конструкції, що визначається часом (у хвиликах) від початку вогневого випробування за стандартним температурним режимом до настання одного з граничних станів конструкції: втрати несучої спроможності (R); втрати цілісності (E); втрати тепло та ізолювальної спроможності (I).

Протипожежні перешкоди і мінімальні межі їх вогнестійкості за ДБН В.1.1.7-2016 [25] наведено в таблиці 4.6.

Таблиця 4.5 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій та максимальні межі поширення вогню по них

Ступінь вогнестійкості і будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвилинали) і максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				коло-ни	сходові площадки, костури, сходи, балки, марші сходових кліток	пере-криття між по-верхові (у т.ч. горищні та над підва-лами	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходових кліток	само-несучі	зовнішні не-несучі	внутрішні не-несучі (перегородки				пли-ти, насти-ли, прого-ни	балки, ферми, арки, рами
II	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	E1 15 M1	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M1	Не нормуються	

Протипожежні відстані від житлових, громадських, адміністративно-побутових будинків промислових підприємств, гаражів до виробничих, складських, сільськогосподарських будинків і споруд слід приймати за таблицею 7 (знаменник). В умовах забудови, що склалася, протипожежні відстані між житловими будинками та від житлових будинків до будівель і споруд іншого призначення слід визначати згідно з протипожежними вимогами даних норм, наведеними у таблиці 7. Протипожежні відстані від житлових, громадських, адміністративно-побутових будинків промислових підприємств, гаражів до виробничих, складських будинків, сільськогосподарських будівель і споруд потрібно приймати за таблицею 7 (знаменник) [25].

На території п/ст встановлено 35 вогнегасників ВВП-5 (ВП-5) та 42 ВВП-9 [26].

У випадку виникнення пожежі робітники повинні: прийняти всі заходи по ліквідації вогню; місце, яке загорілось слід гасити вогнегасниками; при загоранні електропроводів слід відключити лінію, а ізоляцію електропроводів

необхідно гасити тільки порошковими вогнегасниками ВП-5 або піском; зупинити обладнання.

Таблиця 4.6 – Протипожежні перешкоди та мінімальні межі їх вогнестійкості

Протипожежні перешкоди	Типи протипожежних перешкод або їх елементів	Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди (у хвилинах)	Тип заповнення прорізів, не нижче	Тип протипожежного тамбур-шлюзу, не нижче
Стіни	2	REI 60	2	1
Перегородки	2	EI 15	3	2
Перекриття	2	REI 60	2	1

Таблиця 4.7 – Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами, а також до виробничих будинків, будівель і споруд

Ступінь вогнестійкості будинку	Відстані при ступені вогнестійкості будинків, м		
	I, II	III	IIIa, IIIб, IV, IVa, V
III	6/9	8/9	10/12

ВИСНОВОК

У результаті проведеного аналізу основних методів контролю стану силових кабельних ліній у розподільчих електричних мережах встановлено, що надійність функціонування кабельних мереж безпосередньо залежить від технічного стану ізоляції, яка є найбільш вразливим елементом у процесі експлуатації. Особливої актуальності набувають методи діагностики, що дозволяють виявляти ранні стадії дефектів ізоляції без її пошкодження.

Досліджено, що традиційні руйнівні методи випробувань (з використанням підвищеної напруги постійного або змінного струму) не забезпечують повної інформації про стан кабелю, можуть викликати додаткове старіння ізоляції, а отже — скорочення строку служби КЛ. Натомість неруйнівні методи контролю — зокрема діагностика часткових розрядів, вимірювання $\text{tg}\delta$, струму нульової послідовності та термофлуктуаційного нагріву — демонструють вищу ефективність і дозволяють прогнозувати залишковий ресурс кабелю.

