НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК

ПОГОДЖЕНО
Директор ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження

проф., д.т.н. **/КАПЛУН В.В./**
вчене звання, науковийступінь підпис

„_____” _____2024 р.
число місяць рік

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри електротехніки, електромеханіки та електротехнологій

доц., к.т.н. **/Окушко О.В./**
вчене звання, науковий ступінь підпис

„_____” _____2024 р.
число місяць рік

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Удосконалення методів та засобів визначення дефектів ізоляції енергетичного обладнання АПК»

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

Освітня програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханік»
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми
К.т.н.,доц. **Усенко С.М.**
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Керівник магістерської роботи
доц., к.т.н. **Червінський Л.С.**
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Виконав **Оцалюк І.І.**
(підпис) (ПІБ)

КИЇВ – 2024

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Електротехніки , електромеханіки та електротехнологій
доц., к.т.н., _____ **/Окушко О.В.**
науковийступінь, вчене звання підпис ПІБ
„_____” _____2024 року
число місяць рік

З А В Д А Н Н Я

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

Оцалюк Ігор Ігорович
(прізвище, ім'я, по-батькові)

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітня програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи: «Удосконалення методів та засобів визначення дефектів ізоляції енергетичного обладнання АПК»
затверджена наказом ректора НУБіП України від ““_26_”_09_2024 р. №1666“С”
Термін подання завершеної роботи на кафедру _____2024.11.15
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської роботи:
а) Результати науково-дослідницької роботи кафедри ЕЕЕ.
б) Публікації співробітників кафедри ЕЕЕ.
в) Результати навчально-дослідницької практики.
г) Система ПЗР і ТО електрообладнання сільськогосподарських підприємств.
д) Нормативні документи: ПУЕ, ПТЕЕС та ПБЕЕС, ДСТУ, ДБН тощо.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:
1. аналіз стану і основні напрями вдосконалення методів діагностики ізоляції обладнання апк;
2. аналіз сучасних типів ізоляції кабелів, що використовуються в АПК
3. дослідження ефективності та процесів старіння ізоляції енергетичного обладнання АПК;
4. діагностика ізоляції кабелів методом вимірювання рівня часткових розрядів;
5. система моніторингу стану ізоляції обладнання АПК.

Перелік графічного матеріалу (за потреби) _____

Дата видачі завдання “_10_” _09_2024 р.
Керівник магістерської кваліфікаційної роботи _____ **Червінський Л.С.**
(підпис) (прізвище та ініціали)
Завдання прийняв до виконання _____ **Оцалюк І.І.**
(підпис) (прізвище та ініціали студента)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота обсягом 96 сторінки (32 рис. і 2 табл.) включає анотацію, зміст вступ, 7 розділів, висновки, список використаних джерел з 20 найменувань.

Об'єктом дослідження є ізоляція енергетичного обладнання АПК

Предмет дослідження – удосконалення методів та засобів визначення дефектів ізоляції енергетичного обладнання АПК

Методи дослідження та апаратура:

а) інформаційного пошуку та систематизації даних – при аналізі публікацій та патентів;

б) аналітичні – при аналізі розподілення енергії з використанням нового обладнання;

в) чисельні – при розрахунку струмів спрацювання уставок на мікропроцесорних пристроях захисту;

г) експериментальні – при випробуванні на спрацювання системи від випадкових збурень.

Мета роботи - Мета роботи полягає у порівняльній характеристиці та удосконаленні методів і засобів діагностики ізоляції обладнання АПК, а також оцінці їх ефективності.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ЕЗС – електропривід змінного струму

cosφ – коефіцієнт потужності;

ЧПН- частотний перетворювач напруги

ЕЕС – електроенергетична система;

ЕП – електричний привід;

ЕМ – електричні мережі;

ЛЕП – лінія електропередачі;

НС – СКЕ - система керування електроприводом ;

РЕМ – розподільча електрична мережа;

ПІ - паперова ізоляція;

ТП – трансформаторна підстанція.

ЕМІ – електромагнітний імпульс

g – прискорення вільного падіння;

$I_{РОЗР.}$ – розрахунковий струм;

$К_З$ – коефіцієнт запасу;

$К_О$ – коефіцієнт одночасності, який залежить від кількості споживачів;

$U_К$% – напруга короткого замикання ;

$U_Н$ – номінальна напруга мережі;

V – об’єм приміщення;

z – коефіцієнт нерівномірності освітлення;

$\Delta P_{КЗ}$ – втрати короткого замикання;

ΔU – втрата напруги;

ЗМІСТ

ВСТУП 7

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ І ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ДІАГНОСТИКИ ІЗОЛЯЦІЇ ОБЛАДНАННЯ АПК 8

1.1 Види та особливості ізоляції енергетичного обладнання 8

1.2 Аналіз статистичних даних про пошкоджуваність електрообладнання 11

1.3 Вплив дефектів обладнання на його працездатність 12

1.4 Сучасні методи моніторингу стану обладнання 13

1.5 Аналіз пристроїв діагностування електрообладнання 15

1.6 Постановка задачі досліджень 19

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТИПІВ ІЗОЛЯЦІЇ КАБЕЛІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В АПК 20

2.1 Сучасна полімерна ізоляція для кабельних виробів 20

2.2 Основні конструктивні елементи кабелів із зшитого поліетилену і їх призначення 24

2.3 Конструкція кабелів з зшитого поліетилену 27

2.4 Властивості матеріалів для кабелів з зшитого поліетилену 31

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ПРОЦЕСІВ СТАРІННЯ ІЗОЛЯЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДАННЯ АПК 35

3.1 Процеси старіння твердої ізоляції 35

3.2 Основні дефекти в ізоляції кабелів при виробництві та експлуатації 36

3.3 Фізика процесу старіння матеріалів ізоляці 40

3.4 Вибір методу діагностики та контролю стану ізоляції кабельні лінії із зшитим поліетиленом 43

3.5 Спрощенна модель розрахунку терміну служби ізоляції 44

3.6 Методика визначення кореляційного зв'язку між характеристиками ізоляції кабелю і характеристиками безпосередньо пов'язані з термін служби кабелю. 47

РОЗДІЛ 4. ДІАГНОСТИКА ІЗОЛЯЦІЇ КАБЕЛІВ МЕТОДОМ ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ ЧАСТКОВИХ РАЗРЯДІВ.....53

4.1Методи оцінки часткових розрядів.....53

4.2 Вдосконалений метод визначення стану ізоляції.....57

РОЗДІЛ 5. СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ ОБЛАДНЕННЯ АПК.....66

5.1 Загальна схема системи.....66

5.2 Алгоритм системи моніторингу.....69

5.3. Перевірка роботи системи моніторингу.....76

РОЗДІЛ 6. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ.....82

РОЗДІЛ 7. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....89

7.1 Загальні вимоги електробезпеки при прокладанні кабельних ліній.....89

7.2 Захист персоналу при експлуатації та обслуговуванні кабельних ліній.....90

7.3 Підвищення стійкості роботи об'єктів енергетики АПК під час воєнного стану.....91

ВИСНОВКИ.....94

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....95

ВСТУП

Експлуатація електричних мереж в складних умовах призводить до аварій, що спричиняють не лише економічні втрати, а й загрозу для життя людей. Найчастіше пошкодження відбуваються через тривалу дію несприятливих факторів. Для підвищення надійності енергетичного обладнання важливим є впровадження методів оперативної діагностики.

Забезпечення надійності й безпеки електроенергетичних систем стає ключовим завданням, особливо в умовах зростання навантажень та розширення мережі. Важливе значення має діагностика ізоляції, адже її пошкодження може призвести до серйозних аварій. Однак наявні методи не завжди є достатньо ефективними, що обумовлює необхідність пошуку нових підходів для комплексної діагностики.

Ремонт та діагностика силового обладнання, зокрема паперово-масляної ізоляції, є важливими для підвищення надійності електропостачання. Це зумовлено високою вартістю обладнання та витратами на його ремонт і транспортування. Сучасні технічні можливості, зокрема мікропроцесорні системи, дозволяють створювати ефективні системи діагностики.

Серед методів діагностики найбільш поширеними є вимірювання часткових розрядів (ЧР) та тангенса кута діелектричних втрат (tg δ). ЧР свідчать про наявність дефектів ізоляції, тоді як tg δ дозволяє оцінити загальний стан матеріалу. Також використовуються спектроскопія і термографія для виявлення хімічних та термічних дефектів.

Таким чином, розвиток нових методів діагностики та використання сучасних технологій є необхідною умовою для забезпечення безпеки та надійності енергетичного обладнання.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ І ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ДІАГНОСТКИКИ ІЗОЛЯЦІЇ ОБЛАДЕННЯ АПК

1.1 Види та особливості ізоляції енергетичного обладнання

Ізоляція є одним із ключових елементів конструкції електричних апаратів, що значною мірою впливає на їх габарити та надійність під час експлуатації. Для ізоляції струмопровідних частин використовуються різні діелектрики: газоподібні, рідкі та тверді. Ізоляція електричних апаратів класифікується за різними критеріями, зокрема на зовнішню та внутрішню.

Зовнішня ізоляція взаємодіє з навколишнім повітрям, використовуючи його як ізолюючий середник. Умови її роботи залежать від місця розташування апарата: у відкритих розподільних пристроях (ВРП) або закритих (КРП). У ВРП зовнішня ізоляція піддається атмосферним впливам, як-от зниження тиску, зміни температури, зволоження та забруднення. У КРП зовнішня ізоляція функціонує в менш складних умовах, хоча у неопалюваних приміщеннях на ізоляторах може конденсуватися роса. Внутрішня ізоляція, яка не контактує з повітрям, розміщується в оболонках.

Під час експлуатації ізоляція піддається дії робочої та короткочасної перенапруги, механічним навантаженням, високим температурам і електричній дузі. Найважливішою характеристикою ізоляції є її електрична міцність. Ізоляцію поділяють на самовідновлювальну, яка відновлює свої властивості після короткого замикання, та несамовідновлювальну, що втрачає свої властивості після пробою. Як правило, зовнішня ізоляція є самовідновлювальною, тоді як внутрішня — здебільшого несамовідновлювальна, що сприяє накопиченню часткових пошкоджень і старінню.

Електричні апарати часто використовують комбінацію зовнішньої та внутрішньої ізоляцій. Наприклад, у трансформаторах струму зовнішня ізоляція

зазвичай самовідновлювальна, а внутрішня — несамовідновлювальна. Особливу роль відіграє паперово-масляна ізоляція, що має високу електричну міцність завдяки просоченню паперу рідким діелектриком (рис. 1.1).

Рисунок 1.1 - Структура паперово-масляної ізоляції: а - листова; б - при намотуванні стрічкою з зазором між шарами.

Дефекти ізоляції, такі як забруднення, зволоження, утворення струмопровідних відкладень, можуть спричинити часткові розряди, що змінюють значення діелектричних втрат. Тому важливо здійснювати регулярний контроль за станом ізоляції, використовуючи методи тангенса кута втрат і інфрачервоні технології. На рис. 1.2 показано розповсюджені дефекти і фактори, що призводять до пробою ізоляції. Однак періодичний контроль не завжди є достатньо ефективним, тому розроблено системи безперервного моніторингу для виявлення дефектів на ранніх стадіях.

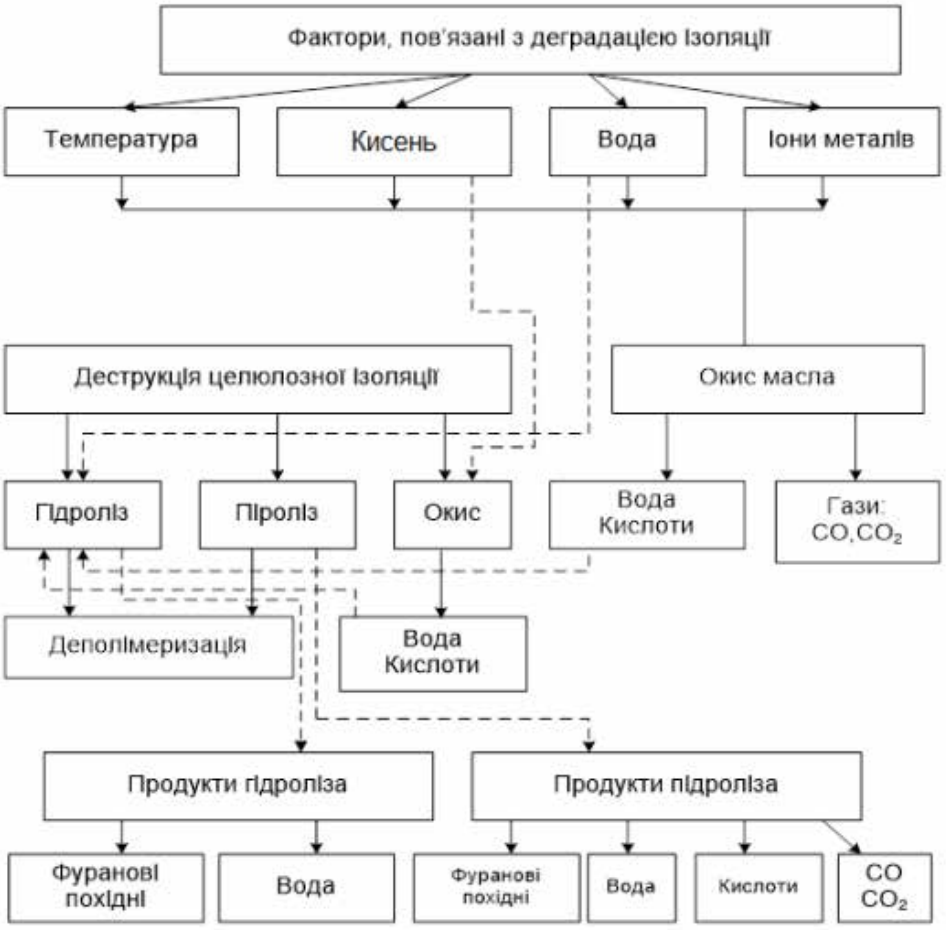

Рисунок 1.2 – Фактори пов’язані з пробоєм ізоляції

Системи безперервного контролю ізоляції знижують аварійність та сприяють накопиченню діагностичних даних, що дозволяє прогнозувати ремонти та запобігати аваріям. Для таких систем важливою є точність вимірювання параметрів ізоляції, що забезпечують методи мостового вимірювання та векторного порівняння.

Значний інтерес викликає оцінка старіння паперово-масляної ізоляції трансформаторів, зокрема через контроль температури та ступеня полімеризації. Важливим є врахування таких параметрів, як вологовміст та склад розчинених кислот, оскільки ці фактори можуть значно прискорювати старіння ізоляції. Розробка методик для врахування цих параметрів є актуальною задачею.

1.2 Аналіз статистичних даних про пошкоджуваність електрообладнання

У сучасному світі, де електроенергія є основним елементом усіх галузей, ефективність та надійність електрообладнання набувають особливого значення. Аналіз статистичних даних щодо пошкоджуваності електрообладнання є ключовим для оцінки стану ізоляції та розробки моніторингових систем.

Аналіз частоти пошкоджень компонентів електроенергетичної системи є необхідним етапом досліджень. Збір даних про пошкодження включає інформацію про інциденти, що стосуються різних компонентів, таких як лінії передачі, трансформатори та електричні двигуни. Аналіз пошкоджуваності ліній передачі, що охоплює перенапруги, вітрові впливи та механічні ураження, дозволяє виявити найбільш уразливі ділянки мережі, так звані "гарячі точки".

Щодо трансформаторів, аналіз витоків ізоляції сприяє оцінці надійності захисних систем. Вивчення типів трансформаторів та їх експлуатаційних умов допомагає визначити фактори, що сприяють пошкодженням. Аналіз пошкоджуваності електродвигунів зосереджується на випадках коротких замикань та перевантажень, що дозволяє визначити області підвищеного ризику.

Після збору даних, визначення причин пошкоджень є наступним етапом, що включає аналіз умов експлуатації та динаміки перенапруг. Вивчення випадків неправильної експлуатації електрообладнання та дефектів виробництва допомагає виявити несправності та зношеність ізоляційних матеріалів для оптимізації термінів їх служби.

Аналіз типів пошкоджень, таких як електричні пробої та механічні впливи, забезпечує комплексне розуміння пошкоджуваності та слугує основою для розробки ефективних моніторингових систем та заходів підвищення надійності електрообладнання.

1.3 Вплив дефектів обладнання на його працездатність

Електрообладнання може перебувати в одному з двох станів: справному або несправному. Справний стан означає відповідність обладнання вимогам, викладеним у технічній документації. Несправний стан виникає, коли обладнання не відповідає хоча б одній з цих вимог через наявність дефекту. Дефекти бувають явними, які виявляються передбаченими методами контролю, або прихованими, для виявлення яких потрібні спеціальні засоби.

Дефекти поділяються на критичні, значні та малозначні. Критичні дефекти унеможливлюють використання обладнання, значні — обмежують його використання або скорочують термін служби, тоді як малозначні не впливають на здатність виконувати функції. На додаток до понять справності й несправності, використовуються поняття працездатності та непрацездатності. Працездатне обладнання здатне виконувати свої функції, навіть якщо воно не повністю справне, але справне обладнання завжди є працездатним.

Перехід електрообладнання зі справного стану в несправний називається пошкодженням, яке може бути несуттєвим або призводити до відмови. Відмова може бути частковою, що не заважає використанню обладнання, або повною, що робить його непридатним. Відмови можуть бути систематичними (через порушення виробничих чи експлуатаційних процесів) або випадковими, пов'язаними з природним зношуванням компонентів.

Виявлення дефектів базується на критеріях, які задаються технічною документацією і визначають допустимі межі змін параметрів. Якщо параметри виходять за ці межі, обладнання вважається непрацездатним. Пошук дефектів здійснюється шляхом діагностики, яка включає як непрямі методи (без вимірювання параметрів), так і безпосередні (шляхом вимірювання параметрів або визначення характеристик).

1.4 Сучасні методи моніторингу стану обладнання

Аналіз частоти пошкоджень елементів електроенергетичної системи є ключовим етапом статистичного дослідження. Перш за все, важливо зібрати дані про пошкодження таких компонентів, як лінії передачі, трансформатори та електродвигуни. Для ліній передачі це включає типи пошкоджень, зокрема перенапруги, вітрові впливи та механічні ушкодження. Аналіз цих даних дозволяє виявити найбільш проблемні зони мережі — так звані "гарячі точки", де ризик пошкоджень найвищий.

Для трансформаторів аналіз частоти витоку ізоляції допомагає оцінити ефективність захисних систем. Також важливо враховувати робочі умови та типи трансформаторів, що можуть впливати на їх надійність. У випадку електродвигунів аналіз включає оцінку частоти коротких замикань та перевантажень для визначення зон підвищеного ризику.

Після збору статистичних даних проводиться аналіз причин пошкоджень, включаючи експлуатаційні умови та динаміку перенапруг. Важливо виявити виробничі дефекти, знос ізоляційних матеріалів, а також встановити оптимальні терміни заміни обладнання.

Детальний розгляд типів пошкоджень дозволяє зрозуміти механізми виникнення, наприклад, електричних пробоїв або механічних ушкоджень, що виникають під впливом зовнішніх факторів, таких як вітер або удари. Цей комплексний аналіз забезпечує основу для розробки ефективних систем моніторингу та управління електрообладнанням.

Моніторинг обладнання електричних мереж — це комплекс заходів, спрямованих на систематичне відстежування технічного стану обладнання, який може бути безперервним або дискретним. Безперервний моніторинг забезпечує постійне спостереження за допомогою датчиків, що вимірюють такі параметри, як напруга, струм, температура тощо, з аналізом у реальному часі. Дискретний моніторинг проводиться з інтервалами часу і включає візуальні огляди, вимірювання параметрів та лабораторні дослідження.

Моніторингу підлягають різні види обладнання: передавальні лінії, розподільчі мережі, електростанції та обладнання споживачів. Основна мета моніторингу — забезпечення безперебійної та надійної роботи системи. Він дозволяє виявляти проблеми на ранніх стадіях, оптимізувати витрати на обслуговування та підвищити безпеку.

Загальна структурна схема системи автоматизованої моніторингу стану технологічного обладнання показана на рис. 1.3. Типова архітектура систем моніторингу обладнання електричних мереж показана на рис 1.4. Основними елементами виступають датчики, сенсори, блоки вимірювання, кабелі зв’язку з обладнанням на щиті управління, де безпосередньо розміщена приймально-перетворююча апаратура з центральним сервером.

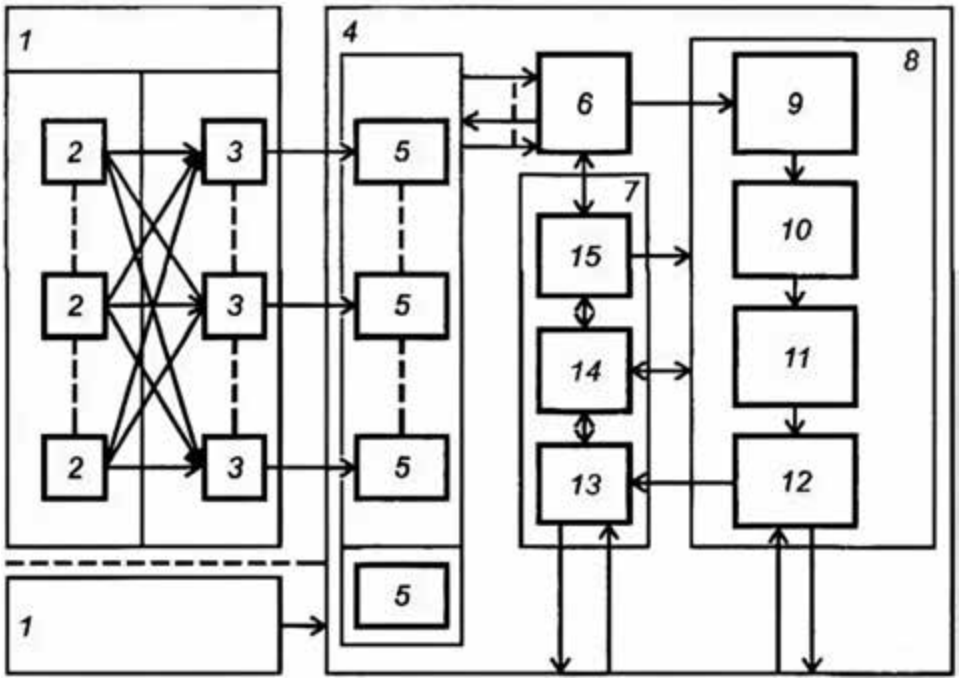

Рисунок 1.1. – 1 – агрегат; 2 – вузол, що діагностується; 3 – канал поширення; 4 – система моніторингу; 5 – датчик; 6 – блок узгодження; 7 – тракт управління; 8 – тракт розпізнавання; 9 – аналізатор; 10 – блок формування діагностичних ознак; 11 – блок ухвалення рішення; 12 – блок сповіщення, відображення і реєстрації; 13 – блок мережевих інтерфейсів (Intranet/Internet); 14 – інформаційні бази даних і знань; 15 – блок управління і синхронізації.

