

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет електроенергетики та електромеханіки

(повне найменування факультету)

Кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного

(повна назва кафедри)

менеджменту

Магістерська кваліфікаційна робота на тему:

« ВИЗНАЧЕННЯ РОБОТОЗДАТНОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ
НАПРУГОЮ 6-35 кВ. »

Виконав: студент 2-го курсу, групи ЕСЕ-22м

спеціальності 141 – Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

Залізницький С.М.

(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доц. каф. ЕСЕЕМ

Кутіна М. В.,

(прізвище та ініціали)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ЕСЕЕМ

проф. Бурбело М.Й.

(прізвище та ініціали)

« 8 » 12 2023 р.

« _____ » _____ 2023 р.

Рецензент доцент каф. ЕСС

Непрядький В.В.

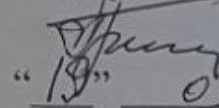
(прізвище та ініціали)

« _____ » _____ 2023 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет Електроенергетики та електромеханіки
Кафедра Електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту
Освітньо-кваліфікаційний рівень _____ магістр
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
ОП «Електротехнічні системи електроспоживання»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕСЕЕМ

 проф. М. Й. Бурбело
“ 19 ” 09 2023 року

З А В Д А Н Н Я НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Залізницькому Серафиму Михайловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Визначення роботоздатності ізоляції розподільних мереж напругою 6-35 кВ

керівник роботи к.т.н., доцент кафедри ЕСЕЕМ ВНТУ Кутіна М. В.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ 18 ” 09 2023 року № 247

2. Термін подання студентом роботи “ 4 ” 12 2023 року

3. Вихідні дані до роботи Відомості відносно конструктивного виконання та особливостей режимів роботи розподільних електричних мереж напругою 6-35 кВ. Причини виникнення змін технічного стану ізоляції елементів розподільних мереж напругою 6-35 кВ. Методи контролю стану ізоляції розподільних мереж напругою 6-35 кВ.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Загальна характеристика об'єкту дослідження. 2. Теоретичне обґрунтування методу визначення роботоздатності ізоляції розподільних мереж. 3. Реалізація методів контролю роботоздатності ізоляції розподільних мереж. 4.

5. Перелік ілюстративного матеріалу:

Матеріал необхідний для висвітлення сутності проведених досліджень та впровадження розроблених методик.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Кутіна М.В., к.т.н., доц., каф. ЕСЕМ		
Економічна частина	Шулє Ю.А., к.т.н., доц., каф. ЕСЕМ		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Кобилянський О.В., д.п.н., професор		

7. Дата видачі завдання 16.09.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Підпис
1	Загальна характеристика технічного стану ізоляції розподільних мереж	18.09.2023 р. 29.09.2023 р.	
2	Вдосконалення методу визначення роботоздатності ізоляції розподільних мереж	02.10.2023 р. 20.10.2023 р.	
3	Розробка методів контролю роботоздатності ізоляції розподільних мереж	23.10.2023 р. 03.11.2023 р.	
4	Економічна частина	06.11.2023 р. 17.11.2023 р.	
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	20.11.2023 р. 27.11.2023 р.	
6	Графічна частина	28.11.2023 р. 04.12.2023 р.	

Студент Заліницький
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи Кутіна
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Войтович
 (підпис) (прізвище та ініціали)

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
(повне найменування вищого навчального закладу)
Факультет електроенергетики та електромеханіки
(повне найменування факультету)
Кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного
(повна назва кафедри)
менеджменту

Магістерська кваліфікаційна робота на тему:

« ВИЗНАЧЕННЯ РОБОТОЗДАТНОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ
НАПРУГОЮ 6-35 кВ. »

Виконав: студент 2-го курсу, групи ЕСЕ-22м

спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

Залізницький С.М.

(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доц. каф. ЕСЕЕМ

Кутіна М. В.

(прізвище та ініціали)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ЕСЕЕМ

проф. Бурбело М.Й.

(прізвище та ініціали)

« ____ » _____ 2023 р.

« ____ » _____ 2023 р.

Рецензент _____

(прізвище та ініціали)

« ____ » _____ 2023 р.

Вінниця ВНТУ – 2023 року

Вінницький національний технічний університет

Факультет Електроенергетики та електромеханіки

Кафедра Електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ОП «Електротехнічні системи електроспоживання»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕСЕЕМ

проф. М. Й. Бурбело

“ ___ ” _____ 2023 року

**З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Залізницькому Серафиму Михайловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Визначення роботоздатності ізоляції розподільних мереж напругою 6-35 кВ

керівник роботи к.т.н., доцент кафедри ЕСЕЕМ ВНТУ Кутіна М. В.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ 18 ” 09 2023 року № 247

2. Термін подання студентом роботи “ 4 ” 12 2023 року

3. Вихідні дані до роботи Відомості відносно конструктивного виконання та особливостей режимів роботи розподільних електричних мереж напругою 6-35 кВ. Причини виникнення змін технічного стану ізоляції елементів розподільних мереж напругою 6-35 кВ. Методи контролю стану ізоляції розподільних мереж напругою 6-35 кВ.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Загальна характеристика об'єкту дослідження. 2. Теоретичне обґрунтування методу визначення роботоздатності ізоляції розподільних мереж. 3. Реалізація методів контролю роботоздатності ізоляції розподільних мереж. 4.

Розрахунок економічної ефективності ДККПІ РМ 5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу:

Матеріал необхідний для висвітлення сутності проведених досліджень та впровадження розроблених методик.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Кутіна М.В., к.т.н., доц., каф. ЕСЕМ		
Економічна частина	Шулє Ю.А., к.т.н., доц., каф. ЕСЕМ		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Кобилянський О.В., д.п.н., професор		

7. Дата видачі завдання 16.09.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Загальна характеристика технічного стану ізоляції розподільних мереж	18.09.2023 р. 29.09.2023 р.	
2	Вдосконалення методу визначення роботоздатності ізоляції розподільних мереж	02.10.2023 р. 20.10.2023 р.	
3	Розробка методів контролю роботоздатності ізоляції розподільних мереж	23.10.2023 р. 03.11.2023 р.	
4	Економічна частина	06.11.2023 р. 17.11.2023 р.	
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	20.11.2023 р. 27.11.2023 р.	
6	Графічна частина	28.11.2023 р. 04.12.2023 р.	

Студент _____ Залізницький . С. М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Кутіна М. В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль _____ Войтюк Ю. П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Залізницький С.М. Визначення роботоздатності ізоляції розподільних мереж напругою 6-35 кВ. Магістерська кваліфікаційна робота. 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. ФЕЕЕМ. Кафедра ЕСЕЕМ. – Вінниця: ВНТУ, 2023.

Запропоновано метод визначення параметрів ізоляції фази мережі відносно землі шляхом неперервного контролю загального активного опору ізоляції і напруг фаз відносно землі при накладанні на мережу сигналу постійного струму і обробки результатів з допомогою спеціальної математичної моделі, яка подається у вигляді системи рівнянь, що відображають залежність параметрів ізоляції від контрольованих показників.

Вдосконалення методу визначення роботоздатності ізоляції розподільних мереж. Було проведено розробка методів контролю роботоздатності ізоляції розподільних мереж та розраховано основні техніко економічні показники.

Виконано охорону праці та безпека в надзвичайних ситуаціях із виконанням завдання з цивільного захисту.

Ключові слова: ізоляція, розподільні мережі, випробування, роботоздатність.

Рисунків: 38 Таблиць: 11 Бібліографій: 48

ANNOTATION

Zaliznytskyi S.M. Determining the efficiency of insulation of distribution networks with a voltage of 6-35 kV. Master's qualification work. 141 – Electropoenegetics, electrotechnics and electromechanics. FEEEM. ECEEM Department. – Vinnytsia: VNTU, 2023.

A method of determining the insulation parameters of the network phase relative to the ground by continuous control of the total active resistance of the insulation and phase voltages relative to the ground when applying a direct current signal to the network and processing the results using a special mathematical model, which is presented in the form of a system of equations reflecting the dependence of the insulation parameters on controlled indicators.

Improvement of the method of determining the efficiency of isolation of distribution networks. The methods of monitoring the efficiency of isolation of distribution networks were developed and the main technical and economic indicators were calculated.

Labor protection and safety in emergency situations with the implementation of the civil protection task were carried out.

Key words: isolation, distribution networks, tests, performance.

Pictures: 38 Tables: 11 Bibliography: 48

ЗМІСТ

ВСТУП.....	11
1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ	13
1.1 Визначення роботоздатності ізоляції розподільних мереж.....	13
1.2 Причини виникнення пошкоджень ізоляції розподільних мереж.....	20
1.3 Причини виникнення змін технічного стану ізоляції елементів розподільних мереж.....	22
1.4 Аналіз впливу нейтрального режиму роботи на технічні умови ізоляції розподільної мережі.....	25
1.5 Існуючі методи контролю стану ізоляції розподільних мереж.....	30
1.6 Визначення роботоздатності ізоляції розподільних мереж.....	34
1.7 Основні проблемами визначення роботоздатності ізоляції розподільних мереж.....	36
1.8 Висновок.....	42
2 ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ РОБОТОЗДАТНОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ.....	48
2.1 Аналіз методів визначення роботоздатності ізоляції.....	48
2.2 Визначення комплексу показників стану технічної ізоляції розподільчої мережі.....	51
2.3 Розробка діагностичної моделі для визначення умов роботоздатності ізоляції.....	55
2.4 Інформативність обраної сукупності показників роботоздатності ізоляції.....	61
2.5 Вибір області зміни значень діагностичних показників при перевірці ефективності запропонованого методу.....	67
2.6 Рівнозначність моделі для визначення умов роботоздатності.....	70
2.7 Висновок.....	72

3 РОЗРОБКА МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ РОБОТОЗДАТНОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ.....	74
3.1 Моделювання пошкоджень ізоляції та процесів експлуатації мережі і визначення вимог до методів контролю ізоляції.....	74
3.2 Розробка методу безперервного моніторингу ізоляції.....	79
3.3 Розроблення методу регулярного моніторингу параметрів фазної ізоляції в розподільчих мережах.....	83
3.4 Висновок.....	87
4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	88
5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	96
5.1 Технічні рішення щодо безпечної експлуатації об'єкта.....	97
5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	99
5.3 Психофізіологічні фактори.....	103
5.4 Завдання з цивільного захисту.....	104
ВИСНОВКИ.....	106
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	109
ДОДАТКИ.....	114

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

БНКІ – блок неперервного контролю ізоляції

ВАФ – вольт-ампер-фазометр

ВАХ – вольт-амперна характеристика

ДК – діагностичний комплекс

ДГР – дугогасний реактор

ДККПІ – діагностичний комплекс контролю роботоздатності ізоляції

НП ДККПІ – підсистема неперервного контролю роботоздатності ізоляції

ПП ДККПІ – підсистема періодичного контролю роботоздатності ізоляції

ЕК – енергопостачальна компанія

КЗ – коротке замикання

ПЛЕП – повітряна лінія електропередач

КЛЕП – кабельна лінія електропередач

ППП – пакет прикладних програм

ОД – об'єкт діагностування

ОЗЗ – однофазне замикання на землю

РЗ – релейний захист

РМ – розподільна мережа

СТОР – система технічного обслуговування і ремонту

ТН – трансформатор напруги

ТС – технічний стан

ВСТУП

Актуальність проблеми. Найпоширенішим пошкодженням в розподільчих мережах є замикання на землю, на які припадає близько 80% всіх пошкоджень. Замикання на землю призводять до ризику ураження людей електричним струмом, значного зниження якості та надійності електропостачання та значних втрат надлишкової технічної електроенергії.

Пошкодження виникають під час експлуатації розподільчих мереж (РМ). Певна кількість є досить стабільною характеристикою, наприклад, середній показник за 2021/2022 роки для повітряних ліній електропередачі (ПЛ) 6-10 кВ в ПАТ "АК Вінницяобленерго" становить 0,19 пошкоджень на км на рік.

Основною причиною замикань на землю є утворення шунтуючого зв'язку між струмоведучою частиною РП та землею; моніторинг провідності ізоляції кожної фази РП відносно землі надає найбільш повну інформацію для виявлення пошкоджень ізоляції окремих елементів на ранніх стадіях розвитку пошкодження за допомогою неруйнівних методів. Слід зазначити, що не існує критеріїв, які б обмежували зміни параметрів ізоляції.

Методи моніторингу ізоляції, що базуються на вимірюванні струмів і напруг нульової послідовності та напруг зсуву нейтралі, через свою низьку чутливість не можуть виявити пошкодження ізоляції на землю на ранніх стадіях їх розвитку.

Тому необхідно розробити та впровадити в РМ вдосконалені методи для визначення стану ізоляційних характеристик під час експлуатації та діагностики технічного стану ізоляції.

Мета і завдання дослідження. Підвищення надійності РМ шляхом врахування параметрів електробезпеки та струмів витоку під час експлуатації.

Відповідно до поставлених цілей вирішуються наступні завдання: аналіз об'єкта дослідження (характер пошкоджень, причини пошкоджень); аналіз існуючих методів та заходів щодо підвищення достовірності моніторингу

ізоляції; дослідження діагностичних моделей для визначення умов працездатності ізоляції РМ; розробка методики розрахунку економічної ефективності використання діагностичних комплексів для моніторингу працездатності ізоляції ПЛ відносно ґрунту;

Об'єктом дослідження є процес зміни технічного стану елементів РМ.

Предметом дослідження є діагностична модель стану працездатності ізоляції РМ.

Методи дослідження. Використано теоретичні та експериментальні методи, зокрема аналіз нормальних, аномальних та аварійних режимів роботи РМ. Фізичне моделювання та емпіричні методи використовувалися для верифікації математичної моделі.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в розробці методу визначення умов працездатності ізоляції з урахуванням параметрів безпеки та струмів витоку в процесі експлуатації розподільчої мережі, що дозволяє підвищити рівень надійності електричної мережі.

Метод безперервного моніторингу ізоляції на основі вимірювання мінімальної фазної напруги може отримати подальший розвиток для підвищення достовірності моніторингу РМ.

Практичне значення отриманих результатів. Уніфіковано діагностичний пристрій для моніторингу стану ізоляції, що дозволяє підвищити надійність та безпеку ліній електропередачі 6-35 кВ.

Апробація результатів роботи. Основні теоретичні положення й найвагоміші практичні результати виконаного дослідження було обговорено на науково-технічній конференції підрозділів ВНТУ у 2023р.

За результатами дослідження опубліковано тези доповідей [1].

1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ

1.1 Визначення роботоздатності ізоляції розподільних мереж

Роботоздатність ізоляції розподільних мереж - це здатність ізоляції виконувати свої функції, тобто запобігати витоку струму з фази в землю. Роботоздатність ізоляції залежить від багатьох факторів, таких як: якість матеріалів ізоляції; вікова деградація ізоляції; наявність пошкоджень ізоляції; вплив зовнішніх факторів, таких як атмосферні впливи, перевантаження мережі та механічні пошкодження [2].

Ізоляція розподільних мереж може бути пошкоджена внаслідок: механічних пошкоджень, таких як удари, падіння предметів; хімічних впливів, таких як корозія, окиснення; термічних впливів, таких як перегрів, пожежа; пошкодження ізоляції може призвести до короткого замикання, що може викликати пожежу, вибух або навіть смерть людей.

Планові та позапланові перевірки проводяться для забезпечення працездатності роз'єднання розподільної мережі.

Планові перевірки проводяться відповідно до встановлених стандартів, а позапланові перевірки проводяться при підозрі на пошкодження або пошкодження ізоляції.

Для перевірки роботоздатності ізоляції використовуються такі методи, як: вимірювання опору ізоляції, вимірювання пробивної напруги та візуальний огляд.

Вимірювання опору ізоляції проводиться для визначення загального стану ізоляції. Вимірювання пробивної напруги проводиться для визначення якості ізоляції. Візуальний огляд проводиться для виявлення видимих пошкоджень ізоляції.

Ізоляцію електроустановок можна розділити на зовнішню і внутрішню.

Зовнішня ізоляція включає повітряні проміжки (наприклад, між провідниками в лініях електропередач, між провідниками та опорами) і частини ізоляційної конструкції, що контактують з повітрям. Внутрішня ізоляція знаходиться всередині корпусів трансформаторів, електрообладнання та оболонки кабелів. Складається внутрішня ізоляція з комбінації газоподібних, твердого і рідкого діелектриків [2].



Рисунок 1.1 - Структура броньованого кабелю ААБл (6, 10 кВ):

1 – жила струмопровідна; 2 – паперова ізоляція жил; 3 – ізоляція поясна; 4 – внутрішня оболонка (алюмінієва); 5 – підкладка під броню; 6 – броня, що складається з двох сталевих стрічок; 7 – зовнішня захисна оболонка

Для забезпечення роботоздатності ізоляції розподільних мереж необхідно проводити такі заходи: використовувати якісні матеріали для ізоляції, виконувати планові та позапланові перевірки ізоляції та вживати заходів для захисту ізоляції від зовнішніх факторів.

Контроль ізоляції - це сукупність заходів, спрямованих на забезпечення роботоздатності ізоляції розподільних мереж.

Контроль ізоляції включає в себе: планові та позапланові перевірки ізоляції; використання якісних матеріалів для ізоляції; вживання заходів для захисту ізоляції від зовнішніх факторів; планові та позапланові перевірки ізоляції [3].

Планові перевірки ізоляції проводяться відповідно до встановлених нормативів. Регулярні перевірки зазвичай проводяться три рази на один рік. Позапланові перевірки проводяться у разі виявлення пошкоджень або підозри на пошкодження ізоляції.



Рисунок 1.2 - Міжфазне коротке замикання в з'єднувальній муфті

Для забезпечення високої якості ізоляції необхідно використовувати якісні матеріали. Якісні матеріали мають високу міцність, стійкість до хімічних впливів і високу пробивну напругу.

Ізоляція розподільних мереж може бути пошкоджена під впливом зовнішніх факторів, таких як атмосферні впливи, перевантаження мережі та механічні пошкодження. Для захисту ізоляції від зовнішніх факторів необхідно вжити таких заходів: захищати ізоляцію від атмосферних впливів, таких як дощ, сніг, сонце; захищати ізоляцію від перевантаження мережі, наприклад, шляхом використання захисних пристроїв; захищати ізоляцію від механічних пошкоджень, наприклад, шляхом використання міцних опор і проводів [4].

Ізоляція є одним з найважливіших елементів розподільних мереж. Вона забезпечує електробезпеку людей і обладнання, а також економію електроенергії.

Роботоздатність ізоляції розподільних мереж визначається її здатністю виконувати свої функції в заданих умовах експлуатації. Ці умови включають в себе рівень напруги, експлуатаційні умови, вплив навколишнього середовища та ін [23][24].

Пошкодження ізоляції може призвести до аварійних ситуацій, таких як коротке замикання, пошкодження обладнання та навіть травми людей. Тому важливо своєчасно виявляти і усувати пошкодження ізоляції.

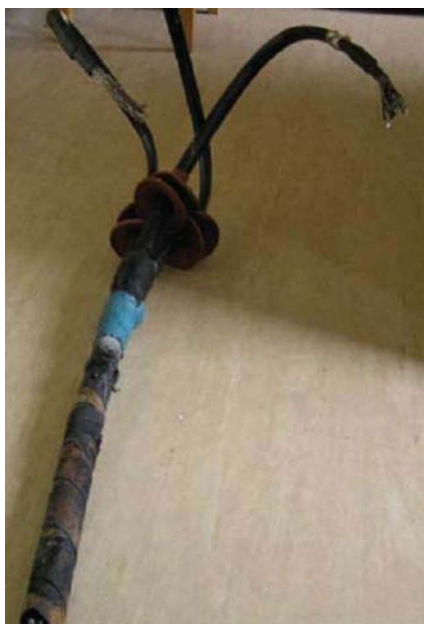


Рисунок 1.3 - Пошкоджений кабель напругою 6 кВ

Основними причинами пошкодження ізоляції розподільних мереж є: механічні пошкодження: пошкодження ізоляції під час монтажу, ремонту або експлуатації обладнання; електричні перенапруги: перенапруги, викликані грозовими розрядами, замиканнями на землю, комутаційними процесами та ін.; хімічні впливи: вплив агресивних середовищ, таких як волога, хімічні речовини та ін [4].

Причина	Частка, %
Механічні пошкодження	40-50
Електричні перенапруги	30-40
Хімічні впливи	20-30

Найбільш поширеною причиною пошкодження ізоляції розподільних мереж є механічні пошкодження. Це пояснюється тим, що ізоляція часто піддається механічним впливам під час монтажу, ремонту або експлуатації обладнання.

Електричні перенапруги є другою за поширеністю причиною пошкодження ізоляції. Перенапруги можуть бути викликані грозовими розрядами, замиканнями на землю, комутаційними процесами та ін.

Хімічні впливи є менш поширеною причиною пошкодження ізоляції, але вони можуть бути дуже серйозними. Хімічні впливи можуть бути викликані вологою, хімічними речовинами та ін.

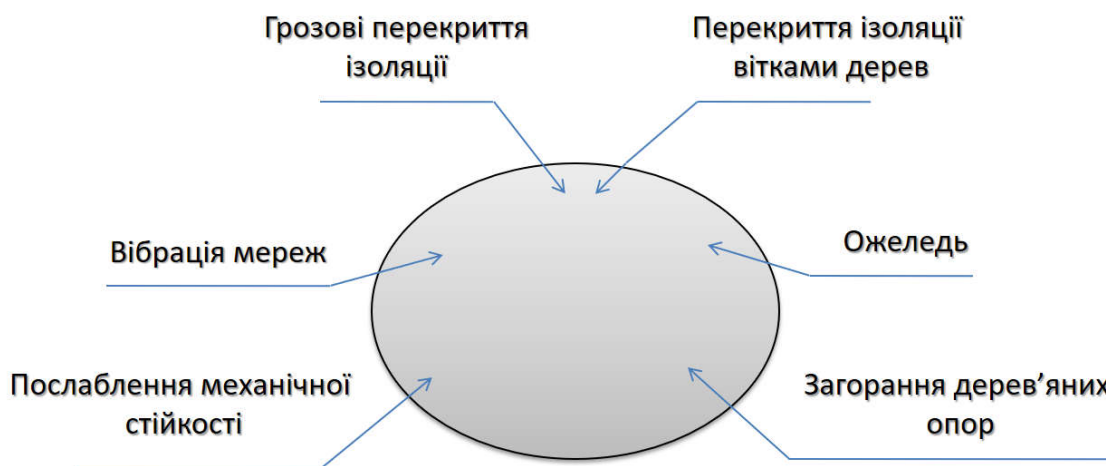


Рисунок 1.4 – Фактори, які впливають на зміну технічного стану ізолятора

Для підвищення надійності ізоляції розподільних мереж необхідно вжити заходів щодо попередження всіх трьох основних причин пошкодження ізоляції.

Для визначення роботоздатності ізоляції розподільних мереж використовуються наступні критерії: критерій електробезпеки: опір ізоляції повинен бути достатнім для забезпечення електробезпеки людей і обладнання; критерій мінімуму втрат електроенергії: опір ізоляції повинен бути мінімальним для забезпечення мінімуму втрат електроенергії від струмів стікання на землю.

Опір ізоляції - це відношення напруги, прикладеної до діелектрика, до струму через діелектрик (струму витоку).

Важливою характеристикою стану ізоляції електрообладнання - опір ізоляції. З цієї причини опір ізоляції завжди вимірюється під час перевірок ізоляції.

Якщо опір ізоляції падає нижче зазначеного значення, може виникнути пожежа або електричний збій.

Стан електричної ізоляції безпосередньо впливає на втрати струму, пов'язані з можливими витокami з електричної системи через погано ізольовані ділянки, безпеку для здоров'я людей і можливість тривалої безперебійної експлуатації. Щоб уникнути подібних проблем, необхідно суворо дотримуватися правил, що регламентують проектування та експлуатацію електричної мережі.

Вимірювання опору ізоляції за допомогою спеціальних методів і обладнання повинні регулярно проводитися на всіх лініях і мережах, оскільки це єдиний спосіб заздалегідь визначити ступінь зносу ізоляції і якість ізоляції [1].

Стан ізоляції вважається задовільним, якщо опір ізоляції кожного ланцюга, до якого підключено приймальне обладнання, вище відповідного еталонного значення.

Опір ізоляції визначається за допомогою спеціальних приладів, таких як мегомметр.