Кожен із методів має свої переваги й обмеження, тому доцільним є застосування комплексного підходу, що включає локальну та інтегральну діагностику, поєднання електричних, теплових та діелектричних вимірювань, з урахуванням режимних параметрів мережі. Перспективним напрямом є подальший розвиток методів діагностики із використанням термодинамічних моделей старіння ізоляції та впровадження цифрових систем онлайн-моніторингу.

Таким чином, перехід від періодичних руйнівних випробувань до систематичної неруйнівної діагностики дозволяє підвищити надійність, безпечність і ефективність експлуатації розподільчих кабельних мереж напругою 6–35 кВ, а також забезпечити своєчасну модернізацію й оптимізацію технічного обслуговування електричних мереж.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Державне підприємство "УкрНДНЦ". (2009). ГОСТ 24291-90. Кабелі силові. Методи випробувань. Київ: ДП «УкрНДНЦ».
2. Державне підприємство "УкрНДНЦ". (2004). ДСТУ ІЕС 60270:2004. Вимірювання часткових розрядів. Київ: ДП «УкрНДНЦ».
3. Козін, І. І., & Жежера, І. А. (2016). Діагностика та технічне обслуговування кабельних ліній електропередавання. Вісник НТУУ «КПІ», 7, 41–48.
4. Степаненко, С. А. (2019). Аналіз методів діагностики електричної ізоляції кабельних ліній. Науковий вісник НЛТУ України, 29(9), 105–111. <https://doi.org/10.36930/40320911>
5. Кузьменко, О. Ю., & Кравець, В. А. (2020). Оцінювання технічного стану силових кабельних ліній на основі аналізу часткових розрядів. Технічні науки та технології, 4(22), 115–121.
6. Національна академія наук України. (2018). Технічна експлуатація кабельних ліній електропередачі. Методичні рекомендації. Київ: ІЄЕ НАН України.
7. Грицай, О. В., & Бобак, М. Й. (2021). Діагностика та оцінка залишкового ресурсу кабелів з полімерною ізоляцією. Вісник ТНЕУ. Серія: Енергетика, 3, 53–59.
8. Куц, О. С., & Дяченко, С. В. (2017). Моніторинг технічного стану розподільчих кабельних мереж. Електроенергетичні та електромеханічні системи, 2, 88–92.
9. Пелешко, Л. І., & Боднарчук, О. М. (2015). Математичне моделювання старіння ізоляції кабельних ліній. Вісник НУ «Львівська політехніка», 819, 91–96.
10. Бугаєнко, Ю. В., & Ліннік, В. В. (2022). Розробка системи контролю технічного стану кабельних мереж середньої напруги. Вісник ХНУРЕ, 1, 67–73. <https://doi.org/10.35598/mcf.2022.01.067>

11. Головатюк, В. В. (2009). *Експлуатація кабельних ліній електропередачі*. Вінниця: ВНТУ.
12. Сурсаєв, А. Ю. (2020). *Розвиток фрагменту електричних мереж з аналізом особливостей експлуатації кабельних ліній* (Магістерська робота). Вінниця: ВНТУ.
13. Кирик, В. В. (2021). *Електричні мережі та системи*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка».
14. Довжанин, О. С. (2023). *Розробка системи внутрішнього електропостачання десятиповерхового житлового комплексу у м. Виноградів* (Кваліфікаційна робота). Тернопіль: ТНТУ.
15. Кобаль, М. В. (2023). *Розробка системи внутрішнього електропостачання десятиповерхового житлового комплексу у м. Виноградів* (Кваліфікаційна робота). Тернопіль: ТНТУ.
16. Науково-технічний центр електроенергетики «НЕК «Укренерго». (2016). *СОУ-Н МЕН 40.1-37471933-49:2011. Проектування кабельних ліній напругою до 330 кВ. Настанова*. Київ: Форт.Balka-Book
17. Луцький національний технічний університет. (2020). *Монтаж кабельних ліній*. Луцьк: ЛНТУ.
18. Вінницький національний аграрний університет. (2024). *Обґрунтування методу діагностики стану кабельної мережі та визначення місця пошкодження кабелю*. Вінниця: ВНАУ.
19. Державний університет інфраструктури та технологій. (2015). *Вивчення методів прокладання кабелів зв'язку*. Київ: ДУІТ.
20. Єдині Енергетичні Мережі України. (2020). *Кабельні роботи*. Отримано з https://eemu.at.ua/news/kabelni_roboti/1-0-5Eemu.
21. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.
22. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних

матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->.