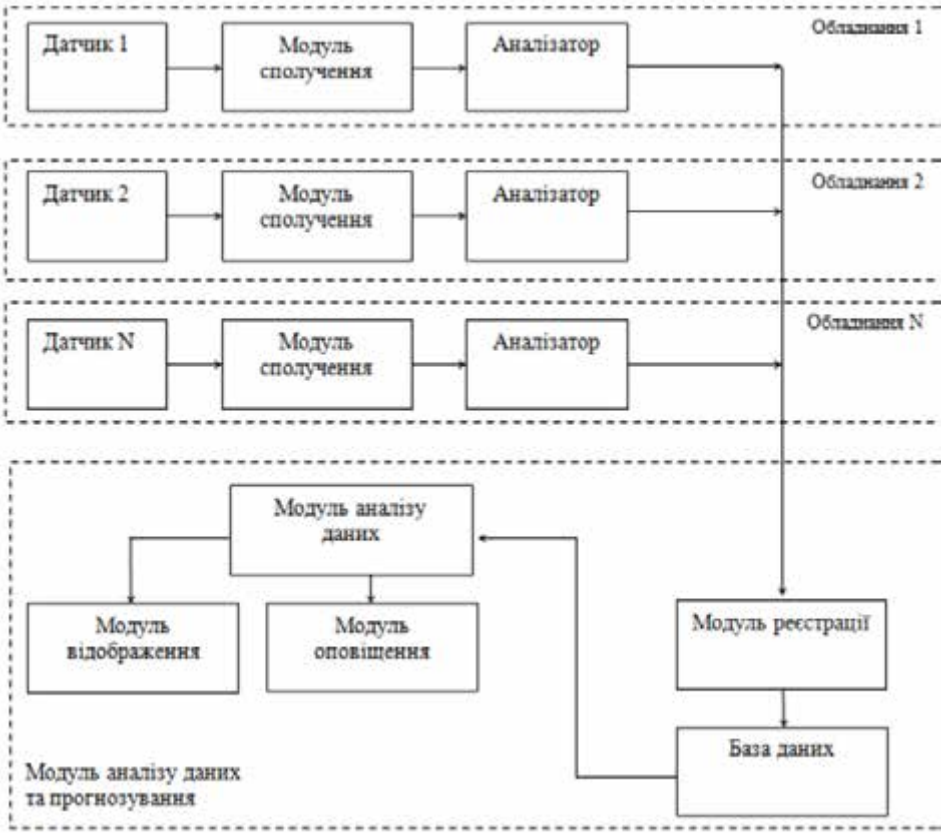

Рисунок 1.4. - Типова архітектура системи моніторингу

Моніторингові системи повинні надавати достатню інформацію для оцінки стану обладнання, дотримуючись таких принципів, як інформаційна повнота, самодіагностика, структурна гнучкість, багаторівнева організація та інтеграція у виробничу систему підприємства.

Різні країни застосовують свої підходи до моніторингу. Наприклад, у Великій Британії (National Grid) акцент робиться на моніторинг у реальному часі та захист мережі, а в Німеччині (E.ON) та Італії (ENEL) — на розподілену генерацію та Smart Meters. В Україні для моніторингу використовуються системи SCADA, що підвищують надійність електромереж за рахунок своєчасного виявлення аварій та прогнозування можливих проблем.

1.5 Аналіз пристроїв діагностування електрообладнання

Сучасні діагностичні пристрої для оцінки технічного стану електроустановок різняться за конструкцією, принципами дії та автоматизації. Їх класифікують за такими ознаками: тип реалізації (апаратні, програмні, програмно-апаратні);

розташування (зовнішні або вбудовані); універсальність (спеціалізовані та універсальні); рівень автоматизації (ручні, автоматизовані, автоматичні); спосіб обробки даних (аналогові, цифрові); вплив на об'єкт (активні або пасивні).

Апаратурні засоби, вбудовані в електрообладнання, вимірюють параметри, як-от струм і напруга, а також здійснюють контроль ізоляції. Якщо вбудовані засоби не забезпечують достатньої точності, використовують зовнішні пристрої, що підключаються до обладнання тільки під час діагностики, наприклад, тестери або осцилографи.

Програмні засоби контролюють діагностичні процеси через алгоритми, а поєднання програмних та апаратних засобів дозволяє реалізовувати самодіагностику. Автоматичні діагностичні системи підвищують продуктивність та точність, а їх використання, особливо в режимі постійного моніторингу, оптимізує експлуатацію обладнання.

Перспективним напрямом є інтеграція програмних та апаратурних засобів у програмно-апаратні системи діагностування, які забезпечують самодіагностику обладнання. Універсальні діагностичні засоби є складнішими та зазвичай побудовані на базі серійних промислових комп'ютерів.

За ступенем автоматизації розрізняють ручні, автоматизовані та автоматичні засоби діагностики. Ручні засоби потребують участі оператора для підключення та оцінки стану обладнання, що знижує ефективність і об'єктивність діагностики. Автоматизовані засоби частково залучають оператора для налаштування, але основний процес діагностики виконується автоматично. Автоматичні засоби, такі як мікропроцесорні системи, працюють без втручання людини, забезпечуючи високу точність і швидкодію. Вони можуть бути як спеціалізованими, так і універсальними.

Засоби діагностики також класифікуються за формою обробки даних: аналогові, цифрові та комбіновані. Активні системи впливають на об'єкт, генеруючи сигнали для аналізу його реакції, тоді як пасивні лише реєструють та оцінюють сигнали об'єкта.

З розвитком мікропроцесорних технологій, програмні та програмно-апаратні засоби діагностування стають все більш популярними в енергетиці, особливо для контролю працездатності та виявлення несправностей електроустаткування.

Забезпечення надійності електрообладнання вимагає високих стандартів до сучасних методів і засобів діагностики. При проектуванні, вдосконаленні та експлуатації діагностичних пристроїв необхідно враховувати кілька ключових параметрів: номінальні та допустимі значення сигналів, точність вимірювань, глибину діагностування, достовірність результатів, надійність обладнання, спосіб зв'язку з об'єктом і форму представлення інформації. Усі ці показники мають бути збалансовані між собою.

Похибка вимірювань у діагностичних пристроях зазвичай не перевищує ±5%, ±2,5% або ±1%, що залежить від типу сигналу (аналоговий чи дискретний) і методу передачі інформації. Особливе значення мають стійкість до перешкод і захищеність від електромагнітних та технологічних завад, які часто присутні в енергетичних системах через їх специфіку та природні коливання.

При використанні апаратурних засобів діагностики та застосуванні ієрархічного підходу до виявлення дефектів, кількість діагностованих параметрів для кожного елемента обладнання має бути обмеженою до 25-26. Збільшення кількості вхідних сигналів може ускладнити реалізацію діагностичних засобів і подовжити час діагностування, а надмірна кількість параметрів ускладнює їх аналіз, знижуючи ефективність діагностики.

Достовірність засобів діагностування, яка полягає у відповідності результатів істинному стану обладнання, залежить від кількох факторів: глибини діагностування (кількість і набір параметрів), частоти перевірок, їх тривалості, а також здатності пристроїв протистояти перешкодам. Довші періоди перевірки знижують достовірність, оскільки за цей час можуть з'явитися нові дефекти.

Тривалість періодів перевірки обладнання варіюється залежно від необхідної точності оцінки параметрів: від 10^{-4} до 10^{5} секунд. Основне завдання вдосконалення засобів діагностування полягає в підвищенні швидкодії, що досягається шляхом скорочення кількості контрольованих параметрів, вибору найбільш інформативних

показників, впровадження вбудованих засобів діагностики та використання програмованих обчислювальних пристроїв.

Надійність засобів діагностики повинна відповідати або перевищувати надійність елементів обладнання, не знижуючи її під час процесу діагностики. Висока надійність досягається використанням якісних компонентів, стійких до дестабілізуючих факторів рішень схем, резервуванням пристроїв і застосуванням методів самоконтролю. Для зовнішніх засобів важливо забезпечити гальванічне розділення електричних ланцюгів між діагностувальним обладнанням та електроустановками, щоб захистити низьковольтні ланцюги та гарантувати безпеку в умовах високих потенціалів.

Сучасний напрямок підвищення якості діагностичного контролю силового електрообладнання базується на автоматизації процесів вимірювання, реєстрації та отримання оперативної інформації про технічний стан обладнання. Особливо ефективною стає реалізація систем діагностики в режимі постійного моніторингу, що забезпечує підвищення експлуатаційної надійності, максимальне використання ресурсів обладнання, скорочення обслуговуючого персоналу та зниження витрат на технічне обслуговування і ремонт.

Для вдосконалення діагностичних пристроїв необхідно впроваджувати програму підвищення ефективності обстежень, яка включає:

1. Створення бази даних щодо аварійності та дефектів різних типів обладнання.
2. Систематизацію видів дефектів і розробку бази даних з ілюстраціями.
3. Порівняння результатів комплексних обстежень і ремонтів.
4. Статистичну обробку результатів та оцінку ефективності методів діагностики.
5. Розробку рекомендацій щодо оцінки рівня і небезпеки дефектів.

Постійне вдосконалення методів і пристроїв діагностики дозволяє точно виявляти місця виникнення дефектів, прогнозувати їх розвиток та оцінювати рівень небезпеки.

1.6 Постановка задачі досліджень

Електрична ізоляція в пристроях АПК відіграє ключову роль у забезпеченні безпеки та надійної роботи обладнання. Її пошкодження можуть призвести до серйозних аварій, таких як коротке замикання, перегрів, пожежі тощо. Особливо важливо моніторити стан ізоляції в місцях підключення навантаження, оскільки це може бути джерелом потенційних проблем.

Основні причини пошкодження ізоляції:

1. Механічні пошкодження:
    - Виникають через удари, вібрацію або перевантаження. Можливі тріщини, розриви або зміни структури ізоляції. Для виявлення використовуються візуальні огляди та вимірювання опору ізоляції.
2. Хімічні пошкодження:
    - Пов'язані з впливом корозії або агресивних середовищ. Корозія може бути електрохімічною (вплив води, кислот) або атмосферною. Для виявлення хімічних пошкоджень застосовують візуальний огляд та спеціальні методи діагностики.
3. Термічні пошкодження:
    - Виникають через перегрів або перенапругу, що призводить до деформації або руйнування ізоляції. Діагностика включає візуальні огляди, вимірювання температури і використання тепловізорів.
4. Старіння матеріалів:
    - З часом ізоляційні матеріали втрачають свої властивості під впливом температури, вологості та інших факторів. Регулярний моніторинг дозволяє виявити такі зміни на ранніх етапах.

Для уникнення цих проблем необхідно проводити регулярні перевірки ізоляції, використовуючи відповідні методи діагностики, такі як візуальний огляд, вимірювання опору, ультразвуковий та інфрачервоний контроль. Це дозволяє своєчасно виявляти та усувати пошкодження, забезпечуючи безпеку та надійність роботи електричних систем АПК.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТИПІВ ІЗОЛЯЦІЇ КАБЕЛІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В АПК

2.1 Сучасна полімерна ізоляція для кабельних виробів

Першим електроізоляційним матеріалом був папір, який у 1795 році почали використовувати для обмотки телеграфних проводів. У 1894 році з'явилися силові кабелі з паперовою ізоляцією, просоченою олією. У XIX столітті, під час прокладання підземних комунікацій у Європі, завдяки використанню гуттаперчі (натурального каучуку) навчилися захищати проводи та кабелі від вологи. З впровадженням вулканізації гумова ізоляція на тривалий час зайняла провідне місце у кабельній індустрії. Після завершення Другої світової війни гумову ізоляцію почали замінювати термопластами, а впровадження поліетиленових композицій у кабельне виробництво в 1950-х роках стало поштовхом для розвитку полімерних екструзійних матеріалів.

Типова конструкція більшості електрокабелів складається з металевого провідника (мідного або алюмінієвого), який оточений діелектричним шаром ізоляції та захисною оболонкою. Основні вимоги до ізоляційного матеріалу полягають у високих діелектричних властивостях, а до зовнішньої оболонки – у стійкості до агресивних впливів навколишнього середовища.

Для оцінки експлуатаційних характеристик електрокабелів, розрахованих на напругу до 150 кВ, використовуються такі параметри: питомий опір ізоляції, діелектрична стала, тангенс кута діелектричних втрат та електрична міцність.

Електричний опір ізоляційних матеріалів залежить переважно від хімічної структури макромолекул. Найчастіше визначають питомий об'ємний опір (ρv) ізоляції при постійній напрузі, який для більшості полімерних матеріалів знаходиться в діапазоні 10^10...10^16 Ом·см.

Діелектрична стала характеризує здатність матеріалу до поляризації під дією зовнішнього електричного поля і зазвичай знаходиться в межах від 2 до 5 (згідно ASTM D150).

Тангенс кута діелектричних втрат визначає рівень нагрівання діелектрика в електричному полі, і його значення для ізоляційних матеріалів повинно бути мінімальним.

Діелектрична міцність вказує на граничну стійкість ізоляції до електричного пробою і залежить від хімічного складу полімеру та домішок. Вимірюється в кіловольтах на одиницю товщини матеріалу (мм) (згідно ASTM D149).

До ключових властивостей зовнішньої оболонки кабельних виробів належать стійкість до вогню, високих температур та хімічних речовин. На сьогодні як ізоляційні матеріали та захисні оболонки кабелів використовуються три класи полімерів: традиційні гуми, термопласти (полівінілхлоридні пластикати, поліолефіни, фторопласти) та термопластичні еластомери (ТЕГТ) (табл. 2.1).

Традиційні гуми на основі натурального, ізопренового та бутадієн-стирольного каучуку широко використовуються для ізоляції та захисної оболонки проводів і кабелів, розрахованих на напругу до 25 кВ. Сьогодні кабельні заводи виробляють понад 200 різних марок кабелів та проводів з використанням гумових матеріалів. Найбільший обсяг застосування гум спостерігається у виробництві гнучких силових проводів, суднових і шахтних кабелів, що відрізняються підвищеними вимогами до експлуатаційних характеристик.

Таблиця 2.1 – Електроізоляційні властивості полімерних матеріалів

Матеріал	Питомий об'ємний електричний опір, Ом·см	Електрична міцність, кВ/мм	Тангенс кута діелектричних втрат при 1 КГц	Діелектрична проникність
Каучуки				
Натуральний каучук	1015...1017	3...30	(2,3...3)·10-3	2,1...3,7
Ізопреновий, бутадієн-стирольний	1015	20...28	0,9·10-3	2,1...2,7
Етилен-пропіленовий (дієновий)	1015...1017	35...42	(0,5...0,9)·10-3	3...3,5
Бутилкаучук	1017	16...24	(8...30)·10-3	2,4...2,6
Хлоропреновий	1011	6...24	30·10-3	9
Нітрильний	109...1010	10...25	5·10-3	3...5
Силоксановий	1014...1016	20...25	(1...50)·10-3	3...5
Термопласти				
ПВХ-пластикати	1011...1014	14...20	(50...90)·10-3	3...10
Поліетилен	1015...1017	18...30	(0,1...0,3)·10-3	2,3
Зшитий поліетилен	більше 1015	25...98	0,3·10-3	2,3...2,4
Поліпропілен та його сополімери	1014...1015	25...30	(0,2...0,3)·10-3	2,3...2,4
Фторопласти: ПВДФ (Ф-2) ПТФЕ (Ф-4)	більше 1014 більше 1016	10...37 20...30	(10...20)·10-3 (0,2...0,3)·10-3	7,5...13 2,0
Термопластичні еластоміри				
Олефінові (Santoprene, ТЕП ПП 305К-М та ін.)	1013...1015	25...40	(0,2...0,3)·10...3	2,3...2,4
Стирольні (Tefabloc тощо)	більше 1014	20...30	(0,3...1,4)·10-3	2,4...2,5
Уретанові (Elastollan та ін.)	більше 1012	15...25	(40...90)·10-3	3...6
Сополіефірні (Amitel, Ннекуд тощо)	1011...1014	15...20	(40...80)·10-3	3...5

Однак з розвитком полімерних матеріалів, що містять насичені вуглеводневі макромолекули, які відзначаються вищою термо-, озоно- та вологостійкістю, а

також стабільнішими електричними характеристиками, традиційні еластомери все частіше витісняються поліолефінами та етиленпропіленовим каучуком. Зокрема, бутил-каучук, популярний ізоляційний матеріал для кабелів середньої напруги в 1940-1950 роках, поступово втрачає актуальність.

Етилен-пропілен-дієнові каучуки (СКЕПТ), особливо нові марки, виготовлені на металоценових каталізаторах, є найбільш поширеними у світовій кабельній промисловості ізоляційними еластомерами. Застосовуються з початку 1960-х років як альтернатива зшитому поліетилену для силових кабелів з напругою до 35 кВ. Вони характеризуються високою еластичністю та стійкістю до озону і атмосферних впливів, однак їх недостатня термо-, волого- та триінгостійкість обмежує використання для кабелів з напругою понад 138 кВ.

Серед захисних оболонкових матеріалів кабелів варто виділити низку полярних каучуків, які мають високу хімічну стійкість до впливу нафтопродуктів та інших агресивних середовищ. Хлоропренова та нітрильна гуми, які широко застосовуються з середини XX століття, використовуються для оболонок телефонних, шахтних, нафтозавантажувальних кабелів. Однак останні 10-15 років їх використання залишається стабільним без значного зростання, оскільки вони поступаються за теплостійкістю новим матеріалам на основі хлорованих і хлорсульфованих поліолефінів.

Основні властивості діелектричних матеріалів, що використовуються в кабельній промисловості, наведені в таблиці 2.1. Сьогодні поліолефіни є основними полімерними матеріалами для виробництва кабельної продукції у світі. У країнах СНД найбільш поширені ПВХ-пластикати, на які припадає понад 60% споживаних полімерів, тоді як поліетиленові компаунди становлять близько 37% (з них 21% на базі поліетилену низької щільності, 9% на базі поліетилену високої щільності, та 7% — на основі зшитих композицій).

2.2 Основні конструктивні елементи кабелів із зшитого поліетилену і їх призначення

Розвиток середньовольтних розподільчих мереж вимагає застосування кабельної продукції, здатної забезпечити передачу високого струмового навантаження. Останніми роками проводиться активна заміна кабелів з паперово-просоченою ізоляцією на кабелі зі зшитим поліетиленом (XLPE), які демонструють кращі експлуатаційні характеристики. У багатьох країнах Північної та Південної Америки, а також у Європі, значна частка ринку силових кабелів належить саме кабелям ізоляції з використанням зшитого поліетилену.

Переваги кабелів із пластиковою ізоляцією:

- Ширший температурний діапазон експлуатації порівняно з кабелями, що мають паперову ізоляцію, що дає змогу значно підвищити передавану потужність.
- Висока стійкість у аварійних режимах, таких як перевантаження чи коротке замикання.
- Можливість монтажу на об'єктах із різною висотною конфігурацією, що робить їх універсальними.
- Ізоляційні матеріали не містять шкідливих компонентів, таких як важкі метали, масла та свинець, що полегшує монтаж і знижує негативний вплив на навколишнє середовище.
- Висока надійність експлуатації та знижені витрати на усунення аварійних ситуацій.
- Завдяки конструктивним особливостям, такі кабелі мають меншу вагу та радіус вигину, що спрощує їх прокладання.
- Можливість виготовлення кабелів великої довжини забезпечує економічність у їхньому використанні.

Доступні у вигляді одножильних і трижильних конструкцій із поліетиленовою оболонкою.

Покращені механічні та термічні характеристики кабелів із зшитого поліетилену пояснюються їхньою молекулярною структурою. Під час процесу вулканізації або "зшивання" ізоляційного матеріалу утворюються нові молекулярні зв'язки, що покращує стійкість матеріалу до механічних і термічних навантажень.

Частка кабелів із зшитим поліетиленом (XLPE) на українському ринку кабельної продукції постійно зростає, що свідчить про збільшення обсягів виробництва та споживання цього типу кабелів. Така тенденція узгоджується із загальноєвропейським ринком, де кабелі на основі зшитого поліетилену (X-PE, де "X" означає "cross-link" або "зшитий", а "PE" — поліетилен) активно витісняють інші ізоляційні рішення.

Переваги кабелів XLPE порівняно з кабелями із просоченою паперовою ізоляцією (ППІ):

1. Вища потужність переданої енергії (струмове навантаження), яка залежить від умов прокладки кабелю, перевищує ППІ-кабелі в 1,4–1,5 рази.
2. Вищі допустимі температури нагріву під час тривалої експлуатації, що збільшує термін служби кабелю.
3. Покращена термічна стійкість у аварійних режимах, таких як короткі замикання, через високу максимальну допустиму температуру кабелів XLPE.
4. Підвищена механічна стійкість до динамічних і статичних навантажень.
5. Менша частота пошкоджень (у 4–5 разів нижча порівняно з ППІ-кабелями).
6. Триваліший залишковий термін служби, що за технічними паспортами становить понад 40 років.
7. Менші показники радіуса вигину, ваги та діаметра кабелю, а також відсутність броньованої оболонки, що полегшує монтаж.
8. Можливість монтажу при низьких температурах (до -25 °C) без попереднього прогріву завдяки полімерним матеріалам в ізоляції та оболонці.

9. Економія часу і коштів на монтаж, оскільки конструкція не містить рідких наповнювачів.
10. Висока екологічність через відсутність технічних масел, що виключає забруднення навколишнього середовища в разі пошкоджень.
11. Менша гігроскопічність ізоляційних матеріалів порівняно з ППІ-кабелями.
12. Високі діелектричні характеристики ізоляції.
13. Можливість прокладки на різних висотних рівнях у процесі проєктування траси.

Головною відмінністю кабелів XLPE є використання принципово нової ізоляції на основі зшитого поліетилену. Поліетилен як ізоляційний матеріал відомий давно, однак традиційний термопластичний поліетилен має низку суттєвих недоліків, серед яких зниження електричних характеристик при підвищених температурах, близьких до точки плавлення матеріалу. Уже при 80 °C спостерігаються незворотні зміни в структурі ізоляції: поліетилен втрачає форму, тангенс кута діелектричних втрат збільшується, а механічна міцність і електрична ізоляція погіршуються.

Зшитий поліетилен, завдяки процесу "зшивання" або "вулканізації", зберігає свої властивості навіть при температурах до 130 °C. У процесі зшивання поліетилену на молекулярному рівні утворюються перехресні зв'язки між макромолекулами, які формують тривимірну структуру. Це забезпечує підвищену механічну та електричну міцність, низьку гігроскопічність і широкий діапазон робочих температур кабелів із зшитого поліетилену

У світовій кабельній промисловості існують дві основні технології зшивання поліетилену, що відрізняються за типом реагентів, використовуваних для цього процесу. Найбільш поширеною є **технологія пероксидного зшивання**, при якій зшивання поліетилену здійснюється за допомогою спеціальних хімічних речовин — пероксидів. Цей процес відбувається в умовах нейтрального газового середовища під впливом певних температур і тиску. Така методика дозволяє

досягти рівномірного ступеня зшивання по всій товщині ізоляції, запобігаючи утворенню повітряних включень.

Пероксидне зшивання забезпечує високу якість кабельної ізоляції завдяки поєднанню чудових діелектричних властивостей, широкого діапазону робочих температур і відмінних механічних характеристик. Ця технологія найбільш ефективна для виробництва кабелів середньої та високої напруги, оскільки забезпечує стійкість до теплових і електричних навантажень.

Менш поширеним є зшивання за допомогою силанолу, при якому до поліетилену додають спеціальні суміші на основі силанів, що сприяють зшиванню при нижчих температурах. Ця технологія є дешевшою у виробництві, але застосовується здебільшого для виготовлення кабелів низької та середньої напруги. Хоча вона не забезпечує таких високих механічних і термічних характеристик, як пероксидне зшивання, вона підходить для кабелів із менш вимогливими умовами експлуатації.

2.3 Конструкція кабелів з зшитого поліетилену

Існує два типи кабелів із зшитого поліетилену (XLPE) — **трижильні** та **одножильні**. Основна частина продукції на ринку — це **одножильні кабелі**, які є найбільш поширеними через їхню універсальність і простоту в монтажі (рис. 2.1).