Рисунок 1.5 - ЦС0202-2 цифровий мегомметр



Рисунок 1.6 - Е6-24 та Е6-24/1 цифровий мегомметр

Таблиця 1.1 – Порівняння параметрів

Назва параметру	ЦС0202-2	Е6-24	Е6-24/1
Діапазон вимірювань	100 000 МОм	до 10 000 МОм	до 1 000 МОм
Базові відхилення	2%	3%±2е.м.р.	3%±2е.м.р.
Вимірювання напруги на об'єкті	1-500 В	1-400 В	1-400 В
Визначення коефіцієнту абсорбції	присутня	присутня	присутня
Визначення індексу поляризації	присутня	відсутня	відсутня
Пам'ять	10 останніх вимірювань	1 останнє вимірювання	1 останнє вимірювання
Індикація опору за 15 і 60 сек	присутня	присутня	присутня
Робочий діапазон температур	від -30 до +50 °С	від -30 до +50 °С	від -30 до +50 °С
Індикація	Цифрова з діалоговим режимом	Цифрова	Цифрова
Живлення	Акумулятор, мережа 220 В/50Гц	Акумулятор, мережа 220 В/50Гц	Акумулятор, мережа 220 В/50Гц
Габарити	221x157x62 мм	81x121x251 мм	81x121x251 мм
Вага, кг	0,958	1,186	1,169
Робоче положення	Будь-яке	Будь-яке	Будь-яке

Продовження Таблиці 1.1			
Середній термін експлуатації	Десять років	Десять років	Десять років
Міжповірочний інтервал	Один рік	Один рік	Один рік

Контроль ізоляції розподільних мереж проводиться з метою виявлення пошкоджень ізоляції на ранніх стадіях їх розвитку.

Контроль ізоляції проводиться наступними способами: візуальний контроль: огляд ізоляції на наявність механічних пошкоджень; механічний контроль: вимірювання величини пробою ізоляції; електричний контроль: вимірювання опору ізоляції [5].

Для підвищення надійності ізоляції розподільних мереж необхідно: вживати заходів щодо попередження механічних пошкоджень ізоляції; забезпечувати захист від електричних перенапруг; використовувати матеріали ізоляції, стійкі до хімічних впливів; регулярно проводити контроль ізоляції.

1.2 Причини виникнення пошкоджень ізоляції розподільних мереж

Ізоляція розподільчої мережі може бути пошкоджена різними зовнішніми та внутрішніми факторами.

Зовнішні фактори, які можуть призвести до пошкодження ізоляції, включають в себе: атмосферні впливи, такі як дощ, сніг, град, сонце; механічні пошкодження, такі як удари, падіння предметів; хімічні впливи, такі як корозія, окиснення.

Фактори	Опис	Рівень впливу, %
Атмосферні впливи	Дощ, сніг, град, сонце, тощо.	20-30
Механічні пошкодження	Удари, падіння предметів, тощо.	40-50
Хімічні впливи	Корозія, окиснення, тощо.	10-20

Найбільш поширеним зовнішнім фактором, який може призвести до пошкодження ізоляції, є атмосферні впливи. Це пояснюється тим, що ізоляція часто піддається впливу атмосферних факторів, таких як дощ, сніг, град, сонце, тощо.

Механічні пошкодження є другою за поширеністю причиною пошкодження ізоляції. Механічні пошкодження можуть бути викликані ударами, падінням предметів, тощо.

Хімічні впливи є менш поширеною причиною пошкодження ізоляції, але вони можуть бути дуже серйозними. Хімічні впливи можуть бути викликані корозією, окисненням, тощо.

Для підвищення надійності ізоляції розподільних мереж необхідно вжити заходів щодо захисту ізоляції від всіх трьох основних зовнішніх факторів.

Внутрішні фактори, які можуть призвести до пошкодження ізоляції, включають в себе: термічні впливи, такі як перегрів, пожежа; старіння ізоляції, яке відбувається з часом; дефекти виготовлення ізоляції.

Найчастішими причинами пошкодження ізоляції розподільних мереж є: механічні пошкодження, які можуть бути викликані ударами, падінням предметів; атмосферні впливи, такі як дощ, сніг, град, сонце; старіння ізоляції, яке відбувається з часом.

Найнебезпечнішими причинами пошкодження ізоляції розподільних мереж є: коротке замикання, яке може призвести до пожежі, вибуху або навіть загибелі людей; відключення електропостачання, яке може спричинити перебої в роботі підприємств і установ, а також незручності для населення.

Для запобігання пошкодженню ізоляції розподільних мереж необхідно проводити такі заходи: використання якісних матеріалів для ізоляції; захист ізоляції від зовнішніх факторів; проведення планових і позапланових перевірок ізоляції [6].

1.3 Причини виникнення змін технічного стану ізоляції елементів розподільних мереж

Ізоляція елементів розподільчої мережі може змінюватися під впливом різних зовнішніх і внутрішніх факторів.

Зовнішні фактори, які можуть призвести до зміни технічного стану ізоляції, включають в себе: атмосферні впливи, такі як дощ, сніг, град, сонце; механічні пошкодження, такі як удари, падіння предметів; хімічні впливи, такі як корозія, окиснення, тощо.

Внутрішні фактори, які можуть призвести до зміни технічного стану ізоляції, включають в себе: термічні впливи, такі як перегрів, пожежа; старіння ізоляції, яке відбувається з часом; дефекти виготовлення ізоляції.

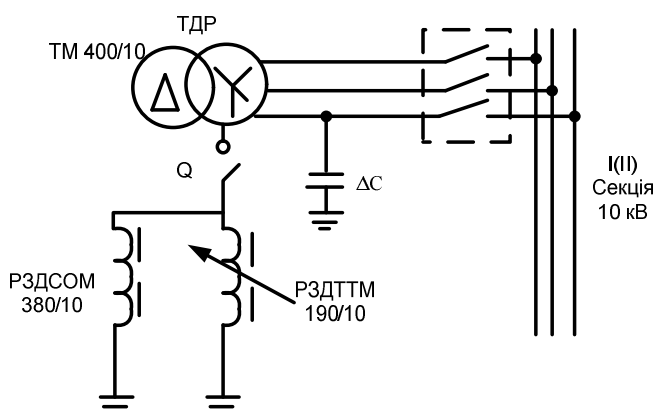


Рисунок 1.7 – Паралельна схема підключення поршня з каскадом мережі 10 кВ дугогасительного реактора.

Найчастішими причинами зміни технічного стану ізоляції розподільних мереж є: старіння ізоляції, яке відбувається з часом; термічні впливи, такі як перегрів, пожежа; атмосферні впливи, такі як дощ, сніг, град, сонце, тощо.

Найнебезпечнішими причинами зміни технічного стану ізоляції розподільних мереж є: коротке замикання може призвести до пожежі, вибуху або навіть смерті та відключення електропостачання, яке може спричинити перебої в роботі підприємств і установ, а також незручності для населення [6].

Для запобігання зміни технічного стану ізоляції розподільних мереж необхідно проводити такі заходи: використання якісних матеріалів для ізоляції; захист ізоляції від зовнішніх факторів; проведення планових і позапланових перевірок ізоляції.

Таблиця 1.2 - Аналіз існуючих методів контролю інформації

Методи контролю	Функціональний	Тестовий	Комбінований
Періодичність контролю	Неперервний	Періодичний	Неперервний та періодичний
Види сигналів, що використовуються	Вимірювання робочих сигналів	Накладання зовнішніх джерел енергії, введення додаткової провідності	Вимірювання робочих сигналів. Дублювання експерименту шляхом накладання сигналів сторонніх джерел живлення

Продовження таблиці 1.2			
Контрольовані величини	$U_A, U_B, U_C, U_{AB}, U_0$	$U_{xx}, I_{к.з.}$, введення додаткових провідностей та вимірювання струму провідності і фазних напруг; накладання постійного та змінного <i>сигналу</i> $f < 50$ Гц	U_A, U_B, U_C, U_0 та струму через додаткову провідність, або сигналу постійного чи змінного струму $f < 50$ Гц зовнішнього джерела живлення
Недоліки	Складність розрахунку за результатами вимірювання величин	Похибки через неспівпадаючі в часі вимірювання	Складність реалізації засобів проведення експерименту

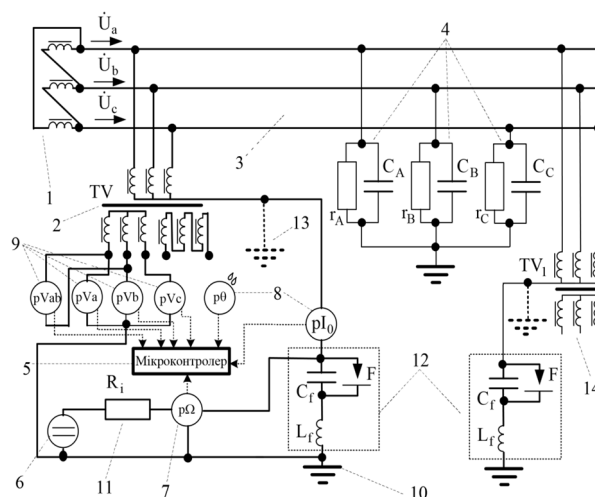


Рисунок 1.8 - Структурна схема пристрою для технічної реалізації методу контролю ізоляції на основі вимірювання загального активного опору ізоляції і напруг фаз мережі відносно землі (метод неперервного контролю ізоляції)

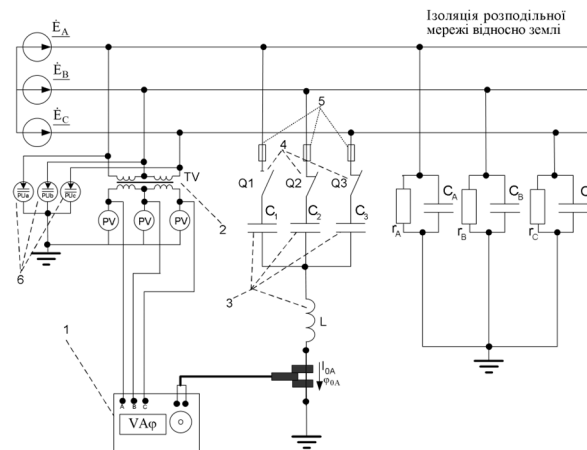


Рисунок 1.9 - Принципова схема пристрою контролю ізоляції окремих фаз відносно землі (метод періодичного контролю)

1.4 Аналіз впливу нейтрального режиму роботи на технічні умови ізоляції розподільної мережі.

Режим роботи нейтралі - це спосіб підключення нейтралі трансформатора до землі. Існує три основних режими роботи нейтралі: ізольована нейтраль - нейтраль трансформатора не підключена до землі; заземлена через дугогасильний реактор - нейтраль трансформатора підключена до землі через дугогасильний реактор; заземлена через резистор - нейтраль трансформатора підключена до землі через резистор.

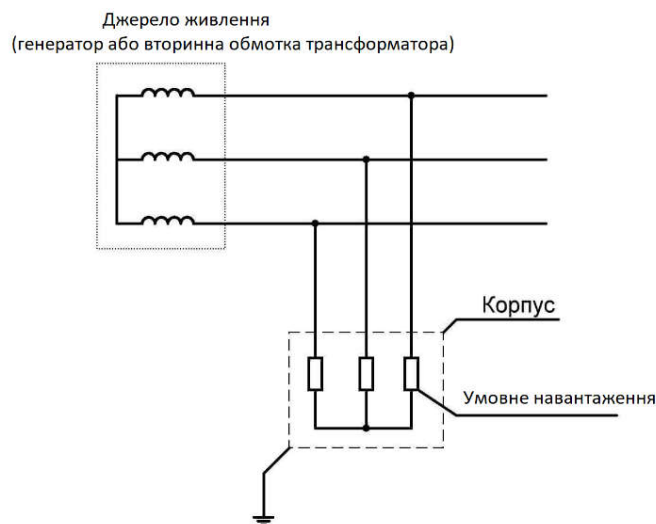


Рисунок 1.10 - Ізольована нейтраль

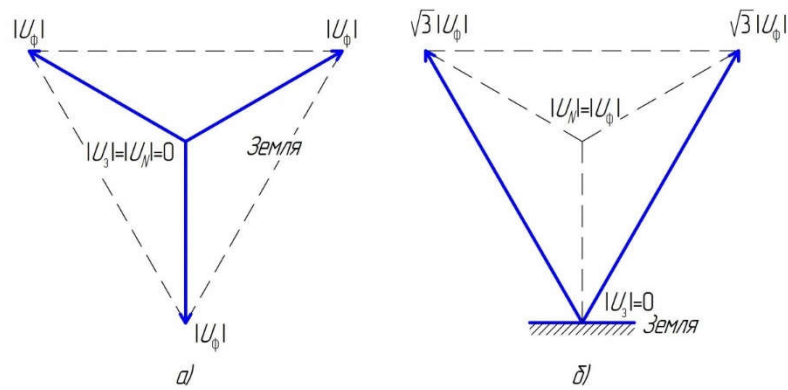


Рисунок 1.11 – Графічне представлення зміни значення напруги справної фази під час однофазного замикання на землю в мережі з ізольованою нейтральністю (сині лінії показ вектор напруги).

Малюнок «а)» показує вихідну симетричну трифазну мережу до замикання. Малюнок «б)» показує зміну напруги здорових фаз при однофазному замиканні землі.

При експлуатації мережі з ізольованою нейтраллю в місці однофазного замикання на землю протікає ємнісний струм неушкодженої фази (а на рис. 1.12).

У мережах, де довжина невелика, а ємнісні струми незначні, дуга розсіюється, коли струм вперше перевищує нуль, і нормальна робота мережі відновлюється без відключення пошкодженої частини мережі. Іншими словами, більшість однофазних замикань на землю безпечні [7].

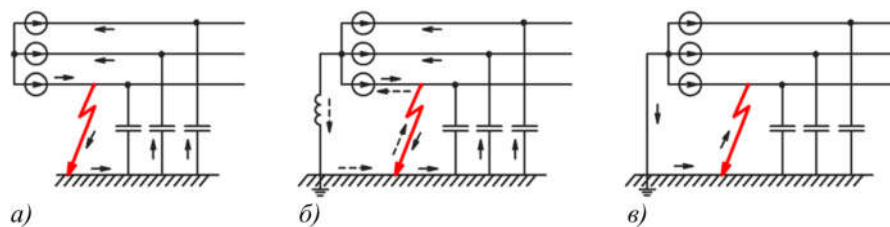


Рисунок 1.12 - Однофазні замикання на землю в ізольованих (а), компенсованих (б) і глухозаземлених (в) нейтральних мережах.

Велика довжина мережі збільшує ємнісні струми, що може призвести до тривалого горіння дуги, коливань через нестабільний характер дуги і можливості перекидання дуги на сусідні фази. Для полегшення гасіння дуги нейтралі трансформатора включають

Реактори високої індуктивності - дугогасильні реактори (катушки Петерсена). У разі однофазного замикання на землю індуктивний струм в катушці компенсує ємнісний струм, що призводить до значного зменшення струму замикання на землю. В результаті дуга гасне і відновлюється нормальний режим роботи.



Рисунок 1.13 - Дугогасильний реактор для мереж 6 кВ, 10 кВ і 35 кВ.

У мережах із заземленою нейтраллю релейний захист спрацьовує при однофазному струмі короткого замикання та вибірково відключає пошкоджену частину мережі. Завдяки швидкому відключенню дуга не встигає поширитися на інші фази або пошкодити ізоляцію. Таким чином, лінія готова до використання менш ніж за секунду і використовується в різних системах автоматичного повторного включення (АПВ) [8].

У нашій країні мережі до 35 кВ зазвичай експлуатуються з ізольованою нейтраллю, а в мережах 110 кВ і вище нейтраль глухозаземлена.

Ізолятори постійно перебувають під робочою напругою і піддаються механічним, тепловим та іншим впливам, які призводять до втрати ними з часом первинних властивостей (за винятком повітряних проміжків), зниження електричної міцності і старіння ізоляції.

Протягом терміну служби обладнання довготривала міцність ізоляції не повинна знижуватися до максимальної робочої напруги, на яку розраховане обладнання.

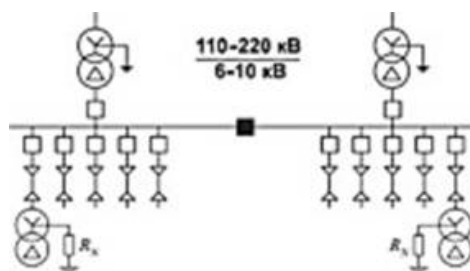


Рисунок 1.14 - Схема двотрансформаторної підстанції із нейтраллю, заземленою через резистор.

Існує два способи резистивного заземлення нейтралі: високоомний і низькоомний.

При високоомному заземленні нульового проводу резистор підбирається таким чином, щоб струм, який генерується резистором у місці однофазного замикання, дорівнював або перевищував ємнісний струм мережі. Іншими словами, високоомне заземлення нейтралі - це заземлення, яке не може негайно ізолювати однофазне замикання, що виникає [9]. З цієї причини високоомне заземлення нейтралі може використовуватися тільки в мережах малої потужності з струмами власної ємності до 5-7 А.

Для низькоомного заземлення нейтралі використовуються резистори, що створюють струми в діапазоні 10-2000 А. Значення струму, що генерується резистором, вибирається відповідно до різних спеціальних умов, таких як опір опори повітряної лінії, оболонки і екрану кабелю до протікання однофазних струмів короткого замикання, наявність в мережі високовольтних двигунів і генераторів, а також чутливість релейного захисту.

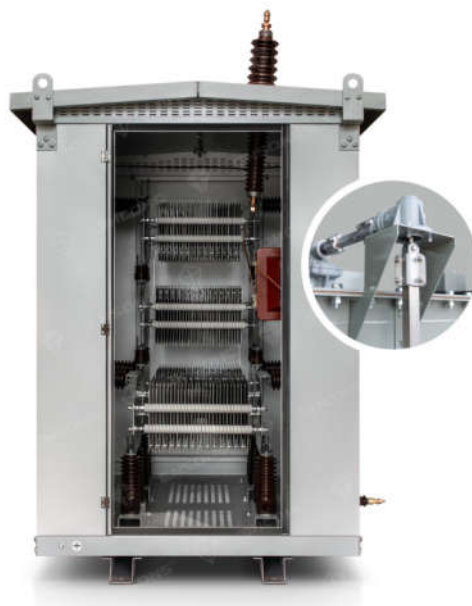


Рисунок 1.15 – Высоковольтный высокоомный резистор

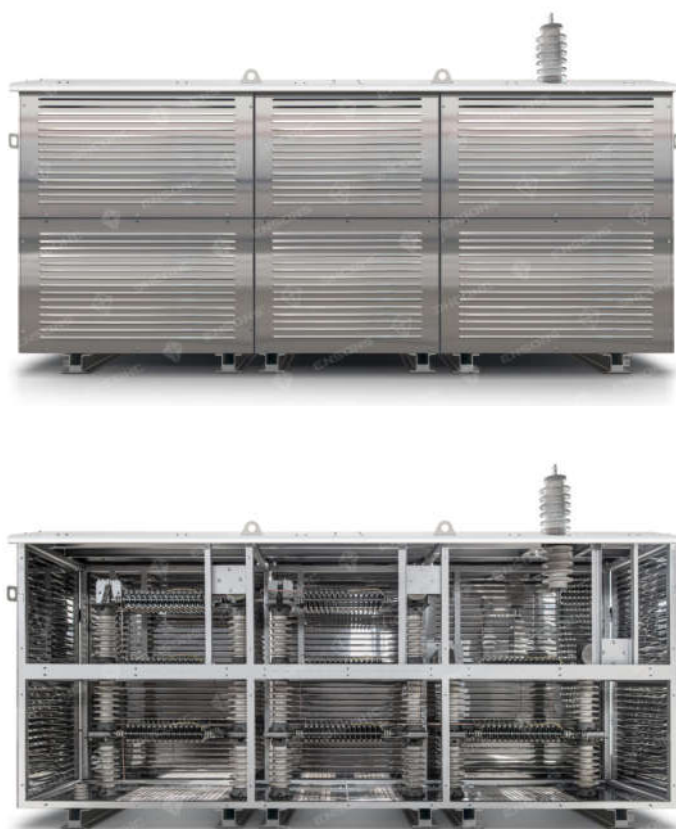


Рисунок 1.16 – Резистор 35 кВ

Режим роботи нейтралі впливає на технічний стан ізоляції розподільних мереж наступним чином: ізольована нейтраль - при цьому режимі роботи нейтралі струми витоку від фаз до землі не зрівноважуються, що може призвести до підвищення напруги на ізоляції. Це може спричинити пошкодження ізоляції, а в крайньому випадку - коротке замикання; заземлена через дугогасильний реактор - при цьому режимі роботи нейтралі струми витоку від фаз до землі зрівноважуються за допомогою дугогасильного реактора. Це дозволяє знизити напругу на ізоляції, що зменшує ризик її пошкодження; заземлена через резистор - при цьому режимі роботи нейтралі струми витоку від фаз до землі зрівноважуються за допомогою резистора. Це дозволяє знизити напругу на ізоляції, але не настільки ефективно, як при заземненні через дугогасильний реактор [10]

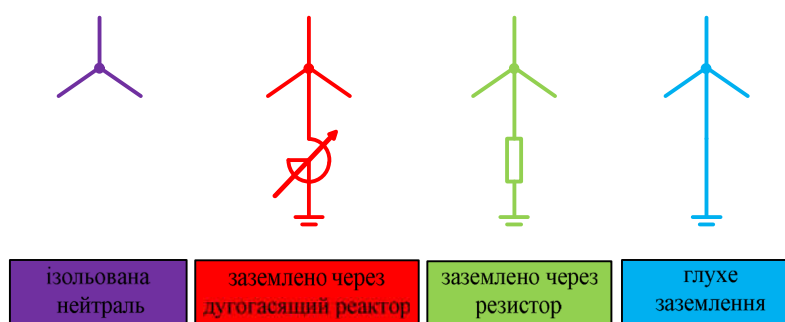


Рисунок 1.17 – Режим нейтрального заземлення мережі середньої напруги.

1.5 Існуючі методи контролю стану ізоляції розподільних мереж

Для контролю стану ізоляції розподільних мереж використовуються такі методи: вимірювання опору ізоляції - це найпоширеніший метод контролю стану ізоляції. Метод полягає в вимірюванні опору ізоляції між фазами і між фазами і землею. Опір ізоляції є мірою якості ізоляції. Чим вище опір ізоляції, тим краще ізоляція; вимірювання пробивної напруги - цей метод полягає в вимірюванні напруги, при якій ізоляція руйнується. Пробойна напруга є мірою міцності ізоляції. Чим вища пробойна напруга, тим міцніша ізоляція;

візуальний огляд - цей метод полягає в огляді ізоляції на предмет видимих пошкоджень. Візуальний огляд дозволяє виявити такі пошкодження, як тріщини, відшарування, тощо [11].

Вимірювання опору ізоляції: переваги - простота і доступність методу; можливість проводити вимірювання без відключення обладнання від мережі; недоліки - не завжди дає точну інформацію про стан ізоляції; не дозволяє виявити пошкодження ізоляції, які не впливають на опір ізоляції.



Рисунок 1.18 – Вимір опору ізоляції

Вимірювання пробивної напруги: переваги - дає точну інформацію про стан ізоляції; дозволяє виявити пошкодження ізоляції, які не впливають на опір ізоляції; недоліки - необхідно відключати обладнання від мережі для проведення вимірювань; метод є більш витратним, ніж вимірювання опору ізоляції.



Рисунок 1.19 - Калібратор напруги та струму UNI-T UT705

Візуальний огляд: переваги - дозволяє виявити видимі пошкодження ізоляції; метод є простим і доступним; недоліки - не дозволяє виявити пошкодження ізоляції, які не є видимими; метод не є достатньо інформативним для оцінки загального стану ізоляції [12].

Вибір методу контролю стану ізоляції залежить від таких факторів, як: тип ізоляції; важливість обладнання, яке підлягає контролю; фінансові можливості.

Для контролю стану ізоляції розподільних мереж рекомендується використовувати комбінацію методів. Це дозволить отримати більш точну інформацію про стан ізоляції і підвищити ефективність контролю [25].

Окрім перерахованих вище методів, для контролю стану ізоляції розподільних мереж також використовуються такі методи, як: вимірювання ємності ізоляції; вимірювання діелектричної проникності; вимірювання тангенсу кута діелектричних втрат; вимірювання температури ізоляції.

Ці методи надають більш детальну інформацію про стан ізоляції, але є більш складними і дорогими.