23. ДНАОП 1.1.10-1.01-97 Правила безпечної експлуатації електроустановок. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=21826.

24. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.

25. НПАОП 40.1-1.32-01 (ДНАОП 0.00-1.32-01) Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.

26. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>.

27. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с.

28. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885

29. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. URL: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>.

30. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>.

31. НАПБ А.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. К. : МВС України, 2014. 47 с.

32. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення. URL: <https://dwg.ru/dnl/15125>.

33. ДСТУ 8829:2019 Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. URL: <https://www.alutal.com.ua/wp-content/uploads/2021/02/dstu-8829-2019-1.pdf>.

34. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759.

35. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf.

36. Наказ Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text>.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ) РОБОТИ

Назва роботи: «Аналіз основних методів контролю стану кабельних ліній електропередавання в розподільних електричних мережах»

Тип роботи: Бакалаврська кваліфікаційна робота

(кваліфікаційна робота, курсовий проєкт (робота), реферат, аналітичний огляд, інше (вказати))

Підрозділ: Кафедра електричних станцій та систем

(кафедра, факультет (інститут), навчальна група)

Керівник: к.т.н., доцент, доцент кафедри ЕСС Малогулко Ю.В.

(прізвище, ініціали, посада)

Показники звіту подібності

StrikePlagiarism	
Оригінальність	94,4 %
Загальна схожість	5,6 %

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

- ☐ Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- ☐ Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Заявляю, що ознайомлений (-на) з повним звітом подібності, який був згенерований Системою щодо роботи

Автор

(підпис)

Сорокати П.М.

(прізвище, ініціали)

Опис прийнятого рішення

Робота допущена до захисту

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Вишневський С.Я

(прізвище, ініціали)

Експерт

(за потреби)

(підпис)

(прізвище, ініціали, посада)

ДОДАТОК Б

ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ

Вінницький національний технічний університет
Кафедра електричних станцій та систем

1

«Аналіз основних методів контролю стану кабельних ліній електропередавання в розподільних електричних мережах»

Виконав: ст. гр. ІЕСМ-216 Сорокати́й П.М.
Керівник: к.т.н., доцент Малогу́лко Ю.В.

Вінниця 2025

2

Актуальність та задачі дослідження

У сучасних умовах функціонування енергетичної системи України, особливо на фоні зростаючих вимог до надійності електропостачання, питання ефективного контролю технічного стану кабельних ліній електропередавання (КЛ) у розподільних електричних мережах набуває особливої актуальності. Кабельні лінії, що забезпечують передачу та розподіл електроенергії споживачам, відіграють ключову роль у забезпеченні безперервної та якісної роботи електричних мереж, особливо в умовах урбанізованого середовища, де застосування повітряних ліній є обмеженим або неможливим.

Особливість КЛ полягає в їхній прихованості, що значно ускладнює процеси виявлення та локалізації пошкоджень. У порівнянні з повітряними лініями, кабельні траси більш вразливі до внутрішніх дефектів, термічного старіння ізоляції, часткових розрядів, впливу вологи, механічних пошкоджень тощо. У зв'язку з цим виникає потреба в запровадженні ефективних методів діагностики, які дозволяють вчасно виявляти потенційно небезпечні зміни стану кабелів, запобігаючи аваріям та скорочуючи витрати на ремонт.