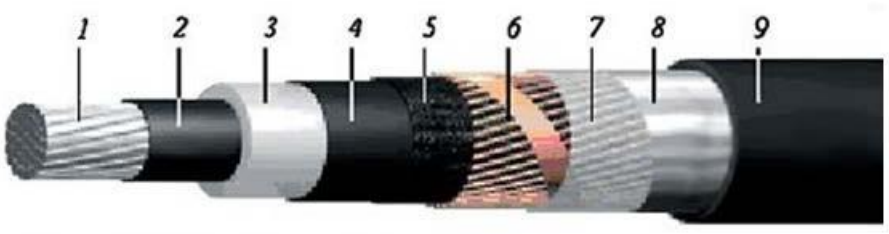

Рисунок 2.1– Одножильний кабель

Конструкція одножильного кабелю XPE складається з кількох шарів, кожен з яких виконує специфічну функцію для забезпечення надійної електричної ізоляції, механічної міцності та захисту від зовнішніх впливів. Компоненти кабелю можна описати наступним чином:

1. Кругла багатожильна герметична струмопровідна жила — основний елемент, який проводить струм.
2. Екран уздовж провідника з напівпровідного зшитого поліетилену, що допомагає рівномірно розподілити електричне поле.
3. Зшита ізоляція з поліетилену (XLPE) — основний ізоляційний шар, що забезпечує високу термічну і діелектричну стійкість.
4. Екран на ізоляції з напівпровідного зшитого поліетилену для захисту від зовнішніх електромагнітних впливів.
5. Напівпровідна стрічка або водоблокуюча стрічка, яка служить роздільним шаром.
6. Екран з мідного дроту, посилений мідною стрічкою, для додаткового захисту і зниження електромагнітних впливів.
7. Розділовий шар з крепірованого паперу, прогумованої тканини, полімерної стрічки або водоблокуючої стрічки.
8. Алюмінієво-поліетиленова або слюдяна стрічка, що забезпечує додатковий захист.
9. Зовнішня оболонка, виконана з поліетилену або полівінілхлоридного пластикату (ПВХ), яка захищає кабель від механічних пошкоджень і зовнішніх факторів.

Відмінною рисою трижильних кабелів XPE є наявність екструдованого міжфазного наповнювача з поліетилену або ПВХ-компаунду, який забезпечує додаткову ізоляцію між фазами кабелю (рис. 2.2)

Рисунок. 2.2 – Трьохжильний кабель

Використання одножильних кабелів із зшитого поліетилену (XPE) дозволяє значно підвищити надійність електропостачання за рахунок зниження ймовірності міжфазних коротких замикань. Конструкція таких кабелів мінімізує ризик одночасного пошкодження ізоляції двох окремих кабелів в одному місці, що знижує ймовірність міжфазних пошкоджень до мінімальних значень. Це робить їх настільки ж надійними, як і ізольовані шинопроводи. Імовірність однофазних замикань на землю при використанні одножильних кабелів XPE також значно нижча, ніж при застосуванні трижильних кабелів з паперовою ізоляцією (ППІ).

Це забезпечується як конструктивними особливостями одножильних кабелів, так і покращеними діелектричними властивостями ізоляції із зшитого поліетилену. Завдяки своїй конструкції, кабелі XPE дозволяють використовувати поперечний переріз струмопровідних жил до 800 мм², що робить їх конкурентоспроможними з традиційними шинами, які застосовуються в системах електропостачання великих промислових підприємств.

Екранування кабелів є важливим для забезпечення електромагнітної сумісності та симетрії електричного поля навколо струмопровідної жили. Внутрішні екрани виготовляються з напівпровідникового пластику, а зовнішній екран — з мідних дротів і смуг. Основна функція екрану з мідного дроту полягає у вирівнюванні електричного поля, яке діє на основну ізоляцію кабелю. Щоб екран виконував свою функцію ефективно, його необхідно заземлити.

Окрім металевого екрану, конструкція кабелів XPE включає два напівпровідникові екрани: один наноситься на зовнішню поверхню провідника, інший — на поверхню основної ізоляції. Ці екрани забезпечують локальне вирівнювання електричного поля, що виникає через нерівності на поверхні провідника та металевого екрану.

Ізоляція екрану також виконує важливу функцію, запобігаючи проникненню вологи до основної ізоляції через обмотку екрануючих проводів. Надійність кабелю великою мірою залежить від цілісності зовнішньої оболонки, яка захищає кабель від вологи та механічних пошкоджень під час монтажу та експлуатації. Зовнішні оболонки кабелів XPE виготовляються з поліетилену або високоміцного

полівінілхлоридного пластикату, що забезпечує додатковий захист від зовнішніх впливів.

Буквено-цифрові позначення (маркування) для кабелів із ізоляцією із зшитого поліетилену мають наступний формат і розшифровуються так:

- **А** — алюмінієвий провідник, якщо літера відсутня — струмопровідна жила мідна.
- **PV** — ізоляційний матеріал: зшитий (вулканізований) поліетилен.
- **П** або **С** — оболонка з поліетилену або полівінілхлоридного (ПВХ) пластикату.
- **у** — армована поліетиленова оболонка збільшеної товщини.
- **нг** — оболонка з полівінілхлоридного пластикату зі зниженою горючістю.
- **Нгд** — оболонка з ПВХ пластикату зі зниженим димо- та газовиділенням.
- **д** — поздовжнє ущільнення щитка водоблокуючими стрічками.
- **1** або **3** — кількість провідників.
- **50—800** — поперечний переріз провідника в мм².
- **Гж** — горюча ліквідація провідника.
- **16—35** — переріз екрану в мм².
- **1-500** — номінальна напруга в кіловольтах.

Приклад маркування:

АПвПг 1х240/35-10

- **А** — алюмінієвий провідник,
- **Пв** — ізоляція з зшитого поліетилену,
- **П** — поліетиленова оболонка,
- **г** — герметизація екрана,
- **1** — одножильний кабель,
- **240** — поперечний переріз провідника в мм²,
- **35** — поперечний переріз екрану в мм²,
- **10** — номінальна напруга в кіловольтах.

Сфера використання:

Силові кабелі з ізоляцією із зшитого поліетилену широко використовуються для будівництва підземних кабельних ліній електропередач, прокладки в траншеях, під водними перешкодами, такими як річки й озера, а також у різних типах ґрунтів. Вони призначені для передачі та розподілу електричної енергії при номінальній напрузі 10 кВ, частотою 50 Гц, у трифазних мережах із заземленою нейтраллю. Кабелі також підходять для трас із необмеженою різницею висот та для з'єднання з повітряними лініями.

2.4 Властивості матеріалів для кабелів з зшитого поліетилену

Кабелі з ізоляцією з зшитого поліетилену (XPE) володіють унікальними властивостями, обумовленими використанням спеціального ізоляційного матеріалу. Поліетилен є одним із найбільш поширених ізоляційних матеріалів у виробництві кабелів. Проте, термопластичний поліетилен має суттєві недоліки, зокрема значне зниження механічних властивостей при температурах, наближених до температури його плавлення. Вирішенням цієї проблеми стало впровадження кабелів із зшитого поліетилену.

Поняття «зшивання» відноситься до обробки поліетилену на молекулярному рівні, внаслідок якої формуються перехресні зв'язки між макромолекулами поліетилену. Цей процес сприяє утворенню тривимірних структур, що надають матеріалу високі електричні та механічні характеристики, зменшують гігроскопічність та розширюють робочий температурний діапазон.

Для виробництва зшитого поліетилену використовується високоякісний поліетилен, що має високу щільність та підвищену міцність при звичайній лінійній структурі. Процес зшивання здійснюється за високої температури і тиску, а також під впливом електронного опромінення або спеціальних хімічних сполук, що об'єднують молекулярні ланцюги поліетилену в єдину тривимірну структуру.

Зшитий поліетилен відрізняється не лише підвищеною ударною в'язкістю та міцністю, але й має корисні властивості, які недоступні для інших матеріалів, що визначає його основні сфери застосування. При укладанні в ґрунті використовують оболонку з високої щільності, яка забезпечує необхідний захист кабелю від механічних пошкоджень як під час монтажу, так і в процесі експлуатації. Якщо необхідно забезпечити герметизацію екрану, застосовують два окремі шари водоблокуючих стрічок, що розташовані під мідним екраном і над ним, із перекриттям. У кабельних установках для прокладання кабелів використовують оболонку з полівінілхлоридного пластикату зі зниженою горючістю.

Зшитий поліетилен може бути виготовлений за різними технологіями, що відрізняються температурами, тиском, реакційними умовами та використовуваними добавками. Це призводить до отримання матеріалів з різними властивостями. У електроізоляційній промисловості найбільш поширені два види зшитого поліетилену:

1. **PEXb** — поліетилен, зшитий за хімічним силановим методом. В його виробництві використовують кремневодневі речовини, які при температурі 80-90°C беруть участь у гідролізі, з'єднуючи бічні ланцюги полімерних макромолекул. Цей метод є відносно дешевим і забезпечує близько 65% зшивання. Хоча він був популярний на початкових етапах використання поліетилену в якості ізоляційного матеріалу, він забезпечує нерівномірний розподіл структури в об'ємі.
2. **PEXa** — зшитий поліетилен, де «перехресні зв'язки» формуються в присутності перекису водню. Цей «пероксидний» метод передбачає підвищення температури до 400°C при тиску 8-9 атм. Він є більш складним і дорогим, але дозволяє досягти до 80% зшивання молекул і забезпечує більш однорідний розподіл структури в матеріалі. Зазвичай використовується для високовольтної ізоляції з великою товщиною.

Ізоляція PEXb рекомендована лише для кабелів, що працюють при напрузі не вище 1 кВ. При більш високих напругах вона має знижений електричний опір,

схильна до частих поломок і швидкого виходу з експлуатації. Для кабелів напругою 10-35 кВ і вище використовується тільки PEXa.

Зшитий поліетилен застосовують у виробництві як одножильних, так і трижильних кабелів, які можуть прокладатися в одиночних або групових установках, на відкритому повітрі, в кабельних лотках або під землею. Товщина ізоляції варіюється від 3,4 до 35 мм, а переріз кабелів — від 35 до 3000 мм², з номінальним струмом до 550 кВ.

Вибір матеріалу для екрана кабелів залежить від типу електромагнітного поля, що впливає на виріб. Магнітні матеріали забезпечують високу поглинальну здатність випромінюваної електромагнітної енергії, тоді як хороші провідники, такі як мідь або алюміній, мають високу відбивну здатність.

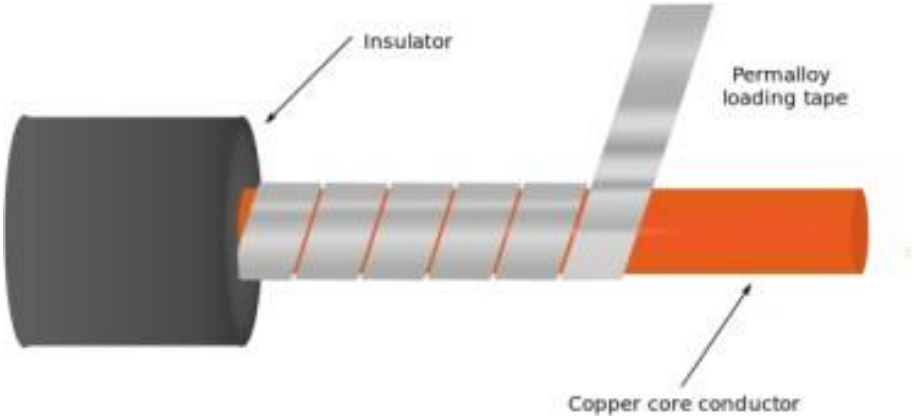

Рисунок 2.3 – Схема екранування кабелю пермалоєм

Останніми роками виявлено, що сплави з підвищеною магнітною проникністю демонструють більшу ефективність у процесі екранування електричних полів, проте їхня продуктивність знижується зі зростанням частоти (див. рис. 2.3). У низькочастотному діапазоні та за умови надійного екранування магнітних полів доцільно використовувати сплави з високою магнітною проникністю, зокрема латунь. Для створення магнітних екранів, призначених для роботи в умовах слабких магнітних полів, застосовують сплави з високою магнітною проникністю, такі як пермалой.

Пермалої — це ковкі сплави, що характеризуються значною магнітною проникністю і здатні до обробки методом різання та штампування. Вони поділяються на низьконікелеві (вміст нікелю 40–50%) та високонікелеві (вміст

нікелю 72–80%). З метою покращення електромагнітних і технологічних характеристик пермалої часто легуються молібденом, хромом, кремнієм, кобальтом, міддю та іншими елементами. Основними параметрами електромагнітної якості цих сплавів є початкова та максимальна магнітна проникність. Важливо, щоб коерцитивна сила пермалоїв була якомога меншою, а питомий електричний опір (ρ) та намагнічення в стані насичення були максимально високими.

Низьконікелеві пермалої використовуються для виготовлення магнітних екранів, які функціонують в умовах слабких постійних магнітних полів. Леговані кремнієм і хромом, вони можуть застосовуватися при вищих частотах.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ПРОЦЕСІВ СТАРІННЯ ІЗОЛЯЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДАННЯ АПК

Матеріали, особливо новостворені, були і залишаються однією з головних ланок у вирішенні багатьох інженерних завдань у виробництві електрообладнання. Сучасне електрообладнання є складним пристроєм, з великою кількістю різноманітних деталей, для виготовлення яких потрібен широкий асортимент різних електротехнічних і конструкційних матеріалів. Кожен використовуваний для цієї мети матеріал повинен мати цілком певні електричні, механічні та хімічні властивості, які залежать від його хімічного складу та будови, а також інтенсивності зовнішнього енергетичного впливу (напруженості та частоти електричного поля, температури тощо). Без знання основних властивостей цих матеріалів, без розуміння фізичних процесів, що протікають при поміщенні їх у електричне або магнітне поле, без розуміння зв'язку цих процесів з хімічним складом та будовою матеріалу, не можна спроектувати та виготовити електротехнічну апаратуру, неможливо грамотно її експлуатувати.

3.1 Процеси старіння твердої ізоляції

Електрична міцність ізоляції та процеси, що спричиняють її порушення (перекриття чи пробій), значною мірою залежать від типу діелектрика. Тому досліджені умови розвитку розрядів, а також перекриття та пробою у різних видах діелектриків, які є характерними для апаратної ізоляції, включають газоподібні, тверді, рідкі діелектрики, а також їх комбінації.

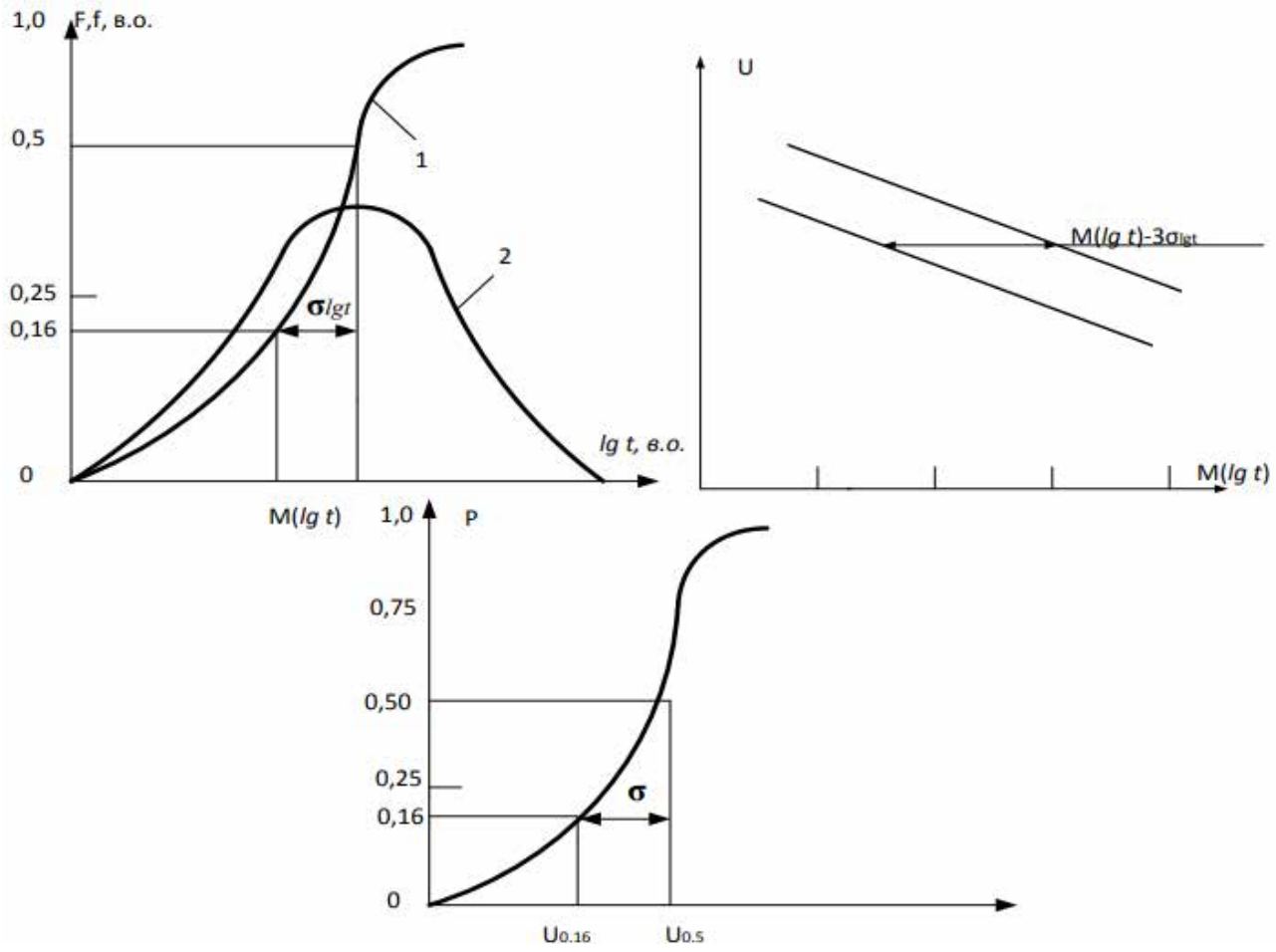

Рисунок 3.1 – Характеристики електричної міцності ізоляції: а – функція розподілу (крива 1) та щільність розподілу (крива 2) пере зарядного часу; б – вольт часова характеристика ізоляції: U = f [M (lgt)] – крива 1;

3.2 Основні дефекти в ізоляції кабелів при виробництві та експлуатації

Термін служби кабелю залежить як від виробничої технології, так і від правильних умов експлуатації. Поліетиленову ізоляцію кабелів формують за допомогою екструдерів. Основні вимоги до технології нанесення ізоляції полягають у забезпеченні її монолітності та відсутності сторонніх включень і порожнин. Кабелі для середньої та високої напруги оснащені екранами з напівпровідного поліетилену (рис. 3.2). Між ізоляцією та напівпровідним екраном не повинно виникати відшарувань, оскільки це спричиняє іонізацію в порожнинах. Висока адгезія між напівпровідним екраном і ізоляцією забезпечується їх одночасним нанесенням.

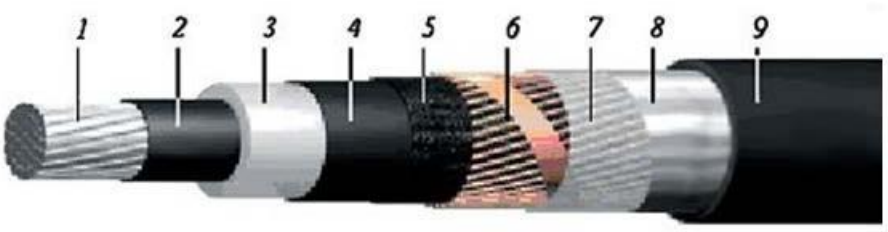

Рисунок 3.2 – Кабель 10 кВ

1 – алюмінієва кругла багатодротяна струмопровідна жила; 2 – екран по жилі з зшитого поліетилену; 3 – ізоляція із сшитого поліетилену; 4 – екран по ізоляції із сшитого поліетилену; 5 – роздільний шар з електропровідної водоблюкувальної стрічки; 6 – екран з мідних дротів;

7 – роздільний шар з водоблюкувальної стрічки; 8 – шар алюмополімерної стрічки; 9 – поліетиленова оболонка

У процесі виробництва можуть виникати різноманітні дефекти, кількість і розмір яких залежать від багатьох факторів: якості матеріалу, параметрів технологічного процесу та умов зберігання готової продукції. Для забезпечення належної якості гранули поліетилену, що подаються в екструдер, повинні бути сухими. На рис. 3.3 і 3.4 показаний приклад, коли в екструдер завантажили вологі гранули, що призвело до закипання води та утворення порожнин у напівпровідному екрані (рис. 3.3) і відшарування ізоляції від екрана (рис. 3.4).

Чистота вихідного матеріалу є критично важливою при накладанні ізоляції. Забруднення можуть потрапити до поліетилену на етапах полімеризації, виготовлення гранул або під час завантаження в екструдер. Крім того, за неналежних технологічних параметрів роботи екструдера можливе підгоряння поліетилену.

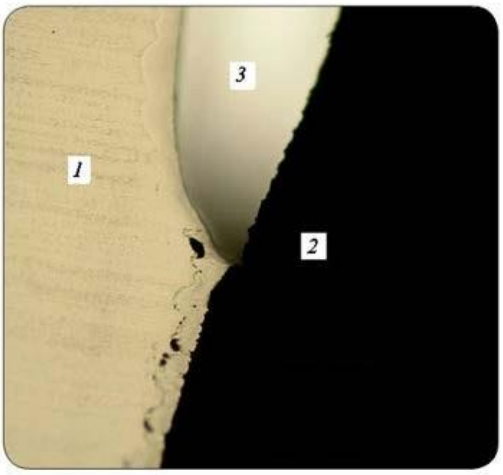

Рисунок 3.3 – Порожнина в напівпровідному екрані:
1 – ізоляція; 2 – напівпровідний екран; 3 - порожнина

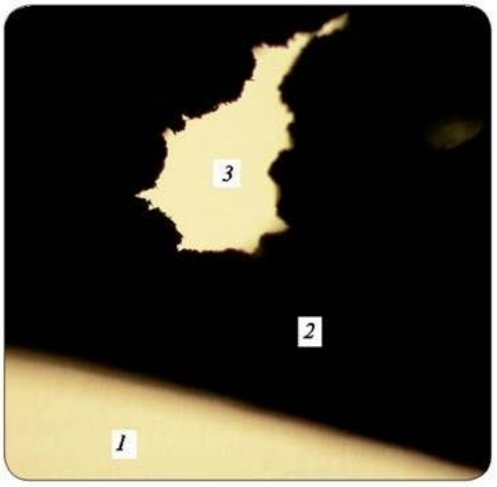

Рисунок 3.4 – Відшарування ізоляції від напівпровідного екрану
1 – ізоляція; 2 – напівпровідний екран; 3 – порожнина

На рис. 3.4 зображені сторонні включення в поліетиленовій ізоляції при 100-кратному збільшенні та огляді в темнопольному мікроскопі. Такі включення сприяють утворенню триінгів і можуть призвести до пробою ізоляції (рис. 3.6).

Ще один вид дефектів – це неповне розплавлення поліетиленових гранул (рис. 3.7). На цих неоднорідностях накопичуються об'ємні заряди, що підвищують напруженість електричного поля і прискорюють процес старіння ізоляції. Уникнути таких дефектів можна за правильного налаштування режиму роботи екструдера.