Спеціалізоване рішення на базі Моста змінного струму СА7100-2 , Розширювача діапазону СА7150 і Розширювача діапазону СА7151 призначене для збільшення діапазону вимірювання ємності мостами змінного струму високовольтними автоматичними СА7100 за рахунок прецизійного масштабного перетворення струму в колі об'єкту вимірювань.



Рисунок 1.20 - Рішення для вимірювання ємності об'єктів при силі струму до 500 А

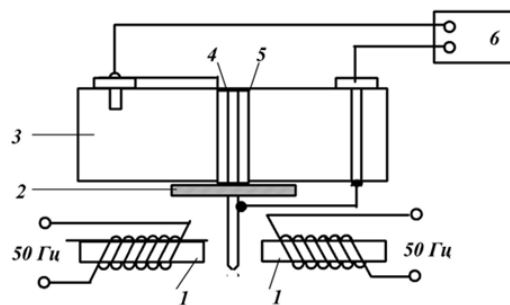


Рисунок 1.21 – Схема приладу вимірювання діелектричної проникності порошкоподібних проб

1 – поляризаційне реле; 2 – пластина; 3 – фторопластова основа;
4, 5 – коаксіальні циліндри; 6 – цифровий вимірювач ємності



Рисунок 1.22 - Прилад для вимірювання тангенса кута діелектричних втрат DTL C



Рисунок 1.23 - Пірометр іскробезпечний Fluke 568 Ex

1.6 Визначення роботоздатності ізоляції розподільних мереж

Роботоздатність ізоляції розподільних мереж (РМ) - це здатність ізоляції виконувати свої функції, що визначаються її призначенням, в заданих умовах експлуатації.

Ізоляція РМ виконує наступні функції: відокремлення струмоведучих частин від землі і між собою; захист від ураження електричним струмом людей і тварин; захист обладнання від руйнування при перенапругах.

Існує два основних методи контролю стану ізоляції РМ: показникові методи - це методи, які дозволяють оцінити стан ізоляції за одним або декількома показниками. До таких методів відносяться: вимірювання опору ізоляції; вимірювання ємності ізоляції; вимірювання та аналіз шуму ізоляції; вимірювання та аналіз частих розрядів (ПД); непрямі методи - це методи, які дозволяють оцінити стан ізоляції за результатами випробувань обладнання, в якому вона використовується. До таких методів відносяться: випробування обладнання на ізоляцію; випробування обладнання на перенапруги [13]

Вибір методу контролю стану ізоляції РМ залежить від наступних факторів: напруги мережі; типу ізоляції; умов експлуатації; вимоги до точності і надійності контролю.



Рисунок 1.24 – Визначення умов роботоздатності РМ

Вимірювання опору ізоляції є найпоширенішим методом контролю стану ізоляції РМ. Опір ізоляції характеризує її здатність чинити опір протіканню електричного струму.

Опір ізоляції вимірюється мегаомметром. Для вимірювання опору ізоляції розподільних мереж використовуються мегаомметри з напругою вимірювання від 500 до 2500 В.

Нормальне значення опору ізоляції розподільних мереж визначається в залежності від напруги мережі.

Вимірювання ємності ізоляції дозволяє оцінити її стан за зміною ємності.

Ємність ізоляції вимірюється ємністоміром.

Зменшення ємності ізоляції може бути викликано її пошкодженням, старінням або забрудненням.

Вимірювання та аналіз шуму ізоляції дозволяє оцінити її стан за характером шуму.[2]

Шум ізоляції вимірюється шумомером.



Рисунок 1.25 - Шумомір двухканальний тип 2270-s / Аналізатор рівня звуку

Збільшення шуму ізоляції може бути викликано її пошкодженням, старінням або забрудненням.

Вимірювання та аналіз частих розрядів (ПД) дозволяє оцінити її стан за частотою та характером ПД.

ПД в ізоляції виникають за її пошкодження.

Випробування обладнання на ізоляцію дають змогу оцінити її стан за результатами випробування.

Обладнання випробовується на напругу ізоляції, яка перевищує робочу напругу кілька разів.

Випробування обладнання на перенапруги дозволяють оцінити його стан за результатами випробування.

Обладнання випробовується на змінну чи імпульсну напругу перенапруги.

1.7 Основні проблемами визначення роботоздатності ізоляції розподільних мереж

Основними проблемами визначення роботоздатності ізоляції розподільних мереж напругою 6-35 кВ є: відсутність чітких і зрозумілих критеріїв визначення роботоздатності ізоляції; недостатня інформативність існуючих методів контролю ізоляції; висока вартість і трудомісткість контрольних робіт.

Для вирішення цих проблем необхідно: щоб розробити чіткі і зрозумілі критерії визначення працездатності ізоляції, необхідно ізолювати її від електричної безпеки і вихідного струму на землю, щоб мінімізувати втрати електроенергії; розробити інформативні методи контролю ізоляції, які б дозволяли не лише визначати загальний опір ізоляції, але й виявляти локальні дефекти; автоматизувати контрольні роботи для зниження їхньої вартості та трудомісткості [14].

На сьогоднішній день в Україні немає єдиних нормативних документів, які б визначали критерії визначення роботоздатності ізоляції розподільних мереж. Існують лише рекомендації, які не є обов'язковими для виконання. Це призводить до того, що різні підприємства використовують різні критерії, що ускладнює порівняння результатів контролю ізоляції.

Для вирішення цієї проблеми необхідно розробити і затвердити нормативні документи, які б визначали чіткі і зрозумілі критерії визначення роботоздатності ізоляції. Ці стандарти повинні враховувати як електробезпеку, так і мінімальні втрати потужності, ізольовані від струмів витоку на землю.

Існуючі методи контролю ізоляції, такі як вимір опору ізоляції, дозволяють лише оцінити загальний стан ізоляції. Вони не дозволяють виявляти локальні дефекти, які можуть призвести до виникнення аварій.

Для вирішення цієї проблеми необхідно розробити інформативні методи контролю ізоляції, які б дозволяли не лише визначати загальний опір ізоляції, але й виявляти локальні дефекти. Ці методи можуть бути засновані на використанні цифрових осцилографів, високошвидкісних вимірювачів опору ізоляції та інших сучасних приладів [15].

Контрольні роботи з визначення роботоздатності ізоляції розподільних мереж є трудомісткими і дорогими. Це пов'язано з тим, що необхідно проводити вимірювання на кожному елементі мережі, включаючи кабельні лінії, трансформатори, роз'єднувачі та інші пристрої.

Для вирішення цієї проблеми необхідно автоматизувати контрольні роботи. Це дозволить зменшити витрати часу і коштів на проведення контрольних робіт.

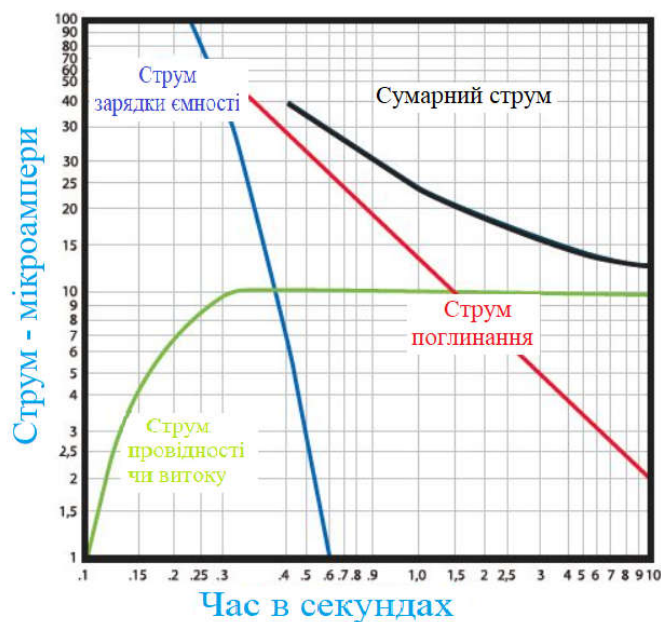
Для вирішення проблем визначення роботоздатності ізоляції розподільних мереж можна вжити такі конкретні заходи: розробити і затвердити нормативні документи, які б визначали критерії визначення роботоздатності ізоляції розподільних мереж; сприяти розробці та впровадженню нових методів контролю ізоляції; надавати фінансову підтримку підприємствам, які займаються розробкою та впровадженням нових методів контролю ізоляції.

Реалізація цих заходів дозволить підвищити надійність і безпеку розподільних мереж, а також зменшити витрати на їхнє обслуговування.

Ось деякі приклади нових методів контролю ізоляції, які можна використовувати для вирішення проблем, зазначених вище:

- Метод високошвидкісного вимірювання опору ізоляції

Цей метод дозволяє вимірювати опір ізоляції за дуже короткий час (тисячі наносекунд). Це дозволяє виявити локальні дефекти, які неможливо виявити за допомогою традиційних методів вимірювання опору ізоляції.



Графік 1.26 – Три струми показані в залежності від часу

Шкала часу є умовною і може відрізнятися залежно від ізоляції, що тестується.

Для забезпечення належних результатів тестування великих електродвигунів або дуже довгих кабелів зведення до мінімуму ємнісних струмів і струмів поглинання може займати від 30 до 40 хвилин.

- Метод цифрового осцилографування

Цей метод дозволяє записувати електричні сигнали в ізоляції. Це дозволяє оцінити характер змін опору ізоляції в часі, що може свідчити про наявність дефектів.

Таблиця 1.3 – Норми випробувальної напруги для кабелів/обладнання

Робоча напруга кабелю/обладнання	Норми випробувальної напруги постійного струму
від 24 до 50 В	від 50 до 100 В
від 50 до 100 В	від 100 до 250 В
від 100 до 240 В	від 250 до 500 В
від 440 до 550 В	від 500 до 1 000 В
2 400 В	від 1 000 до 2 500 В
4 100 В	від 1 000 до 5 000 В
від 5 000 до 12 000 В	від 2 500 до 5 000 В
> 12 000 В	від 5 000 до 10 000 В

- Метод ультразвукового контролю

Цей метод дозволяє виявляти дефекти в ізоляції за допомогою ультразвукових хвиль. Цей метод є неінвазивним, що дозволяє проводити контроль ізоляції без її демонтажу.

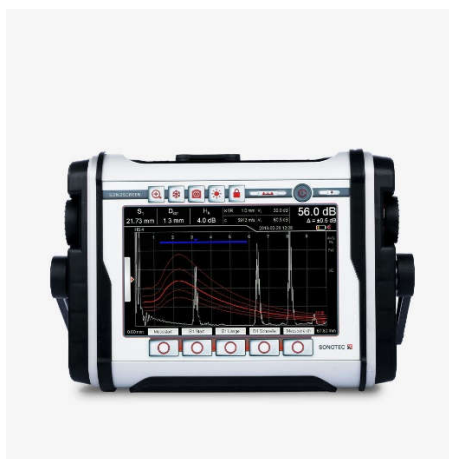


Рисунок 1.27 - Дефектоскоп SONOSCREEN ST10



Рисунок 1.28 - Ультразвуковий товщиномір DEMEQ серії QS-3

Впровадження цих методів дозволить підвищити ефективність контролю ізоляції розподільних мереж.

На сьогоднішній день існують певні напрацювання у вирішенні цих проблем. Наприклад, у наукових роботах пропонується використовувати такі критерії визначення роботоздатності ізоляції: опір ізоляції не менше 0,5 МОм; струм стікання на землю не більше 10 мА [16].

Також розробляються нові методи контролю ізоляції, засновані на використанні цифрових осцилографів, високошвидкісних вимірювачів опору ізоляції та інших сучасних приладів.

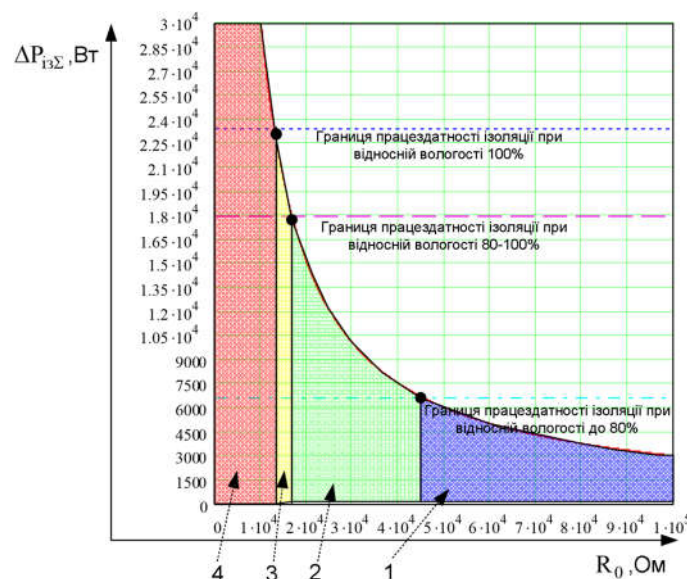


Рисунок 1.29 - Залежність потужності втрат в ізоляції через струміні стікання на землю від загального опору ізоляції відносно землі $P_{из} = f(R_0)$

Однак ці розробки поки що не впроваджені в практику. Тому актуальними залишаються питання розробки та впровадження ефективних методів визначення роботоздатності ізоляції розподільних мереж.

Ось деякі конкретні заходи, які можна вжити для вирішення цих проблем: розробити і затвердити нормативні документи, які б визначали критерії визначення роботоздатності ізоляції розподільних мереж; сприяти розробці та впровадженню нових методів контролю ізоляції; надавати фінансову підтримку підприємствам, які займаються розробкою та впровадженням нових методів контролю ізоляції.

Реалізація цих заходів дозволить підвищити надійність і безпеку розподільних мереж, а також зменшити витрати на їхнє обслуговування.

Для вирішення проблеми відсутності чітких і зрозумілих критеріїв визначення роботоздатності ізоляції необхідно розробити і затвердити нормативні документи, які б визначали ці критерії. Ці документи повинні бути розроблені з урахуванням досвіду експлуатації розподільних мереж в Україні та закордоном [17].

Розробка нормативних документів повинна проводитися за участю представників наукових установ, підприємств електроенергетики, а також органів державного регулювання.

Для вирішення проблеми недостатньої інформативності існуючих методів контролю ізоляції необхідно сприяти розробці та впровадженню нових методів контролю ізоляції. Ці методи повинні бути випробувані в реальних умовах експлуатації розподільних мереж.

Для сприяння розробці та впровадженню нових методів контролю ізоляції можна вжити таких заходів: надання фінансової підтримки підприємствам і науковим установам, які займаються розробкою нових методів контролю ізоляції; організація науково-технічних конференцій та семінарів з питань розробки та впровадження нових методів контролю ізоляції; створення інформаційних ресурсів, присвячених новим методам контролю ізоляції.

Надання фінансової підтримки підприємствам, які займаються розробкою та впровадженням нових методів контролю ізоляції

Для стимулювання розробки та впровадження нових методів контролю ізоляції необхідно надавати фінансову підтримку підприємствам і науковим установам, які займаються цими питаннями. Це можна зробити за рахунок державних коштів, а також за рахунок коштів підприємств електроенергетики.

Для вирішення проблеми високої вартості і трудомісткості контрольних робіт необхідно автоматизувати контрольні роботи. Це можливо завдяки використанню новітніх технологій, таких як ШІ і машинне навчання [18].

Автоматизація контрольних робіт дозволить зменшити витрати часу і коштів на проведення контрольних робіт, а також підвищити ефективність цього процесу.

1.8 Висновок

Роботоздатність ізоляції розподільних мереж є важливим фактором, який забезпечує безперебійне та безпечне постачання електроенергії.

Ось деякі додаткові деталі про перевірку роботоздатності ізоляції розподільних мереж: вимірювання опору ізоляції проводиться за допомогою мегомметра. Опір ізоляції повинен бути не менше встановленого нормативом; вимірювання пробивної напруги проводиться за допомогою пробивного трансформатора. Пробойна напруга повинна бути не менше встановленого нормативом; візуальний огляд проводиться для виявлення пошкоджень ізоляції, таких як тріщини, відшарування, тощо.

Пошкодження ізоляції розподільних мереж може призвести до таких наслідків: коротке замикання; пожежа; вибух; загибель людей.

Щоб уникнути цих наслідків, необхідно проводити регулярні перевірки роботоздатності ізоляції розподільних мереж.

Важливо своєчасно виявляти і усувати пошкодження ізоляції для забезпечення її довговічності і безперебійної роботи.

Пошкодження ізоляції розподільних мереж може призвести до серйозних наслідків, таких як коротке замикання, відключення електропостачання, пожежа, вибух або навіть загибель людей. Тому важливо проводити регулярні перевірки ізоляції і вжити заходів для її захисту.

Ось деякі додаткові деталі про причини виникнення пошкоджень ізоляції розподільних мереж: механічні пошкодження ізоляції можуть бути викликані ударами, падінням предметів, землетрусами, тощо; атмосферні впливи, такі як дощ, сніг, град, сонце, тощо, можуть призвести до пошкодження ізоляції через вологу, струмів витоку, тощо; старіння ізоляції відбувається з часом і може призвести до її руйнування; термічні впливи, такі як перегрів, пожежа, тощо, можуть призвести до пошкодження ізоляції через її плавлення або руйнування; дефекти виготовлення ізоляції можуть бути викликані неякісним матеріалом, неправильним виготовленням, тощо.

Контроль стану ізоляції РМ є важливим завданням, що забезпечує безпеку та надійність експлуатації мереж.

Для контролю стану ізоляції РМ використовують різні методи, вибір яких залежить від конкретних умов експлуатації.

Щоб уникнути пошкодження ізоляції, необхідно проводити планові і позапланові перевірки ізоляції. Планові перевірки ізоляції проводяться відповідно до встановлених нормативів, позапланові перевірки проводяться у разі виявлення пошкоджень або підозри на пошкодження ізоляції.

Для перевірки ізоляції використовуються такі методи, як: вимірювання опору ізоляції. Опір ізоляції повинен бути не менше встановленого нормативом; вимірювання пробивної напруги. Пробойна напруга повинна бути не менше встановленого нормативом; візуальний огляд. Візуальний огляд проводиться для виявлення видимих пошкоджень ізоляції, таких як тріщини, відшарування, тощо.

Правильний контроль ізоляції дозволяє своєчасно виявити пошкодження ізоляції і усунути їх, запобігаючи таким чином аваріям.

Зміна технічного стану ізоляції елементів розподільних мереж може призвести до серйозних наслідків, таких як коротке замикання, відключення електропостачання, пожежа, вибух або навіть загибель людей. Тому важливо проводити регулярні перевірки ізоляції і вжити заходів для її захисту.

Цей розділ надає додаткову інформацію про причини зміни технічного стану ізоляції елементів розподільчих мереж: старіння ізоляції відбувається з часом і може призвести до її руйнування; термічні впливи, такі як перегрів, пожежа, тощо, можуть призвести до зміни технічного стану ізоляції через її плавлення або руйнування; атмосферні впливи, такі як дощ, сніг, град, сонце, тощо, можуть призвести до зміни технічного стану ізоляції через вологи, струмів витоку, тощо.

Щоб уникнути зміни технічного стану ізоляції, необхідно проводити планові і позапланові перевірки ізоляції. Планові перевірки ізоляції проводяться відповідно до встановлених нормативів, позапланові перевірки проводяться у разі виявлення пошкоджень або підозри на пошкодження ізоляції.

Для перевірки ізоляції використовуються такі методи, як: вимірювання опору ізоляції. Опір ізоляції повинен бути не менше встановленого нормативом; вимірювання пробивної напруги. Пробойна напруга повинна бути не менше встановленого нормативом; візуальний огляд. Візуальний огляд проводиться для виявлення видимих пошкоджень ізоляції, таких як тріщини, відшарування, тощо.

Правильний контроль ізоляції дозволяє своєчасно виявити зміни технічного стану ізоляції і усунути їх, запобігаючи таким чином аваріям.

Найчастішими причинами зміни технічного стану ізоляції розподільних мереж є старіння ізоляції та термічні впливи.

Основні проблеми, що визначають працездатність ізоляції розподільної мережі при напрузі 6-35кВ:

- 1) Відсутність чітких і зрозумілих критеріїв визначення робоздатності ізоляції. Це призводить до того, що різні підприємства використовують різні критерії, що ускладнює порівняння результатів контролю ізоляції.

Основні критерії вибору: Тип. Рекомендується віддавати перевагу цифровому обладнанню як більш точному, надійному та беззавадному; Бренд. Варто вибирати продукцію відомих виробників з позитивними відгуками; Набір додаткових функцій. Параметри, які можна вимірювати.

Визначаючи, який мультиметр вибрати раціонально, слід виходити з його майбутнього призначення. Для перевірки функціонування електричної мережі він повинен вимірювати змінний струм, для визначення справності акумуляторів - постійний. Крім того, пристрій може вимірювати температуру, потужність, ємність, частоту, індуктивність акумуляторів та інших електроприладів;

Досвідчені майстри, які знають, як правильно вибрати мультиметр, рекомендують цифрові сучасні пристрої з різноманітним функціоналом та високою точністю вимірювань. Наявність дисплею обумовлює зручність зчитування інформації. Підбираючи модель, важливо розуміти, для яких цілей вона буде використовуватися. Деякі спеціальні опції, які використовуються професійними майстрами, можуть бути не вигідними для домашнього застосування.

2) Недостатня інформативність існуючих методів контролю ізоляції. Вони дозволяють лише оцінити загальний стан ізоляції, не дозволяючи виявляти локальні дефекти, які можуть призвести до виникнення аварій.

3) Висока вартість і трудомісткість контрольних робіт. Це пов'язано з тим, що необхідно проводити вимірювання на кожному елементі мережі, включаючи кабельні лінії, трансформатори, роз'єднувачі та інші пристрої.

Висока вартість і трудомісткість інспекційних робіт з визначення характеристик ізоляції розподільчих мереж напругою від 6-35 кВ зумовлена наступними факторами: необхідність проведення вимірювань на кожному елементі мережі, включаючи кабельні лінії, трансформатори, роз'єднувачі та інші пристрої; необхідність використання спеціального обладнання, такого як вимірювачі опору ізоляції, осцилографи та інші; необхідність проведення робіт у складних умовах, таких як підстанціях, повітряних лініях та інших.

Таблиця 1.4 - Вартість і трудомісткість контрольних робіт

Елемент мережі	Вартість робіт, грн.	Трудомісткість робіт, год./елемент
Кабельна лінія 1 км	1000-2000	1-2
Трансформатор 1000 кВА	5000-10000	2-3
Роз'єднувач	1000-2000	1-2

Як видно з таблиці, вартість і трудомісткість контрольних робіт можуть бути досить значними. Це обмежує можливості підприємств електроенергетики для проведення регулярних контрольних робіт, що може призвести до зниження надійності і безпеки розподільних мереж.

Для вирішення цієї проблеми необхідні заходи з автоматизації адміністративних завдань. Це дозволить зменшити витрати часу і коштів на проведення контрольних робіт, а також підвищити ефективність цього процесу.

Ось деякі конкретні приклади того, як можна автоматизувати контрольні роботи: використання мобільних комплексів для проведення контрольних робіт. Ці комплекси оснащені сучасним обладнанням і програмним забезпеченням, що дозволяє проводити контрольні роботи швидко і точно; використання штучного інтелекту і машинного навчання для аналізу результатів контрольних робіт. Це дозволяє виявляти локальні дефекти, які неможливо виявити за допомогою традиційних методів.

Впровадження заходів щодо автоматизації контрольних робіт дозволить підвищити надійність і безпеку розподільних мереж, а також зменшити витрати на їхнє обслуговування.

Режим роботи нейтралі має важливий вплив на технічний стан ізоляції розподільних мереж.

Для забезпечення високої надійності і безпеки електропостачання необхідно правильно вибрати режим роботи нейтралі: ізольована нейтраль - це найстаріший і найпростіший режим роботи нейтралі. Він використовується в основному в розподільних мережах з невеликими навантаженнями; заземлена через дугогасильний реактор - це найбільш поширений режим роботи нейтралі. Він використовується в розподільних мережах з середніми і великими навантаженнями; заземлена через резистор - це менш поширений режим роботи нейтралі. Він використовується в розподільних мережах з великими навантаженнями, де необхідно забезпечити високий рівень надійності.

Для оцінки впливу режимів роботи нейтралі на технічний стан ізоляції розподільчих мереж використовуються наступні методи: математичне моделювання - цей метод дозволяє оцінити вплив режиму роботи нейтралі на напругу на ізоляції; експериментальні дослідження - цей метод дозволяє провести реальні випробування розподільних мереж з різними режимами роботи нейтралі. За результатами оцінки впливу нейтрального режиму роботи на технічні умови ізоляції розподільної мережі приймається рішення про вибір оптимального нейтрального режиму роботи.