Сучасні методи контролю технічного стану КЛ базуються на різних фізичних принципах і включають як традиційні вимірювання опору ізоляції та ємності, так і складніші підходи, такі як діагностика за допомогою часткових розрядів, імпульсного рефлектометричного аналізу, тепловізійного контролю, а також новітні цифрові рішення із застосуванням сенсорних технологій, моніторингу в режимі реального часу та методів машинного навчання. Вибір того чи іншого методу залежить від типу кабелю, умов його експлуатації, рівня напруги, а також техніко-економічної доцільності.

РОЗДІЛ 1 СТАН ТА ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ У РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

3



Рисунок 1 – Кабельні траса

Кабельна лінія електропередавання — це електротехнічний пристрій, який складається з одного або кількох кабелів, що прокладаються безперервно між двома точками (зазвичай електрообладнанням) і забезпечують передачу електричної енергії. Вони можуть мати різну конструкцію, довжину, тип ізоляції та способи прокладання.

Класифікація КЛ за основними ознаками:

- за рівнем напруги;
- за типом ізоляції;
- за середовищем прокладання.

Типові пошкодження та причини виходу з ладу кабельних ліній електропередавання

4

Кабельні лінії є складними технічними об'єктами, які зазнають дії багатьох факторів, що впливають на їх довговічність. Серед найбільш поширених причин пошкодження КЛ можна виділити:

1. Теплове старіння ізоляції
2. Порушення герметичності оболонки
3. Часткові розряди
4. Механічні пошкодження
5. Корозія броні та металевих оболонок
6. Порушення технології монтажу



Рисунок 2 - Теплове старіння ізоляції



Рисунок 3 - Порушення герметичності оболонки КЛ

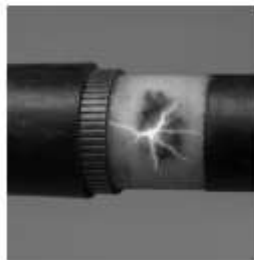


Рисунок 4 – Часткові розряди в КЛ



Рисунок 5 - Механічні дефекти КЛ



Рисунок 6 - Корозія броні та металевих оболонок КЛ

Проблематика технічного обслуговування та контролю стану кабельних ліній

5

Контроль технічного стану КЛ ускладнюється їх прихованим прокладанням і відсутністю візуального доступу. Це потребує використання спеціалізованого обладнання та методів, які здатні діагностувати стан ізоляції, виявляти дефекти на ранніх етапах та запобігати аваріям.

Проблемні аспекти обслуговування КЛ включають:

- високу вартість профілактичних випробувань і діагностики;
- необхідність відключення лінії при деяких видах випробувань;
- недостатню кількість висококваліфікованих фахівців та обладнання;
- обмеженість у впровадженні автоматизованих систем онлайн-моніторингу в існуючих мережах.

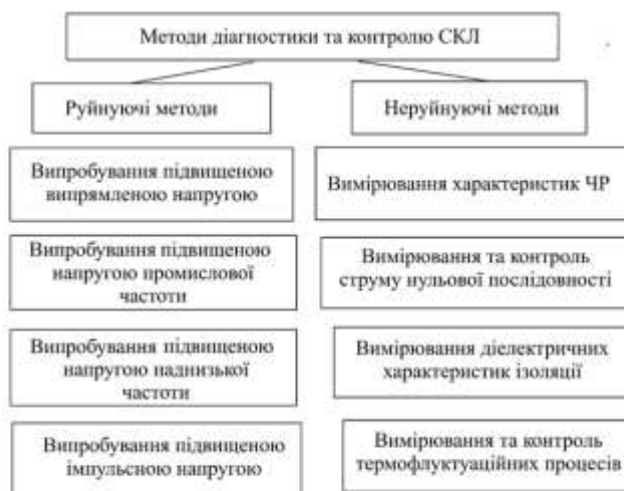
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ОСНОВНИХ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ СТАНУ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

6

Види та причини пошкоджень кабельних розподільних електричних мереж:

- ❖ пошкодження ізоляції, що викликають замикання однієї фази на землю;
- ❖ пошкодження ізоляції, що викликають замикання двох або трьох фаз на землю;
- ❖ пошкодження ізоляції, що викликають замикання двох або трьох фаз між собою;
- ❖ обрив однієї, двох або трьох фаз без заземлення;
- ❖ обрив однієї, двох або трьох фаз із заземленням обірваних жил;
- ❖ обрив однієї, двох або трьох фаз із заземленням не обірваних жил; повзучий пробій ізоляції;
- ❖ пошкодження ліній одночасно в двох або більше місцях, кожне з яких може належати до однієї з наведених вище груп.