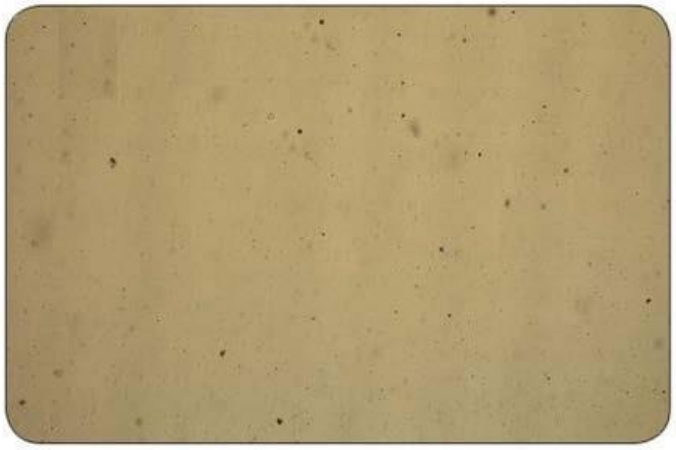

Рисунок 3.5 – Сторонні включення в поліетиленовій ізоляції

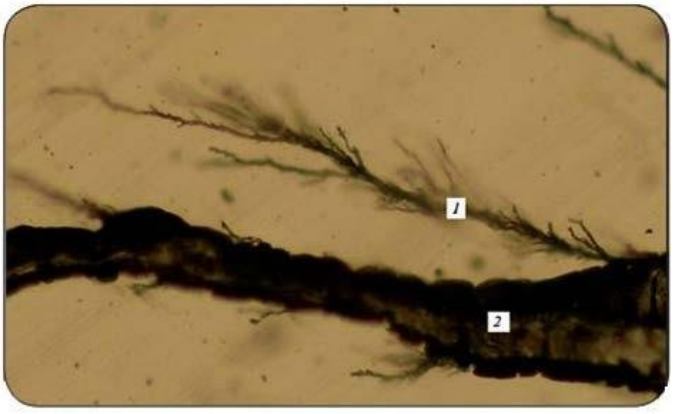

Рисунок 3.6 – Пробій ізоляції

1 – триінги; 2 – канал пробою

Рисунок 3.7 – Неоднорідність ізоляції визвана неповним розплавленням гранул поліетилену

У разі порушення технології двошарового нанесення поліетиленової ізоляції на струмопровідні жили кабелів можливе забруднення поверхні після нанесення першого шару (рис. 3.8). Кабель із таким дефектом швидко втрачає працездатність.

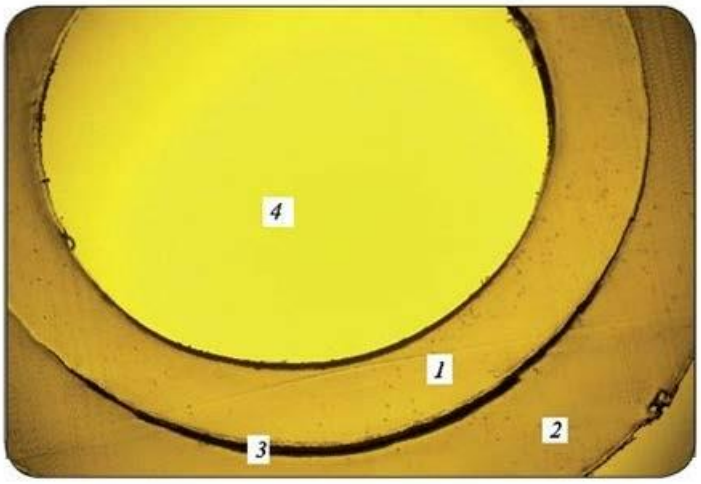

Рисунок 3.8 – Забруднення поверхні ізоляції після накладення першого слою

1 – перший шар; 2 – другий шар; 3 – забруднення; 4 – струмопровідна жила

Основними причинами виникнення вище перерахованих дефектів являються невисока якість сировини та порушення технології виробництва. Тому після накладання ізоляції в обов'язковому порядку необхідно проводити перевірку її цілісності.

3.3 Фізика процесу старіння матеріалів ізоляці

Частковий розряд — це низькоенергетичний електричний розряд, що шунтує лише частину ізоляції, не викликаючи значних змін напруги між електродами. Зазвичай часткові розряди локалізуються в областях внутрішніх дефектів, таких як газові бульбашки, мікрочастинки або тверді домішки, де спостерігається неоднорідність електричного поля, напруга якого в межах дефекту може бути значно вищою, ніж у навколишньому ізоляційному матеріалі.

Діелектрична міцність домішок, як правило, значно нижча, ніж діелектрична міцність основного ізоляційного матеріалу, що призводить до локального пробою в зоні дефекту. Одним із джерел інтенсивних часткових розрядів є дендрити — деревоподібні канали неповного пробою, що утворюються через неоднорідності в ізоляції внаслідок її зношування, деполімеризації або природного старіння під час виробництва та експлуатації. Також місця неякісного монтажу, зокрема кабельні муфти, можуть слугувати джерелами часткових розрядів. Внутрішні дефекти

ізоляції виникають внаслідок недоліків виробничої технології, а під дією електричного поля в процесі експлуатації призводять до посилення часткових розрядів і росту дендритів.

У газонаповнених дефектах часткові розряди виникають при нижчій напруженості електричного поля, оскільки діелектрична проникність газів менша, ніж у рідин чи твердих тіл, що спричиняє високу інтенсивність часткових розрядів на початкових етапах розвитку дефекту. Мікропори в ізоляції можуть бути заповнені водою, присутньою як у вигляді розчину, так і через проникнення з навколишнього середовища.

До неруйнівних методів контролю стану ізоляції відноситься моделювання та розрахунок основних параметрів кабелю з урахуванням експлуатаційних умов. Це дозволяє оцінити стан ізоляції в реальному часі незалежно від терміну її служби. Основними аспектами прогнозування часу до погіршення ізоляції є опис фізичних перехідних процесів з використанням математичного апарату або моделювання процесу старіння через спеціалізовані програмні засоби.

У режимі експлуатації кабелю відбувається поступове погіршення ізоляційних властивостей, що пов'язане з нелінійними змінами динамічних характеристик. На це впливають зовнішні магнітні та електричні поля, температурні коливання, механічні навантаження, динамічні напруги на розтягнення й стиск, а також фактори навколишнього середовища, такі як світло, радіація, вологість і вплив інертних газів. На рівні хімічних реакцій вплив зовнішніх факторів на швидкість молекулярного розпаду можна описати за допомогою закону Арреніуса.

$$K_i = K * e^{\frac{-wa}{kr}}, \quad (3.1)$$

де, K_t - середня ймовірність розпаду однієї молекули за одиницю часу, змінна відповідає за швидкість хімічних реакцій;

K - коефіцієнт,матеріально-залежних речовин, що беруть участь в реакції;

Wa – Енергія активації;

k - еталонне значення постійної Больцмана.

Для кращого розуміння цього явища розглядається окремий випадок старіння ізоляції в умовах високої інтенсивності електростатичного поля. Під дією електричного поля на локальну ділянку ізоляції в цій області виникають часткові розряди (рис. 3.9), що характеризуються нелінійним зростанням та періодичним повторенням. Ці розряди ініціюють процес руйнування ізоляції, оскільки в її структурі присутні мікротріщини. Коли досягається максимально допустиме значення електричної напруги, діелектрична міцність ізоляції втрачається. Для аналізу та розрахунку стану ізоляційного матеріалу розроблено закон, який описує механізм утворення та еволюції дефектів у діелектрику. У цьому дослідженні як зразок був обраний поліетилен.

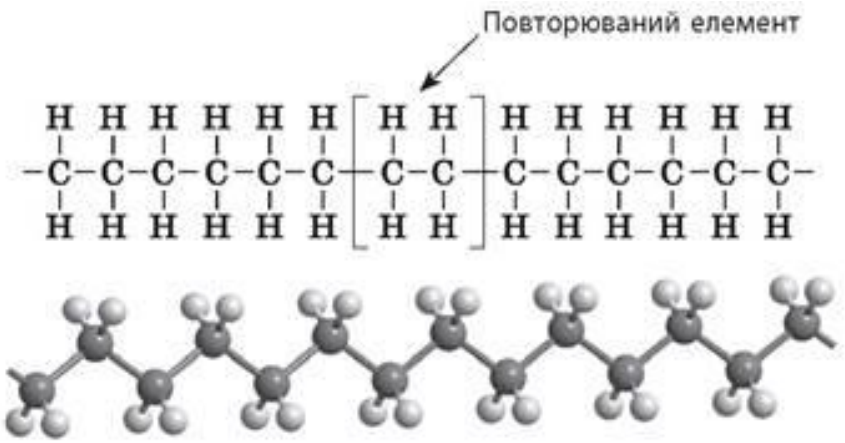

Рисунок 3.9 – Будова молекули поліетилену

У хімічній структурі поліетилену при пробої розриваються зв’язки між атомами вуглецю, що призводить до утворення так званих вільних атомів вуглецю, які можуть сприяти появі бульбашок. Вивільнений вуглець, отримуючи позитивний заряд як іон H^+, спричиняє іонізацію та подальшу деградацію молекулярної структури поліетилену. Захопивши вільний електрон, іон стає нейтральним, перетворюючи вуглець на провідну мікрочастинку, тоді як сусідні атоми формують нові зв’язки. Старіння поліетиленової ізоляції є неминучим як через технологічні, так і експлуатаційні фактори, зокрема через появу повітряних мікропорожнин, домішок та тріщин, що можуть утворюватися під час виробництва, монтажу та роботи кабелів. Періодичне стискання та розширення матеріалу в режимах навантаження сприяє утворенню мікропорожнин, які згодом заповнюються

водяною парою і леткими продуктами, що виникають під час процесів зшивання та екструзії ізоляції.

3.4 Вибір методу діагностики та контролю стану ізоляції кабельні лінії із зшитим поліетиленом

Для забезпечення надійної роботи силових кабелів їх необхідно ретельно перевірити перед введенням в експлуатацію. Огляду підлягають струмопровідні жили кабелю (для забезпечення з'єднання джерела електричної енергії зі споживачем) та ізоляція (для запобігання коротким замиканням). При введенні в експлуатацію кабельних ліній напругою 6-10 кВ зі зшитою поліетиленовою ізоляцією виконуються такі тести:

Перевірка цілісності та фазування жил кабелю.

1. Вимірювання опору ізоляції. Значення опору не стандартизоване, його вимірюють до та після випробування підвищеною напругою.
2. Випробування на номінальну або перенапругу випрямленого струму (іноді застосовують випробування напругою промислової або наднизької частоти 0,01-0,1 Гц).
3. Вимірювання розподілу струму по одножильних кабелях. Нерівномірність розподілу не повинна перевищувати 10%.
4. Контроль стану антикорозійного покриття, якщо воно є.
5. Вимірювання опору заземлення.

Ізоляційні матеріали особливо схильні до деградації під дією зовнішніх і внутрішніх факторів, тому випробування ізоляції має бути пріоритетним. Стандартизована випробна напруга є руйнівною для ізоляції: вона не лише виявляє недоліки, що могли виникнути під час виробництва або монтажу, але й прискорює деградацію ізоляційного матеріалу, що може зменшити його термін служби. Використання постійної напруги під час випробувань кабелів із зшитого поліетилену може призвести до накопичення об'ємних зарядів, що сприяє передчасному виходу кабелю з ладу.

З огляду на це зростає популярність неруйнівних методів контролю та діагностики ізоляції, зокрема:

1. Вимірювання часткових розрядів в ізоляції.
2. Вимірювання тангенса діелектричних втрат.
3. Вимірювання напруги/струму в процесах поляризації та деполяризації діелектрика.

3.5 Спрощенна модель розрахунку терміну служби ізоляції

Спрощена модель поліетиленової ізоляції представлена у вигляді площини 100×100 молекул CH_2, у яких може відбуватися розпад під дією електричного поля. Уявімо собі цю площину як систему координат, де місця пробою визначаються випадковим чином. В окремому випадку розглядається процес старіння ізоляції під дією високої інтенсивності електричного поля. Це старіння зумовлюється розвитком часткових розрядів, які сприяють виникненню мікротріщин в ізоляції, що, своєю чергою, призводить до пробою (рис. 3.10). Для визначення ступеня пошкодження ізоляції, яке веде до пробою, застосовується закон розподілу дефектів у діелектрику.

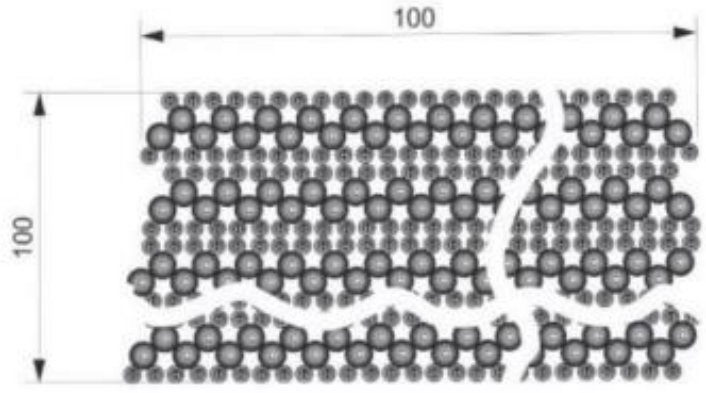

Рисунок 3.10 – Модель ізоляції у вигляді зрізу молекул 100x100

При моделюванні використовується випадкова функція, яка на основі робочої напруги кабелю (10 кВ) та товщини ізоляції визначає координати зруйнованих клітинок. Вважається, що пробій відбувається, коли в одному напрямку руйнується

10 із 100 клітинок. Проте очевидно, що ця модель потребує вдосконалення (рис. 3.11). Насамперед, необхідно уточнити критерії пробою ізоляції, а саме визначити ступінь руйнування матеріалу залежно від радіуса ізоляції, що призводить до пробою. За результатами більшості спостережень, пробій ізоляції зазвичай відбувається при пошкодженні в діапазоні від 300 до 500 молекул.

Рисунок 3.11 – Графік ймовірності пробою ізоляції ділянки на кількість проколотих молекул CH

Для розрахунку середньої кількості пошкоджених молекул обирається значення 400. Розмір моделювання становить 100×100 клітин, що відповідає 10 000 молекулам у польових умовах. Отже, для досягнення пробою ізоляції достатньо руйнування 4% молекул, якщо припустити, що при кожному частковому розряді пробивається лише одна молекула. В реальних умовах одноразовий частковий розряд може зруйнувати більшу кількість молекулична модель для визначення критичного рівня пошкодження ізоляційного шару показує, що одним із найімовірніших видів дефектів є еліптичні утворення, розподілені по радіусу кабелю. Дефекти, які призводять до пробою, часто мають дендритну структуру: це канали в ізоляції, наповнені рідинами, твердими частками або газами (рис. 3.12). Моделювання різних типів дефектів продемонструвало значний запас електричної міцності матеріалу ізоляції. Щоб створити напруженість електричного поля, що перевищує пробивну межу, обрану на рівні 6 кВ/мм для зістареного кабелю,

необхідно зруйнувати приблизно 78% ізоляції по радіусу, що підтверджено візуалізацією електричного поля та розподілом напруги в зоні дефекту.

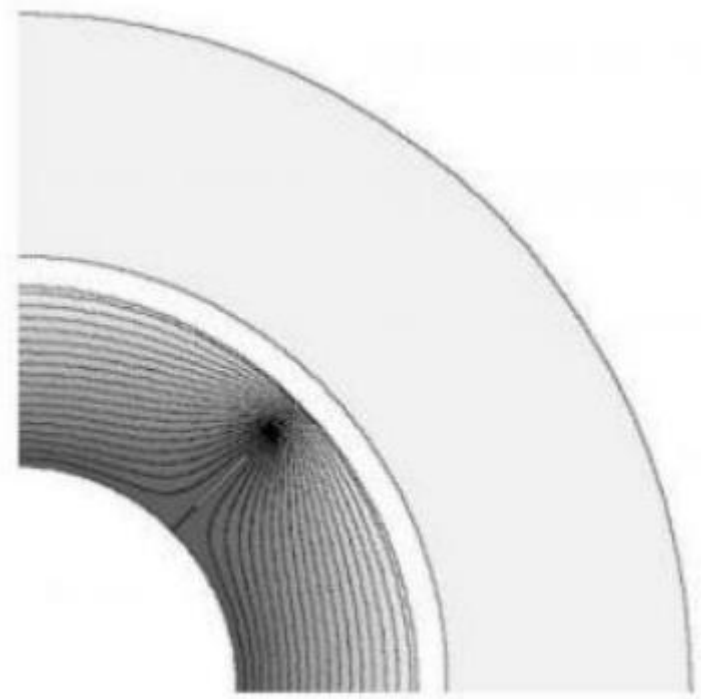

Рисунок 3.12 – Електричне поле дендритового кабелю

Для виконання тривимірних розрахунків пропонується використовувати модель у вигляді паралелепіпеда зі сторонами, пропорційними довжині кабелю, товщині та внутрішній площі ізоляційного шару. Застосування такої геометричної форми дозволяє врахувати можливість розростання дендритів переважно вздовж радіусу кабелю. Для коректного моделювання пропорційність сторін має бути визначена шляхом обчислення розмірів кожної з них. Переведення двовимірної моделі в об'ємний масив елементів є необхідним для проведення розрахунків у трьох вимірах.

Результати моделювання показали, що щільність ймовірності пробою змінюється відповідно до закону розподілу Вейбулла, який описується наступною формулою:

$$f = \left(\frac{k}{x}\right) * \left(\frac{x}{X}\right)^{k-1} * e^{-\left(\frac{x}{X}\right)^{k}}, \quad (3.2)$$

де, k - коефіцієнт форми, а λ - коефіцієнт масштабу.

Для математичного розрахунку залишкового ресурсу ізоляції кабелю важливо визначити функцію ймовірності пробою, що залежить від ступеня руйнування матеріалу. У випадку розподілу Вейбулла ця функція записується таким чином:

$$F = 1 - e^{-\left(\frac{x}{X}\right)^k}, \quad (3.3)$$

Результати моделювання показали, що при руйнуванні матеріалу до 35,5% ймовірність пробою становить менше 1%, після чого вона починає стрімко зростати. Таким чином, при рівні пошкодження до 35,5% ймовірність безвідмовної роботи ізоляції залишається дуже високою. У діапазоні руйнування від 35,5% до 78% ймовірність пробою істотно підвищується, що свідчить про високу ймовірність частих дефектів ізоляції в цьому інтервалі.

3.6 Методика визначення кореляційного зв'язку між характеристиками ізоляції кабелю і характеристиками безпосередньо пов'язані з термін служби кабелю.

Основною причиною виходу з ладу поліетиленових кабелів, що піддаються тривалому впливу високих температур і механічних навантажень (так зване термомеханічне старіння), є утворення тріщин в оболонці та ізоляції. Тріщиностійкість кількісно оцінюється через температуру холодостійкості ТхТ_хТх. Виявлено, що експлуатація поліетиленових кабелів в умовах підвищених напружень значно скорочує їхній термін служби. Структурний тепловий рух та рухливість полімерних елементів визначають релаксаційні переходи, які досліджуються за допомогою методів релаксаційної спектроскопії. Особливо важливою є структурна динаміка при вивченні температурно-частотних спектрів діелектричних та механічних втрат, що підтверджено експериментально. Спектри механічних втрат виявляють ті ж молекулярні процеси, що й діелектричні спектри.

Для діелектричних спектрів виділяють три основні переходи: низькотемпературні α-максимальні втрати діелектрика пов'язані з рухливістю окремих макромолекулярних груп, тоді як β-максимум обумовлений сегментарною

рухливістю вище температури твердіння полімеру. Дослідження показали, що α- та β-максимуми спостерігаються при негативних температурах за Цельсієм і є менш інформативними. Натомість α-максимум, пов'язаний із сегментарною рухливістю полярних груп вздовж поверхні кристалітів, проявляється при підвищених температурах і є цінним для аналізу. З часом в зоні α-релаксації спостерігається збільшення тангенса кута діелектричних втрат при максимумі температурної залежності та частоти, а також зміщення цього максимуму в область вищих температур на ΔTm\Delta TmΔTm близько 35°C від початкової температури до повного виснаження ресурсу. Це ж спостерігається і в частотній області, де максимум зміщується в зону нижчих частот близько 750 Гц.

Відхилення місця розташування максимального значення тангенса (на ΔTm\Delta TmΔTm або Δfm\Delta f_mΔfm) виступає як кількісний показник процесу старіння. Експериментально встановлено, що між цими показниками — критеріями ΔTm\Delta TmΔTm або Δfm\Delta fmΔfm — та стандартним критерієм (температурою холодостійкості) існує пряма кореляційна залежність. Ці залежності можна описати у вигляді лінійної функції від температури.

$$Tx = 189 - 1{,}7\Delta Tm, \tag{3.4}$$

-від прикладеної напруги

$$Tx = 189 - 1{,}7\Delta Tm, \tag{3.5}$$

де, Тх - температура холодостійкості Кельвіна. У той же час, щоб визначити необхідно відрізати зразок від кабелю і визначити його значення експериментальним шляхом , тобто цей спосіб не прийнятний в експлуатації.

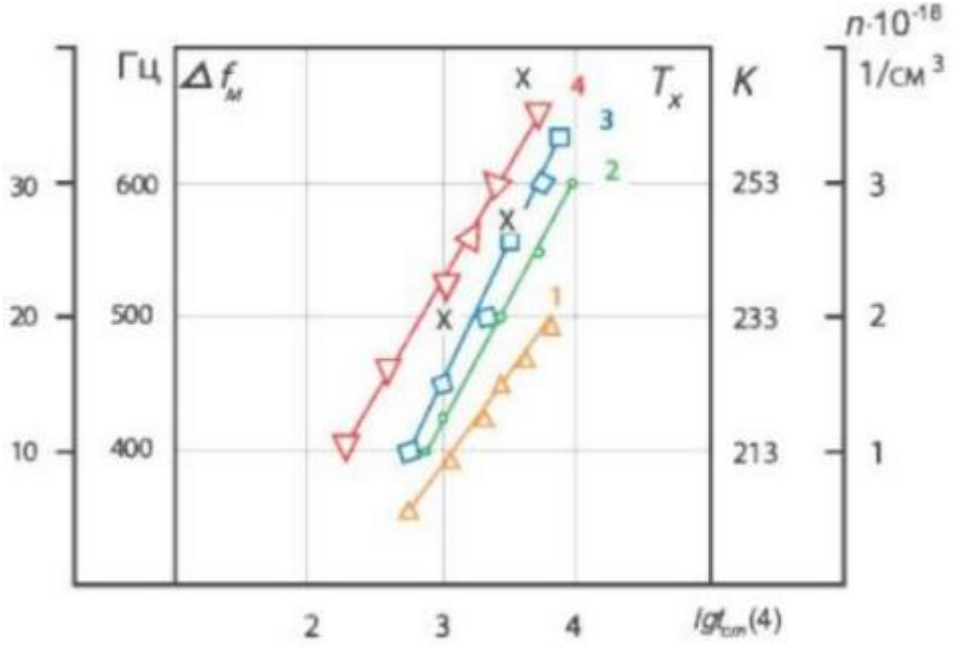

Рисунок 3.13 – Залежності параметрів старіння

При дослідженні температурно-частотних спектрів діелектричних втрат експерименти проводяться на ділянках кабелю або кабельних лініях без вилучення зразків, що робить метод неруйнівним. Випробувальна напруга становить 30-50 В, а діапазон частот досягає 15 кГц, що не чинить впливу на ізоляцію під час тестування. У цьому контексті вводиться поняття коефіцієнта зміни параметрів продуктивності під час старіння, який відображає зміни в характеристиках ізоляційного матеріалу з часом. Цей коефіцієнт може бути використаний для оцінки зниження експлуатаційних властивостей кабелів внаслідок впливу тривалої експлуатації та навантажень.

$$K_n = \frac{\Pi_{\text{пр}} - \Pi_{\text{н}}}{In\text{пр} - In\text{н}}, \tag{3.6}$$

де, $\Pi_{\text{пр}}\Pi_{\text{н}}$ - відповідне значення параметра: граничне (вичерпаний ресурс) і отримане в ході експерименту;

$\tau_{\text{пр}}$- межа робочого часу, що відповідає часу роботи;

$\tau_{\text{н}}$ - накопичений ресурс на момент вимірювання параметра Рн.