Вирішити ці проблеми можна за допомогою таких заходів: розробка і затвердження нормативних документів, які б визначали чіткі і зрозумілі критерії визначення роботоздатності ізоляції. Ці документи повинні враховувати як електробезпеку, так і мінімальні втрати електроенергії в ізоляції від струмів стікання на землю; сприяння розробці та впровадженню нових методів контролю ізоляції. Ці методи повинні бути засновані на використанні сучасних приладів і технологій, таких як цифрові осцилографи, високошвидкісні вимірювачі опору ізоляції та інші; надання фінансової підтримки підприємствам і науковим установам, які займаються розробкою та впровадженням нових методів контролю ізоляції. Це дозволить стимулювати розробку та впровадження нових методів, а також зменшити витрати на їхнє дослідження та випробування; автоматизація контрольних робіт.

2 ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ РОБОТОЗДАТНОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ

2.1 Аналіз методів визначення роботоздатності ізоляції

Для визначення працездатності об'єкта або системи можна використовувати два підходи. Відповідно до першого підходу проводиться попередній вибір контрольованих показників, які можуть пояснити технічний стан об'єкта, що діагностується. Тут слід зазначити, що їх кількість може бути досить великою (але обґрунтованою і обмеженою складністю подальших експериментів). Далі проводиться серія експериментальних досліджень на об'єкті діагностування (ОД) для визначення того, як обрані контрольні показники відображають технічний стан об'єкта діагностування. На наступному етапі будується математична модель, що описує зміни ТС (стохастичні залежності параметрів) або створюється статистична еталонна база даних чи нейронна мережа, яка дозволяє визначити технічний стан об'єкта діагностування (визначити його працездатність) за результатами моніторингу обраних показників. Цей підхід використовується у випадках, коли теоретично неможливо обґрунтувати здатність контрольованих показників відображати технічний стан через такі особливості ОФ: висока складність, неоднорідність структури, невизначеність критеріїв відбору діагностичних показників, велика кількість вимірюваних параметрів тощо [19].

Відповідно до другого підходу (використовується переважно для ТС з простою структурою, високою однорідністю структурних елементів та невеликою кількістю безпосередньо вимірюваних параметрів), спочатку проводиться теоретичне дослідження, відбираються індикатори ТС (керуючись певними критеріями, які необхідно визначити заздалегідь) та проводиться аналіз можливостей визначення результативності діяльності ТС через індикатор ТС.

На наступному етапі дослідження розробляється діагностико-математична модель ТС та встановлюються умови функціонування ТС. Буде перевірено правильність вибору діагностичних показників для визначення працездатності.

Визначення працездатності РМ-ізоляції в умовах експлуатації обумовлено відсутністю досить точних кількісних методів оцінки впливу факторів, що погіршують стан ізоляційних матеріалів. Ці фактори включають процес старіння ізоляційних матеріалів, вологість, забруднення (зовнішнє середовище), механічні навантаження та перенапруги. Тому на практиці для контролю технічного стану ізоляції використовують непрямі електричні показники, такі як напруга зсуву нейтралі, тангенс кута діелектричних втрат, повний ефективний опір мережі відносно землі, струм і напруга послідовності нейтралі та провідність фаз мережі відносно землі. Підхід до розгляду ізоляції РМ як єдиного просторово розподіленого об'єкта, технічний стан якого може бути визначений шляхом моніторингу параметрів ізоляції, реалізований не в повній мірі. Цей підхід частково нереалізований в частині обмеження змін цієї групи параметрів та розробки норм для визначення технічного стану. У багатьох випадках важко визначити технічний стан та ефективність ізоляції шляхом контролю зміни параметрів ізоляції. Це пов'язано з тим, що через особливості процесів, які відбуваються в ізоляції, ці параметри можуть змінюватися кількісно в широкому діапазоні і не завжди однозначно відображають технічний стан ізоляції. Цієї невизначеності можна уникнути, перевіряючи не лише один параметр (наприклад, напругу зсуву нейтралі), а й цілу групу параметрів ізоляції (активну та реактивну провідність фази мережі на землю). Однак це створює досить об'ємну проблему визначення характеристик ізоляції при аналізі змін цілої групи параметрів. Можливим вирішенням цієї проблеми є визначення інтегрального показника (діагностичної ознаки) ТП, що характеризує параметри ізоляції, та обмеження його значення за певними критеріями. Однак, на даний час така робота не проводилась і ефективного показника ефективності ізоляції не існує [20].

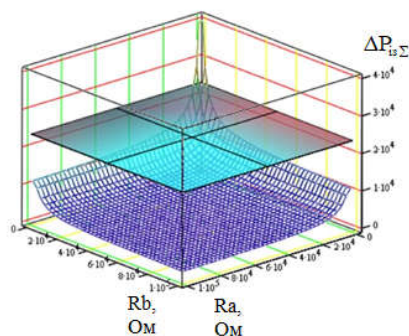


Рисунок 2.1 - Поверхня залежності потужності втрат в ізоляції із за струмів стікання на землю від обернених величин діагностичних показників для вологої погоди

Для вирішення проблеми визначення працездатності ізоляції РМ були розроблені наступні рекомендації.

1. Обрати чіткі та зрозумілі критерії для визначення працездатності ізоляції РП та розмежувати робочі та неробочі стани ізоляції РП. Такими критеріями мають бути умови безпеки експлуатації обладнання з ізоляцією РЗ та мінімальні втрати потужності від ізоляції РЗ через витоки, спричинені несправною або пошкодженою ізоляцією РЗ.

2. При визначенні працездатності ізоляцію РП слід розглядати як єдиний інтегрований об'єкт, технічний стан якого визначається відповідно змінами низки параметрів (активної провідності фази РП відносно землі). Ефективність ізоляції повинна визначатися інтегральним показником технічного стану, який визначається розрахунковим методом за відомими параметрами ізоляції. Вибір показників технічного стану ізоляції повинен ґрунтуватися на аналізі придатності всієї сукупності показників, які так чи інакше характеризують процес зміни технічного стану ізоляції, для обраних критеріїв оцінки технічного стану ізоляції, тобто безпеки експлуатації РЕЗ та ефективності його функціонування (мінімізації втрат потужності через струм витоку на землю) [27][28].

2.2 Визначення комплексу показників стану технічної ізоляції розподільчої мережі

Завдання вибору показників технічного стану ізоляції полягає в тому, щоб врахувати всі електричні характеристики, які можуть бути пов'язані з технічним станом ізоляції, і на основі обраних критеріїв (експлуатаційна безпека та економічна ефективність) проаналізувати, як той чи інший показник технічного стану враховує ці критерії, іншими словами, проаналізувати рівень експлуатаційної безпеки та економічної ефективності розподільчої мережі і як їх можна охарактеризувати. При цьому ізоляція РМ розглядається як єдиний, але просторово розподілений електричний комплекс, що визначається набором параметрів. Цими параметрами є такі параметри ізоляції, як ефективні провідності g_A , g_B і g_C фаз РМ відносно землі та ємності C_a , C_b і C_c [21].

Оскільки основною причиною зміни технічного стану ізоляції РП з ізолюваною нейтраллю є пошкодження відносно землі, вважається, що технічний стан міжфазної ізоляції має незначний вплив на загальний ТС і може бути проігнорований у подальших дослідженнях.

Для аналізу змін технічного стану ізоляції розглянемо спрощену сурогатну схему розподільчої мережі з ізолюваною нейтраллю В.2.1.

Параметри ізоляції - це об'єктивні фізичні (електричні) величини, які можуть бути виміряні безпосередньо і тому чітко вказують на характер процесів, що відбуваються в ізоляції. Ємності C_a , C_b і C_c фази мережі відносно землі залежать від конструктивних параметрів мережі (її загальної довжини і конструкції опор), тому їх значення можна вважати постійними. Однак слід зазначити, що часто спостерігається, що в процесі зволоження поверхні ізолятора загальна ємність мережі дещо зростає. Активні провідності g_A , g_B і g_C фазних ізоляторів відносно землі можуть змінюватися в досить широкому діапазоні значень.

Ці зміни (збільшення активної провідності) характеризують процес пошкодження ізоляції, основною причиною якого є утворення шунтуючих зв'язків між фазами мережі та землею [3]. Утворення шунтових з'єднань (наприклад, фази А) відображається активною провідністю шунтового з'єднання. Необхідно розрізняти два процеси: симетричне збільшення активної провідності фазного ізолятора відносно землі через вологу або бруд на поверхні ізолятора та значне несиметричне збільшення активної провідності окремих фаз відносно землі через появу шунтових з'єднань із землею.

Задача визначення характеристик ізоляції безпосередньо за відомими параметрами ізоляції (з використанням параметрів ізоляції як діагностичних показників) є проблемою великої розмірності через велику кількість змінних. Тому її прийнято спрощувати, використовуючи для опису технічного стану набір інтегральних показників. До таких показників належать тангенс кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta$, напруга зсуву нейтралі U_0 , загальний ефективний опір мережі відносно землі R_0 , загальний струм витоку I_0 та втрата ізоляції через струм витоку R_{iz} [18]

Для всіх цих показників існує математична залежність від параметрів ізоляції.

Для $\text{tg}\delta$, U_0 , R_0 та I_0 існує багато способів визначення технічного стану ізоляції на основі накопиченої статистичної бази вимірних значень цих показників. Наразі не існує таких методів визначення працездатності ізоляції на основі таких критеріїв, як безпека експлуатації та економічна ефективність. Тому їх розробка є науковою задачею.

Розглянемо застосування критеріїв експлуатаційної безпеки при визначенні ефективності ізоляції.

Відомо, що в Україні діє державний стандарт [69] (ГОСТ 12.1038-82 "Гранично допустимі рівні напруги та струму"), який регламентує безпеку експлуатації електрообладнання з точки зору виникнення небезпечних для людини рівнів напруги та струму.

Згідно з цим стандартом:

1) у мережі з часом захисту від однофазного замикання на землю (ОЗЗ) більше 1 секунди струм в організмі людини обмежений 6 мА.;

2) при вимірюванні контактних напруг і струмів, що проходять через тіло людини частотою 50 Гц, тіло людини в електричному колі моделюється резистивним опором.

Враховуючи всі перераховані вище показники технічного стану, очевидно, що оцінити рівень безпеки процесу ізоляції РМ неможливо, оскільки жоден з них безпосередньо не пов'язаний з дією струму, що проходить через тіло людини (у разі пошкодження ізоляції). Тому в даному випадку необхідно ввести показники технічного стану, які повинні бути пов'язані з процесом деградації ізоляції та струмами через тіло людини, що генеруються при цьому. Таким індикатором може бути струм у шунтуючій перемичці, що протікає через тіло людини при дотику тіла людини до струмоведучої частини обладнання в місці пошкодження ізоляції [28]. Однак для обґрунтування вибору цього показника необхідно створити та врахувати спеціальну модель пошкодження ізоляції.

Розглянемо застосування критерію економічної функції для визначення ефективності ізоляції. Очевидно, що основним показником для вимірювання економічної ефективності розподільчої мережі є втрати при передачі електроенергії. Тому ефективна потужність втрат потужності через струми витоку може розглядатися як міра економічної ефективності ізоляції РМ та показник її працездатності при застосуванні цього критерію.

Якщо у вас є інформація про напругу і ефективної провідності фази мережі щодо землі, ви можете отримати втрати потужності через струму витоку на землю:

$$\Delta P_{\text{is}\bar{a}} = \Delta P_{\text{isA}} + \Delta P_{\text{isB}} + \Delta P_{\text{isC}} = U_A^2 \cdot g_a + U_B^2 \cdot g_b + U_C^2 \cdot g_c. \quad (2.1)$$

Отримані значення опору втрат ізоляції порівнюються з нормативним R_R , який можна розрахувати, використовуючи технічні дані мережі, такі як тип (ПЛ або КЛ), загальна довжина L , номінальна напруга та поширені марки кабелів згідно з методикою, описаною в [12].

$$\Delta P_{із\Sigma} \leq P_{із}^{норм}. \quad (2.2)$$

Таким чином, ви можете ізолювати та визначити надмірні втрати потужності та встановити обмеження на ці значення, щоб створити умови, що дозволяють їх використовувати.

Ліміти також можуть бути встановлені для кожної фази:

$$\begin{aligned} \Delta P_{ізА} &\leq \frac{P_{із}^{норм}}{3} \\ \Delta P_{ізВ} &\leq \frac{P_{із}^{норм}}{3} \\ \Delta P_{ізС} &\leq \frac{P_{із}^{норм}}{3} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Згідно з методологією [12], було кілька умов навколишнього середовища, в яких проводилося дослідження (Львівський ОРГРЕС), були отримані дані для розрахунку регулюючої здатності втрат в ізоляції. Прикладами є:

- дощ, мокрий сніг та мряка (вологість - 100%);
- імла (вологість - 80-100%);
- бездощова погода (вологість - нижче 80%).

Тому для визначення експлуатаційних характеристик ізоляції R_M необхідно спочатку визначити нормативну величину втрат ізоляції для всіх трьох умов навколишнього середовища, а потім порівняти фактичну величину втрат ізоляції з нормативними значеннями для відповідного рівня навколишнього середовища, за яким ведеться спостереження [29][30].

2.3 Розробка діагностичної моделі для визначення умов роботоздатності ізоляції

Для отримання діагностичної моделі розглянемо ситуацію, коли виникає шунтове з'єднання між фазою розподільчої мережі з ізолюваною нейтраллю (наприклад, фазою А) та заземленою частиною електроустановки.

r_A , r_B і r_C - ефективні опори ізоляції фаз РМ; C_A , C_B і C_C - ємності кожної фази відносно землі; r_1 і L_1 - параметри схеми заміщення контролю ізоляції; Z_n - еквівалентний опір повного навантаження (на протікання струму ПЗВ не впливають); R_z - опір заземлювального пристрою (згідно з [22], для мереж 6-10 кВ не повинен перевищувати 10 Ом); r_d - додатковий тимчасовий опір заземлення.

Утворюється шунтове з'єднання, через яке починає протікати струм витоку $I(T)$, що викликає окислення і згоряння заземлювача і спікання землі в точці протікання струму із землі на землю. В результаті до перехідного опору r_d додається перехідний опір і на заземлених металевих частинах обладнання (корпусах, арматурі) утворюються небезпечні потенціали. Операторів часто попереджають про існування цих явищ.

Небезпечний характер цих процесів ілюструють численні нещасні випадки, пов'язані з появою потенціалів на корпусах електрообладнання РМ. Додатковий перехідний опір заземлення може змінюватися в досить широкому діапазоні - від декількох сотень Ом до декількох сотень кОм у разі повного вигорання землі. Для того, щоб визначити об'єктивне значення додаткового опору заземлення, ми керуємося наступними припущеннями та підходами.

- Випадок повного замикання на землю, при якому практично неможливо захистити людей від впливу потенціалу, що дорівнює основній фазній напрузі, не враховується;
- Щоб врахувати ситуацію, коли дрiт падає на землю і людина потрапляє в зону витоку, передбачається, що додатковий перехідний опір для шунтування людського тіла в зоні витоку становить 100 Ом [20];

- Для моделювання найбільш несприятливої ситуації передбачається, що пошкодження ізоляції відбувається в електроустановках з найпростішим варіантом заземлення (залізний стрижень стандартного перерізу); додатковий перехідний опір такого заземлювального обладнання витoku приймається приблизно таким же, як у дроту, що падає в землю (згідно з [20], опір витoku є параметром розподілу і приблизно дорівнює 100 Ом вологого ґрунту в місці витoku).

Тому, виходячи з наведених вище припущень, додатковий перехідний опір заземлення r_d приймається рівним 100 Ом. Це частково відповідає реальним умовам експлуатації, в яких у разі пошкодження ізоляції або фіксованого однофазного короткого замикання в корпусі електрообладнання зазвичай фіксується потенціал до 300 В, що відповідає опору заземлення приблизно від 100 до 110 Ом.

На наступному етапі моделюється контакт людини із заземленою частиною електроустановки для найбільш несприятливого випадку, коли пошкодження відбувається одночасно в двох різних фазах мережі і контакт людини відбувається в місці найбільшого пошкодження [18][32].

В результаті через тіло людини починає протікати струм $I_A(T)$, але згідно з вимогами електробезпеки цей струм не повинен перевищувати 6 мА. Рівняння для граничних умов характеристик ізоляції цієї моделі пошкодження виглядає наступним чином:

$$\begin{aligned}
 I_{zA} &= U_A \frac{g_{ша} \cdot g_n}{g_{шA} + g_n + g_z} \leq 6 \cdot 10^{-3} \text{ А}; \\
 I_{zB} &= U_B \frac{g_{ша} \cdot g_n}{g_{шB} + g_n + g_z} \leq 6 \cdot 10^{-3} \text{ А}; \\
 I_{zC} &= U_C \frac{g_{ша} \cdot g_n}{g_{шC} + g_n + g_z} \leq 6 \cdot 10^{-3} \text{ А},
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

де U_A, U_B, U_C – напруги фаз відносно землі (значення діючі);

$g_{шA}, g_{шB}, g_{шC}$ – провідності шунтувального з'єднання в разі пошкодження у фазах;

g_l – провідність людського тіла, яка дорівнює $g_l = 1r_l = \frac{1}{(6 \cdot 10^3)}$;

g_3 – провідність заземлення, що визначається як

$$g_3 = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{r_d},$$

де R_3 – номінальний опір заземлювального пристрою (в такій мережі не повинно перевищувати 10 Ом),

r_d – перехідний додатковий опір заземлення (обмежений 100 Ом). Провідність шунтових з'єднань $g_{шA}, g_{шB}$ і $g_{шC}$ у кожній фазі можна визначити, наприклад, вимірявши ефективний опір ізоляції фази щодо землі за початкових значень (r_{A0}, r_{B0}, r_{C0}) після введення в експлуатацію або ремонту електроустановки, а також вимірявши ці опори в будь-якій точці (r_A, r_B, r_C) і порівнявши їх з початковими значеннями за допомогою рівняння:

$$\begin{aligned} g_{шA} &= \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_{A0}} - \frac{1}{r_s} \\ g_{шB} &= \frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_{B0}} - \frac{1}{r_s} \\ g_{шC} &= \frac{1}{r_C} - \frac{1}{r_{C0}} - \frac{1}{r_s} \end{aligned} \quad (2.4)$$

де r_s – симетричне зменшення опору ізоляції ґрунту через зволоження поверхні ізолятора під час опадів можна визначити як::

$$r_s = \min(r_{A0} - r_A)(r_{B0} - r_B)(r_{C0} - r_C); \quad (2.5)$$

Використовуючи струм у шунтовому з'єднанні як індикатор технічного стану ізоляції та встановлюючи на цій основі умови працездатності ізоляції (2.3), можна обмежити набір робочих станів ізоляції відповідно до безпечних умов експлуатації обладнання.

Значення напруги кожної фази відносно землі також залежить від параметрів ізоляції:

$$\begin{aligned}
 U_A &= \frac{1,5 \cdot U_f}{\sqrt{(g_a + g_b + g_c)^2 + (\omega(C_a + C_b + C_c) - B_L)^2}} \times \\
 &\times \sqrt{\left[g_b + g_c + \frac{\omega}{\sqrt{3}} (C_c - C_b) \right]^2 + \left[\frac{g_b + g_c}{\sqrt{3}} + \omega(C_b - C_c) - \frac{2B_L}{3} \right]^2} \\
 U_B &= \frac{1,5 \cdot U_f}{\sqrt{(g_a + g_b + g_c)^2 + (\omega(C_a + C_b + C_c) - B_L)^2}} \times \\
 &\times \sqrt{\left[g_a + g_c + \frac{\omega}{\sqrt{3}} (C_c - C_b) \right]^2 + \left[\frac{g_c + g_a}{\sqrt{3}} + \omega(C_b - C_c) - \frac{2B_L}{3} \right]^2} \\
 U_C &= \frac{1,5 \cdot U_f}{\sqrt{(g_a + g_b + g_c)^2 + (\omega(C_a + C_b + C_c) - B_L)^2}} \times \\
 &\times \sqrt{\left[g_a + g_b + \frac{\omega}{\sqrt{3}} (C_c - C_b) \right]^2 + \left[\frac{g_a + g_b}{\sqrt{3}} + \omega(C_b - C_c) - \frac{2B_L}{3} \right]^2}
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

де U_f – фазна напруга РМ;

ω – кутова частота РМ;

g_a, g_b, g_c – активні провідності фаз мережі (відносно землі);

C_a, C_b, C_c – ємності фаз мережі (відносно землі);

B_L – реактивна сумарна провідність до землі всіх індуктивних елементів, підключених до РМ.

Підставляючи (2.6) у рівняння (2.1) та (2.3) для умов ефективності ізоляції, отримаємо рівняння математичної моделі для визначення ефективності ізоляції при застосуванні вищезазначених критеріїв.

При застосуванні критеріїв експлуатаційної безпеки математична модель для визначення ефективності ізоляції виглядає наступним чином:

$$\begin{cases}
 I_{zA} = \frac{g_{mа} \cdot g_n}{g_{mA} + g_n + g_s} \times \frac{1,5 \cdot U_f}{\sqrt{(g_a + g_b + g_c)^2 + (\omega(C_a + C_b + C_c) - B_L)^2}} \times \\
 \times \sqrt{\left[g_b + g_c + \frac{\omega}{\sqrt{3}} (C_c - C_b) \right]^2 + \left[\frac{g_b + g_c}{\sqrt{3}} + \omega(C_b - C_c) - \frac{2B_L}{3} \right]^2}; \\
 I_{zB} = \frac{g_{mа} \cdot g_n}{g_{mB} + g_n + g_s} \times \frac{1,5 \cdot U_f}{\sqrt{(g_a + g_b + g_c)^2 + (\omega(C_a + C_b + C_c) - B_L)^2}} \times \\
 \times \sqrt{\left[g_a + g_b + \frac{\omega}{\sqrt{3}} (C_c - C_b) \right]^2 + \left[\frac{g_a + g_b}{\sqrt{3}} + \omega(C_b - C_c) - \frac{2B_L}{3} \right]^2}, \\
 I_{zC} = \frac{g_{mа} \cdot g_n}{g_{mC} + g_n + g_s} \times \frac{1,5 \cdot U_f}{\sqrt{(g_a + g_b + g_c)^2 + (\omega(C_a + C_b + C_c) - B_L)^2}} \times \\
 \times \sqrt{\left[g_a + g_b + \frac{\omega}{\sqrt{3}} (C_c - C_b) \right]^2 + \left[\frac{g_a + g_b}{\sqrt{3}} + \omega(C_b - C_c) - \frac{2B_L}{3} \right]^2}.
 \end{cases} \tag{2.7}$$

Якщо застосовується критерій економічної функції, то математична модель для визначення ефективності ізоляції виглядає наступним чином:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta P_{iA} = \frac{2.25 \cdot U_f^2 \cdot g_a}{\sqrt{(g_a + g_b + g_c)^2 + (\omega(C_a + C_b + C_c) - B_L)^2}} \times \\ \times \left[\left[g_a + g_b + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(C_c - C_b) \right]^2 + \left[\frac{g_a + g_b}{\sqrt{3}} + \omega(C_b - C_c) - \frac{2B_L}{3} \right]^2 \right] \\ \Delta P_{iB} = \frac{2.25 \cdot U_f^2 \cdot g_a}{\sqrt{(g_a + g_b + g_c)^2 + (\omega(C_a + C_b + C_c) - B_L)^2}} \times \\ \times \left[\left[g_a + g_b + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(C_c - C_b) \right]^2 + \left[\frac{g_a + g_b}{\sqrt{3}} + \omega(C_b - C_c) - \frac{2B_L}{3} \right]^2 \right] \\ \Delta P_{iC} = \frac{2.25 \cdot U_f^2 \cdot g_a}{\sqrt{(g_a + g_b + g_c)^2 + (\omega(C_a + C_b + C_c) - B_L)^2}} \times \\ \times \left[\left[g_a + g_b + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(C_c - C_b) \right]^2 + \left[\frac{g_a + g_b}{\sqrt{3}} + \omega(C_b - C_c) - \frac{2B_L}{3} \right]^2 \right] \end{array} \right. \quad (2.8)$$

Видно, що основну роль у відображенні процесу зміни технічного стану ізоляції РП відіграють активні провідності g_a , g_b та g_c фази мережі відносно землі. Це єдині величини у співвідношеннях (2.7) і (2.8), які змінюються в процесі виникнення пошкодження і тому розглядаються як діагностичні показники для визначення стану ізоляції [34]

Більш детальний аналіз рівнянь (2.7) і (2.8) в математичній моделі для визначення характеристик дозволяє визначити взаємозв'язок між передавальними функціями W_I і W_P , оскільки як струм у шунтовому з'єднанні, так і втрати потужності через струм на землю залежать від напруги фази мережі відносно землі:

$$\begin{aligned} W_I &= |W(i\omega)| \cdot \frac{g_{mX} \cdot g_x}{g_{mX} + g_x + g_s}; \\ (2.9) \quad W_P &= |W(i\omega)|^2 \cdot g_x, \end{aligned}$$

де $W(i\omega)$ - комплексна передавальна функція, коли як вихідний сигнал використовується напруга фази x мережі відносно землі;

x - індекс відповідної фази;

Як бачимо, обидві передавальні функції мають спільну складову (комплексне число передавальної функції $W(i)$).