Класифікація методів контролю та діагностики КЛ у розподільчих електричних мережах



РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ В УМОВАХ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ УКРАЇНИ

Технічне забезпечення - основні методи контролю базуються на доступному обладнанні:

- мегаомметри для вимірювання опору ізоляції;
- портативні рефлектометри для локалізації пошкоджень;
- тепловізори для контролю з'єднань і муфт;
- випробувальні установки для високовольтних тестів ізоляції.

Більш складні методи (моніторинг часткових розрядів, tg δ) застосовуються переважно у великих міських ОСР через високу вартість.

Кадрове забезпечення - нестача кваліфікованих фахівців обмежує використання сучасних діагностичних технологій, особливо у середніх та малих підприємствах. Часто застосовуються традиційні підходи — діагностика перед зимовим сезоном або після аварій.

Організаційні обмеження - через складність відключення КЛ у міських мережах діагностика проводиться в короткі часові «вікна», що потребує ретельного планування. Недостатня актуалізація карт прокладання КЛ також ускладнює доступ до об'єктів контролю.

Економічна доцільність - пріоритет у діагностиці надається КЛ, що живлять критичну інфраструктуру; лініям із зафіксованими пошкодженнями або частими скаргами споживачів. Менш критичні ділянки обслуговуються вибірково.

Інтеграція з системами управління - деякі компанії впроваджують інтеграцію діагностичних даних із SCADA-системами, що дозволяє оперативно реагувати на виявлені дефекти та здійснювати прогнозне технічне обслуговування.

Використання мобільних лабораторій - найбільших ОСР (ДТЕК Київські електромережі, Львівобленерго) застосовують мобільні діагностичні лабораторії, які дають змогу швидко проводити повноцінну діагностику КЛ безпосередньо на місці.

Методи контролю в різних енергокомпаніях України

Компанія	Метод(и) контролю	Напруга КЛ	Особливості
ДТЕК Київські мережі	Рефлектометрія, тепловізія, PD-аналіз	6–35 кВ	Впровадження ГІС
Укренерго	Випробування високою напругою, PD, SCADA-моніторинг	110–330 кВ	Пріоритет — стратегічні об'єкти
Полтаваобленерго	Тангенс дельта, ізоляція	6–10 кВ	Станова діагностика
Львівобленерго	Вимірювання опору ізоляції	0,4–10 кВ	Рутинна діагностика
Вінницяобленерго	База пошкоджень, мобільна лабораторія	0,4–35 кВ	Статистичний аналіз

Перспективи впровадження систем прогнозного технічного обслуговування

1. Цифровізація енергетичної інфраструктури як основа PdM

2. Переваги впровадження прогнозного обслуговування кабельних ліній

- Підвищення надійності мережі — зменшення кількості аварійних відключень і скорочення середнього часу відновлення.
 - Зниження витрат — планова заміна дефектних ділянок замість дорогих аварійних ремонтів.
 - Оптимізація ресурсів — зниження навантаження на аварійні бригади, економія матеріалів.
 - Подовження строку служби кабельних ліній — завдяки обслуговуванню лише там, де це дійсно потрібно.
- Аналітика та планування — створення баз даних для прогнозування деградації ізоляції, побудова ризик-орієнтованих моделей.