Можна визначити накопичений ресурс

$$\tau_{\text{н}} = \tau_{\text{прф}} * \exp\left[\frac{\Pi_{\text{н}} - \Pi_{\text{пр}}}{K_n} + \frac{W}{R} * \left(\frac{1}{T_p} - \frac{1}{T_{\text{ф}}}\right)\right], \tag{3.7}$$

де, $\tau_{прф}$ - граничне значення терміну служби в режимі примусового випробування;

$T_ф$- температура старіння у форсованому режимі;

$T_р$ - робоча температура кабелю;

W – 54 кДж/моль – умовна енергія активації процесу деструкції ПЕ.

Щоб використовувати формулу (5), спочатку необхідно визначити критерії ефективності, які складають параметри ΔTm\Delta T_mΔTm та Δfm\Delta fmΔfm. Вимірювання параметра ΔTm\Delta TmΔTm повинно проводитися за умов рівномірного нагрівання кабелю, що є практично неможливим у реальних умовах. У зв'язку з цим більш зручним параметром є Δfm\Delta fmΔfm.

Для вирішення цієї проблеми було розроблено експрес-метод, який дозволяє визначати параметр Δfm\Delta fmΔfm шляхом проведення вимірювань лише на двох частотах. В результаті було отримано формулу для визначення fmf_mfm, яка виглядає наступним чином:

$$f_м = \sqrt{f_1 * f_2 * \left(\frac{f_1^x * tg\delta_1 - f_2^x * tg\delta_2}{f_2^x * tg\delta_2 - f_1^x * tg\delta_1}\right)^{\frac{1}{x^2}}}, \quad (3.8)$$

де λ =0,4–0,8 – параметр розподілу часу релаксації.

Після визначення fm обчислюється параметр Δfm.

Математична модель виникнення включень

У кабельних лініях електричних мереж існує різновид неоднорідностей, таких як включення, прошарки між окремими шарами, мікротріщини, відшарування ізоляції тощо. Ці неоднорідності призводять до перерозподілу електричного поля через різницю в діелектричній проникності ε\varepsilonε та питомій провідності γ\gammaγ, що описується рівняннями ε1·E1=ε2·E2\varepsilon1\cdot E1= \varepsilon2 \cdot E2ε1·E1=ε2·E2 та γ1·E1=γ2·E2\gamma1\cdot E1=\gamma2\cdot E2γ1·E1=γ2·E2. Внаслідок цього в місцях неоднорідностей спостерігається висока локальна напруженість електричного поля.

Розвиток розрядів у зонах з підвищеною локальною напругою може призводити до неповного пробою ізоляції, що називається частковим розрядом. Для вивчення закономірностей розвитку часткових розрядів у газових включеннях важливо визначити їх характеристики, оскільки вони відіграють ключову роль у процесах деградації ізоляції. Це дозволяє розробити стратегії для прогнозування терміну служби кабелів та підвищення їхньої надійності в експлуатації.

Для визначення величини області включення, роцес розвитку ПДн, звідси механізми старіння і електричного пробою , необхідно визначити параметри , а саме встановити зв'язок між напруга виникнення Uчр, його максимальне значення qчр і товщина включення .Напруженість електричного поля в газовому полі включення перевищує польову міцність ізоляційного матеріалу, так що оскільки його діелектрична проникність значно вища за діелектрик газопроникність (air=1). Якщо матеріал утеплювача напруга U = Umsinωt, тоді при включенні газу напруга дорівнюватиме:.

$$U_{\text{в}} = U * \frac{\text{C}_{\text{п}}}{\text{C}_{\text{в}}}, \tag{3.9}$$

Прикладена напруга викликає накопичення поверхневого заряду на кордоні між включенням газу і рештою діелектрика. Коли напруга досягне початкової іонізаційної напруги газу при включенні, Здатність до включення часткрвого розряду:

$$U_{\text{чр}} = \frac{U_{\text{в.пр}}}{\sqrt{2}} * \frac{\text{C}_{\text{п}} + \text{C}_{\text{п}}}{\text{C}_{\text{в}}}, \tag{3.10}$$

Де, $\text{C}_{\text{п}} = \frac{\varepsilon_0 * \varepsilon_{\text{п}} * S_{\text{в}}}{h - h_{\text{в}}}$, $\text{C}_{\text{в}} = \frac{\varepsilon_0 * \varepsilon_{\text{п}} * S_{\text{в}}}{h_{\text{в}}}$

$U_{\text{в.пр}}$ – пробивна напруга включення газу;

$C_{\text{в}}$ – газова зона включення.

Після підстановки $C_{\text{в}}$, $C_{\text{п}}$ враховують, що $h_{\text{в}} << h$ і неоднорідність ізоляція електричного поля, отримуємо:

$$U_{\text{в}} = \frac{U_{\text{в.пр}}}{\sqrt{2}} * \frac{\varepsilon_{\text{п}}}{\varepsilon_0} * \frac{h}{\delta K_n}, \tag{3.11}$$

де, $K_n=E_{max}/EPC$ – коефіцієнт неоднорідності електричного поля в ізоляції дорівнює відношенню максимального напруження Emax до середньої напруженості EPC в ізоляційній щілині.

Ізоляційний матеріал має діелектричну товщину вставки hв, товщину діелектрика h і діелектрична проникність ізоляційного матеріалу εі=εр, де hв< при робочій напрузі U, напруга комутації:

$$U_{\text{в}} = \varepsilon_{\text{п}} * \frac{h_{\text{в}}}{h} * U, \tag{3.12}$$

З підвищенням напруги зростає допустима робоча напруга для ізоляції, що забезпечує її тривалу експлуатацію. Зростання прикладеного електричного поля веде до лінійного збільшення рівня часткових розрядів, а також до зниження порогу їх виникнення. При досягненні певного значення напруги UкрU_{\text{кр}}Uкр — критичної напруги, інтенсивність часткових розрядів ηчр\eta_{\text{чр}}ηчр різко зростає. Це, в свою чергу, призводить до значного погіршення характеристик ізоляції і скорочення терміну її служби. Таким чином, контроль за рівнем часткових розрядів є критично важливим для забезпечення надійності та безпеки електричних кабелів.

РОЗДІЛ 4. ДІАГНОСТИКА ІЗОЛЯЦІЇ КАБЕЛІВ МЕТОДОМ ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ ЧАСТКОВИХ РАЗРЯДІВ

4.1Методи оцінки часткових розрядів

Важливим параметром кабельних виробів, що визначає їх експлуатаційні властивості, є цілісність ізоляції. При надмірній напруженості електричного поля в окремих ділянках ізоляції можуть виникати часткові розряди (ЧР), які, розвиваючись, призводять до повного пробою електроізоляційної конструкції. Часткові розряди зазвичай утворюються в газових включеннях діелектрика або внаслідок технологічних дефектів.

Для оцінки стану ізоляції силових кабелів застосовуються різноманітні методи діагностики та випробувань, зокрема традиційні і сучасні підходи. З метою забезпечення високої якості продукції на технологічній лінії ізоляцію кабелю контролюють за допомогою електроіскрового методу. Суть цього методу полягає у тому, що під час руху кабелю по технологічній лінії до його ізоляції прикладається висока напруга за допомогою спеціального електрода, тоді як струмопровідна жила, броня або екран заземлюються. При проходженні дефектної ділянки у зоні впливу випробувальної напруги виникає іскровий розряд, який фіксується електроіскровим дефектоскопом.

Сьогодні найбільш поширеними методами діагностики є реєстрація електричних імпульсів часткових розрядів. У готових виробах такі розряди фіксуються електричними методами, структура яких зображена на рис. 4.1.

Принцип методу полягає в наступному: у момент підвищеної напруженості електричного поля в ізоляції виникає ударна іонізація і пробій газового включення С3, при цьому на час 10–7 с сумарна ємність збільшується на ΔСх. При зміні полярності електродів у наступному напівперіоді відбувається новий імпульс іонізації. Кількість імпульсів за секунду пропорційна частоті f ($n = 4 \cdot k \cdot f$; $k = 1, 2, 3 \ldots$).

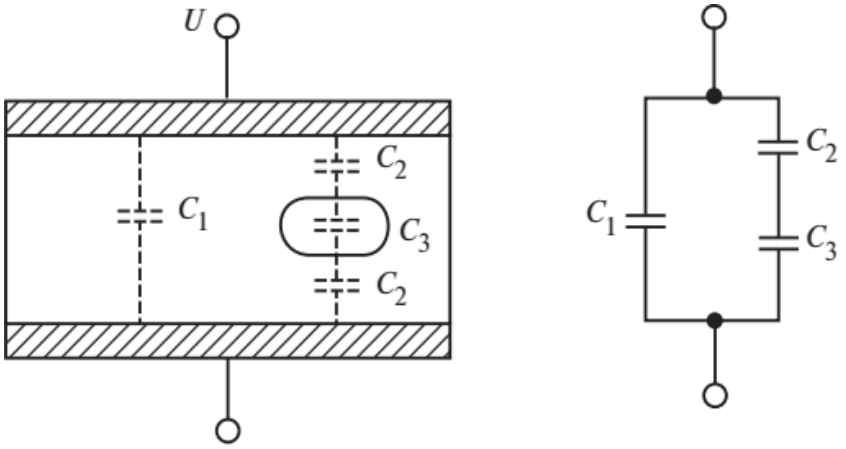

Рисунок 4.1 – Схема діелектрика із газовим включенням При зміні ємності зразка Cx на ΔCx відбувається зміна заряду

$$\Delta Q_x = U\Delta C_x, \tag{4.1}$$

де U - напруга на зразку.

Величина ΔQx визначається як заряд одиничного, видимого часткового розряду (ЧР). У разі, коли ємність Cx підключена послідовно з резистором, зміна ємності на величину ΔCx спричиняє появу імпульсу напруги на Cx

$$\Delta U_x = \frac{\Delta Q_x}{C} * \frac{U\Delta C_x}{C}, \tag{4.2}$$

Після підсилення цей імпульс може бути зареєстрований вимірювальним приладом R. Оскільки сигнал являє собою короткочасний імпульс, його спектр електромагнітних коливань охоплює частоти в діапазоні від 20 до 2000 кГц. Для точного вимірювання заряду або струму необхідне рівномірне підсилення та реєстрація в цьому частотному діапазоні. У разі значних перешкод або для підвищеної точності реєстрації ЧР використовуються резонансні підсилювачі.

Середній струм часткових розрядів визначається як:

$$I = \Delta Q_x n, \tag{4.3}$$

Для оцінки якості діелектрика іноді використовують потужність часткових розрядів, яка пропорційна ΔU2 та сумарному заряду Q за час випробувань t.

Схеми приладів для дослідження часткових розрядів при послідовному, паралельному та балансному з’єднаннях наведені на рис. 4.2 (а-в). У цих схемах як опір Zi використовують резистор або настроєний контур; також допускається застосування індуктивності чи більш складного фільтра.

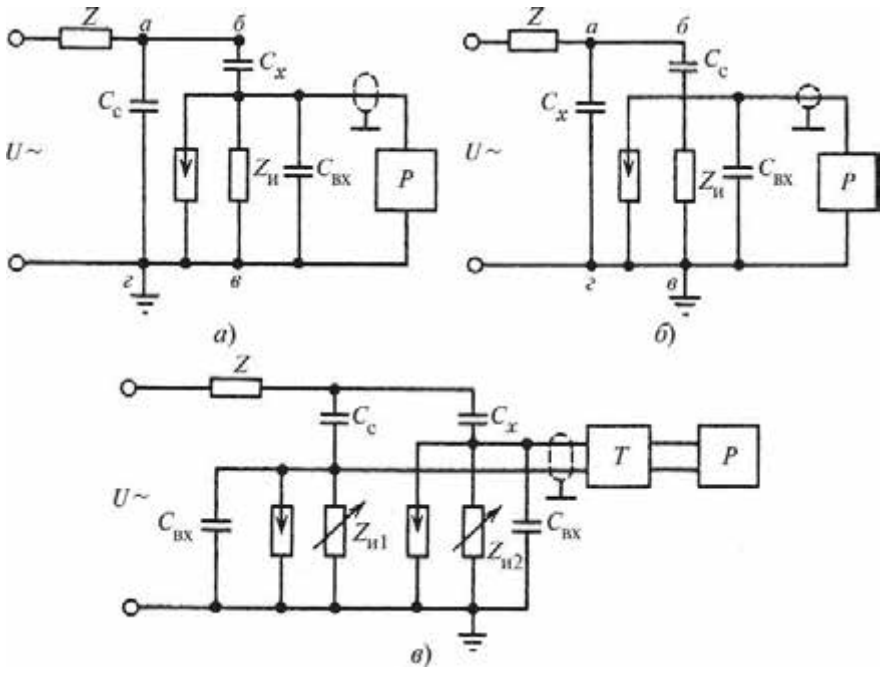

Рисунок 4.2 – Схеми приладів для дослідження часткових розрядів електричним методом

Для вимірювання ΔQx використовуються підсилювач, амплітудний вольтметр, осцилограф і вимірювач радіоперешкод. Імпульсні параметри реєструються за допомогою підсилювача, амплітудного дискримінатора й лічильника імпульсів, а для вимірювання струму — підсилювача, випрямного пристрою або вимірювача середніх значень. На вхід підсилювача встановлюється фільтр для усунення низькочастотних перешкод (нижче 5–20 кГц), забезпечуючи коефіцієнт підсилення до 106 з кроками регулювання 20 дБ. При великих значеннях Cx та перешкодах використовують вузькосмуговий підсилювач з пропускною здатністю Δf 8–10 кГц, а частота підсилення коливається від 20 кГц до 2 МГц.

Для запобігання пробоям зразків паралельно Zi підключають розрядник. Чутливість схеми зростає при послідовному з'єднанні (рис. 4.2, а), але обидва електроди мають бути ізольовані від заземлення. Елемент Cc приєднується до Zi з індуктивністю L для налаштування контуру на резонанс з частотою підсилювача і максимальною частотою спектра ЧР. Комбінація Cc і Zi може діяти як фільтр для усунення високочастотних перешкод мережі.

При паралельному з'єднанні (рис. 4.2, б) Cc з'єднує зразок Cx з Zi. Якщо Zi індуктивний, то контур можна налаштувати на резонанс, як і при послідовному

з'єднанні. В цьому випадку один електрод Cx заземлений. У балансній схемі (рис. 3.2, в) із Cc=Cx і Zi1=Zi2 усуваються мережеві перешкоди, потрібен узгоджувальний трансформатор T для несиметричного входу P.

Щоб створити на виході реєструючого приладу напругу 1 В при підсиленні 106, реєструється ΔUx на рівні 10−6 В. Тоді заряд ΔQx=Cx·ΔUx а для Cx=1000 пФ (або 10−9Ф) чутливість схеми становить 10−1510^{-15}10−15 Кл, хоча в умовах перешкод чутливість зазвичай досягає 10−13 Кл.

Проводи під високою напругою мають бути гладкими та достатнього діаметра для запобігання коронному розряду, а конденсатор Cc — розрахований на напругу, що значно перевищує випробувальну напругу ЧР. Спеціальні трансформатори з обмотками без ЧР застосовують для стабільної випробувальної напруги, зменшуючи номінальну напругу у звичайних трансформаторах.

Рівень перешкод можна визначити експериментально, під'єднавши зразок Cx без ЧР. Показання приладу при цьому сигналізують про наявність перешкод.

У кабельних системах важливо досліджувати ЧР, що виникають уздовж довжини кабелю, особливо в полімерних високовольтних кабелях. На рис. 4.3 показана схема вимірювань: заземлена металева ванна (1) заповнена деіонізованою водою (2) з великим питомим опором. Висока напруга підключається до електрода (3), а жила кабелю заземлена через резистор ZiZ. Завдяки високій діелектричній проникності води вся напруга припадає на ізоляцію кабелю, дозволяючи ЧР відбуватися лише всередині кабелю. Пропускаючи кабель крізь ванну, можна визначити місця виникнення ЧР.

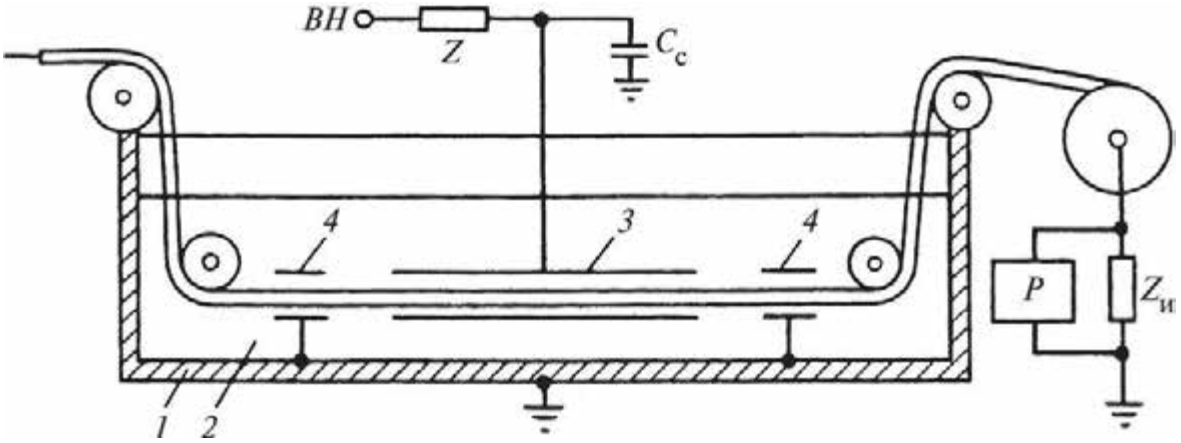

Рисунок 4.3 – Схема вимірювання часткових розрядів у кабелі

Для вимірювання часткових розрядів (ЧР) у довгих кабелях при частоті близько 20 МГц використовуються методи, які дозволяють визначити місце їх виникнення за різницею часу проходження імпульсів від точки розряду до віддаленого кінця кабелю. ЧР низької інтенсивності можуть поступово зменшуватися, що допускається під час випробувань. Проте зростання інтенсивності ЧР свідчить про можливий пробій ізоляції у найближчий час.

Стійкість матеріалів до ЧР варіюється: поліетилен швидко руйнується під їх впливом, тоді як скло і фарфор руйнуються значно повільніше. Зносостійкість електроізоляційної конструкції описується степеневою залежністю $t=AU^n$, де A і n— постійні.

Точність контролю ЧР знижується через коронні розряди, особливо у місцях контакту високовольтного електрода з ізоляцією. Недоліком методу є невиявлення деяких «ненаскрізних» дефектів, що впливають на електричну міцність ізоляції, а також неможливість отримати інформацію про електричні властивості об'єкта, що обмежує точність виявлення дефектів і вибір оптимальних режимів роботи дефектоскопів.

4.2 Вдосконалений метод визначення стану ізоляції

Дефекти в ізоляції, що не можуть бути виявлені за допомогою електроіскрового методу контролю, можна виявити шляхом безперервного вимірювання ємності окремих ділянок кабельної продукції. Під час перевірки погонної електричної ємності кабель пропускається через циліндричний електрод, на який подається низьковольтна напруга, що дозволяє вимірювати електричну ємність ізоляційного шару. Для забезпечення електричного контакту між ізоляційною поверхнею та електродом використовується вода охолоджувальної ванни. При наявності дефекту ізоляції, значення погонної електричної ємності змінюється, що дає змогу робити висновки щодо якості діелектрика.

Для підвищення надійності результатів запропоновано поєднати два методи контролю в один комплексний підхід. Новий метод полягає у вимірюванні погонної електричної ємності під час електроіскрових випробувань.

У рамках електроіскрового методу широко застосовуються електроди з набору кулькових ланцюгів (ланцюжкові, пружинні або щіткові), які демонструють високі експлуатаційні характеристики. Ці електроди дозволяють подавати випробувальну напругу до поверхні ізоляції, і при проходженні дефектної ділянки відбувається електричний пробій, що фіксується автоматизованими системами.

У запропонованому методі точність вимірювань значною мірою залежить від розподілу електричного поля по поверхні об'єкта контролю. Зниження неоднорідності поля підвищує інформативність отриманих даних. Для забезпечення достовірного вимірювання ємності важливо, щоб випробувальна напруга рівномірно розподілялася по всій контрольованій поверхні, а не лише в точках контакту електродних ланцюжків з ізоляцією. Цього можна досягти завдяки високій випробувальній напрузі.

Однак конструкція електрода, яка складається з ланцюжків, створює неоднорідне електричне поле у контрольованій зоні. Аналіз електричного поля на початковій стадії, до виникнення іонізаційних процесів, показав, що нормальна складова поля домінує над тангенціальною. Це домінування сприяє термічній іонізації, яка полегшує виникнення електричного розряду.

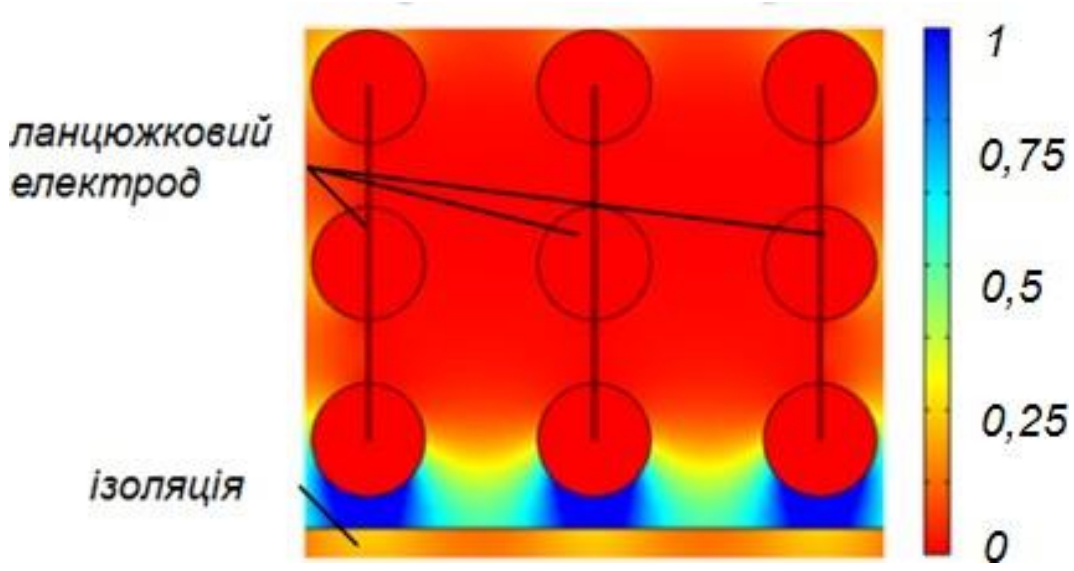

Рисунок 4.4 – Картина електричного поля між поверхнею ізоляції та ланцюжковим електродом (максимальна відносна напруженість дорівнює 1, мінімальна 0)

При цьому електричному полі формується ковзний розряд, на розвиток якого впливають такі фактори, як матеріал і стан поверхні ізоляції, а також тип і величина випробувальної напруги. Підвищення однорідності електричного поля покращує інформативність отриманих результатів вимірювань.

Для оцінки точності діагностики та інформативності контролю за різних режимів напруги застосовується нормальний закон розподілу ймовірностей. Зокрема, визначається ймовірність точності при постійній напрузі (режим 1), при змінній напрузі з частотою 50 Гц (режим 2) і при змінній напрузі з частотою 1 кГц (режим 3).