Для спрощення задачі побудови характеристичних рівнянь ми також будемо використовувати її як діагностичну модель.

Визначимо передаточні функції для отриманої діагностичної моделі та характеристичних рівнянь і підтвердимо правильність вибору показників ефективності ізоляції.

Знайдемо комплексну передаточну функцію з урахуванням різних фаз мережі:

$$W_x(i\omega) = \frac{U_x}{U_f}$$

Для спрощення подальших розрахунків тут будуть розглядатися тільки мережі без індуктивних елементів, підключених до землі, тобто з ізольованою нейтральною точкою $V_L = 0$.

Отже,

$$\begin{aligned} W_A(i\omega) &= \frac{\sqrt{3} \cdot \left[(g_b + i\omega \cdot C_b) \cdot e^{i30^\circ} + (g_c + i\omega \cdot C_c) \cdot e^{-i30^\circ} \right]}{(g_a + g_b + g_c) + i\omega \cdot (C_a + C_b + C_c)}; \\ W_B(i\omega) &= \frac{\sqrt{3} \cdot \left[(g_c + i\omega \cdot C_b) \cdot e^{i30^\circ} + (g_a + i\omega \cdot C_c) \cdot e^{-i30^\circ} \right]}{(g_a + g_b + g_c) + i\omega \cdot (C_a + C_b + C_c)}; \\ W_C(i\omega) &= \frac{\sqrt{3} \cdot \left[(g_a + i\omega \cdot C_b) \cdot e^{i30^\circ} + (g_b + i\omega \cdot C_c) \cdot e^{-i30^\circ} \right]}{(g_a + g_b + g_c) + i\omega \cdot (C_a + C_b + C_c)}. \end{aligned} \quad (2.10)$$

У співвідношенні (2.10) формула для напруги зсуву нейтралі використовується в комплексній формі, а комплексний вираз фазної напруги мережі на землю отримано шляхом аналізу схеми заміщення трифазної мережі з ізольованою нейтраллю.

Для переходу від комплексних чисел до запису в операторній формі (за допомогою операторного методу: і р) комплексне число в чисельнику рівняння (2.10) розкладається і множиться на спряжене комплексне число знаменника в чисельнику і знаменнику. В результаті отримуємо наступний результат:

$$W(p) = \frac{\sqrt{3} \cdot (a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0)}{(g_a + g_b + g_c)^2 + \omega^2 \cdot (C_a + C_b + C_c)^2}, \quad (2.11)$$

де a_0, a_1, a_2, a_3 – коефіцієнти рівняння (характеристичного).

Для одержання характеристичного рівняння чисельник (2.11) повинен дорівнювати нулю.

$$a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0 = 0. \quad (2.12)$$

Коефіцієнти характеристичного рівняння для фази А будуть такими:

$$\begin{cases} a_3 = -\left[\frac{1}{2 \cdot w} \cdot (C_b + C_c) \cdot (C_a + C_b + C_c) \right]; \\ a_2 = \frac{1}{2 \cdot w} \cdot (C_b + C_c) \cdot (g_a + g_b + g_c) - \\ - \left[\frac{1}{2 \cdot w} \cdot (g_b + g_c) + \frac{1.5}{\sqrt{3}} \cdot (C_b + C_c) \right] \cdot (C_a + C_b + C_c); \\ a_1 = \left[\frac{1}{2 \cdot w} \cdot (g_b + g_c) + \frac{1.5}{\sqrt{3}} \cdot (C_b + C_c) \right] \cdot (g_a + g_b + g_c) - \\ - \frac{1.5}{\sqrt{3}} \cdot (g_b + g_c) \cdot (C_a + C_b + C_c); \\ a_0 = \frac{1.5}{\sqrt{3}} \cdot (g_b + g_c) \cdot (g_a + g_b + g_c). \end{cases} \quad (2.13)$$

Для фаз В і С коефіцієнти в характеристичному рівнянні такі ж, як і в рівнянні (2.13), за винятком того, що коефіцієнти $(g_c \pm g_a)$ і $(C_c \pm C_a)$ замінюються на $(g_b \pm g_c)$ і $(C_b \pm C_c)$ для фази В і $(g_a \pm g_b)$ і $(C_a \pm C_b)$ для фази С.

2.4 Інформативність обраної сукупності показників роботоздатності ізоляції

Для підтвердження правильності вибору показників стану ізоляції (діагностичних показників) було досліджено чутливість полюсів характеристичного рівняння (2.13) до модифікації діагностичних показників (параметри фазної ізоляції - активної провідності ізоляції ПЛ до землі) [14].

За допомогою цього дослідження можна якісно оцінити ступінь впливу обраних діагностичних показників на технічний стан ізоляції РП, що діагностується, на землю.

Кінцеві результати повинні надати інформацію для підтвердження правильності вибору набору діагностичних показників та визначення їх порядку за ступенем впливу.

Для зручності проведення дослідження була використана реальна розподільна мережа, що складається з повітряних ліній електропередачі 10 кВ протяжністю 70 км.

Було визначено нормативну потужність втрат в ізоляції для всіх трьох умов навколишнього середовища на основі її технічних даних за методикою [5]:

$$\Delta P_{із_i}^{норм} = I_{3_i}^2 \cdot I_i \cdot T_i \cdot \frac{L}{100}$$

де I_{3_i} – питома квадратичне значення струму замикання на землю для відповідного навколишнього середовища i -го рівня вологості, А/100км;

R_i – питома еквівалентне значення активного опору ізоляції для i -го рівня вологості відносно землі, Ом·100км;

T_i – тривалість з i -м рівнем вологості за рік погоди;

L – сумарна довжина розподільчої мережі. Для даної РМ:

$$\Delta P_{із_100\%}^{норм} = 23\,377 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_{із_80-100\%}^{норм} = 17\,910 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_{із_p80\%}^{норм} = 6\,643 \text{ Вт};$$

Вихідні умови дослідження:

1. Спочатку ефективний опір ізоляції фаз мережі відносно землі є симетричним $r_{A0}=r_{B0}=r_{C0}=100$ кОм. Відповідно, вводиться поняття нормального значення активної провідності ізоляції фази відносно землі. Поточне значення активної провідності, вплив якого на полюси аналізується, можна виразити як суму нормального значення і поточного значення його відхилення, $g_i=g_i+\lambda_i$.

2. При дослідженні впливу певного діагностичного індикатора на полюси припускається, що всі інші діагностичні індикатори залишаються незмінними при зміні поточного діагностичного індикатора.

3. Ємність фазової розв'язки відносно землі симетрична, дорівнює $C_a=C_b=C_c=C_f=0,5$ мкФ і не змінюється.

4. Максимальною зміною діагностичного показника вважається допустиме відхилення λ_i ефективної провідності, при якому в умовах максимальної продуктивності (2.2) і (2.3) ефективна провідність фази шунтового з'єднання (фаза А) дорівнює ефективній провідності досліджуваної фази (фаза В або С) (припускаючи, що пошкодження виникає одночасно в обох фазах і прогресує до межі максимальної продуктивності ізоляції) [12][15].

5. Для робочих умов (2.2) і (2.3) було проведено моделювання з метою визначення меж зміни активної провідності для заданих початкових умов:

- для робочих умов (2.3) при дослідженні впливу активної провідності:
 1. фази В – $\lambda_B = 5.39 \cdot 10^{-5}$;
 2. фази С – $\lambda_C = 6.692 \cdot 10^{-5}$;
- для робочих умов (2.2) при дослідженні впливу активної провідності фази В:

$$\lambda_{B_{100\%}} = 4,488 \cdot 10^{-4}$$

$$\lambda_{B_{80-100\%}} = 3,261 \cdot 10^{-4}$$

$$\lambda_{B_{p80}} = 9,565 \cdot 10^{-5}$$

фази С:

$$\lambda_{C_{100\%}} = 4,488 \cdot 10^{-4}$$

$$\lambda_{C_{80-100\%}} = 3,261 \cdot 10^{-4}$$

$$\lambda_{C_{p80}} = 9,565 \cdot 10^{-5}$$

Провідність трьох фаз збільшується одночасно і симетрично:

$$\lambda_{\text{сум}_{100\%}} = 2,439 \cdot 10^{-4}$$

$$\lambda_{\text{сум}_{80-100\%}} = 1,843 \cdot 10^{-4}$$

$$\lambda_{\text{сум}_{p80}} = 6,151 \cdot 10^{-5}$$

Через те, що ємність кожної фази симетрична, характеристичне рівняння є квадратичним і має наступні корені:

$$x_1 = \frac{g_a + g_b + g_c}{C_a + C_b + C_c} = \frac{g_n}{C_f};$$

$$x_2 = \frac{-\frac{1.5}{\sqrt{3}} \times (g_b + g_c)}{\frac{1.5}{\sqrt{3}} \times (g_b + g_c) + \frac{1.5}{\sqrt{3}} \times (C_b + C_c)} = \frac{g_n}{C_f}.$$
(2.14)

На основі наведених вище початкових умов записано для трьох випадків характеристичні рівняння:

1. При дослідженні впливу g_a :

$$-3\sqrt{3} \cdot C_f^2 \cdot x^2 + \sqrt{3} \cdot C_f \cdot \lambda \cdot x + 3\sqrt{3} \cdot g_n^2 + \sqrt{3} \cdot g_n \cdot \lambda = 0.$$
(2.15)

2. При дослідженні впливу g_b

$$-\left(\frac{3C_f}{2w} \cdot \lambda + 3\sqrt{3}C_f^2\right) \cdot x^2 + \left[\left(\frac{\lambda^2}{2w}\right) + \left(\sqrt{3}C_f + \frac{3g_n}{2w} - \frac{3\sqrt{3}C_f}{2}\right)\right] \cdot x + 3\sqrt{3}g_n^2 + 3\sqrt{3}g_n^2 + \frac{5\sqrt{3}g_n}{2} \cdot \lambda + \lambda^2 = 0.$$
(2.16)

3. При дослідженні впливу g_c :

$$\left(\frac{3C_f}{2w} \cdot \lambda + 3\sqrt{3}C_f^2\right) \times x^2 + \left[\left(\frac{-\lambda^2}{2w}\right) + \left(\sqrt{3}C_f - \frac{3g_n}{2w} - \frac{3\sqrt{3}C_f}{2}\right)\right] \times x + 3\sqrt{3}g_n^2 + \frac{5\sqrt{3}g_n}{2} \cdot \lambda + \lambda^2 = 0.$$
(2.17)

До діагностичних показників для оцінки чутливості полюсів та ранжування полюсів за ступенем їх впливу використовується метод визначення норми вектора відносних чутливостей [19].

У загальному вигляді норма вектора відносних чутливостей полюсів до зміни відповідного діагностичного показника (залежно від відхилення λ) має такий вид:

при дослідженні впливу g_a :

$$T_a(\lambda) = \text{const} = \sqrt{\left[\frac{\sqrt{3}C_f \cdot x_1 + \sqrt{3}g_n}{-6\sqrt{3}C_f \cdot g_n \cdot x_1} \right]^2 + \left[\frac{\sqrt{3}C_f \cdot x_2 + \sqrt{3}g_n}{-6\sqrt{3}C_f \cdot g_n \cdot x_2} \right]^2}, \quad (2.18)$$

при дослідженні впливу g_b :

$$T_b(\lambda) = \sqrt{\left[\frac{\left(\frac{-3C_f}{2w} \right) \cdot x_1^2 + \left(\frac{\lambda}{w} + \frac{3g_n}{2w} - \frac{\sqrt{3}C_f}{2} \right) \cdot x_1 + 2\lambda + \frac{5\sqrt{3}}{2}}{-6\sqrt{3}C_f \cdot g_n \cdot x_1} \right]^2 + \left[\frac{\left(\frac{-3C_f}{2w} \right) \cdot x_2^2 + \left(\frac{\lambda}{w} + \frac{3g_n}{2w} - \frac{\sqrt{3}C_f}{2} \right) \cdot x_2 + 2\lambda + \frac{5\sqrt{3}g_n}{2}}{-6\sqrt{3}C_f \cdot g_n \cdot x_1} \right]^2}, \quad (2.19)$$

при дослідженні впливу g_c :

$$T_c(\lambda) = \sqrt{\left[\frac{\left(\frac{3C_f}{2w} \right) \cdot x_1^2 + \left(\frac{-\lambda}{w} - \frac{3g_n}{2w} - \frac{\sqrt{3}C_f}{2} \right) \cdot x_1 + 2\lambda + \frac{5\sqrt{3}g_n}{2}}{-6\sqrt{3}C_f \cdot g_n \cdot x_1} \right]^2 + \left[\frac{\left(\frac{3C_f}{2w} \right) \cdot x_2^2 + \left(\frac{-\lambda}{w} - \frac{3g_n}{2w} - \frac{\sqrt{3}C_f}{2} \right) \cdot x_2 + 2\lambda + \frac{5\sqrt{3}g_n}{2}}{-6\sqrt{3}C_f \cdot g_n \cdot x_1} \right]^2}, \quad (2.20)$$

Норма вектора відносних чутливостей до зміни g_a є постійною і у всіх випадках дорівнює $T_a = 3,333 \ 104$. Це пов'язано з тим, що залежність коренів характеристичного рівняння від g_a є лінійною (сформована з урахуванням деформації пошкодження у фазі А), а тому диференціювання для визначення T_a дає константу.

Норма вектора відносних чутливостей до зміни g_b і g_c є функцією відхилення λ . Для візуальної оцінки чутливості кожного діагностичного показника побудуємо графік залежності.

Отже, набір діагностичних індикаторів обрано правильно (відносно землі потрібно тримати під контролем всі три активні провідності фаз мережі), а діагностична модель є рівнозначний.

Виявлено, що у випадку шунтового з'єднання у фазі А провідність g_c має найбільший вплив на характеристики ізоляції, тоді як g_b є дещо нижчою.

Вертикальною пунктирною лінією також показано межі працездатності фаз В і С за умов (2.3), а точніше - максимальне відхилення активної провідності. Як бачимо, вони різні і запас міцності більший для фази С. Така розбіжність з попередніми результатами пояснюється тим, що норма вектора чутливості не дає інформації про характер впливу показника, а є лише оцінкою ступеня впливу. Наприклад, результати математичного моделювання дійсно показали, що на напругу фази А і, відповідно, на струм у шунтувальному з'єднанні фази А при I_{3A} та потужність втрат ізоляції фази А при R_{i3A} більше впливає провідність g_b , ніж g_c . Однак, беручи до уваги абсолютне значення зміни напруги на фазі А, можна зробити висновок, що вплив g_c на цю напругу дещо вищий, ніж вплив g_b (іншими словами, збільшення g_c призводить до більш значного зниження U_A , ніж збільшення U_A при збільшенні g_b).

Інший важливий висновок полягає в тому, що умова ефективності (2.2) повинна використовуватися для оцінки ефективності ізоляції, коли активна провідність фази мережі збільшується симетрично відносно землі.

Це пов'язано з тим, що високий рівень асиметрії при виконанні умови (2.2) не гарантує чіткого виконання умови (2.3).

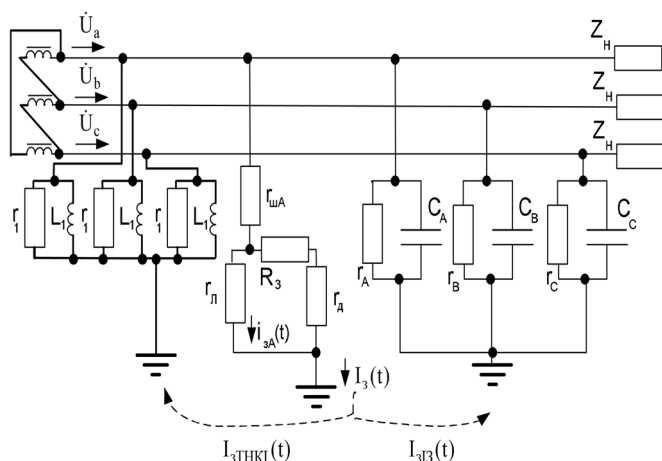


Рисунок 2.2 - Заступна схема для опису процесу виникнення шунтувального зв'язку в РМ і дотику людини до заземлених елементів електроустановки

Задача вибору показників технічного стану ізоляції полягає у розгляді всіх можливих електротехнічних характеристик ізоляції, виходячи з аналізу на основі вибраних критеріїв (безпеки експлуатації і економічності функціонування).

2.5 Вибір області зміни значень діагностичних показників при перевірці ефективності запропонованого методу

Аналіз допустимих змін значень діагностичних показників, обмежених умовами працездатності (2.2) і (2.3), є масштабним завданням через значну кількість змінних, включаючи параметри ізоляції відносно землі (активна провідність і ємність відносно землі). Таким чином, всього є шість змінних (g_a , g_b , g_c , C_a , C_b і C_c).

Для спрощення дослідження зроблено наступні припущення:

1. Припустимо, що ємність фази мережі відносно землі постійна і симетрична (або майже симетрична).

У цьому випадку кількість змінних скорочується до трьох, але цього недостатньо, оскільки при побудові залежностей $F(g_a, g_b, g_c)$ матимемо справу з чотиривимірним простором, що є дуже складним завданням. Тому вводяться наступні припущення:

2. При аналізі змін g_a , g_b та g_c при виконанні умов (2.2) та (2.3) передбачається, що пошкодження ізоляції (виникнення шунтових з'єднань із землею), яке є найпоширенішим пошкодженням у реальних розподільчих мережах, відбувається синхронно лише у двох фазах мережі (наприклад, А та В), а провідність третьої фази (наприклад, С) залишається незмінною.

Отже, зменшується кількість змінних до двох, і можна проводити у тривимірному просторі побудову залежностей $F_{g_c = \text{const}}(g_a, g_b)$.

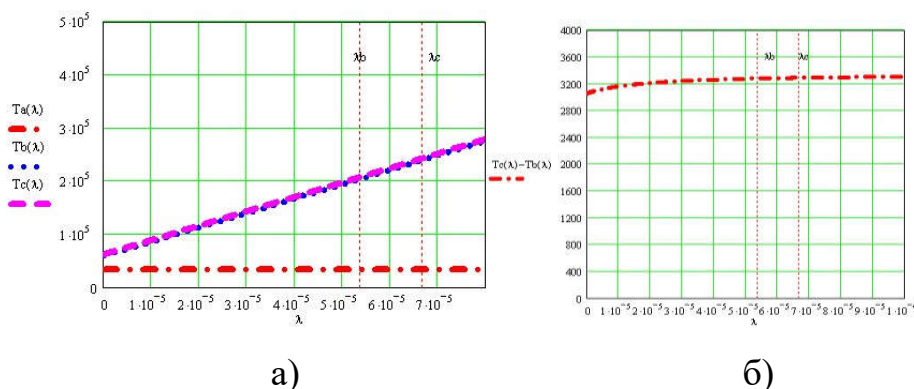


Рисунок 2.3 - Перевірка інформативності вибору показників роботоздатності ізоляції

Залежності норм векторів відносних чутливостей від відхилення:

а – загальний графік залежностей;

б – функція різниці норми чутливості до g_c і норми чутливості до g_b

Вихідні умови дослідження такі:

1. Розглянемо повітряну мережу 10 кВ довжиною 70 км.
2. Ємність полярної фази мережі на 5% більша за ємність проміжної фази ($C_a = C_b = 0,5$ мкФ, $C_c = 0,475$ мкФ). Це враховує різну висоту підвісу проводів у полярній та проміжній фазах повітряних ліній.

3. Типові значення потужності, що втрачається в ізоляції внаслідок протікання струму через ґрунт, розраховані за методикою [21] лише для двох екстремальних значень вологості навколишнього середовища і становлять: під час опадів - 23,377 кВт, під час сухості - 6,642 кВт.

4. Початкове значення активного опору ізоляції до землі становить $r_{A0}=r_{B0}=r_{C0}=100$ кОм.

5. Внаслідок пошкодження в суху пору року, в умовах експлуатації, шунтуючі з'єднання виникли одночасно у двох фазах мережі (А та В), але з різною інтенсивністю.

В результаті аналізу початкових умов та множини можливих станів ізоляції в пакеті прикладних програм «MathCAD» для обробки результатів дослідження та їх графічного представлення створено математичну модель у тривимірному просторі та алгоритм генерації залежностей працездатності від зміни діагностичних показників (2.2) та (2.3).

Для зручності аналізу отриманих залежностей замість ефективної провідності фазної ізоляції відносно землі використовується її обернена величина - ефективний опір фазної ізоляції відносно землі.

Наступні залежності були встановлені таким чином:

1. Залежності (суміщені поверхні) для сухих погодних умов, коли не спостерігається симетричного падіння ефективного опору між фазної ізоляції.
2. У разі вологої та дощової погоди спостерігається симетричне зменшення ефективного опору міжфазного ізолятора відносно землі.

Для того, щоб краще охарактеризувати застосування методики [16] у запропонованому методі, залежність величини втрат ізоляції через струми витоку на землю від повного опору мережі на землю R_0 , $R_{iz} = f(R_0)$. Ефективний опір ізоляції фази мережі відносно землі вважається симетричним. Ця залежність відображає діапазон зміни R_0 , який показує межі працездатності ізоляції при різних рівнях вологості навколишнього середовища. Тому для даної мережі можна встановити межі зміни R_0 при симетричному зменшенні опору ізоляції відносно землі для різних умов навколишнього середовища [16][17][18].

Використовуючи умову консервативності (2.2.1), можна обмежити зменшення ефективного опору ізоляції кожної фази відносно землі.

Для аналізу можливості розмежування працездатного та непрацездатного стану ізоляції для кожної фази побудовано залежності $R_{isA} = F(r_a, r_B)$, $R_{isB} = F(r_a, r_B)$ та $R_{isC} = F(r_a, r_B)$.

2.6 Рівнозначність моделі для визначення умов роботоздатності

Були використані наступні припущення при будові моделі:

- 1) несправності не можуть виникати одночасно в більш ніж одній фазі мережі (наприклад, А і В);
- 2) рівень симетричного збільшення ефективної провідності ізоляції однієї фази не повинен перевищувати значення шунтової провідності однієї з пошкоджених фаз;
- 3) для кожної фази мережі можливе максимум одне шунтове з'єднання;
- 4) якщо людина доторкнеться до заземленої частини електроустановки, максимальне пошкодження отримає одна з фаз мережі, що йде на землю;
- 5) тіло людини в електричному колі моделюється відповідно до вимог [7].
- 6) ємність фази мережі відносно землі симетрична і не змінюється за певних умов експлуатації.

Для визначення похибки запропонованого методу визначення ефективності ізоляції використано метод обчислювального експерименту, який полягає у порівнянні двох моделей: узагальненої (без припущень) та розрахункової (з припущеннями). При цьому було побудовано обчислювальний математичний апарат з використанням програмного забезпечення MathCAD для визначення залежностей відносних похибок визначення адіабатичного показника ефективності від параметрів, на які впливають припущення. Отримані залежності можуть бути використані для аналізу ступеня впливу припущень на точність методу [3].

Наше дослідження показало, що припущення 1-5 суттєво не впливають на визначення технічних умов, тобто умов ефективності (2.2) та (2.3).

По-шосте, дослідимо залежність похибки визначення струму та потужності за математичними моделями (2.7) та (2.8) від ступеня несиметрії ізоляційної ємності $K_c = C_A/C_B$ відносно землі в крайній та проміжній фазах.