3. Технології, які забезпечують PdM для КЛ

- PD-сенсори (частковий розряди) — моніторинг локальних дефектів ізоляції.
- Теплові датчики — контроль температури муфт, з'єднань, ділянок із підвищенням навантаженням.
- Он-лайн-вимірювачі ізоляційного опору — безперервне визначення витoku струму.
- Рефлектометри нового покоління (OTDR) — застосування у поєднанні з автоматичним аналізом.
- Big Data та машинне навчання — аналіз великих обсягів даних для побудови прогнозних моделей деградації.

4. Перешкоди на шляху впровадження PdM в Україні

- Недостатнє фінансування ОЗР, особливо в регіонах.
- Відсутність уніфікованої інфраструктури цифрового моніторингу.
- Брак кваліфікованих фахівців у сфері data science для енергетики.
- Відсутність централізованого обліку історичних відмов та дефектів КЛ.

5. Перспективи розвитку в найближчі роки

З урахуванням курсу на відбудову енергетичної інфраструктури України, в тому числі за підтримки міжнародних партнерів, очікується:

- Активізація інвестицій у пілотні проекти цифрової діагностики КЛ в містах-мільйонниках.
- Формування реєстрів технічного стану кабельних мереж у ГІС-системах.
- Інтеграція PdM у загальні стратегії енергетичної безпеки та децентралізації мереж.
- Розробка національних стандартів і методик прогнозного обслуговування кабельних ліній.

- ❖ У розділі розроблено комплекс заходів з охорони праці при організації обслуговування та діагностування кабельних ліній електропередавання. Визначено основні шкідливі виробничі фактори, які впливають на оперативно-ремонтний персонал, та заходи для їх мінімізації.
- ❖ Розглянуто технічні рішення для безпечної організації робочих місць, включно з вимогами до електробезпеки, використанням електрозахисних засобів, організацією мікроклімату, вентиляції, освітлення та контролю рівня шуму у виробничих приміщеннях.
- ❖ Особливу увагу приділено забезпеченню пожежної безпеки — визначено категорію пожежної небезпеки приміщень, вимоги до вогнестійкості конструкцій, правила експлуатації електроустановок та порядок дій персоналу у разі виникнення пожежі.
- ❖ Реалізація запропонованих заходів сприятиме зниженню рівня професійних ризиків, запобіганню виробничого травматизму та створенню безпечних умов праці при виконанні робіт з обслуговування та діагностування кабельних ліній.

Висновок

12

У результаті проведеного аналізу основних методів контролю стану силових кабельних ліній у розподільних електричних мережах встановлено, що надійність функціонування кабельних мереж безпосередньо залежить від технічного стану ізоляції, яка є найбільш вразливим елементом у процесі експлуатації. Особливої актуальності набувають методи діагностики, що дозволяють виявляти ранні стадії дефектів ізоляції без її пошкодження.

Досліджено, що традиційні руйнівні методи випробувань (з використанням підвищеної напруги постійного або змінного струму) не забезпечують повної інформації про стан кабелю, можуть викликати додаткове старіння ізоляції, а отже — скорочення строку служби КЛ. Натомість неруйнівні методи контролю — зокрема діагностика часткових розрядів, вимірювання $tg\delta$, струму нульової послідовності та термофлуктуаційного нагріву — демонструють вищу ефективність і дозволяють прогнозувати залишковий ресурс кабелю.

Кожен із методів має свої переваги й обмеження, тому доцільним є застосування комплексного підходу, що включає локальну та інтегральну діагностику, поєднання електричних, теплових та діелектричних вимірювань, з урахуванням режимних параметрів мережі. Перспективним напрямом є подальший розвиток методів діагностики із використанням термодинамічних моделей старіння ізоляції та впровадження цифрових систем онлайн-моніторингу.

Таким чином, перехід від періодичних руйнівних випробувань до систематичної неруйнівної діагностики дозволяє підвищити надійність, безпеку і ефективність експлуатації розподільчих кабельних мереж напругою 6–35 кВ, а також забезпечити своєчасну модернізацію й оптимізацію технічного обслуговування електричних мереж.