Теорія ймовірностей і математична статистика дозволяють кількісно оцінити результати вимірювань та їхню випадкову похибку. Похибка визначається як відхилення виміряного значення X від дійсного значення Xd.

$$\Delta = X - X_d, \tag{4.4}$$

Для характеристики точності технічних пристроїв, що застосовуються для вимірювань, використовується термін "похибка засобу вимірювань". Під похибкою розуміють різницю між показанням вимірювального приладу та істинним значенням фізичної величини.

У разі прямих вимірювань числове значення досліджуваної величини зчитується безпосередньо з приладу. Якщо при повторних вимірюваннях (n) однієї й тієї ж величини XXX отримують різні значення Xi, то їх сукупність можна розглядати як вибірку випадкових величин: X1,X2,X3,…,Xn . У такому випадку найбільш ймовірною оцінкою величини зазвичай є вибіркове середнє значення, яке обчислюють як середнє арифметичне.

Різницю між середнім значенням вимірюваної величини X та окремими значеннями Xi, отриманими в результаті кожного окремого вимірювання, називають одиничним відхиленням або відхиленням окремих вимірів від середнього арифметичного значення. Ці відхилення також називаються абсолютними помилками одиничного відхилення і визначаються за формулою:

$$\Delta X_i = \bar{X} - X_i, \tag{4.5}$$

Для визначення середньої абсолютної помилки результату беруть середнє арифметичне абсолютне значення (модулів) окремих помилок:

$$\Delta X = \frac{|\bar{X} - X_1| + |\bar{X} - X_2| + \cdots |\bar{X} - X_n|}{n} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i\,, \tag{4.6}$$

Відношення середньої абсолютної помилки результатів вимірювання до середнього арифметичного значення визначає середню відносну помилку вимірювання. Вона розраховується за формулою:

$$E = \frac{\Delta X}{\bar{X}} * 100\%, \tag{4.7}$$

Згідно з теорією помилок, щільність розподілу випадкових помилок залежить від їхньої величини і описується нормальним розподілом, або законом Гауса. Ця залежність виражається такою формулою:

$$f_{X,\sigma} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(\bar{X}-X_i)^2}{2\sigma^2}}, \tag{4.8}$$

де X і – справжнє (середньоарифметичне) значення вимірюваної величини; σ – середня квадратична похибка.

Дисперсію генеральної сукупності для n знайдених значень X1, X2, X3, …, Xn випадкових величин знаходимо за формулою:

$$\sigma^2(S^2) = \frac{(\bar{X} - X_1)^2 + (\bar{X} - X_2)^2 + \cdots (\bar{X} - X_n)^2}{n} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^{n} (\bar{X} - X_i)^2 , \qquad (4.9)$$

Вона характеризує рівень розкиду Xi навколо X (рис. 3.5).

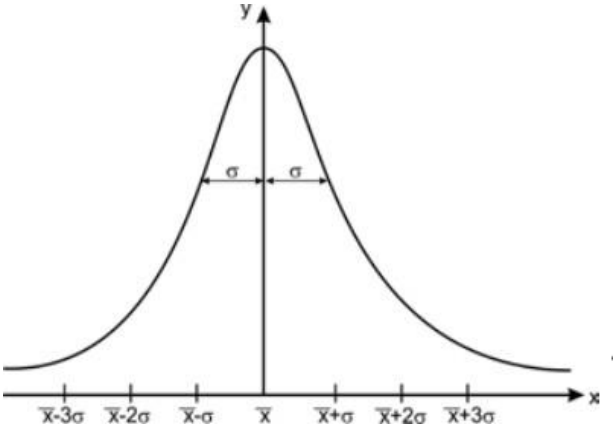

Рисунок 4.5 – Крива нормального розподілу помилок

Стандартне відхилення, середню квадратичну помилку окремого виміру знаходять за такою формулою:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{(\bar{X} - X_1)^2 + (\bar{X} - X_2)^2 + \cdots (\bar{X} - X_n)^2}{n}} = \pm \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^{n} (\bar{X} - X_i)^2} , \qquad (4.10)$$

Відносна середня квадратична помилка виміру, виражена у відсотках, називається коефіцієнтом варіації:

$$V = \frac{\sigma}{\bar{X}} * 100\%, \qquad (4.11)$$

З рисунка 4.5 видно, що максимум щільності розподілу випадкових помилок відповідає середньому значенню X для всіх результатів вимірювань із відхиленням σ. Крива розподілу симетрично знижується як вліво, так і вправо від середнього значення, що свідчить про рівну ймовірність виникнення позитивних та негативних помилок однакової величини. На цій кривій є дві точки перегину, відстань між якими по осі абсцис дорівнює стандартному відхиленню σ. Стандартне відхилення характеризує розсіювання даних і відтворюваність методу вимірювання: чим менше значення σ, тим менший розкид результатів.

Ймовірність P(k), яка також називається надійністю, є важливим параметром для характеристики випадкових похибок. Для точного опису випадкової похибки необхідно вказати два параметри: саму похибку, тобто півширину довірчого інтервалу ΔX або DX, та пов'язану з нею довірчу ймовірність P(k). У технічних вимірюваннях зазвичай використовується довірча ймовірність P=0,95, тоді як у наукових дослідженнях приймають P=0,68, що відповідає середньоквадратичній похибці (стандартному відхиленню середнього результату), яка обчислюється за формулою:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} * \sum_{i=1}^{n} (\bar{X} - X_i)^2}\,, \qquad (4.12)$$

і тоді вимірювання похибок середнього значення обчислюють за такою формулою:

$$\Delta\bar{X} = K * \sigma_{\bar{x}} = \frac{K * \sigma}{\sqrt{n}} = K * \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} * \sum_{i=1}^{n} (\bar{X} - X_i)^2}\,, \qquad (4.12)$$

Результати розрахунку точності діагностики під час вимірювання ємності кабелю при різних режимах напруги — постійній напрузі, змінній напрузі з частотою 50 Гц та змінній напрузі з частотою 1 кГц — отримані за допомогою формул (3.1)…(3.10) і представлені в таблиці 4.1. У цій таблиці наведено порівняльні дані щодо точності діагностики в різних умовах випробувань, що дозволяє оцінити вплив частоти напруги на точність вимірювання ємності кабелю. Такий аналіз важливий для визначення оптимальних умов контролю, що забезпечують найвищу точність результатів.

Таблиця 4.1 – Результати розрахунку визначення точності діагнозу

Параметри	Вимірювання ємності кабелю		
	При постійній напрузі	При змінній напрузі з частотою 50 Гц	При змінній напрузі з частотою 1 кГц
Погонна ємність при досліді 1, пФ/м	310	295	305
Погонна ємність при досліді 2, пФ/м	275	280	295
Погонна ємність при досліді 3, пФ/м	290	305	285
Погонна ємність при досліді 4, пФ/м	265	275	290
Погонна ємність при досліді 5, пФ/м	270	280	300
Середнє значення погонної ємності, пФ/м	282	287	295
Середнє арифметичне абсолютне значення (модулів) окремих помилок, □X , пФ/м	14,4	10,4	6
Середня відносна помилка вимірювання, E, %	5,11	3,62	2,03
Дисперсія генеральної сукупності, σ 2	266,00	126,00	50,00
Середня квадратична помилка, σ	16,31	11,22	7,07
Відносна середня квадратична помилка, V ,%	5,78	3,91	2,40
Стандартне відхилення середнього результату, σ x	7,29	5,02	3,16

За результатами розрахунків, наведених у таблиці 4.1, можна зробити висновок, що точність діагностики та інформативність контролю є вищими при змінній напрузі з частотою 1 кГц порівняно з іншими експериментами. Це підтверджується тим, що середня відносна похибка вимірювання (2,03 %) та відносна середня квадратична похибка (2,40 %) для цього режиму мають найнижчі значення.

Згідно з формулою Теплера, на довжину ковзного розряду значно впливає величина напруги та питома поверхнева ємність. У процесі експериментів були отримані залежності розподілу випробувальної напруги на поверхні ізоляції, які представлені на рисунку 4.6. Ці залежності дозволяють оцінити вплив напруги на розвиток ковзного розряду і підтверджують важливість вибору оптимальних параметрів для забезпечення високої точності контролю.

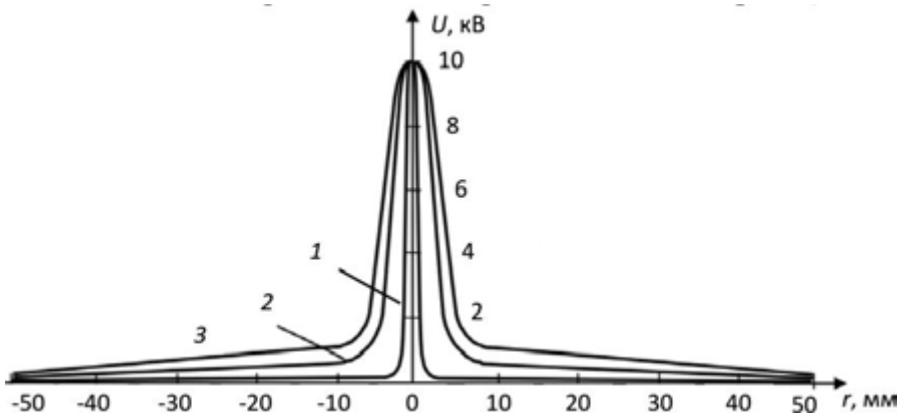

Рисунок 4.6 – Розподіл напруги на поверхні ізоляції при постійній напрузі (1) та при змінній напрузі з частотою 50 Гц (2), 1 кГц (3)

При аналізі отриманих залежностей для випробувальних напруг величиною 3, 10 і 15 кВ видно, що розподіл потенціалу по поверхні ізоляційного матеріалу виражений лише при змінній напрузі. Це пояснюється впливом питомої поверхневої ємності ізоляційного матеріалу, що підтверджується відповідною теплоізоляційною формулою. У випадку постійної випробувальної напруги, питома поверхнева ємність не має значного впливу на поширення розряду. Розряд, що виникає в таких умовах, подібний до розряду, що виникає в повітряному проміжку.

На основі експериментальних даних щодо розподілу напруги теоретично визначено залежність подовження електрода, через який подавалася випробувальна

напруга, від типу і величини напруги. Ця залежність відображена на рисунку 4.7 і демонструє, як змінюється довжина ковзного розряду з різними характеристиками напруги. Це дозволяє краще зрозуміти природу електричних розрядів при різних умовах та оптимізувати параметри контролю для покращення діагностики ізоляційних матеріалів.

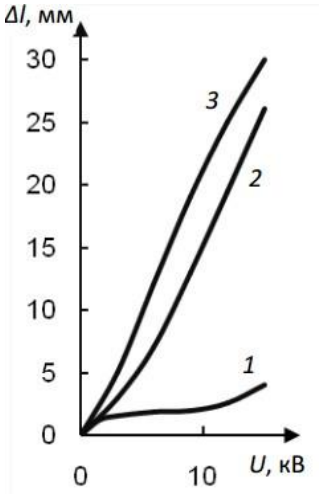

Рисунок 4.7 – Залежність подовження електрода від величини постійної (1) та змінної напруги із частотою 50 Гц (2), 1 кГц (3)

При припущенні про зв'язок між розподілом напруги та довжиною ковзного розряду, можна зазначити, що величина прикладеної змінної напруги має значний вплив на подовження електрода. У випадку постійної напруги спостерігається лише незначне подовження електрода.

Аналіз отриманих результатів досліджень показує, що за рахунок виникнення ковзних розрядів можливо забезпечити електричний контакт між електродом і поверхнею ізоляції не лише в точках дотику ланцюгів електрода, а й по всій довжині зони контролю при застосуванні змінної напруги. Це призводить до збільшення однорідності електричного поля, що, в свою чергу, підвищує інформативність контролю під час вимірювання погонної ємності.

Об’єднання контролю погонної електричної ємності та електроіскрового методу контролю створює можливості для більш точного та якісного виявлення дефектів в ізоляції кабелю. Це дозволяє оптимізувати процес діагностики, забезпечуючи підвищену надійність та точність результатів контролю.

РОЗДІЛ 5. СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ ОБЛАДНАННЯ АПК

Моніторинг — це система регулярних і тривалих спостережень у просторі й часі, яка надає інформацію про стан об’єкта з метою оцінки його минулого, поточного стану та прогнозування змін у майбутньому. Виходячи з цього, структура моніторингу повинна включати три основні етапи: оцінку минулого, аналіз поточного стану і прогнозування майбутніх змін (рис. 5.1.).

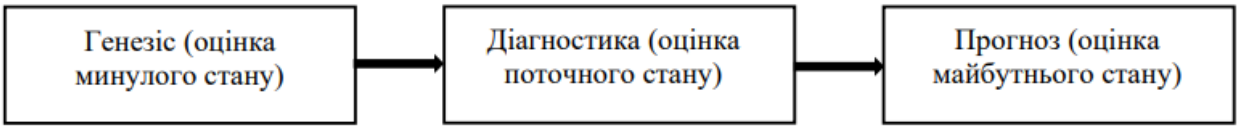

Рисунок 5.1. – Узагальнена структура процесу моніторингу

При проектуванні систем моніторингу важливо, по-перше, визначити оптимальну кількість діагностичних показників. По-друге, слід враховувати систему факторів, що впливають на формування негативних тенденцій. Ці фактори можуть бути пов'язані як із засобами та методами вимірювання, так і з самими діагностичними показниками. Корекція математичних моделей для визначення параметрів об’єкта можлива без втручання в технічну частину вимірювальної системи шляхом часткового або повного виключення факторів, що впливають на шкідливий тренд.

5.1 Загальна схема системи моніторингу стану ізоляції

Система моніторингу стану ізоляції кабельних ліній призначена для виявлення та локалізації дефектів на ранніх стадіях, що допомагає запобігти аваріям і зберегти працездатність електрообладнання. Вона складається з наступних основних компонентів:

1. Вимірювальний пристрій: Виконує вимірювання опору ізоляції кабельних ліній. Його основні частини:
    - Вхідний підсилювач

- Опірний вимірювальний канал
- Аналого-цифровий перетворювач (АЦП)
- Процесор
- Вихідний блок

2. Система передачі даних: Забезпечує передачу інформації від вимірювального пристрою до центру управління. Може використовувати технології Ethernet, Wi-Fi або інші.
3. Центр управління: Приймає та обробляє дані від системи передачі даних і видає сигнали управління. Його основні елементи:
   - Вхідний блок для прийому цифрового сигналу
   - Процесор для обробки отриманих даних
   - Сигнальний блок для видачі керуючих сигналів

Схема роботи системи моніторингу:

1. Вимірювання: Вимірювальний пристрій виконує вимірювання опору ізоляції кабельних ліній.
2. Передача даних: Результати вимірювань передаються до системи передачі даних.
3. Передача до центру управління: Система передачі даних надсилає інформацію до центру управління.
4. Обробка даних: Центр управління приймає та обробляє отримані дані.
5. Видача сигналів: Центр управління формує сигнали управління на основі аналізу отриманих даних.

Система враховує різні режими роботи електрообладнання, такі як увімкнений, тимчасово вимкнений або вимкнений на тривалий час, що важливо для точного моніторингу його стану.

Експлуатація електроенергетичного обладнання передбачає періодичні вимкнення, що можуть тривати від кількох хвилин до кількох днів або більше. У цей час ізоляція обладнання піддається ризикам зволоження, забруднення або механічних пошкоджень. Оскільки під час вимкнення напруга відсутня, звичайні

прилади захисту та діагностики не можуть працювати, і стан обладнання залишається невідомим до його повторного ввімкнення. Це підвищує ймовірність аварій або необхідність додаткових відключень.

Для моніторингу стану ізоляції вимкненого обладнання застосовуються методи, що враховують як опір, так і ємність ізоляції. Ці методи можна автоматизувати, що дозволяє отримувати інформацію про стан ізоляції безпосередньо перед повторним ввімкненням обладнання.

Метод оцінки стану електричної ізоляції відключених приєднань

Цей метод заснований на тому, що в нормальному стані ізоляція всіх фаз приєднання має однакові параметри. Якщо в одній із фаз виникає дефект, її параметри змінюються, що призводить до появи міжфазної напруги. Для виявлення дефектів подається короткий імпульс постійної напруги на відключене приєднання. Якщо після зняття імпульсу міжфазна напруга не виникає, приєднання вважається справним. Поява міжфазної напруги свідчить про дефект ізоляції.

Інформативні параметри

Частота міжфазної напруги є ключовим параметром для оцінки стану ізоляції. Вона залежить від співвідношення ємності фаз та індуктивності навантаження. Якщо параметри ізоляції всіх фаз однакові, розряд ємностей відбувається з однаковою постійною часу, і міжфазна напруга не виникає. Якщо ж параметри фаз різняться, розряд ємностей має різні постійні часу, і виникає міжфазна напруга.

Схема безперервного моніторингу

На основі цього методу можна побудувати схему для безперервного моніторингу якості ізоляції електроенергетичних об'єктів, що дозволить виявляти дефекти ізоляції на ранніх стадіях і запобігати аваріям (Рисунок 5.2.).

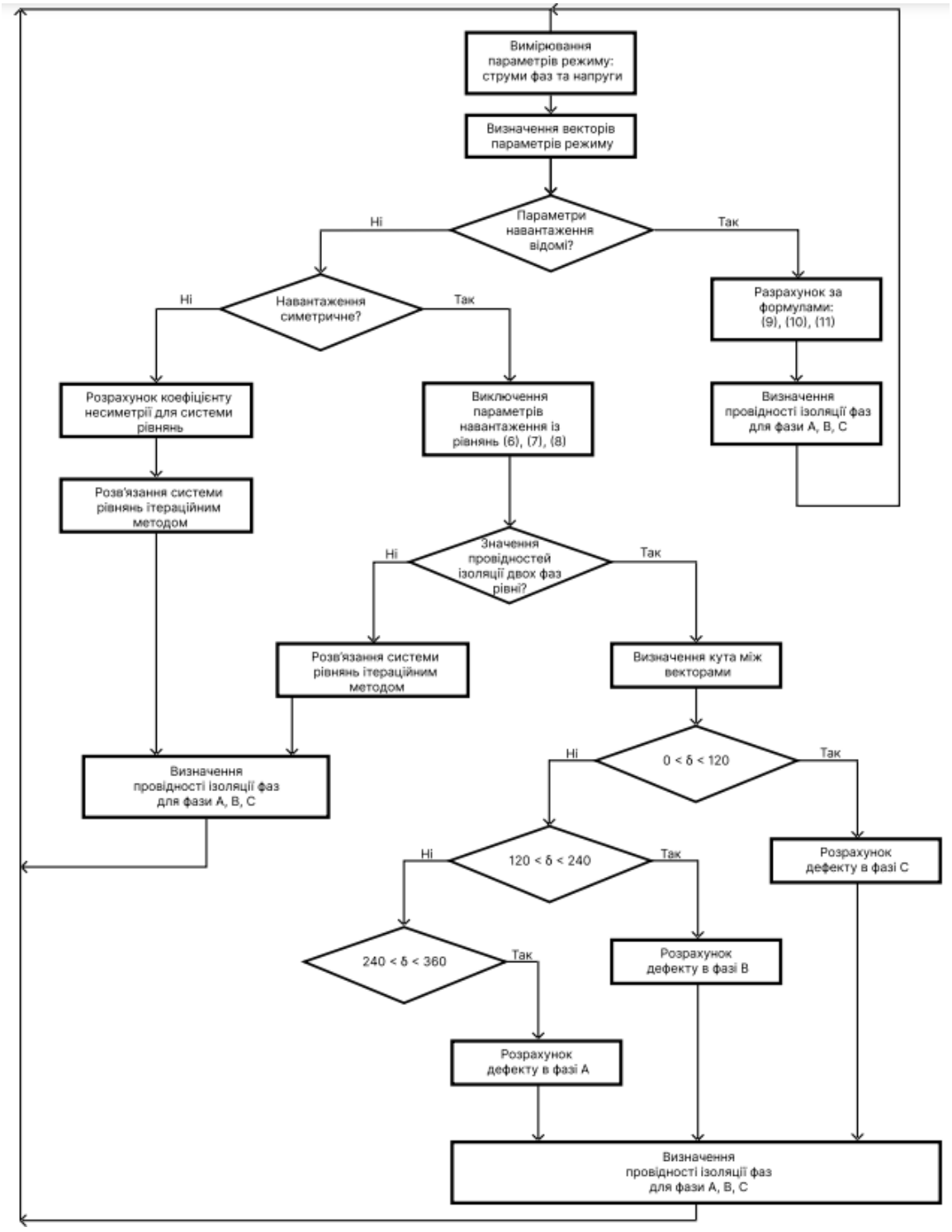

Рисунок 5.2. – Алгоритм безперервного моніторингу якості ізоляції

5.2 Алгоритм системи моніторингу

Створення нових алгоритмів моніторингу електроенергетичних об'єктів передбачає складний та багатогранний підхід, що включає кілька ключових етапів:

1. Формулювання задачі моніторингу. На цьому етапі визначають мету моніторингу. Наприклад, метою моніторингу асинхронного двигуна може бути забезпечення його надійної роботи впродовж усього терміну експлуатації через своєчасне виявлення дефектів та їх усунення. Важливо чітко окреслити, що саме потрібно контролювати і як це впливатиме на ефективність системи.
2. Аналіз конструкції та результатів експлуатації. Тут аналізується структура об’єкта моніторингу та попередній досвід експлуатації аналогічних об'єктів. Це дозволяє ідентифікувати найбільш уразливі елементи, які підлягають моніторингу, та основні причини їх відмов.
3. Визначення елементів для контролю. Важливо визначити, які конкретно частини об’єкта потребують постійного моніторингу для забезпечення ефективного функціонування. Це можуть бути критичні елементи, що часто піддаються навантаженням або впливають на загальну надійність системи.
4. Вибір методів контролю. Кожен елемент повинен мати адекватний метод контролю його стану. Обрані методи повинні забезпечувати точність вимірювань і можливість раннього виявлення дефектів. Для цього можуть бути використані різні датчики та діагностичні технології.
5. Визначення періодичності контролю. Це рішення базується на частоті виникнення дефектів і потребує аналізу експлуатаційних даних або математичних моделей. Оптимальна частота моніторингу дозволить своєчасно реагувати на відхилення без надмірного витрачання ресурсів.
6. Розробка технічних рішень. На цьому етапі розробляються практичні рішення для контролю стану об'єкта, включаючи вибір датчиків, розташування їх на об’єкті, засоби передачі і обробки даних. Технічні рішення повинні бути інтегровані в систему моніторингу для забезпечення безперебійної роботи.
7. Визначення критеріїв для прийняття рішень щодо ремонту. Необхідно встановити граничні значення параметрів, при яких буде прийматися рішення про проведення відновлювальних або ремонтних робіт. Це дозволить уникнути аварій та зменшити ризик виходу з ладу обладнання.

Цей підхід дозволяє забезпечити ефективний та своєчасний контроль стану електроенергетичних об'єктів, що суттєво підвищує надійність їх роботи та знижує ризики відмов.

На сьогоднішній день у мережах 6-35 кВ для контролю стану ізоляції в режимі експлуатації електрообладнання найчастіше використовуються засоби, що реагують на збільшення амплітуди струму та напруги нульової послідовності. Однак існуючі засоби захисту від замикань на землю мають порівняно низьку чутливість. Це зумовлено як несприятливими співвідношеннями параметрів мережі, так і необхідністю компенсації струму спрацювання при кидках власного ємнісного струму під час зовнішніх замикань на землю.

Підвищення чутливості захисту від замикань на землю є актуальним через наступні причини. Більшість захистів реагують на струм замикання на землю, тоді як такі пошкодження часто супроводжуються переривчастою дугою. У таких випадках захист не спрацьовує, доки замикання не стає постійним. Перехідні процеси при цьому спричиняють перенапруги, що негативно впливають на ізоляцію всієї мережі.

Модернізація захистів від замикань на землю та підвищення їхньої чутливості дозволяє здійснювати моніторинг і виявляти незначні локальні дефекти ізоляції або зниження її якості в окремих фазах мережі.