Побудуємо графік:

1) $\delta\%(I_{3C})=f(K_c)$, $\delta\%(I_{3B})=f(K_c)$, $\delta\%(I_{3A})=f(K_c)$ для аналізу математичної моделі(2.7);

2) $\delta\%(\Delta P_{13A})= f(K_c)$, $\delta\%(\Delta P_{13B})= f(K_c)$, $\delta\%(\Delta P_{13\Sigma})= f(K_c)$, $\delta\%(\Delta P_{13C})= = f(K_c)$ для аналізу математичної моделі (2.8).

Вихідні умови дослідження:

1. Ефективний опір ізоляції між фазою та землею вважається незмінним і становить 10 кОм для пошкодженої фази, 20 кОм для непошкодженої фази і 100 кОм для непошкодженої фази.

2. K_c поступово зростає до 1,05.

3. На першому етапі дослідження ємність ізоляції фаз мережі відносно землі є симетричною і становить 0,5 мкФ для кожної фази.

Ми будемо використовувати симетричне відносне збільшення ємності, δ_C , як змінну. Отже, тепер $C_a=C_a (1+\delta_C/100)$, $C_b=C_b (1+\delta_C/100)$ і $C_c=C_c (1+\delta_C/100)$.

Наведемо графік цих залежностей нижче:

1) $\delta\%(I_{3B})=f(\delta_C)$, $\delta\%(I_{3A})=f(\delta_C)$, $\delta\%(I_{3C})=f(\delta_C)$ для аналізу математичної моделі (2.7);

2) $\delta\%(\Delta P_{13C})= f(\delta_C)$, $\delta\%(\Delta P_{13A})= f(\delta_C)$, $\delta\%(\Delta P_{13B})= f(\delta_C)$, $\delta\%(\Delta P_{13\Sigma})= f(\delta_C)$ для аналізу математичної моделі (2.8).

Розгляд похибок, отриманих в результаті застосування другого припущення, проводиться аналогічно.

2.7 Висновок

1. Застосування умови ремонтпридатності (2.3) є ефективним способом обмеження множини ремонтпридатних умов за критеріями експлуатаційної безпеки, незалежно від величини несиметрії параметрів ізоляції відносно землі. Симетричне зменшення опору ізоляції відносно землі (у п'ять разів зі 100 кОм до 20 кОм) практично не впливає на струм у шунтувальному приєднанні пошкодженої фази в досліджуваному діапазоні. Цей ефект позитивно проявляється лише при дуже значному симетричному зменшенні опору ізоляції активної фази відносно землі (в діапазоні нижче 10 кОм), в результаті чого умова працездатності (2.2) перестає виконуватися.

2. Доцільніше використовувати умову працездатності (2.2) для обмеження симетричного збільшення провідності міжфазного ізолятора відносно землі (за рахунок впливу навколишньої вологи та бруду на поверхню ізолятора). Таким чином, можна обмежити сукупність умов економічної експлуатації та загальний опір ізоляції R_0 відносно землі до рівня симетричного зменшення опору. Це є вагомим аргументом для побудови системи моніторингу ізоляції на основі вимірювання R_0 та його порівняння із заданим значенням у вигляді питомого опору для різних рівнів вологості навколишнього середовища, розрахованого для даної розподільчої мережі.

3. Умова доступності (2.1) може бути використана для обмеження несиметричного збільшення ефективної провідності ізоляції відносно землі для кожної фази мережі. Слід зазначити, що характер залежностей $F(r_a, r_b) = F(r_a, r_b)$ настільки складний і неоднозначний, що в даному випадку оптимальним є обмеження збільшення провідності ізоляції найбільш пошкодженої фази (фази А в даній роботі) відносно землі. Таким чином, при вимірюванні активної провідності ізоляції окремих фаз мережі можна обмежити множину працездатних станів ізоляції (2.1), використовуючи критерій працездатності РМ.

Таким чином, завдання полягає в розробці повноцінного методу контролю параметрів ізоляції окремих фаз мережі відносно землі, щоб функціональні можливості запропонованого методу визначення працездатності ізоляції могли бути реалізовані в повній мірі.

4. Умови ефективності (2.2) та (2.3) чітко виконуються з точки зору безпеки та ефективності в суху погоду. 3) чітко виконуються в суху погоду. При 100% відносній вологості (під час опадів) умови (2.2) і (2.3) не виконуються одночасно, оскільки межа продуктивності, виражена як 23 377 кВт, є занадто високою, а вимоги до технічних умов ізоляції - занадто низькими. У цьому випадку першочерговим пріоритетом є забезпечення безпеки експлуатації обладнання.

5. Несиметрія ізоляційних ємностей фаз мережі відносно землі має досить слабкий вплив на розрахунок. Так, у припущенні, що ізоляційні ємності фаз відносно землі симетричні, при граничній несиметрії $K_c = 1,05$ максимальна похибка методу становить: при визначенні $I_{зв}$ - 1,5% - для математичної моделі (2.7); при визначенні $R_{зв}$ - 3% - для математичної моделі (2.8).

Враховано додатковий граничний випадок, коли несиметрія ємностей впливає на похибку методу у випадку ОЗЗ (пошкодження ізоляції тільки в одному заземлювачі фази мережі) - 3,5% для моделі (2.7) (при визначенні $I_{зв}$), а також 3,5% для математичної моделі (2.8) (при визначенні $R_{зв}$). Похибка для математичної моделі (2.8) становить 3,5%. Ця похибка вважається прийнятною для запропонованого методу.

3 РОЗРОБКА МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ РОБОТОЗДАТНОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ

3.1 Моделювання пошкоджень ізоляції та процесів експлуатації мережі і визначення вимог до методів контролю ізоляції

Пошкодження ізоляції для моделювання розглядаються такі умови пошкодження: у фазі А виникає шунтове з'єднання з опором заземлення 17,5 кОм; під впливом струмів, що стікають у землю, стан ізоляції в місці пошкодження погіршується і виникають умови, за яких виникає дугове замикання в ізоляції з опором дугового проміжку до 100 Ом; виникає переривчаста дуга. Займання і гасіння дуги відбувається один раз в кожному періоді промислової частоти і відбувається в момент, коли напруга пошкодженої фази відносно землі досягає значення, близького до амплітудного. Погасання дуги відбувається в момент, коли струм короткого замикання перевищує нуль.; перенапруги, спричинені дуговими струмами, створюють умови для пошкодження ізоляції у фазі В. Як правило, виникають шунтові з'єднання з опором 1,7 кОм, що призводить до двофазного замикання на землю; для того, щоб дослідити вплив симетричного зменшення активного опору ізоляції на землю (через вологу), було змодельовано п'ятикратне зменшення активного опору ізоляції фази на землю до 20 кОм [9].

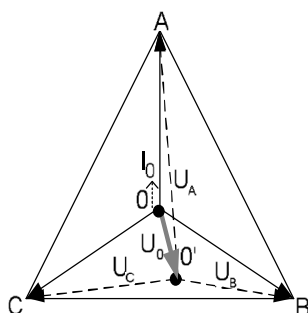


Рисунок 3.1 – Векторна діаграма при реалізації умови дослідження 1

U_A, U_B, U_C – напруги фаз мережі відносно землі;

I_0 – струм стікання на землю через шунтувальний зв'язок

U_0 – напруга зміщення нейтралі;

Видно, коли відбувається шунтування, з'являється напруга зсуву нейтралі U_0 і струм I_0 протікає через цю напругу на землю.

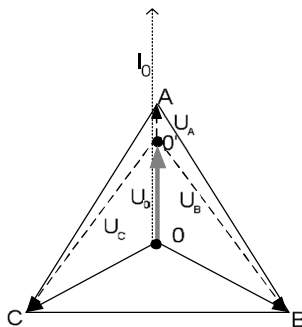


Рисунок 3.2 – Векторна діаграма при виконанні умови дослідження 2

На рисунку 3.2 показано, що дугове замикання на землю, спричинене низьким перехідним опором у фазі А, призводить до підвищення напруги у фазах В і С до рівня лінійної напруги, що призводить до пошкодження ізоляції заземлення в одній з цих фаз і виникнення двофазного замикання на землю.

Дугові замикання зазвичай супроводжуються періодичним гасінням і повторним запалюванням дуги, в даному випадку це перехідний процес. В результаті можуть виникати перенапруги. Розглянемо цей режим більш детально.

Для дослідження перехідних процесів була створена спеціальна комп'ютерна модель трифазної мережі 10 кВ з ізолюваною нейтраллю в симуляторі електричних кіл. При цьому над її структурними елементами виконувалися відповідні операції для імітації процесів, що відбуваються в мережі за умов 1) - 5).

Спочатку проаналізуємо динаміку зміни в часі напруг зсуву землі та нейтралі фази А. При цьому моделюються умови 1), 2) і 3).

При однократному запалюванні дуги в кожному циклі промислової частоти варіація напруги зсуву нейтралі U_0 значно зростає і її амплітудне значення досягає 10 кВ приблизно через 0,2 - 0,3 секунди після початку дугового замикання.

Тепер розглянемо процес утворення шунтового з'єднання у фазі В за умови 4).

Як бачимо, при утворенні шунтового з'єднання на фазі В і запаленні дуги на фазі А коливання напруги на фазі В відносно землі значно зростають, досягаючи амплітудних значень до 13,7 кВ в перший момент дугового замикання, і мають тенденцію до зменшення. Це призводить до подальшого погіршення ізоляції фази В і створює умови для виникнення двофазних замикань на землю [11][18].

Дослідимо, як зміна вологості навколишнього середовища, що проявляється у симетричному зменшенні ефективного опору ізоляції відносно ґрунту, впливає на перехідні процеси в мережі під час пошкодження ізоляції.

У цьому випадку умова 5) враховується для двох умов, що передували пошкодженню.

У цьому випадку симетричне зменшення ефективного опору ізоляції (через вологість) призводить до погіршення умов горіння дуги, і для її запалювання рівень ізоляції фази А повинен бути значно гіршим, ніж у попередньому випадку. Різких коливань напруги зсуву нейтралі більше не спостерігається.

Тому можна з упевненістю сказати, що симетричне зменшення опору ізоляції призводить до зниження рівня перенапруги в разі виникнення дуги замикання на землю.

Аналогічний ефект спостерігається при замиканні на фазу В і виконанні умови 4), але вплив симетричного зменшення ефективного опору ізоляції на перенапругу у фазі В значно менший, ніж у попередньому випадку.

Згідно з теорією симетричних складових [10], при розгляді замикань на землю можна виділити системи напруги нульової послідовності з гармоніками, кратними трьом. У випадку міжфазних замикань через перехідний опір важливо також розглядати системи напруги зворотної послідовності (п'ята, сьома та одинадцята гармоніки).

Проаналізуємо вплив цих процесів з точки зору можливості генерації перенапруг на стан ізоляції РМ: Цей вплив є загалом несприятливим, особливо для електродвигунів.

Оскільки ізоляція розподільчої мережі має ємнісну складову реактивної провідності, ємність ізоляції може резонувати, наприклад, з індуктивністю або з індуктивністю елементів, приєднаних до мережі проводів і нефазних режимів, що падають на землю, таких як силові трансформатори в розподільчій мережі [15, 22]. Однак, слід зазначити, що є малопотужними і не можуть резонувати з великою ємністю відгалуження мережі, навіть якщо їхня робоча частота становить 50 Гц. Дослідження з використанням програмного забезпечення MathCAD (пошук параметрів) показали, що можуть резонувати на основній частоті тільки тоді, коли вони включені в мережу малої довжини, наприклад, з коротким фідером. Ця теза була підтверджена дослідженнями [16].

Вищі гармоніки не можуть призвести до резонансу та пропускну здатністю мережі при нормальній роботі мережі.

Розглянемо випадок, коли провід падає на землю і параметри мережі резонують з індуктивністю силового трансформатора 10(6)/0,4 кВ.

За такого варіанту пошкодження ізоляції, при кратності перенапруг до 3,8 Un у фазі В, ферорезонанс може виникнути у зворотній фазі змінного струму. Це неминуче призводить до пробоя ізоляції та перенапруги.

Крім того, індуктивність є нелінійною і може змінюватися в широкому діапазоні під час перехідних перенапруг, що може призвести до сильного резонансу з мережею в разі дугового замикання. Дослідження [17-21] підтверджують цю тезу.

Розглянемо процес генерації ферорезонансу при дуговому замиканні на землю.

У роботі [21] зроблено два важливі висновки щодо необхідних умов існування ферорезонансу в дузі замикання на землю:

- при частоті 25 Гц стаціонарні процеси, що виникають після короткочасного перенапруження (в тому числі після замикання фази на землю в разі перенапруги);;
- постійне замикання на землю з паузою понад 20 мс. У цьому випадку кожне наступне замикання виникає, коли попереднє замикання все ще активне і подає живлення.

Детально оцінено вплив перенапруги в мережі на резонансні процеси в роботі [23]. Автори проаналізували вплив параметрів мережі на перехідні процеси. Це дозволило оцінити кратність перенапруг, що генеруються від дугових замикань на землю.

Перехідні процеси були розраховані за допомогою операторного методу. Схема на рисунку 3.3.а) використовується під час загоряння дуги, а схема на рисунку 3.3.б) - після гасіння дуги.

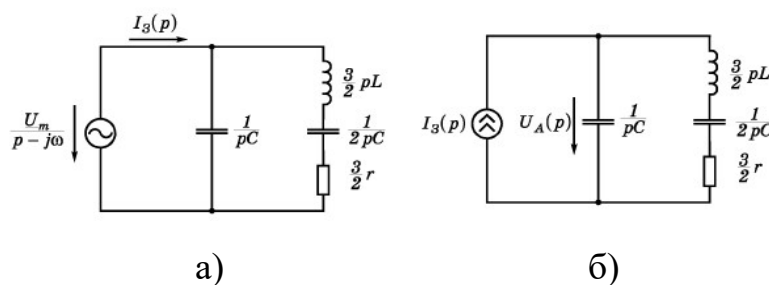


Рисунок 3.3 – Розрахункові схеми струму дугового замикання на землю:
а – при горінні дуги; б – після погасання дуги

Визначено формулу залежності напруги зсуву нейтралі від параметрів альтернативної схеми мережі та отримано якісну оцінку її впливу на перехідний процес.

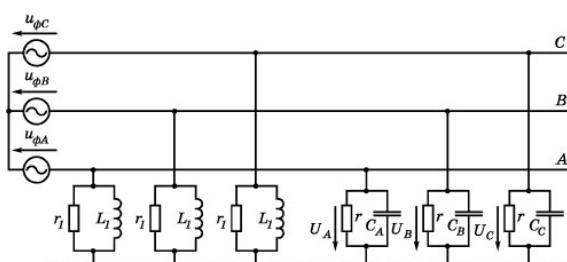


Рисунок 3.4 – Схема трифазної мережі з врахуванням опорів трансформатора напруги

Водночас, метод моніторингу ізоляції повинен бути адаптований для контролю параметрів ізоляції окремих етапів РМ. Саме ці методи дозволяють достовірно оцінити перебіг процесу ізоляції РП та визначити його ефективність. Ці методи також повинні контролювати як симетричне зниження ефективного опору ізоляції відносно землі, так і виникнення раптових замикань в окремих фазах [5].

3.2 Розробка методу безперервного моніторингу ізоляції

Розробка методу безперервного моніторингу ізоляції на основі моніторингу ефективного опору ізоляції та напруги фаз мережі відносно землі

Згідно з рівнянням (2.1), щоб визначити величину втрати ізоляції через струм витоку на землю, необхідно виміряти фазні напруги мережі U_A , U_B і U_C та ефективні провідності g_a , g_b і g_c ізоляції фаз мережі до землі. Оскільки безперервний моніторинг ізоляції кожної фази є складним завданням, замість ефективної провідності ізоляції фази до землі контролюються фазні напруги мережі U_A , U_B і U_C та загальний ефективний опір ізоляції R_0 до землі, а ефективна провідність ізоляції фази мережі до землі розраховується за допомогою:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1,5 \cdot U_f}{\sqrt{(1/R_0)^2 + (\omega C - B_L)^2}} \times \\ \times \sqrt{\left[g_b + g_c + \frac{\omega C_0 (K_c - 1)}{3\sqrt{3}} \right]^2 + \left[\frac{g_b - g_c}{\sqrt{3}} + \frac{\omega C_0 \cdot (1 + K_c) - 2B_L}{3} \right]^2} = U_A; \\ \times \frac{1,5 \cdot U_f}{\sqrt{(1/R_0)^2 + (\omega C - B_L)^2}} \times \\ \sqrt{\left[g_a + g_c \right]^2 + \left[\frac{g_c - g_a}{\sqrt{3}} + \frac{2\omega C_0 \cdot K_c - 2B_L}{3} \right]^2} = U_B; \end{array} \right. \quad (3.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \times \frac{1,5 \cdot U_f}{\sqrt{(1/R_0)^2 + (\omega C - B_L)^2}} \times \\ \sqrt{\left[g_a + g_b + \frac{\omega C_0 \cdot (K_c - 1)}{3\sqrt{3}} \right]^2 + \left[\frac{g_a - g_b}{\sqrt{3}} + \frac{\omega C_0 \cdot (1 + K_c) - 2B_L}{3} \right]^2} = U_C, \end{array} \right.$$

де $K_c = C_{кр} / C_{сер}$ - коефіцієнт несиметрії ємностей заземлення кінцевих фаз мережі відносно середньої ємності (значення $K_c = 1$ може бути в межах 1,05);

C_0 - сума ємностей "земля-земля" мережі (попередньо виміряна, наприклад, методом моніторингу ізоляції з використанням режиму, який зміщує нейтраль мережі до центру вектора лінійної напруги, де $C_0 = \text{const}$ вважається незмінним для подальших вимірювань);

B_L - сумарна реактивна провідність відносно землі всіх індуктивних елементів, підключених до РМ.

У розділі 2 (див. підрозділ 2.6) детально розглянуто вплив різних припущень на похибку визначення сили струму витоку ізоляції через струми витоку на землю: Для $C_0 = \text{const}$ і $K_c = 1$ похибка не перевищує 3,5%. Ця похибка є прийнятною для задачі контролю (допускається до 10 %). Можна спростити:

$$\begin{cases} \frac{1,5 \cdot U_f}{\sqrt{(1/R_0)^2 + (\omega C - B_L)^2}} \cdot \sqrt{[g_b + g_c]^2 + \left[\frac{g_b - g_c}{\sqrt{3}} + \frac{2\omega C_0 \cdot K_c - 2B_L}{3} \right]^2} = U_A; \\ \frac{1,5 \cdot U_f}{\sqrt{(1/R_0)^2 + (\omega C - B_L)^2}} \cdot \sqrt{[g_a + g_c]^2 + \left[\frac{g_a - g_c}{\sqrt{3}} + \frac{2\omega C_0 \cdot K_c - 2B_L}{3} \right]^2} = U_B; \\ \frac{1,5 \cdot U_f}{\sqrt{(1/R_0)^2 + (\omega C - B_L)^2}} \cdot \sqrt{[g_a + g_b]^2 + \left[\frac{g_a - g_b}{\sqrt{3}} + \frac{2\omega C_0 \cdot K_c - 2B_L}{3} \right]^2} = U_C; \end{cases} \quad (3.2)$$

Тому при вимірюванні U_A , U_B , U_C , U_f і R_0 бажано максимально спростити визначення потужності втрат ізоляції через струм витоку на землю. Наприклад, для визначення R_{iz} рекомендується використовувати наступну формулу:

$$\Delta P_{iz\Sigma} = \frac{U_f}{R_0 \cdot (U_A + U_B + U_C)} \cdot (U_A^2 + U_B^2 + U_C^2) \quad (3.3)$$

Похибка рівняння (3.3) була досліджена шляхом моделювання зміни активної провідності (активного опору) фази мережі відносно землі в «MathCAD». При цьому досліджувався ряд варіантів зміни параметрів ізоляції::

1. Опір заземлення змінюється між фазами А і В, тоді як ємність заземлення симетрична ($K_c = 1$) і не змінюється у фазі С
2. В той час як опір заземлення змінюється між фазами В і С, ємність заземлення симетрична ($K_c = 1$) і не змінюється у фазі А
3. Опір заземлення змінюється між фазами А і С, тоді як ємність заземлення симетрична ($K_c = 1$) і не змінюється у фазі В

4. Опір заземлення змінюється між фазами А і В і залишається незмінним у фазі С з $K_c = 1,05$

5. Опір землі змінюється у фазах В і С і не змінюється у фазі А при $K_c = 1,05$ [23].

6. При $K_c = 1,05$ у фазі В, опір заземлення змінюється між фазами А і С і залишається незмінним.

В результаті сумарна відносна похибка цього методу при визначенні величини втрат ізоляції через струми витoku на землю не перевищує $\xi < 8,5$ відсотка, що є цілком прийнятним.

Результати дослідження показали, що при використанні цього методу контролю ізоляції також виконуються умови працездатності згідно з нормами безпеки: при заданих обмеженнях і допущеннях. Похибка цього методу не перевищує $\xi < 3,5$ відсотка [14].

За допомогою датчиків 8 і 9 вимірюються значення фази і напруги, U_A , U_V , U_C , U_f , I_0 , R_0 та струму I_0 і опору R_0 , які обробляються мікропроцесорним контролером і подаються на вхід, який реалізує алгоритм розрахунку методу у вигляді мікропрограмних інструкцій. На наступному етапі мікроконтролер визначає ефективність ізоляції РМ на основі подальших розрахунків і видає результат.

Для визначення загальної ємності ізоляції мережі відносно землі використовуються наступні залежності:

$$C_0 = \frac{1}{\omega \left[X_{\text{ТНКИ}} - \sqrt{\left(\frac{I_0 \cdot n_{\text{ТНКИ}}}{\left(\frac{2U_A^2 - (U_C^2 + U_B^2)}{6U_f} \right)^2 + \left(\frac{U_C^2 + U_B^2}{2\sqrt{3}U_f} \right)^2} \right)^2 - R_0} \right]} \quad (3.4)$$

де I_0 – струм, виміряний в нейтралі ТН контролю ізоляції (НТМИ), А;

$X_{\text{ТНКИ}}$ – індуктивний опір сумарний всіх обмоток ТН контролю ізоляції, Ом;

$n_{\text{ТНКИ}}$ – кількість ТН контролю ізоляції в мережі;

R_0 - активний опір ізоляції, Ом;

U_f – фазна напруга мережі, В.

Формула (3.4) матиме наступний вигляд при наявності в мережі ДГР:

$$C_0 = \frac{1}{\omega \left[X_{\text{ТНКИ}} - \sqrt{\left(\frac{I_0 \cdot \left(n_{\text{ТНКИ}} + \frac{X_{\text{ТНКИ}}}{X_{\text{ДГР}}} \right)}{\left(\frac{2U_A^2 - (U_C^2 + U_B^2)}{6U_f} \right)^2 + \left(\frac{U_C^2 + U_B^2}{2\sqrt{3}U_f} \right)^2} \right)^2} - R_0 \right]} \quad (3.5)$$

де $X_{\text{ДГР}}$ – індуктивний опір обмоток ДГР, Ом.

Прилад вносить похибки при вимірюванні напруги та повного опору ізоляції відносно землі. На точність вимірювання цих параметрів впливає клас точності вимірювального приладу і, як правило, рівень вищих гармонік в мережі, які можуть бути досить великими і викликати похибки до 2% при вимірюванні напруги і до 2,5% при вимірюванні струму.

Таким чином, загальна відносна похибка вимірювання напруги має дві складові:

$$\varepsilon_{U\Sigma} = \varepsilon_V + \varepsilon_{\text{В.Г.}}$$

де ε_V – відносна максимальна похибка вимірювача напруги;

$\varepsilon_{\text{В.Г.}}$ – похибка вимірювання напруги, зумовлена впливом вищих гармонік.

Те ж саме можна сказати і про струмові характеристики:

$$\varepsilon_{I\Sigma} = \varepsilon_I + \varepsilon_{\text{В.Г.}}$$

При використанні датчика для отримання значення ВАХ і вимірювання ефективного опору ізоляції щодо землі виникають такі відносні похибки:

$$\varepsilon_R = \frac{\varepsilon_{I\Sigma}}{\varepsilon_{U\Sigma}}.$$

Отже, застосування методу середнього квадратичного до рівняння (3.3) дає вираз для сумарної похибки вимірювання.

$$\varepsilon_{\Sigma} = \sqrt{\varepsilon_{U\Sigma}^2 + \left(\frac{3\varepsilon_{U\Sigma}}{\varepsilon_{I\Sigma}}\right)^2 + 6\varepsilon_{U\Sigma}^2} = \sqrt{7\varepsilon_{U\Sigma}^2 + \frac{9\varepsilon_{U\Sigma}^2}{\varepsilon_{I\Sigma}^2}}$$

Якщо припустити, що кластеризація датчиків напруги і струму (для вимірювання ВАХ) дорівнює 1, а похибки від впливу вищих гармонік струму і напруги становлять 2% і 2,5% відповідно, тоді сумарна похибка діагностичного комплексу не перевищуватиме $\varepsilon_{\Sigma} = 8.34\%$.