Необхідна чутливість захистів для виявлення дефектів ізоляції визначається наступним чином. Забруднення та зволоження ізоляції збільшують коефіцієнт загасання мережі через зниження опору ізоляції. Зменшення опору однієї з фаз у мережі 6 кВ в 2-4 рази відносно інших фаз призводить до появи первинного струму нульової послідовності в межах 0,003-0,01 А. Тому рекомендується встановлювати уставку спрацювання для виявлення дефектів ізоляції на рівні 0,01 А.

Проте слід враховувати, що при такому значенні первинного струму вторинний струм трансформаторів нульової послідовності (ТСНП) є значно меншим за мінімальну уставку серійних реле струму. Для реєстрації таких малих струмів необхідна цифрова обробка даних, отриманих із виходу аналого-цифрового перетворювача (АЦП) з розрядністю не менше 12 біт. Напруга шунта, підключеного

до вторинної обмотки ТСНП, подається на вхід АЦП. Основною причиною низької чутливості захисту є відносно низький рівень вихідного сигналу ТСНП, що особливо помітно при трансформації малих струмів, пов'язаних із дефектами ізоляції.

Найбільш ефективним способом підвищення чутливості захисту є застосування цифрових методів обробки сигналів з використанням адаптивної фільтрації, що дозволяє збільшити чутливість до 0,003-0,005 А, що відповідає вимогам для виявлення дефектів ізоляції.

Рисунок 5.3. Структурна схема автоматичного контролю стану ізоляції приєднання з використанням в ТСНП додаткової м.р.с.

На рисунку 5.3 представлена структурна схема одного з варіантів автоматизованого контролю стану ізоляції приєднання, в основі якої лежить використання звичайного захисту від замикань на землю та додаткового магнітного збудження (м.р.с.) у трансформаторі струму нульової послідовності (ТСНП).

На схемі зображений ТСНП з двома обмотками: вторинною (W2) та додатковою (WДОД). Пристрій працює у двох режимах. Перший — для грубого контролю ізоляції, що активує захист від замикань на землю, а другий — для високочутливого контролю стану ізоляції.

Зазвичай пристрій функціонує в режимі захисту від замикань на землю. У цьому випадку вхід органу порівняння струму з'єднаний з виходом ТСНП, а вихід органу — через другий блок комутації з виконавчим органом. Поки генератор

періодичних сигналів не відлічив встановлений час, сигнали на виходах першого блоку комутації відсутні, а сигнальний орган залишається у відключеному стані. Відповідно, струм у додатковій обмотці не з'являється.

У режимі захисту від замикань на землю, при нормальному функціонуванні мережі, якщо ізоляція приєднання в хорошому стані, а замикання на землю відсутнє, струм нульової послідовності у вторинній обмотці трансформатора менший за заданий поріг 3I0. У такому випадку орган порівняння струму не спрацьовує, і виконавчий орган захисту також залишається неактивним.

Коли стан ізоляції починає погіршуватися, струм нульової послідовності зростає, однак якщо його значення не перевищує поріг спрацьовування, захист не активується. Якщо ж у мережі відбувається металеве замикання на землю або замикання через невеликий опір, струм нульової послідовності перевищує встановлене значення, і орган порівняння активує виконавчий орган, який може подати сигнал або вимкнути приєднання.

Після закінчення встановленого часу генератор періодичних імпульсів активує перший блок комутації, і пристрій переходить у режим високочутливого контролю стану ізоляції. Перший блок комутації переключає вихід органу порівняння на сигнальний орган, а другий блок підключає джерело змінного струму до додаткової обмотки трансформатора. Третій вихід комутації блокує орган порівняння під час перехідного процесу, пов'язаного з наростанням струму у додатковій обмотці.

Після завершення перехідного процесу починається режим контролю, у якому струм на виході трансформатора пропорційний сумі струму нульової послідовності та струму додаткової обмотки. Якщо під час цього режиму відбувається критичне погіршення ізоляції, орган порівняння фіксує перевищення допустимого рівня струму і сигналізує про несправність. У разі замикання на землю під час режиму контролю орган порівняння також спрацьовує, виявляючи аварію.

Після завершення контролю пристрій повертається в режим захисту від замикань на землю, вимикаючи сигнальний орган. Якщо замикання відбулося, виконавчий орган залишається активним.

Щоб запобігти помилковому спрацьовуванню при коротких замиканнях, на другий вхід логічної схеми подається сигнал про неспрацьовування основних захистів приєднань системи.

Для покращення системи можна використовувати додаткову м.р.с. з частотою, відмінною від частоти мережі. Це дозволяє змінювати кут вектора додаткової м.р.с. відносно векторів струмів через ізоляцію фаз. Завдяки цьому пристрій стає чутливішим до несправностей ізоляції будь-якої фази, забезпечуючи їх послідовне виявлення.

При замиканні на землю пристрій контролю ізоляції спрацьовує миттєво, припиняючи подачу струму в додатковій обмотці. Цей сигнал надходить до виконавчого органу захисту, який спрацьовує без затримки, не чекаючи завершення циклу контролю ізоляції всіх фаз. Основним режимом роботи пристрою є безперервний моніторинг, що не заважає роботі захисту від замикань на землю.

Структурна схема системи автоматичного моніторингу складається з таких елементів:

- трансформатора струму нульової послідовності (ТСНП) з додатковою обмоткою,
- органу порівняння струму із заданим порогом,
- генератора змінного струму з частотою, відмінною від частоти мережі,
- блоків комутації та контролю наявності струму,
- інвертора,
- сигнального органу,
- логічної схеми І та виконавчого органу.

Під час роботи пристрою генератор змінного струму подає сигнал на додаткову обмотку через блоки комутації та контролю. Наявність струму в додатковій обмотці призводить до логічного нуля на виході інвертора, що блокує виконавчий орган захисту.

Система моніторингу підсумовує магнітні потоки, створені струмом у додатковій обмотці та струмом витоку через ізоляцію фаз. Якщо ізоляція в порядку, то струм на виході ТСНП буде меншим за порогове значення, і сигнальний орган не спрацює. Оскільки частоти струмів у мережі та додатковій обмотці не збігаються, вектори струмів постійно обертаються відносно один одного, чергуючи перевірку фаз. Якщо виникає несправність ізоляції, струм витоку збільшується, а при збігу фаз струм на виході ТСНП перевищує задане значення, що активує орган порівняння та сигнальний орган, який інформує обслуговуючий персонал та відключає струм у додатковій обмотці.

У випадку замикання на землю струм витоку різко зростає, і орган порівняння спрацьовує миттєво, незалежно від фази струму в додатковій обмотці. Сигнальний орган активується, а виконавчий орган вимикає приєднання.

Для розрахунку параметрів локального дефекту ізоляції використовується алгоритм, що базується на визначенні опору в точці дефекту та відстані до нього, використовуючи перебір параметрів у вкладених циклах (Рисунок 5.4).

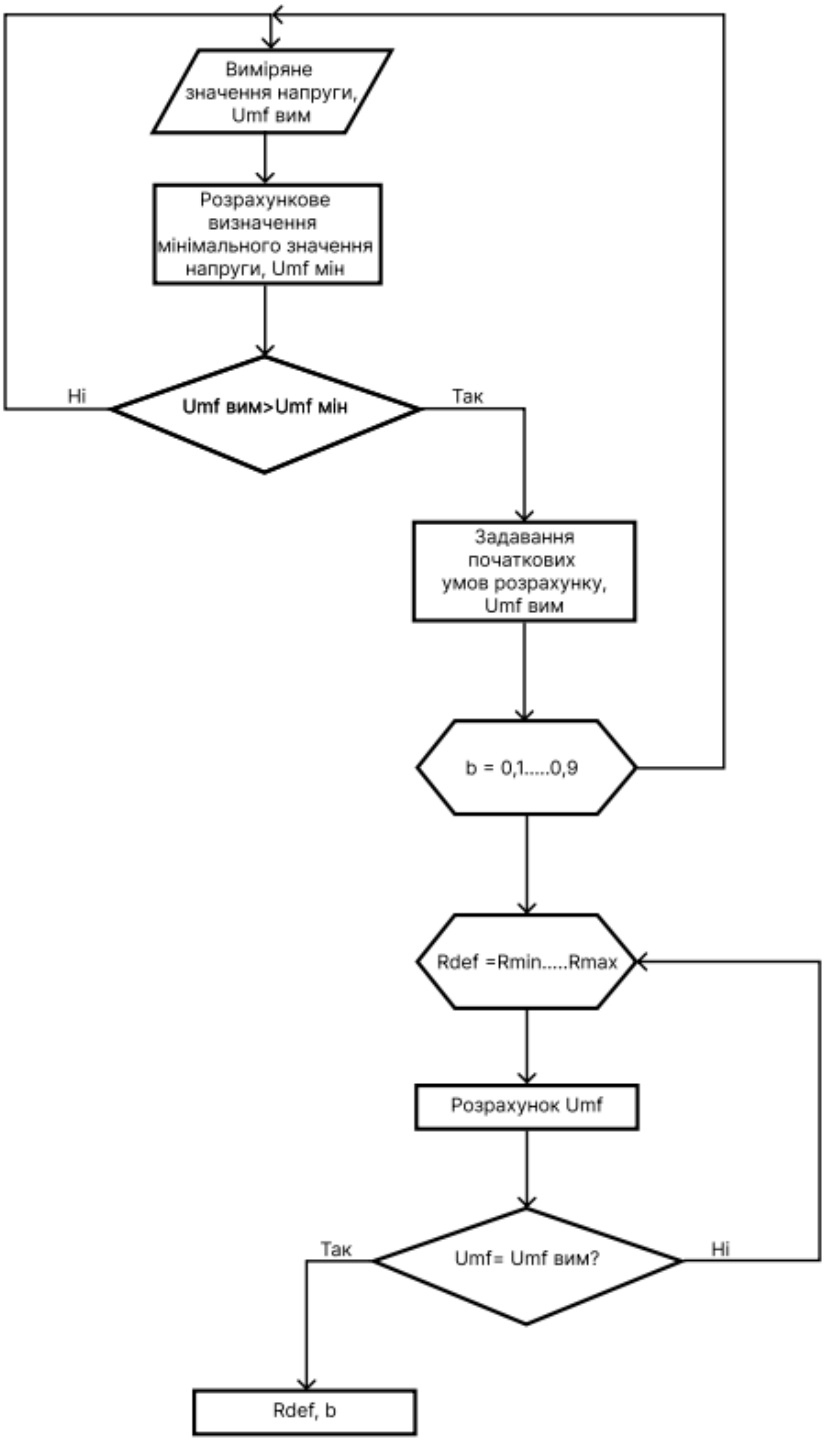

Рисунок 5.4. – Алгоритм безперервного моніторингу якості ізоляції

5.3. Перевірка роботи системи моніторингу

На практиці існує кілька методів для перевірки стану електричної ізоляції. Один із найпоширеніших методів — це використання мегомметра, який вимірює опір ізоляції. Ось основні методи перевірки:

Методи перевірки стану електричної ізоляції:

1. Вимірювання опору ізоляції

Це найбільш поширений метод, що дозволяє оцінити опір, який чинить ізоляція проти протікання струму. Опір ізоляції повинен бути достатньо високим, щоб мінімізувати витік струму.

Порядок дій для вимірювання опору ізоляції:

— З'єднайте мегомметр із двома контактами для перевірки.

— Встановіть на мегомметрі відповідний рівень напруги.

— Запишіть показники опору.

Якщо опір нижче норми, це може свідчити про пошкодження ізоляції, і потрібне проведення додаткових тестів для виявлення причини.

2. Вимірювання втрат на ізоляції

Цей метод вимірює кількість енергії, що втрачається в ізоляції, і допомагає виявити пошкодження, підвищену температуру або старіння ізоляції.

Порядок дій для вимірювання втрат на ізоляції:

- З'єднайте мегомметр із двома контактами.
- Встановіть необхідну напругу.
- Запустіть мегомметр на певний час.
- Запишіть значення втрат.

Якщо втрати перевищують допустимі норми, це може свідчити про погіршення стану ізоляції, що потребує додаткової діагностики.

3. Вимірювання струму витоку

Цей метод полягає у вимірюванні струму, що проходить через пошкоджену ізоляцію. Струм витоку може свідчити про наявність дефектів або деградацію ізоляції.

Застосування цих методів дозволяє своєчасно виявити проблеми з електричною ізоляцією та запобігти серйозним аваріям.

Вимірювання струму витоку – це метод перевірки стану електричної ізоляції, який полягає у вимірюванні струму, що проходить через ізоляцію. Струм витоку

може бути викликаний такими факторами, як пошкодження ізоляції, підвищення температури або старіння.

Порядок проведення тесту на струм витоку:

— З’єднайте мегомметр з двома контактами, які підлягають перевірці.

— Встановіть необхідну напругу на мегомметрі.

— Запустіть прилад на визначений період часу.

— Запишіть значення струму витоку.

Якщо струм витоку перевищує допустимі норми, це може свідчити про пошкодження ізоляції. У такому разі слід провести додаткові тести для визначення джерела проблеми.

Частота перевірок

Перевірка ізоляції на струм витоку залежить від умов експлуатації електричної системи. Зазвичай перевірку виконують щорічно, але за особливо важких умов вона може проводитися частіше.

Алгоритм постійного моніторингу

Застосування алгоритму дозволяє проводити безперервний моніторинг, що підвищує ефективність виявлення дефектів. На прикладі алгоритму для моніторингу ізоляції обмотки статора генератора малої потужності можна відслідковувати дефекти, аналізуючи вектори фазних струмів і напруг щодо землі. Це допомагає своєчасно ідентифікувати вид дефекту генератора та запобігти серйозним пошкодженням.

Задамо початкові значення:

$$U_{\text{АЗ}} = -30.7898 - j695.504$$
$$U_{\text{ВЗ}} = 137.3485 + j13343$$
$$U_{\text{СЗ}} = 1205 + \text{j}6192.563$$
$$I_A - 121.1952 - j80.0724$$
$$I_B = 10.8524 + j154.1711$$
$$I_C = 129.1815 - j86.4105$$

Визначаємо кут δ між векторами $3I_0$ та U_{AB}

$$3I_0 = I_A + I_B + I_c$$

$$= (-121.1952 - j80.0724) + (10.8524 + j154.1711) + 129.1815$$

$$- j86.4105 = 18.839 + j12.312$$

$$\delta = \arctan\left(\frac{lmZ}{ReZ}\right)$$

Де $Z = \frac{U_m}{3I_0}$

$$Z = \frac{1205 + j6192.563}{18.839 + j12.312} = 303.439 + j527.024$$

$$ImZ = 527.024$$

$$Rez = 303.439$$

$$\delta = \arctan\left(\frac{527.024}{303.439}\right) = 1.048$$

$$0 < \delta < 120$$

Отже, далі робимо розрахунок дефекту в фазі С

$$U_N = \frac{U_{A3} + U_{B3} + U_{C3}}{3}$$

$$= \frac{(-30.7897 - j695.504) + (137.3485 + j13343) + (12205 + j6129.563)}{3}$$

$$= 4104 - j6280$$

Приймаємо що $Y_{AI} = Y_{BI}$ та $Y_{AI} = Y_{CI}$

$$Y_{BI} = \frac{I_A * (U_{B3} - U_N) - I_B * (U_{A3} - U_N)}{U_{A3} * (U_{B3} - U_N) - U_{B3} * (U_{A3} - U_N)} = 8.003 * 10^{-4} - j1.461 * 10^{-3}$$

$$Y_{DC} = \frac{U_{B3} * (U_{C3} - U_N) * Y_{BI} + I_B * (U_{C3} - U_N) + I_C * (U_{B3} - U_N)}{U_{c3} * (U_{B3} - U_N)} - Y_{CI}$$

$$= 0.011 - j0.021$$

Тепер знаходимо провідності ізоляції та дефекти усіх фаз

$$Y_{AI} = \frac{I_A * (U_{C3} - U_N) - I_C * (U_{A3} - U_N)}{U_{A3} * (U_{C3} - U_N) - U_{C3} * (U_{A3} - U_N)} = -7.999 * 10^{-4} - j1.462 * 10^{-3}$$

$$Y_{CI} = \frac{I_B * (U_{C3} - U_N) - I_C * (U_{D3} - U_N)}{U_{B3} * (U_{C3} - U_N) - U_{C3} * (U_{B3} - U_N)} = -2.403 * 10^{-7} - j7.55 * 10^{-5}$$

$$Y_{DA} = \frac{U_{C3} * (U_{A3} - U_N) * Y_{CI} + I_A * (U_{C3} - U_N) * I_C * (U_{A3} - U_N)}{U_{A3} * (U_{C3} - U_N)} - Y_{AI}$$

$$= 0.014 - j0.027$$

$$Y_{DB} = \frac{U_{A3} * (U_{B3} - U_N) * Y_{AI} + I_A * (U_{B3} - U_N) * I_B * (U_{A3} - U_N)}{U_{B3} * (U_{A3} - U_N)} - Y_{AI}$$

$$= 0.022 - \frac{j1}{524} * 10^{-3}$$

Розрахуємо опір дефектів для кожної фази:

$$\frac{1}{Y_{DA}} = 15.398 - j28.755 \qquad R_A = 15.298$$

$$\frac{1}{Y_{DB}} = 45.865 - j3221 \qquad R_A = 45.865$$

$$\frac{1}{Y_{DC}} = 18.637 - j38.286 \qquad R_A = 18.637$$

Значення активного опору дефекту RRR характеризує діелектричні втрати в дефектній частині ізоляції. Якщо з розрахунків видно, що опір фази А є нижчим, це може вказувати на наявність локальних дефектів ізоляції в цій фазі. Зниження опору свідчить про збільшення струму витоку, що, у свою чергу, призводить до підвищених втрат енергії через пошкоджену ізоляцію. Для підтвердження наявності дефекту слід провести додаткові дослідження, зокрема, вимірювання струмів витоку та опору ізоляції інших фаз.

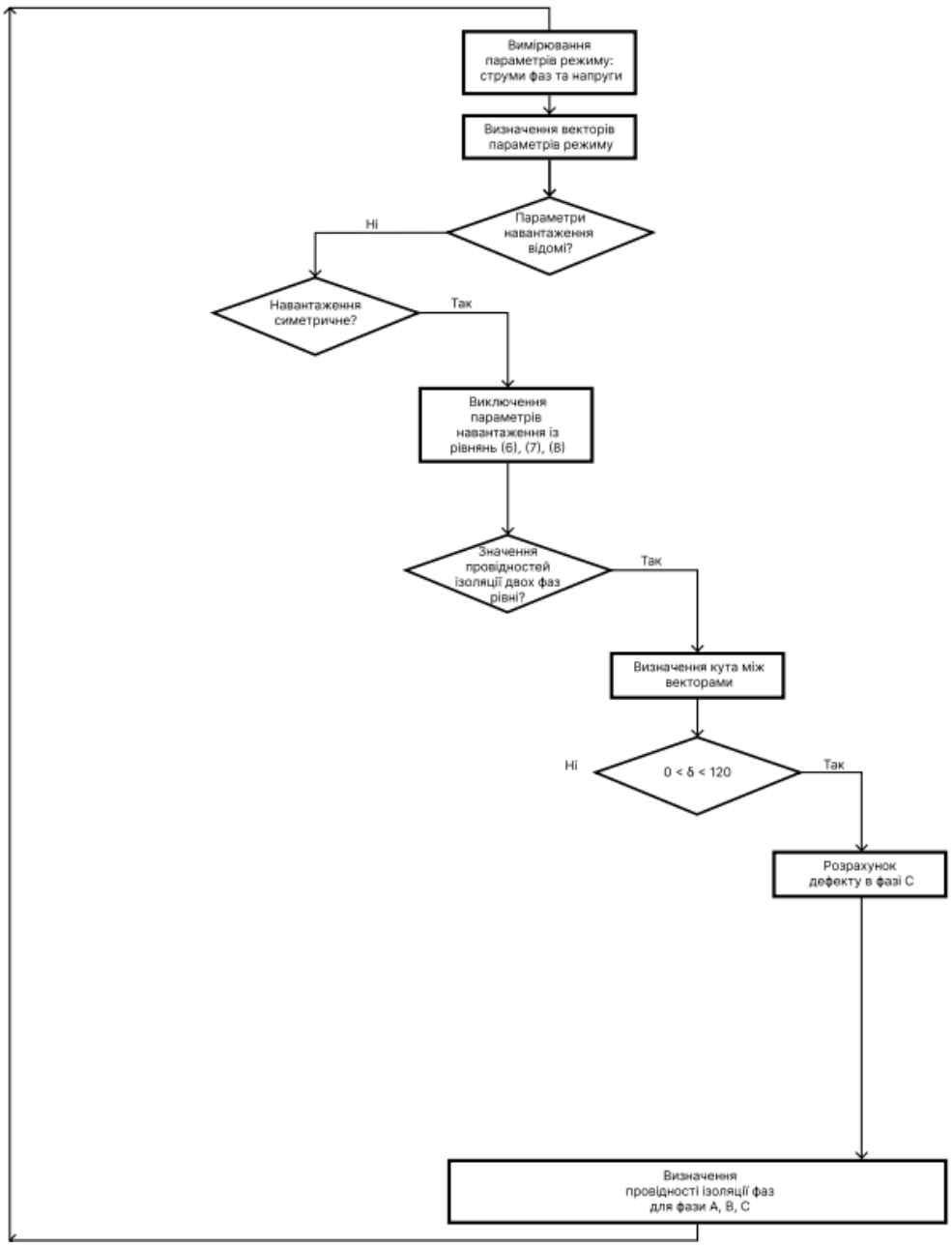

Рисунок 5.5. – Алгоритму роботи у разі пошкодження ізоляції в фазі С на приєднанні з однаковими значеннями провідності ізоляції в фазах А і В і симетричним

РОЗДІЛ 6. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ

Техніко-економічна оцінка системи моніторингу стану ізоляції полягає у визначенні ефективності використання ресурсів для її створення та експлуатації. Основними етапами цього процесу є:

1. Визначення цілей і завдань моніторингу — встановлення цілей, яких необхідно досягти, та аспектів, за якими слід здійснювати спостереження. Правильне формулювання цілей є ключовим, оскільки від цього залежить ефективність системи моніторингу. Цілі зазвичай мають стратегічний характер і можуть включати поліпшення безпеки, зниження витрат або підвищення продуктивності.
2. Вибір методів і засобів моніторингу — це процес відбору способів збору даних та визначення відповідного обладнання. Методи моніторингу включають різні технології збору інформації про стан об'єкта, наприклад, вимірювання температури чи аналіз якості повітря. Вибрані методи повинні відповідати завданням і забезпечувати точні й достовірні дані. Засоби моніторингу — це інструменти та пристрої, що реалізують ці методи, такі як сенсори, камери, або програмне забезпечення. При виборі засобів слід враховувати технічні характеристики об'єкта моніторингу, вимоги до точності та своєчасності даних, а також економічну доцільність. Основна мета — досягти максимальної інформативності та точності даних при врахуванні існуючих технічних і фінансових обмежень.

Розрахунок витрат на створення та функціонування системи моніторингу охоплює витрати на придбання обладнання, монтаж, навчання персоналу, експлуатацію, обслуговування та ремонт. Додаткові витрати можуть включати технічну підтримку, зберігання даних і заходи безпеки. Такий розрахунок дозволяє оцінити загальні фінансові ресурси, необхідні для ефективного впровадження та функціонування системи моніторингу.

Оцінка економічної ефективності системи моніторингу полягає в порівнянні очікуваних результатів її впровадження з витратами на створення та функціонування. Цей процес включає аналіз того, як система може знижувати ризики, підвищувати продуктивність праці та зменшувати витрати. Критерії, такі як мінімізація ризиків, зростання продуктивності й скорочення витрат, слугують основою для оцінки економічних переваг системи моніторингу, що дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо доцільності інвестицій.