3.3 Розроблення методу регулярного моніторингу параметрів фазної ізоляції в розподільчих мережах.

Основні положення цього методу детально описані в [70].

Цей метод перевірки ізоляції ґрунтується на принципі зміщення нульової точки трикутника напруг до центру вектора лінійної напруги. У цьому випадку напруга зсуву нейтралі:

$$U_0 = -\frac{U_{\phi}}{2}$$

Це набувається шляхом включення в мережу зіркоподібних провідників, які налаштовані в резонанс послідовно відносно землі.

Таким чином, провідність додається до основної фази та фази заземлення

$$Y_D = \frac{1}{r_{др} + j\omega L - \frac{j}{2\omega C}}$$

Струм I_0 , що протікає в нижньому промені зірочки, і кут зсуву відносно напруги мережі 0 вимірюються за допомогою ВАФ (з урахуванням цієї напруги і перетворення 1800 витків). Перемикачі Q_1 , Q_2 і Q_3 замкнуті попарно, Q_2 і Q_3 для вимірювання фази А, Q_1 і Q_3 для вимірювання фази В і Q_1 і Q_2 для вимірювання фази С.

В результаті розмикання зірочок на фазах В і С напруга на землі фази А підвищується до $1,5 U_{\phi}$, а напруга на землі фаз В і С знижується до $0,5 U_{\phi}$, що є зворотною фазою незалежно від провідності фази мережі (див. Рисунок 3.6 а).

Така ж ситуація спостерігається, коли зірочка увімкнена для кожної з двох інших парних комбінацій фаз.

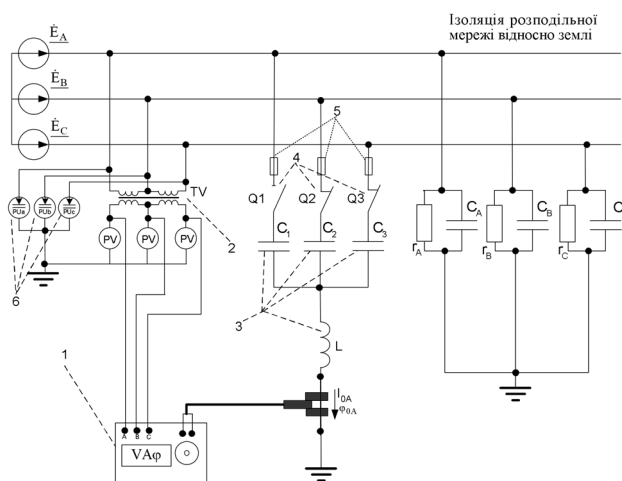


Рисунок 3.5 – Схема пристрою контролю ізоляції окремих фаз (відносно землі)

Всі вимірювання ВАФом проводяться відносно лінійної напруги $U_{BA}=U_{л}$.

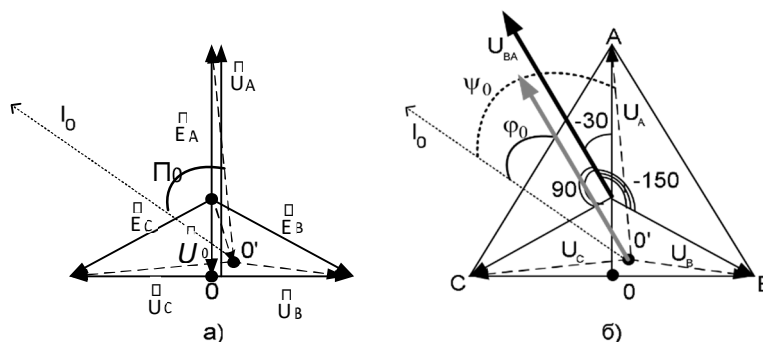


Рисунок 3.6 – Векторна діаграма до методу контролю ізоляції

а) - трактовка принципу нейтрального зсуву. б) - трактовка формули для визначення параметрів фазового розділення на основі вимірювань ВАФу.

Слід зазначити, що ідеалізована ситуація, коли нуль O трикутника напруги знаходиться в центрі вектора лінійної напруги, на практиці неможлива. Існує декілька факторів, які можуть призвести до зміщення нуля O трикутника напруг O в точку O' : несиметрія лінійних напруг мережі та наявність активного опору дроселя $r_{др}$. [19][21]

Параметри ізоляції відповідно до векторної діаграми, можуть бути отримані шляхом одночасного розв'язання наступних лінійних рівнянь щодо активної провідності та ємності фази мережі відносно землі.

$$\begin{cases} g_a + \frac{\omega}{\sqrt{3}} \cdot (C_b - C_c) = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{0A}}{1.5 U_\pi} \cdot \cos(\varphi_{0A} - 30^\circ); \\ g_b + \frac{\omega}{\sqrt{3}} \cdot (C_c - C_a) = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{0B}}{1.5 U_\pi} \cdot \cos(\varphi_{0B} - 150^\circ); \\ g_c + \frac{\omega}{\sqrt{3}} \cdot (C_a - C_b) = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{0C}}{1.5 U_\pi} \cdot \cos(\varphi_{0C} + 90^\circ); \\ \frac{g_a - g_b}{\sqrt{3}} + \omega \cdot C_a - \frac{B_L}{3} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{0A}}{1.5 U_\pi} \cdot \cos(\varphi_{0A} - 30^\circ); \\ \frac{g_b - g_c}{\sqrt{3}} + \omega \cdot C_b - \frac{B_L}{3} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{0B}}{1.5 U_\pi} \cdot \cos(\varphi_{0B} - 150^\circ); \\ \frac{g_c - g_a}{\sqrt{3}} + \omega \cdot C_c - \frac{B_L}{3} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{0C}}{1.5 U_\pi} \cdot \cos(\varphi_{0C} - 30^\circ), \end{cases} \quad (3.6)$$

де I_{0A} , I_{0B} , I_{0C} – вимірні значення струму в зірочці провідностей;

φ_{0A} , φ_{0B} , φ_{0C} – кути зміщення між струмом в зірочці I_0 і лінійною напругою U_{BA} ;

g_A , g_B , g_C – активні провідності фаз РМ;

U_π – лінійна напруга джерела живлення;

C_A , C_B , C_C – ємності фаз РМ;

ω – кутова частота мережі;

B_L – реактивна провідність до землі всіх індуктивних елементів, підключених до РМ.

Якщо різниці $C_B - C_C$, $C_C - C_A$ і $C_A - C_B$ прирівняти до нуля, то систему рівнянь (3.6) можна розв'язати точним методом. Тоді, виходячи з одночасних рівнянь (3.6), можна легко визначити C_A , C_B і C_C , а також g_A , g_B і g_C , відповідно.

У цьому випадку пропонується визначити зв'язок між C_A , C_B і C_C шляхом додавання додаткової змінної ємності dC .

Результати вимірювань, отримані шляхом додавання додаткової змінної ємності, представлені як функція dC :

$$\frac{\sqrt{3} \cdot I_{0A}}{1.5 U_B} \cdot \cos(\varphi_{0A}) = f(dC) \rightarrow \min \quad (3.7)$$

Всього, може бути лише 6 комбінацій співвідношень між C_A , C_B , C_C :

- $C_A > C_B > C_C$ – визначимо лише g_B ;

- $C_B > C_c > C_a$ – визначимо лише g_c ;
- $C_c > C_a > C_B$ – визначимо лише g_a ;
- $C_a > C_c > C_B$ – визначимо g_B і g_a , а через g_0 і g_c ;
- $C_B > C_a > C_c$ – визначимо g_B і g_c , а через g_0 і g_a ;
- $C_c > C_B > C_a$ – визначимо g_c і g_a , а через g_0 і g_B .

У варіантах 2), 4) і 6) параметри ізоляції можна визначити, додавши додаткову ємність до відповідної фази. У варіантах 1), 3) і 5) замість додаткової ємності потрібно додати додаткову змінну активну провідність dg . У цьому випадку результати вимірювань також можуть бути відображені:

$$\frac{\sqrt{3} \cdot I_{0A}}{1.5U_{\text{л}}} \cdot \cos(\varphi_{0A}) = f(dg) \rightarrow \min \quad (3.8)$$

Функція $f(dg)$ зростає, поки не досягне свого мінімального значення $f(dg) = C_A$. Функція $f(dg) \rightarrow \infty$ означає $g_c > g_B$. Функція $f(dg) \rightarrow \infty$ означає $g_c > g_B$:

Для зручності вимірювання рекомендується вводити додаткову ємність і активну провідність одночасно. Наприклад, якщо вимірювання виконується на фазі А (зірки провідності на фазах В і С розімкнуті), ємність вводиться на фазі С, а провідність на фазі В. Якщо вимірювання виконується на фазі В, вводиться ємність на фазі С і провідність на фазі А.

Якщо вимірювання виконується на фазі В, вводиться ємність на фазі С і провідність на фазі В, вводиться ємність на фазі С і провідність на фазі А.

Таким чином, g_A , g_B , g_C і C_A , C_B , C_C для відношення ємності до активної провідності 2), 4), 6), 8), 10) і 12) можуть бути визначені відразу за допомогою цього методу.

Для комбінацій варіантів 1), 3), 5), 7), 9) і 11) можна визначити тільки провідність однієї з фаз і ємність тієї чи іншої фази.

Тому визначені провідність і ємність необхідно підставити в одночасне лінійне рівняння (3.6) і розв'язати його будь-яким точним способом. У цьому випадку існує лише один розв'язок для кожної комбінації провідності та ємності кожної фази, підставленої в систему рівнянь (3.6).

3.4 Висновок

1. Виникнення коротких замикань через перехідний опір призводить до перенапруг в інших фазах мережі та пошкодження ізоляції.
2. Дугові замикання, що перевищує один цикл промислової частоти, також можуть викликати значні перенапруги і пошкоджувати інші непошкоджені фази мережі. При цьому спостерігаються значні коливання напруги зсуву нейтралі U_0 , амплітуда яких може досягати 10 кВ.
3. Якщо під час замикання на землю відбувається замикання на сусідню фазу, на цій фазі виникає перенапруга на землю, і замикання переростає у двофазне замикання на землю.
4. Якщо ТНКІ підключено до мережі короткого замикання (низький струм замикання на землю), можливий резонансний процес на промислових частотах, що призводить до перенапруги та пробоя ізоляції.
5. Ферорезонансні явища, спричинені дугами замикань на землю, також викликають значні перенапруги та пошкодження через великі перехідні процеси в ізоляції та обмотках ТНКІ.

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Основним завданням ДККПІ є виявлення пошкоджень ізоляції РП відносно землі на ранній стадії їх розвитку, що дозволяє підвищити рівень надійності, безпеки експлуатації та економічної ефективності розподільчих мереж 6-10 кВ. Це досягається за рахунок використання моніторингу стану ізоляції для зменшення кількості аварійних ситуацій (коротких замикань та міжфазних замикань), пов'язаних з пошкодженням ізоляції. Основними критеріями оцінки ефективності впровадження ДККПІ є річний дефіцит електроенергії через виникнення коротких замикань та рівень економії електроенергії за рахунок виявлення ділянок РП з наднормативними втратами ізоляції та їх ліквідації [18].

Таким чином, річний дефіцит електропостачання через виникнення КЗ в розподільчій мережі 10 кВ можна визначити наступним чином.

$$\Delta W = P \cdot L \cdot \omega_{\text{ОЗЗ}}^0 (\tau_{\text{ОЗЗ}} + p_{\text{КЗ}} \tau_{\text{КЗ}}), \quad (4.1)$$

де P - потужність споживачів, що підключені до мережі (кВт);

L – сумарна протяжність розподільної мережі, км;

$\omega_{\text{ОЗЗ}}^0$ - питома частота ОЗЗ (рік·км)⁻¹ ($\omega_{\text{ОЗЗ}}^0 = 0.88$);

$\omega_{\text{ОЗЗ}}^0, \tau_{\text{КЗ}}$ - відповідно, час пошуку ОЗЗ та к.з. (год);

$p_{\text{КЗ}}$ - ймовірність переходу ОЗЗ в стійкі відмови, якщо час існування режиму $t_{\text{О.з.з.}} \geq 4$ год ($p_{\text{КЗ}} = 0.35$).

Застосування ДККПІ дозволяє зменшити кількість відмов та час їх пошуку, а тому і недовідпуск електроенергії, тобто

$$\delta \Delta W = P \cdot L \cdot \frac{\omega_{\text{ОЗЗ}}^0 (\tau_{\text{ОЗЗ}} + p_{\text{КЗ}} \tau_{\text{КЗ}}) - \xi \omega_{\text{ОЗЗ}}^0 \tau_{\text{ОЗЗ}}}{M_e}, \quad (4.2)$$

де M_e - коефіцієнт ефективності обраної стратегії пошуку пошкоджень ізоляції при використанні ДККПІ (для спрощення методу розрахунку розроблена ДККПІ використовується для послідовної перевірки всіх секцій (фідерів) РП,

що комутуються за спеціальним алгоритмом, тут 1,5), з урахуванням того, що ефективність пошуку пошкоджень може бути підвищена, а час пошуку пошкоджень може бути зменшений на 50% при послідовній перевірці всіх секцій (фідерів) РП за спеціальним алгоритмом;

$\xi = 0,33$ – коефіцієнт, який враховує ступінь пом'якшення відновлення електропостачання у порівнянні з раптовою відмовою за результатами моніторингу ізоляції; ДККПІ слід застосовувати у випадках, коли

$$B_H \delta \Delta W \geq B_{\text{ДККПІ}}, \quad (4.3)$$

де $B_{\text{ДККПІ}}$ – витрати на виготовлення, обладнання та обслуговування ДККПІ;

B_H – питомі витрати підвищення надійності;

$$B_H = 2,63 \text{ грн/кВт}\cdot\text{год.}$$

Порівнюючи ліву та праву частини цього рівняння та враховуючи рівняння (4.2), можна отримати вираз для граничного навантаження на мережу.

$$P_{\text{гр}} = B_{\text{ДККПІ}} \left\{ B_H L \left[\omega_{\text{ОЗЗ}}^0 (\tau_{\text{ОЗЗ}} + p_{\text{КЗ}} \tau_{\text{КЗ}}) - \xi \omega_{\text{ОЗЗ}}^0 \tau_{\text{ОЗЗ}} \right] \right\}^{-1}. \quad (4.4)$$

З (4.4) можна отримати залежність $P_{\text{гр}} = f(L)$, але ця залежність має бути визначена у відносних одиницях.

$$P_{\text{гр}}^* = \frac{P_{\text{гр}}}{B_{\text{ДККПІ}}} \left\{ B_H L \left[\omega_{\text{ОЗЗ}}^0 (\tau_{\text{ОЗЗ}} + p_{\text{КЗ}} \tau_{\text{КЗ}}) - \xi \omega_{\text{ОЗЗ}}^0 \tau_{\text{ОЗЗ}} \right] \right\}^{-1}.$$

Частоту відмов ПЛ 10 кВ можна визначити як

$$\omega = (\omega_{\text{ОП}}^0 + \omega_{\text{Д}}^0 + \omega_{\text{ІЗ}}^0 + \omega_{\text{СП}}^0 + \omega_{\text{ІП}}^0) L,$$

де компонент у правій частині рівняння - це частота відмов через пошкодження опор, проводів та ізоляції, комбіновані пошкодження та інші причини, визначені на основі статистичних даних:

$$\omega_{\text{ОП}}^0 = 0,04; \quad \omega_{\text{Д}}^0 = 0,035; \quad \omega_{\text{ІЗ}}^0 = \omega_{\text{КЗ}}^0 + \omega_{\text{ОЗЗ}}^0 = 0,25 + 0,88 = 1,1;$$

$$\omega_{\text{СП}}^0 = 0,025;$$

$$\omega_{\text{ІП}}^0 = 0,05 \text{ (рік}\cdot\text{км)}^{-1}$$

Рішення про доцільність використання діагностичного комплексу для моніторингу стану ізоляції конкретної розподільчої мережі (з вхідними даними R_i, L_i) підстанції енергосистеми приймається на основі положення на графіку точки з координатами $R_i, L_i \cdot \left(\frac{P_i}{V_{\text{ДККП}}}, L_i \right)$. [17].

Наступне рівняння пропонується для визначення розрахункового рівня надлишкових втрат потужності через струми витоку в реальній розподільчій мережі 6-10 кВ, де всі ділянки повітряних і кабельних ліній електропередачі мають фіксовану довжину:

$$\Delta W_{\text{із}}^{\text{понаднорм.оц}} = \Delta W_{\text{із}}^{\text{норм}} \cdot (k_{\text{п.н}} \cdot k_{\text{п.і}} \cdot k_{\text{ох.з}} \cdot k_{\text{с.із}} - 1), \quad (4.5)$$

де $\Delta W_{\text{із}}^{\text{норм}}$ – нормативні втрати електроенергії в ізоляції РМ від струмів стікання на землю, розраховані згідно методики [71];

$K_{\text{п.н}}$ – коефіцієнт, що враховує виникнення наднормативних втрат в ізоляції внаслідок підвищення рівня напруги (1,1-1,15 Ун) шин підстанції 10(6) енергосистеми перемикачем РПН під навантаженням для компенсації падіння напруги фідерів понад 40 км за рахунок втрат в мережі (в т.ч. в ізоляції) - $K_{\text{п.н}} = 1,15^2 = 1,32$;

$K_{\text{п.і}}$ – коефіцієнт, що враховує збільшення кількості циклів пошкодження ізоляції внаслідок підвищення напруги на шинах 110(35)/10 кВ ПС 10 кВ від номінальної напруги (рекомендований $K_{\text{п.і}} = 1,05$);

$K_{\text{ох.з}}$ – коефіцієнт, що враховує стан зони захисту ПЛЕП (наявність гілок дерев, які можуть спричинити пошкодження ґрунту - рекомендується встановлювати $K_{\text{ох.з}}=1,2$);

$K_{\text{с.із}}$ – Коефіцієнт, що враховує стан ізоляторів ПЛЕП ($K_{\text{с.із}}=1,1$, рекомендується, якщо є значне забруднення або пошкодження поверхні ізоляторів через неадекватні експлуатаційні заходи).

Значення коефіцієнтів $K_{\text{п.н}}$, $K_{\text{п.і}}$, $K_{\text{ох.з}}$, $K_{\text{с.із}}$ були отримані шляхом аналізу статистичних даних щодо основних причин відключень в РП 6-10 кВ ПАТ "АК Вінницяобленерго", наведених у таблицях 1.1 та 1.2 (див. розділ 1).

Для проведення необхідних техніко-економічних розрахунків були використані наступні вихідні дані:

1. Розподільча мережа однієї структурної одиниці енергопостачальної компанії (Замостянські районні електричні мережі), загальна довжина всіх повітряних ліній електропередачі - 758 км, загальна довжина всіх ліній електропередачі - 86,5 км (всього 60 фідерів 10 кВ від 12 підстанцій 110(35)/10 кВ, встановлена потужність 150,162 МВт, середній коефіцієнт навантаження 0,13). Середньозважена сумарна потужність всіх підключених споживачів становить $P = 0,13 \cdot 150,162 = 19,52$ МВт..

2. Сумарні нормативні втрати в ізоляції (згідно розрахунків по методиці [15]) в 2023р. склали $W_{із}^{норм} = 10729400$ кВт.год.

3. У 2023 році сталося 25,2 тис. випадків пошкодження ізоляції повітряних ліній напругою 10 кВ. При цьому середній час пошуку замикання склав $\tau_{озз} = 14$ годин, а середній час пошуку короткого замикання $\tau_{кз} = 6$ годин.

4. Загальні витрати на технічне обслуговування та ремонт розподільчої мережі 10 кВ у 2023 році склали 15,7 млрд грн.

Визначимо річну економічну вигоду від зменшення надлишкових втрат в ізоляції при використанні ДККП.

Спочатку за допомогою рівняння (4.5) розраховується оцінка надлишкових втрат ізоляції.

$$\Delta W_{із}^{понаднорм.оц} = 10729400 (1.32 \cdot 1.05 \cdot 1.2 \cdot 1.1 \cdot 1) = 19\,629\,652 \text{ кВт.год.}$$

При застосуванні ДККП надмірні втрати ізоляції можуть бути значно знижені до економічно обґрунтованого рівня шляхом контролю величини втрат ізоляції через струми замикання на землю та застосування більш оптимальних експлуатаційних заходів (наприклад, очищення захисних зон ПЛЕП, дезактивація ізоляторів на підстанціях).

Економічно обґрунтованим вважається рівень, при якому втрати ізоляції знижуються до нормативного рівня.

Таким чином, річна економія коштів від зменшення наднормативних втрат ізоляції при використанні ДККП є наступною.

$$E_{к_{із}}^{ДККП} = \Delta W_{із}^{понаднорм.оц} \cdot c_{сер}, \quad (4.6)$$

де $c_{сер}=2,64$ грн/кВт.год – є середнім значенням тарифів на електроенергію, що продається споживачами, які належать до РМ енергопостачальника (середнє значення тарифів для домогосподарств та тарифів 2-го класу для підприємств).

$$E_{к_{із}}^{ДККП} = 19\,629\,652 \cdot 2,64 = 51\,822\,281 \text{ грн.}$$

У випадку пошкодження ізоляції, припустимо, що максимум два з 60 фідерів 10 кВ будуть відключені і використаємо рівняння (4.2) для визначення річного дефіциту електропостачання через виникнення короткого замикання. У базовому варіанті (без ДККП):

$$\delta \Delta W_{ОЗЗ}^6 = \frac{2}{60} \cdot 21438 \cdot 758 \cdot 0,88 \cdot (12 + 0,35 \cdot 5) = 6\,554\,168 \text{ кВт.год.}$$

При застосуванні ДККП зменшення річного недовідпуску від виникнення ОЗЗ становить

$$\delta \Delta W_{ОЗЗ}^{ДККП} = \frac{2}{60} \cdot 21438 \cdot 758 \cdot \frac{0,88 \cdot (12 + 0,355) - 0,33 \cdot 0,85 \cdot 12}{1,5} = 2\,710\,645 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Економія коштів від зменшення річного недовідпуску електроенергії при застосуванні ДККП

$$E_{к_{ОЗЗ}}^{ДККП} = (\delta \Delta W_{ОЗЗ}^{ДККП}) \cdot E_{вн}, \quad (4.7)$$

де $E_{вн}$ – питомий економічний збиток енергопостачальника через недоотриману комерційну вигоду внаслідок неможливості постачання електроенергії споживачам (грн/кВт-год).

$$E_{вн} = c_{сер} - C_{пок} \cdot k_{норм},$$

де $C_{пок}$ – базова ціна закупівлі електроенергії у ДП "Енергоринок" (для енергопостачальників, за даними ПАТ "АК Вінницяобленерго", за умови, що $C_{пок}=233,55$ грн/МВт·год, може бути в діапазоні $C_{пок}=234,89$ грн/МВт·год);

$k_{норм}=1,05$ – коефіцієнт, що враховує збільшення вартості електроенергії між мережею 110(35) кВ та периметром РП 10 кВ регіональної мережі.

Отже,

$$E_{Вн} = 2,64 - 0,218 \cdot 1,05 = 2,4111 \text{ грн/кВт.год.}$$

$$E_{к_{ОЗЗ}}^{ДККП} = 3\,084\,130 \cdot 2,4111 = 7\,436\,146 \text{ грн.}$$

Рівняння (4.3) використовується для визначення доцільності встановлення ДККП для кожної підстанції для двох варіантів навантаження мережі (фактичний коефіцієнт навантаження = $k_n=0.13$, оптимальний коефіцієнт навантаження = $k_n=0.9$).

Результати розрахунків представлено в таблиці 4.1.