Економічна ефективність системи оцінюється через її вплив на діяльність організації. Система моніторингу повинна забезпечувати виявлення потенційних проблем у реальному часі, що допомагає уникати негативних наслідків і знижувати ризики. Крім того, її впровадження може підвищувати ефективність роботи персоналу за рахунок своєчасної реакції на проблеми та оптимізації робочих процесів. Зниження витрат можливе через виявлення й усунення непродуктивних витрат, що сприяє економії ресурсів і зменшенню операційних витрат.

Додатково, система моніторингу повинна покращувати якість надання послуг або виробництва шляхом оперативного виявлення аномалій і відхилень. Можливість швидкого та точного управління на основі даних, отриманих за допомогою системи, є важливим чинником у прийнятті оптимальних рішень. Якщо система сприяє підвищенню якості продукції або обслуговування, це може позитивно вплинути на рівень задоволеності клієнтів.

Оцінка за вказаними критеріями дозволяє визначити доцільність інвестицій у систему моніторингу для досягнення бізнес-цілей та оптимізації діяльності. Вибір методів і засобів моніторингу має ключове значення для забезпечення її ефективності, оскільки впливає на кілька важливих аспектів:

- Точність даних: Застосування точних і відповідних методів моніторингу дозволяє отримувати надійні та корисні дані, що сприяє більш акуратному аналізу й ухваленню оптимальних управлінських рішень.
- Швидкість: Засоби, що забезпечують оперативне отримання інформації, дають змогу вчасно реагувати на зміни або проблеми, що підвищує ефективність управління в реальному часі.

- Вартість: Вибір методів і засобів із відповідним співвідношенням якості та ціни допомагає контролювати витрати на впровадження системи, дозволяючи досягти балансу між ефективністю та економічною доцільністю.
- Автоматизація та інтеграція: Використання засобів, що підтримують автоматизацію й інтеграцію з іншими системами, сприяє спрощенню процесу обробки та передачі даних, знижуючи ризик помилок і підвищуючи загальну продуктивність.
- Масштабованість: Система повинна бути здатна адаптуватися до збільшення обсягів даних або розширення сфери моніторингу без зниження продуктивності, що забезпечує її гнучкість і тривалу ефективність.
- Доступність та зручність використання: Легкий доступ до даних та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс забезпечують ефективне використання системи як операторами, так і керівниками.

Урахування цих факторів при виборі методів та засобів моніторингу дозволяє максимізувати ефективність системи відповідно до потреб бізнесу й наявних ресурсів.

Система моніторингу ґрунтується на мережі датчиків, розташованих на кожній фазі електричного приєднання. Ці датчики вимірюють такі параметри, як струм, напруга та температура, що необхідні для аналізу стану ізоляції. За допомогою сучасних технологій дані передаються до центральної системи моніторингу для подальшого аналізу.

Технічні характеристики. Система моніторингу електричної ізоляції забезпечує високу точність вимірювань із максимальною похибкою ±0,5% (детально розглянуто в пункті 3), що дозволяє з високою достовірністю оцінювати реальний стан ізоляції. Така точність є критичною для виявлення навіть незначних відхилень, які можуть свідчити про потенційні дефекти чи проблеми в електричній мережі.

Система працює з високою швидкістю оновлення даних — щосекундне оновлення дозволяє операторам своєчасно відстежувати зміни та миттєво реагувати

на аномалії. Це важливо для швидкої ідентифікації проблем і їх вирішення до настання серйозних наслідків.

Завдяки передовим бездротовим технологіям, передача даних між датчиками та центральною системою відбувається швидко й ефективно. Це забезпечує гнучкість, зменшує потребу в дротових з'єднаннях і полегшує встановлення та обслуговування системи. Така бездротова інтеграція також сприяє функціонуванню системи в реальному часі, що дозволяє миттєво реагувати на зміни в електромережі.

Потенційні користувачі. Система моніторингу розрахована на енергетичні компанії, промислові підприємства та інші організації, які використовують трифазні електромережі. Вона відповідає вимогам користувачів, що прагнуть забезпечити безпеку та стабільність своїх електричних систем.

Комерційна реалізація. Система буде доступною через канали продажу обладнання. Клієнти зможуть придбати обладнання для моніторингу електричної ізоляції та самостійно інтегрувати його у свої мережі, що дозволить їм повністю контролювати систему й налаштувати її відповідно до власних потреб.

Другий ключовий канал реалізації — це підписка на сервіс моніторингу стану ізоляції. У цьому варіанті користувачі сплачують щомісячну або річну плату за доступ до централізованої системи моніторингу та її технічного обслуговування. Цей підхід підходить для тих, хто прагне використовувати систему без необхідності безпосереднього володіння або управління обладнанням.

Такий двоваріантний підхід забезпечує гнучкість для клієнтів із різними потребами. Ті, хто віддає перевагу самостійному контролю та налаштуванню, можуть придбати обладнання для індивідуального управління. Натомість користувачі, які бажають передати управління та обслуговування системи стороннім фахівцям, можуть обрати варіант підписки. Це дозволяє компанії адаптуватися до вимог різних сегментів ринку, надаючи рішення для обох типів клієнтів.

Потенційний ринок. За даними дослідження компанії MarketsandMarkets, ринок систем моніторингу в енергетичній галузі зросте з 5,23 млрд доларів США у 2022 році до 8,67 млрд доларів США до 2028 року, зі середньорічним темпом

зростання (CAGR) 6,8% у період з 2022 по 2028 рік. Це свідчить про значне розширення ринку, оскільки підприємства все більше усвідомлюють важливість надійності та безпеки своїх електромереж.

З урахуванням цього прогнозованого зростання попиту, система моніторингу стану електричної ізоляції має всі шанси стати популярною серед енергетичних компаній, промислових підприємств та інших організацій. Це відкриває значні можливості для успішного виходу на ринок і закріплення позицій у галузі моніторингу електричних систем.

Оцінка витрат. Першим етапом є витрати на дослідження для розробки системи моніторингу стану електричної ізоляції. Це передбачає аналіз сучасних технологій, розробку концепції, визначення ключових вимог і технічних можливостей. Основною метою цього етапу є забезпечення науково-технічної основи для подальшого проектування.

Другий етап включає витрати на розробку програмного забезпечення, яке буде використовуватися для збору, аналізу та візуалізації даних. Це охоплює створення інтерфейсу користувача, баз даних, алгоритмів для обробки інформації, а також заходи щодо забезпечення кібербезпеки, що є важливим для захисту критичних даних.

Третій етап стосується витрат на закупівлю й налаштування обладнання. Це включає придбання сенсорів, передавачів, серверів та іншого апаратного забезпечення, необхідного для ефективної роботи системи.

Обслуговування та підтримка. Регулярні витрати включають технічне обслуговування та підтримку системи. Це включає оновлення програмного забезпечення для забезпечення його актуальності та безпеки. Також проводяться системні перевірки та діагностика для виявлення можливих несправностей і їх усунення до того, як вони вплинуть на функціонування системи.

Обслуговування включає також перевірку точності сенсорів та заміну несправних компонентів. Технічна підтримка передбачає вирішення питань клієнтів, забезпечуючи безперебійність роботи системи. Додаткові витрати можуть

виникати через впровадження патчів безпеки або зміни в законодавстві, що вимагатимуть адаптації програмного забезпечення.

Оцінка ефективності. Ключовим показником ефективності є зменшення часу виявлення дефектів ізоляції. Система моніторингу дозволяє швидше ідентифікувати та усувати проблеми, що допомагає уникнути аварій і мінімізувати витрати на ремонт, сприяючи підвищенню загальної надійності електричних систем.

Інший ключовий критерій ефективності системи моніторингу – це зниження витрат на ремонтні роботи на 20%. Завдяки постійному контролю та оперативному виявленню дефектів, ремонтні заходи можна здійснювати швидше і з меншою кількістю витратних ресурсів. Це значно оптимізує витрати на обслуговування електричних систем, знижуючи витрати на ремонт та покращуючи їх ефективність.

Поєднання зменшення часу виявлення дефектів і зниження витрат на ремонт робить систему моніторингу критично важливим інструментом для підвищення надійності та безпеки електромереж. Це також сприяє запобіганню простоїв і перебоїв у постачанні електроенергії, що позитивно позначається на стабільності системи.

Порівняння з витратами на впровадження показує, що економічні вигоди від використання системи значно перевищують витрати на її створення та обслуговування. Оперативне виявлення проблем і зменшення витрат на ремонт допомагають уникнути дорогих аварій, покращують надійність та забезпечують безперебійне функціонування електромереж.

Таким чином, впровадження системи моніторингу стане ефективним інвестиційним рішенням, оскільки витрати будуть компенсовані економіями, що виникають внаслідок зростання ефективності та надійності електроенергетичних систем.

Оцінка правових аспектів також відіграє важливу роль у функціонуванні системи. Вона повинна відповідати чинним правовим нормам, особливо щодо захисту персональних даних та дотримання стандартів безпеки. Будь-які

персональні дані, які можуть бути зібрані чи оброблені системою, повинні бути надійно захищені від несанкціонованого доступу або розголошення.

Система моніторингу повинна відповідати встановленим стандартам безпеки для забезпечення конфіденційності та захисту даних. Це включає застосування сучасних технологій шифрування даних, використання протоколів безпеки для захисту від несанкціонованого доступу, а також впровадження інших механізмів для попередження можливих порушень безпеки.

Система має бути гнучкою та адаптуватися до змін у законодавстві. Це забезпечить постійну відповідність правовим вимогам і мінімізує ризики правових проблем у майбутньому. Регулярні перевірки та оновлення повинні проводитися для підтримки актуальності захисту даних і безпеки.

Документація, що підтверджує відповідність системи законодавчим нормам, є важливою для забезпечення прозорості. Вона повинна бути доступною для клієнтів, з чітким поясненням заходів щодо захисту даних і кібербезпеки, що сприятиме довірі з боку користувачів.

РОЗДІЛ 7. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

7.1 Загальні вимоги електробезпеки при прокладанні кабельних ліній

При виконанні магістерської роботи на тему "Прогнозування ресурсу силових кабелів із зшитого поліетилену" необхідно керуватися Правилами улаштування електроустановок (ПУЕ) та Правилами безпечної експлуатації електроустановок. Відповідно до цих правил, до прокладання кабельних ліній висуваються такі вимоги:

1. Монтаж та експлуатація кабельних ліній повинні виключати небезпечні механічні напруження і пошкодження. Для цього кабелі укладаються з запасом по довжині (1-2%) для компенсації можливих зміщень ґрунту та температурних деформацій. Запас кабелю створюється укладанням «змійкою» або провисанням між конструкціями. Заборонено укладати кабель у вигляді кілець.
2. Горизонтальні кабелі, прокладені по конструкціях, стінах, або перекриттях, жорстко закріплюються в кінцевих точках і біля муфт. Одножильні кабелі слід закріплювати немагнітними хомутами з достатньою міцністю для витримування коротких замикань.
3. Вертикальні кабелі мають бути закріплені таким чином, щоб уникнути деформацій оболонок під дією власної ваги.
4. Для неброньованих кабелів необхідно передбачати захист оболонок від механічних пошкоджень і корозії за допомогою еластичних прокладок.
5. Металеві конструкції, що підтримують кабелі на відкритому просторі, повинні бути оцинковані.
6. Захист кабелів від механічних пошкоджень у місцях з підвищеною небезпекою (рух транспорту, доступ сторонніх осіб) має забезпечуватися до висоти 2 м для кабелів до 10 кВ і 3 м – для кабелів до 35 кВ.

7. Прокладання кабелів поблизу інших кабелів вимагає заходів для запобігання пошкодження існуючих ліній. Не дозволяється експлуатація кабелів з пошкодженою ізоляцією.
8. При перетині кабельних ліній використовуються багаторівневі лотки або роздільні перегородки з негорючих матеріалів для захисту від пошкоджень у разі короткого замикання.
9. Кабельні мережі до 35 кВ повинні бути обладнані селективним захистом від однофазного замикання на землю (ОЗЗ). У разі, якщо час роботи кабельної лінії в режимі ОЗЗ перевищує 8 годин, застосовується кабель із підвищеним класом ізоляції.
10. Кабельні споруди повинні бути виготовлені з негорючих матеріалів відповідно до державних стандартів. Тимчасові кабелі прокладаються лише за дозволом експлуатаційної організації з дотриманням усіх вимог.

Ці вимоги сприяють підвищенню надійності та безпеки електроенергетичних систем, забезпечуючи ефективну експлуатацію та збереження ресурсів силових кабелів.

7.2 Захист персоналу при експлуатації та обслуговуванні кабельних ліній

У магістерській роботі досліджено кабель із ізоляцією зі зшитого поліетилену. Під час експлуатації можливе пошкодження ізоляції кабелю. Після ремонту, відповідно до Правил безпечної експлуатації електроустановок (ПБЕЕ), проводять випробування кабелю, яке включає:

- Вимірювання опору ізоляції. Опір ізоляції вимірюють мегаомметром на напругу 2,5 кВ протягом 1 хв до і після випробувань кабелю підвищеною напругою. Згідно з ПБЕЕ, вимірювання опору дозволено виконувати самостійно особою, що має другу групу з електробезпеки.

- Випробування підвищеною напругою. Значення, параметри випробної напруги та тривалість випробувань визначаються відповідно до таблиці 1.8.39 Правил улаштування електроустановок (ПУЕ).
- Випробування кабелів із ізоляцією зі зшитого поліетилену випрямленою напругою може призвести до деградації ізоляції через накопичення об'ємних зарядів у товщі ізоляційного матеріалу та на поверхні напівпровідникових шарів. Тому кабелі зі зшитим поліетиленом випробовують змінною напругою наднизької частоти (0,1 Гц) або напругою промислової частоти, що дорівнює номінальній лінійній напрузі мережі, прикладеній між жилою кабелю та мідним екраном. Для кабелю на 20 кВ, дослідженого у роботі, значення випробної напруги становить 20 кВ при промисловій частоті протягом 5 хвилин або 36 кВ при частоті 0,1 Гц протягом 30 хвилин.

Під час випробувань випрямленою напругою контролюють показання міліамперметра для визначення струму витоку, зокрема на останній хвилині випробування. Якщо струм витоку зростає або виникають імпульси струму, тривалість випробування подовжують удвічі. Однак абсолютне значення струму витоку не є критерієм для бракування кабелю. Результати випробувань змінною напругою наднизької частоти або промисловою частотою вважаються задовільними, якщо не відбулося пробою ізоляції.

При виконанні таких робіт керівник повинен мати четверту групу з електробезпеки. Член бригади, який проводить дослідження, зобов'язаний використовувати індивідуальні засоби захисту: діелектричні боти, рукавички, спеціальний одяг та ізоляційний килимок (згідно з ПБЕЕ).

7.3 Підвищення стійкості роботи об'єктів енергетики АПК під час воєнного стану

Моніторинг стану ізоляції високовольтного обладнання в агропромисловому комплексі під час воєнного стану є важливим компонентом забезпечення

стабільності та безпеки електропостачання. Масовані ракетні удари РФ по енергетичній інфраструктурі України навесні, особливо в жовтні-листопаді 2022 року, виявили слабкі місця централізованої системи енергозабезпечення громад. Особливо критичною виявилася вразливість централізованих систем теплопостачання та електрогенерації. Така тендеція призвела до збільшення кількості навантаження на вцілілі лінії, що в свою чергу зменшило надійність енергопостачання. Це призводить до того, що важливість моніторингу стану вцілілих ліній електропердач суттєво зросла.

Високовольтне обладнання, яке використовується для енергопостачання сільськогосподарських підприємств, піддається значним навантаженням через зростання потреб у надійній та безперебійній роботі. У воєнний час, коли інфраструктурні ризики значно зростають, надійний контроль ізоляційного стану стає вирішальним фактором для забезпечення працездатності обладнання та безпеки виробничих процесів.

По-перше, підвищення ризиків пошкодження інфраструктури обумовлює необхідність посиленого моніторингу для своєчасного виявлення проблем в ізоляції. Відсутність стабільного моніторингу може призвести до пошкодження обладнання, що, в свою чергу, спричинить збої в енергозабезпеченні та значні економічні втрати. Високовольтні лінії передачі електроенергії в агропромисловому секторі часто розташовані на відкритій місцевості, що підвищує ймовірність механічного пошкодження або впливу несприятливих погодних умов, які можуть негативно вплинути на стан ізоляції.

По-друге, своєчасний контроль ізоляції сприяє зменшенню ризиків виникнення коротких замикань та пожеж, що є важливим для забезпечення безпеки персоналу і навколишнього середовища. Умови воєнного часу створюють додаткові виклики для інженерів, які мають працювати в умовах обмеженого доступу до деяких ділянок мережі. Застосування сучасних методів моніторингу, таких як дистанційні датчики та автоматизовані системи контролю, дозволяє вчасно діагностувати відхилення в ізоляції без потреби в частому фізичному огляді.

Крім того, моніторинг стану ізоляції підвищує ефективність експлуатації та обслуговування обладнання. Знання про фактичний стан ізоляції дозволяє оптимізувати планові ремонтні роботи, забезпечуючи їх проведення лише тоді, коли це дійсно необхідно. Такий підхід не лише знижує експлуатаційні витрати, але й продовжує термін служби обладнання, зменшуючи потребу в частій заміні компонентів або їх ремонті, що є критично важливим в умовах обмежених ресурсів.

Моніторинг також сприяє підвищенню загальної надійності енергосистеми агропромислового комплексу, адже дозволяє ефективніше управляти енергетичними потоками і вчасно реагувати на будь-які зміни в параметрах роботи обладнання. В умовах підвищених навантажень на мережі, які виникають під час військових дій, це допомагає уникати системних аварій та підтримувати безперервність процесів на агропідприємствах, де стабільне електропостачання необхідне для збереження продукції та технологічного циклу виробництва.

Загалом, моніторинг ізоляційного стану високовольтного обладнання під час воєнного стану є невід'ємною частиною підтримання функціональності та безпеки електропостачання в агропромисловому секторі. Впровадження сучасних методів контролю та діагностики ізоляції дозволяє забезпечити стійкість інфраструктури, мінімізувати ризики виникнення надзвичайних ситуацій і, як результат, сприяти сталому розвитку аграрного виробництва навіть в умовах кризи.

ВИСНОВКИ

Магістерська робота присвячена аналізу стану та удосконаленню методів діагностики ізоляції енергетичного обладнання агропромислового комплексу (АПК). У роботі систематизовано основні види та особливості ізоляційних матеріалів, визначено вплив дефектів на працездатність обладнання, а також проведено аналіз сучасних методів і пристроїв для моніторингу стану ізоляції. Досліджено полімерні матеріали, зокрема кабелі із зшитого поліетилену, що є перспективними завдяки високим експлуатаційним властивостям.

У дослідженні розглянуто процеси старіння та основні дефекти ізоляції, що виникають під час виробництва і експлуатації кабелів. Запропоновано спрощену модель розрахунку терміну служби ізоляції, що базується на кореляційному зв’язку між характеристиками матеріалу і експлуатаційними умовами. Визначено ефективність методу діагностики стану ізоляції за допомогою вимірювання рівня часткових розрядів, що дозволяє вчасно виявляти дефекти ізоляції.

Розроблена система моніторингу стану ізоляції передбачає алгоритм автоматизованої оцінки, що забезпечує оперативний контроль параметрів кабельних ліній і своєчасне виявлення небезпечних станів. Проведено техніко-економічну оцінку запропонованої системи моніторингу, яка підтвердила доцільність її впровадження з огляду на зниження витрат на експлуатацію та підвищення надійності роботи енергетичного обладнання АПК.

Особливу увагу приділено питанням охорони праці, безпеки в надзвичайних ситуаціях та захисту персоналу, що працює з енергетичним обладнанням. Комплексний підхід до підвищення надійності та безпечності експлуатації обладнання АПК робить результати роботи цінними для практичного використання та подальших наукових досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. А. М. Губіцький, М. С. Наконечний. Методи діагностики стану кабельних ліній з ізоляцією із ршитого поліетилену, 1. Актуальні задачі сучасних технологій: зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 6–7 груд. 2023.)– Тернопіль: ТНТУ, 2023. – С. 249
2. Висящев А.М., Устинов А.А. Визначення місця пошкодження на лініях електропередачі великої протяжності та високої напруги з урахуванням хвильових процесів // Збірник праць VI Міжнародної наукової конференції «Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств». Маріуполь: Вид-во ПДТУ. 2008. С. 319-322.
3. Гавриленко В. Є., Мельничук О. В., Сокол В. В., Методичні вказівки з контролю стану ізоляції електрообладнання. - К.: УкрНДІЕЕ, 2002.
4. Гребченко М.В. Система захисно-діагностуючої автоматики локальних об’єктів електричних систем // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика, випуск 112: Донецьк: ДонНТУ. – 2006. – С. 81- 87.]
5. Гребченко М. В., Кирушок І. І. Розвязання системи рівнянь стану електричної мережі з дефектом ізоляції або з однофазним замиканням на землю. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, 16 листопада 2022 р.,
6. Іванов О. І., Гребенюк О. В., Бунько В. Я. Вимірювання ізоляції електрообладнання. - К.: Техніка, 2000.
7. Електроакустичні методи діагностики електричних установок / В.М. Гаврилюк, В.В. Іванов, А.В. Шульга. - Київ: Техніка, 2008. - 256 с.
8. Математичне моделювання електричних систем / П.М. Кочубей, В.М. Кочубей, В.В. Кочубей. – Київ: Наукова думка, 2018. – 336 с.
9. Методи визначення дефектів ізоляції електричних мереж / В.М. Гаврилюк, В.М. Некрасов, А.В. Шульга, В.В. Іванов. - Київ: Техніка, 2010. - 256с.
10. Сабарно, Л. Р. Дослідження впливу експлуатаційних таметеорологічних факторів

на рівень ушкоджуваності та стан ізоляції розподільних мереж. 2016.

11. Сокол В. В., Гуменко В. В. Аналіз відмов електрообладнання в електроенергетичних системах (Національний університет «Львівська політехніка», 2022).
12. Новоселов С.П., Бєлей Р.С. Аналіз загальних принципів побудови автоматизованих систем тестування стану технологічного обладнання. Вісник харківського національного університету радіоелектроніки, кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматики і мехатроніки, 2020.
13. Хоменко О.В., Карпенко Д.А. Моніторинг стану обладнання електричних мереж електроенергетичних систем. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 5 с.
14. Попадченко С.А., Тоберт М.Ю. Аналіз існуючих методів і технічних засобів організації моніторингу електричної мережі. Харківський національний технічний університет сільського господарства імені П. Василенка, 2018.
15. Camerlingh Onnes H. Expression of the equation of state of gases andliquids by means of series // Comm. Leiden. — 2016. — No 71. — P. 1 – 25.
16. Mayer J.E. The statistical mechanics of condensed systems// J.Chem. Phys. – 1937. – V.5. – No.1. – P. 67-74.
17. Neher J.H., McGrath M.H. The calculation of the temperature rise andload capability of cable systems // AIEE Transactions – Power Apparatus and System. Part III. 2012. V. 76. P. 752–772.
18. George J. Anders. Rating of Electric Power Cables: Ampacity Computations for Transmission, Distribution, and Industrial Applications// IEEE Press power engineering series. –2000 P. 428.
19. Lyall J.S., Nourbakhsh G., Zhao H.C., Underground power cableenvironment on line monitoring and analysis // Proceedings of Power Engineering Society Summer Meeting. – Washington. 2000. P. 457–462.
20. Izadi M., Razavi F. Energy Loss Reduction in a 20-kV DistributionNetwork Considering Available Budget //Journal of Applied Science and Engineering. – 2017. – Т. 20. – №. 1. – С. 21-30