ПС	L, км	P _{ном} , МВт	Кількість фідерів	P _{сер} при k _n =0,13	P _{сер} при k _n =0,9	B _н δΔW* грн при k _n =0,13	B _н δΔW* грн при k _n =0,9
ПС Агрономічне	73.330	16.34	5	14.728	2.124	6 912	47 931
ПС Вороновиця	75.470	15.61	7	14.059	2.027	4 851	33 636
ПС Лаврівка	80.160	15.54	9	13.990	2.017	3 987	27 650
ПС Міз. Хутора	35.200	6.626	4	5.963	0.860	1 679	11 645
ПС Степанівка	29.020	5.903	4	5.313	0.766	1 233	8 553
ПС Тюшкатыга	39.660	6.021	3	5.419	0.781	2 292	15 897
ПС Східна	28.410	5.756	1	5.180	0.747	4 710	32 659
ПС Західна	118.40	28.294	7	25.465	3.672	13 786	95 595
ПС Північна	34.230	9.795	4	8.816	1.271	2 414	16 740
ПС Південна	22.200	4.621	2	4.159	0.600	1 477	10 244
ПС Нова	91.390	16.879	6	15.191	2.191	7 405	51 346
Сума	758.3	150.1	60	19.489	135.14	59 573	413 101

Продовження таблиці 4.1						
ПС	При $\kappa_n=0,13$			При $\kappa_n=0,9$		
	Доцільність встанов. НП ДККП	Доцільність встанов. ПП ДККП	Загальні витрати На ДККП, грн	Доцільність встанов. НП ДККП	Доцільність встанов. ПП ДККП	Загальні витрати На ДККП, грн
ПС Агрономічне	+	-	6 765	+	+	16 713
ПС Вороновиця	-	-	0	+	+	16 713
ПС Лаврівка	-	-	0	+	+	16 713
ПС Міз. Хутора	-	-	0	+	-	6 765
ПС Степанівка	-	-	0	+	-	6 765
ПС Тюшка-тяга	-	-	0	+	-	6 765
ПС Східна	-	-	0	+	+	16 713
ПС Західна	+	-	6 765	+	+	16 713
ПС Північна	-	-	0	+	-	6 765
ПС Південна	-	-	0	+	-	6 765
ПС Нова	+	-	6 765	+	+	16 713
Сума	4	0	27 060	12	7	150 815

Розрахунки базуються на припущенні, що на одній підстанції в разі пошкодження можна відключити до двох фідерів 10 кВ.

Загальна вартість встановлення ДККП на підстанції розраховується за наступною формулою:

$$V_{\text{ДККП}} = V_{\text{НПДККП}} + V_{\text{ПДККП}}^{\text{ВАФ}} + V_{\text{ПДККП}}^{\text{КОМ}} / n_{\text{ПДККП}}, \quad (4.8)$$

де $V_{\text{НПДККП}} = 16\,870$ грн. – витрати на встановлення НП ДККП

$V_{\text{ПДККП}}^{\text{КОМ}} = 21\,625$ грн. – витрати на встановлення комірки ПП ДККП;

$V_{\text{ПДККП}}^{\text{ВАФ}} = 8\,300$ грн. – витрати на придбання ВАФ;

$n_{\text{ПДККП}}$ – кількість ПС, на яких доцільним є встановлення ПП ДККП.

Результати показують, що при фактичному коефіцієнті завантаження мережі $k_z=0,13$, неможливо повністю встановити ДККП на всіх підстанціях, якщо використовувати вартість підвищення надійності електропостачання в якості критерію прийнятності. В той же час, НП ДККП має бути встановлена на чотирьох підстанціях. [5]

За умов, коли K_z дорівнює 0,9, доцільно повністю впровадити ДККП на 7 з 12 підстанцій.

Загальна вартість впровадження ДККП в окремих регіональних підрозділах електропостачальної компанії (Замостянський РЕМ) може бути визначена за наступним рівнянням:

$$V_{\Sigma}^{\text{ДККП}} = C^{\text{ДККП}} + E_n \cdot K^{\text{ДККП}},$$

де $C^{\text{ДККП}}$ – собівартість ДККП, складає

$$C^{\text{ДККП}} = V_{\text{ДККП}\Sigma} \cdot k_{\text{обс}} = 164388 \cdot 1,05 = 172\,608 \text{ грн.},$$

де $K_{\text{обс}}=1.05$ – коефіцієнт, що враховує витрати на обслуговування ДККП в собівартості);

$E_n=0.15$ – нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень;

$K^{\text{ДККП}}$ – капіталовкладення на побудову ДККП ($K^{\text{ДККП}} = V_{\text{ДККП}\Sigma} = 164\,388$ грн.).

Отже, $V_{\Sigma}^{\text{ДККП}} = 172608 + 0.15 \cdot 164388 = 197\,266$ грн.

Визначимо сумарний річний економічний ефект від впровадження ДККП:

$$E_{\Sigma}^{\text{ДККП}} = E_{\text{ф}_{13}}^{\text{ДККП}} - E_{\text{к}_{\text{ОЗЗ}}}^{\text{ДККП}} - V_{\Sigma}^{\text{ДККП}} \quad (4.9)$$

$$E_{\Sigma}^{\text{ДККП}} = 51822281 + 7436146 - 164388 = 59\,094\,039 \text{ грн.}$$

Розрахунковий термін окупності ДККП:

$$T_{\text{окуп}}^{\text{ДККП}} = \frac{V_{\Sigma}^{\text{ДККП}}}{E_{\Sigma}^{\text{ДККП}}} \cdot 12 = \frac{197266}{59\,094\,039} \cdot 12 = 0,04 \text{ місяців} \approx 1,2 \text{ дня}$$

Отриманий термін окупності є меншим одного року і вказує на дуже високу прибутковість впровадження ДККП.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

В цьому розділі магістерської дипломної роботи розробляються заходи з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях в процесі визначення працездатності ізоляції розподільних мереж напругою 6-35 кВ. Аналіз потенційних небезпек для електротехнічного оперативного персоналу, який здійснює автоматизований пошук пошкоджень в розподільчих мережах напругою 10 кВ, проведемо за [39, 40]. Під час експлуатації діючих електроустановок необхідно передбачати заходи із запобігання впливу на працівників таких небезпечних і шкідливих виробничих факторів:

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

Хімічні фактори: речовини хімічного походження, аерозолі фіброгенної дії (пил).

Фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою. Напруженість праці характеризують: інтелектуальні, сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

У розділі охорони праці будуть досліджені такі питання як технічні рішення щодо безпечної організації робочих місць, електробезпека, мікроклімат, склад повітря робочої зони, виробниче освітлення, виробничий шум, виробничі вібрації, пожежна безпека для працівників в цілому для об'єкта проектування під час його експлуатації.

5.1 Технічні рішення щодо безпечної експлуатації об'єкта

5.1.1 Технічні рішення щодо безпечної організації робочих місць

Підготовка робочого місця і допуск до виконання робіт з монтажу пристроїв для контролю ізоляції здійснюється оперативним персоналом електричних станцій і підстанцій [43, 44].

Підготовка робочих місць і допуск можуть провадитись тільки з дозволу оперативних працівників, а на підприємствах, де таких працівників немає – з дозволу особи, яка видала наряд чи розпорядження за узгодженням з особою, відповідальною за електрогосподарство.

Забороняється змінювати передбачені нарядом (розпорядженням) заходи по підготовці робочих місць.

В разі виникнення сумніву в достатності і правильності заходів з підготовки робочого місця і можливості безпечного виконання роботи, ця підготовка має бути припинена.

Підготовку робочих місць, як правило, виконують два працівники, які мають право на оперативні перемикання в даній електроустановці. Дозволяється виконувати підготовку робочого місця керівнику робіт з одним із членів бригади, якщо вони мають права на оперативні перемикання в даній електроустановці.

Підготовку робочого місця може виконувати один працівник, крім встановлення переносних заземлень в електроустановках понад 1000 В і виконання перемикань, що здійснюються на двох і більше приєднаннях в електроустановках понад 1000 В, що не мають діючих пристроїв блокування роз'єднувачів від неправильних дій.

Допускач разом з керівником робіт повинні перевірити виконання технічних заходів з підготовки робочого місця.

Якщо керівник робіт суміщає обов'язки допускача, то таку перевірку він виконує з одним із членів бригади, який має групу III.

Допуск до роботи за нарядами та розпорядженнями слід провадити безпосередньо на робочому місці.

Допуск провадиться після перевірки технічних заходів з підготовки робочого місця.

В цьому разі допускатч має:

- перевірити, чи відповідає склад бригади зазначеному у наряді або розпорядженні, та наявність у членів бригади посвідчень про перевірку знань;
- провести інструктаж: ознайомити бригаду зі змістом наряду, розпорядження; зазначити межі робочого місця і підходи до нього; показати найближче до робочого місця устаткування та струмопровідні частини приєднань, що ремонтуються, та суміжних, до яких забороняється наближатися незалежно від того, перебувають вони під напругою чи ні;
- довести бригаді, що напруга відсутня, показом встановлених заземлень та перевіркою відсутності напруги, якщо заземлення не видно з робочого місця, а в електроустановках 35 кВ і нижче (де дозволяє конструктивне виконання) з наступним дотиком рукою до струмопровідних частин, після перевірки відсутності напруги.

Після інструктажу допускатча бригаду повинен проінструктувати керівник робіт щодо безпечного виконання робіт, використання інструменту, пристосувань, механізмів і вантажопідіймальних машин.

Без проведення інструктажу допуск бригади забороняється.

Проведення інструктажу і допуску оформляються підписами допускатча і керівника робіт (наглядача) в таблиці 3 наряду із зазначенням дати і часу.

Допуск оформлюється в обох примірниках наряду, з яких один залишається у керівника робіт (наглядача), а другий – у допускатча.

Коли керівник робіт суміщає обов'язки допускатча, допуск оформлюють в одному примірнику наряду.

Під час роботи за розпорядженням час допуску реєструють в журналі обліку робіт за нарядами і розпорядженнями.

5.1.2 Електробезпека

Тип електромережі, що контролюється: трьохпровідна мережа змінного струму напругою 6-35 кВ. Категорія умов з небезпеки електротравматизму – з підвищеною небезпекою, у зв'язку з наявністю струмопровідної підлоги.

Основні технічні засоби і заходи забезпечення електробезпеки при нормальному режимі роботи електроустановок включають:

- ізоляцію струмопровідних частин;
- недоступність струмопровідних частин;
- засоби орієнтації в електроустановках;
- виконання електроустановок, ізольованих від землі;
- захисне розділення електричних мереж;
- компенсацію ємкісних струмів замикання на землю;
- вирівнювання потенціалів.

Електроінструмент, переносні лампи, знижувальні трансформатори і перетворювачі частоти струму необхідно перевіряти один раз на місяць на відсутність замикання на корпус, цілісність заземлювального контуру, цілісність ізоляції живильних проводів та відсутність оголених струмопровідних частин. Переносні трансформатори необхідно перевіряти також на відсутність замикання між обмотками високої і низької напруги.

5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

5.2.1 Мікроклімат

Параметри мікроклімату в виробничому приміщенні [47], де встановлена лінія, наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Нормування параметрів мікроклімату на непостійних робочих місцях

Період року	Категорія робіт	Температура	Відносна вологість	Швидкість руху
Теплий	Пб	15-29 °С	70 при 25°С	0,2-0,5
Холодний	Пб	13-23 °С	не більш 75	не більш 0,4

Для забезпечення потрібних за нормативами параметрів мікроклімату проектом передбачено [45, 46]:

1. Утеплення фасаду будівлі
2. Встановлено вентиляцію приміщень

5.2.2. Склад повітря робочої зони

В умовах, що розглядаються в роботі, можливим забруднювачем повітря може бути пил нетоксичний [48].

Характерні забруднюючі речовини для виробничого приміщення наведені в таблиці 5.2

Таблиця 5.2 – Характерні забруднюючі речовини для виробничого приміщення

Найменування речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньодобова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4

Для забезпечення складу повітря робочої зони в роботі передбачені такі рішення [48]: робочі місця, де можливе виділення пилу та, обладнані вентиляційними пристроями, які повинні бути постійно готовими до роботи; будь-які порушення у системі вентиляції відображаються попереджувальними сигнальними пристроями; установки для кондиціонування повітря або механічні вентиляційні установки під час їх роботи не створюють для працівників протягів.

5.2.3 Виробниче освітлення

Штучне освітлення в будівлі запроектоване загальне, освітлення, за якого світильники розміщуються рівномірно у верхній зоні приміщення (загальне рівномірне освітлення). Характеристика зорових робіт – середньої точності. Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [64] розряд зорової роботи IV, підрозряд «г».

Нормовані значення виробничого освітлення наведені в таблиці 5.3.

Для забезпечення нормованого значення освітлення у проекті передбачено:

- використання природного та штучного освітлення;
- штучне освітлення повинне бути рівномірне та достатньо інтенсивне;
- світло не повинне створює різких тіней на місцях роботи, значних контрастів між освітленим робочим місцем і навколишньою обстановкою;
- штучне світло не створює зайвих відблисків у полі зору працівника.

Таблиця 5.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

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

5.2.4 Виробничий шум

Джерелами шуму, що розглядаються в роботі, для працівників є шум будівельних машин і механізмів. Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного (непостійного) широкопasmового (тонального) шуму наведено в таблиці 5.4

Таблиця 5.4 Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного (непостійного) широкопasmового (тонального) шуму

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах зі середньгеометричними частотами (Гц)										Допустимий рівень звуку, дБА
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
Основні виробничі приміщення	86	71	61	54	49	45	42	40	38		50

Для забезпечення допустимих параметрів шуму (поліпшення шумового клімату) в приміщенні проектом передбачено:

- раціональне розташування робочих місць;
- постійний контроль режиму праці і відпочинку працівників;
- обмеження застосування обладнання та використання робочих місць, що не відповідають санітарно-гігієнічним вимогам.

5.3 Психофізіологічні фактори

Психофізіологічні фактори визначаються відповідно до Гігієнічної класифікації праці [40]. Робота проєктувальника не потребує великих фізичних зусиль за важкістю та напруженістю праці.

Клас умов праці за показниками важкості праці – допустимий (середньої важкості): загальні енергозатрати організму (кґ/м) – до 290; стереотипні робочі рухи: при локальному навантаженні (участь м'язів кистей та пальців рук) – до 40000; при регіональному навантаженні (участь рук та плечового суглоба) – до 20000; статичне навантаження (кґ/с): двома руками (чоловіки) – до 70000; за участю м'язів тулуба та ніг – до 100 000; робоча поза: періодичне перебування в незручній позі (робота з поворотом тулуба, незручним розташуванням кінцівок) та/або фіксованій позі (неможливість зміни взаємного розташування різних частин тіла відносно одна одної) до 25% часу зміни; перебування у вимушеній позі до 10%, нахил тулуба: вимушені нахили протягом зміни – 51-100 разів.

2. Класи умов праці за показниками напруженості праці:

Інтелектуальні навантаження: зміст роботи – рішення складних завдань з вибором за алгоритмом; сприймання інформації та їх оцінка – сприймання інформації з наступною корекцією дій та операцій; розподіл функцій за ступенем складності завдання – обробка, контроль, перевірка завдання; характер виконуваної роботи – робота за встановленим графіком з можливим його коригуванням під час діяльності.

Сенсорні навантаження: зосередження (% за зміну) – більше 75; щільність сигналів (звукові за 1 год) – більше 300; навантаження на голосовий апарат (протягом тижня) – від 20 до 25. Емоційне навантаження: ступінь відповідальності за результат своєї діяльності – є відповідальним за функціональну якість основної роботи; ступінь ризику для власного життя – вірогідний; ступінь відповідальності за безпеку інших осіб – є відповідальним за безпеку інших. Режим праці: тривалість робочого дня – 8 год; змінність роботи – однозмінна (без нічної зміни).

5.4 Завдання з цивільного захисту

Дослідження стійкості роботи елементів розподільних мереж в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій

Завдання:

Дослідити стійкість роботи елементів розподільних мереж в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій, таких як пожежа, вибух, падіння літака, землетрус, ураган тощо.

Вхідні дані:

- Потужність пожежі $P_1 = 4,87 \text{ Р/год.}$
- Електричне поле в зоні вибуху $E_v = 10,79 \text{ кВ/м}$

Вихідні дані:

- Характер пошкодження елементів розподільної мережі
- Тривалість роботи елементів розподільної мережі

Розрахункова модель:

Для дослідження стійкості роботи елементів розподільних мереж в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій використовується наступна розрахункова модель:

$$R = R_0 \cdot (1 - a \cdot P_1 \cdot t)$$

де:

R - електричний опір елемента розподільної мережі

R_0 - початковий електричний опір елемента розподільної мережі

a - коефіцієнт стійкості елемента розподільної мережі до дії пожежі

P_1 - потужність пожежі

t - час дії пожежі

Розрахунок:

За заданими вхідними даними, коефіцієнт стійкості елемента розподільної мережі до дії пожежі:

$$a = \frac{1}{(1 + 4.87 \cdot 10.79 \cdot t)}$$

Для часу дії пожежі $t = 1$ година, коефіцієнт стійкості елемента розподільної мережі:

$$a = \frac{1}{(1 + 4.87 \cdot 10.79 \cdot 1)} = 0,0186751 \approx 0,02$$

Отже, в умовах дії пожежі потужністю 4,87 Р/год., електричний опір елемента розподільної мережі зменшиться на 0,02 від початкового значення.

При цьому, робочий струм в елементі розподільної мережі збільшиться на 0,02 від початкового значення.

Якщо робочий струм в елементі розподільної мережі не перевищує допустимого значення, то елемент розподільної мережі буде працювати в нормальних умовах.

У разі, якщо робочий струм в елементі розподільної мережі перевищує допустиме значення, то елемент розподільної мережі може вийти з ладу.

Висновок:

За результатами розрахунків, елемент розподільної мережі буде працювати в нормальних умовах в умовах дії пожежі потужністю 4,87 Р/год. протягом 1 години.

Для забезпечення стійкості роботи елементів розподільних мереж в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій необхідно, щоб їх електричний опір був достатньо високим.

Також, необхідно, щоб робочий струм в елементах розподільних мереж не перевищував допустимого значення.

ВИСНОВКИ

МКР вирішує науково-практичну задачу розробки єдиної теорії діагностичних методів для забезпечення діагностичної підтримки індивідуальних систем контролю надійності під час експлуатації та ремонту РП 6-35 кВ. Розвиток теорії полягає у визначенні закономірностей побудови уніфікованої системи моніторингу стану ізоляції для РП 6-35 кВ. Впровадження комбінованої системи діагностики контролю стану ізоляції дозволить підвищити надійність, безпеку та ефективність експлуатації обладнання РП.

Побудова комбінованої системи діагностики передбачає координацію та поєднання системи безперервного моніторингу стану РП з системою, що регулярно повторює діагностичні цикли. Інформація про технічний стан РМ отримується шляхом безперервного моніторингу узагальнюючих параметрів.

Виявилось доцільним використовувати динамічні характеристики ефективного опору ізоляції всієї мережі як базовий діагностичний параметр технічного стану ізоляції РМ. Показано, що зміни технічного стану ізоляції окремих елементів РЕМ зумовлені утворенням шунтуючих зв'язків між струмоведучими частинами та землею. Під впливом навколишнього середовища та перенапруг ефективний опір шунтуючого з'єднання змінюється. Перевірка динамічних характеристик ефективного опору ізоляції мережі відносно землі дає можливість раннього виявлення пошкоджень ізоляції неруйнівним способом. Існуючі методи контролю не можуть відобразити динамічні характеристики ефективного опору ізоляції мережі. Крім того, їх значення не нормуються, тому для визначення умов роботи ізоляції необхідно створювати та аналізувати діагностичні моделі.

Запропоновано принципи визначення працездатності ізоляції РМ щодо заземлення, які базуються на використанні норм електробезпеки та мінімізації втрат потужності в ізоляції за рахунок струмів витоку.

Встановлено умови працездатності ізоляції РП відносно землі у вигляді граничних значень зміни показників ізоляції, що відповідають нормативним документам і стандартам. Розроблено математичну модель для визначення працездатності ізоляції у вигляді залежності показників працездатності від параметрів ізоляції відносно землі. Аналіз її достовірності показав, що припущення, прийняті при розробці моделі, призвели до похибки методу до 3,5%.

Для підвищення достовірності діагностування технічного стану ізоляції пропонується використовувати метод регулярного контролю параметрів ізоляції фази мережі відносно землі, заснований на принципі переміщення нульової точки трикутника напруг до центру вектора міжфазної напруги. Це реалізується шляхом включення в мережу "земля-земля" провідника-зірки, параметри якого налаштовані на послідовний резонанс. Запропонований метод підтримується методом, який враховує несиметрію ємностей фаз мережі відносно землі. Особливістю вимірювань у цьому методі є використання еталонної напруги, якою є міжлінійна напруга мережі, а всі вимірювання проводяться за допомогою стандартних вимірювальних приладів (наприклад, електронних вольт-амперних фазометрів).

Вдосконалили метод визначення параметрів ізоляції заземлення шляхом безперервного контролю повного активного опору ізоляції та напруги заземлення при подачі в мережу сигналу постійного струму та обробки результатів за допомогою спеціальної математичної моделі, представленої у вигляді системи рівнянь, що відображає залежність параметрів ізоляції від контрольованих показників. Використання цього методу підвищує чутливість контролю і, таким чином, дозволяє на ранніх стадіях виявляти пошкодження ізоляції ґрунту.

Структура, будова та функціональні алгоритми діагностичного комплексу для контролю стану ізоляції складаються з підсистем безперервного та

періодичного контролю та алгоритмічного програмного забезпечення для обробки даних вимірювань і визначення стану ізоляції підстанції РМ.

Проаналізовано основні заходи з охорони праці та безпеки в аварійних становищах при роботі на лініях 6-35 кВ.

Проаналізовано правила безпеки в аварійних ситуаціях. Також проаналізовано стійкість розподільчої мережі 6-35 кВ під впливом загроз надзвичайних ситуацій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кутіна М. В., Залізницький С. М. Визначення роботоздатності ізоляції розподільних мереж напругою 6-35 кВ. Матеріали LIII науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ–2024). Збірник наукових праць [Електронний ресурс], Вінниця: ВНТУ, 2023-2024. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2024/paper/view/19614/16262>
2. Яндульський О.С., Дмитренко О.О., Касьянов Г.П. Релейний захист електричних систем. Мікропроцесорні пристрої релейного захисту і автоматики електроенергетичних систем: навч. посіб., 2007 р. 72 с.
3. Widmaier K. Durchführung – eine höchstbeanspruchte Komponente // Micafil Symposium 2002 Werterhaltung von Izolationssystemen in Transformatoren, Schaltanlagen und Kabeln., 2002.
4. Кутін В.М. Визначення провідності ізоляції фази щодо землі у трифазній мережі з ізолюваною нейтраллю. Вінниця : ВНТУ, 2015. 148 с.
5. Кутін В.М. Пристрій для вимірювання повної провідності ізоляції // В.М. Кутін, Л.С. Тонкошкур.
6. Кутін В.М. Приставка для безперервного контролю провідності ізоляції фаз мережі / В.М.Кутін, В.А.Жогов // Промислова енергетика. Кривий Ріг, 2005. №7. С.123-128
7. Кутін В.М. Система контролю працездатності ізоляції розподільної мережі напругою 6-10 кВ / В.М.Кутін, С.В.Матвієнко // Вісник Криворізького технічного університету: Зб. наук. праць. Кривий Ріг, 2005. №7. С.123-128.
8. Положення про кваліфікаційні роботи на другому (магістерському) рівні вищої освіти / Уклад. А.О. Семенов, Л. П. Громова, Т.В. Макарова, О. В. Сердюк. Вінниця: ВНТУ, 2021. 68 с.

9. Кутін В.М. Комбінована система діагностування систем електропостачання змінного та постійного струму (теорія, дослідження та розробка): Дис. . докт. техн. наук.: 6.11.2002; Дніпропетровськ, 2002. 518 с.
10. Структура балансу електроенергії в електричних мережах 0.38-154 кВ – Методики складання, аналізу складових та нормування технологічних витрат електроенергії, Київ, 2003.
11. Кутін В.М. Визначення умов працездатності ізоляції в розподільних мережах напругою 6-10 кВ / В.М.Кутін, С.В.Матвієнко, В.В.Луцяк // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Зб. наук. праць. Кременчук, 2003. № 2 (19). Т1. С. 120-125.
12. Кутін В.М. Вибір сукупності діагностичних показників для оцінки працездатності ізоляції відносно землі мережі 6-35 кВ / В.М.Кутін, С.В.Матвієнко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Зб. наук. праць. Кременчук, 2006. № 3(38). С. 96-99.
13. Кутін В.М. Комбінована система діагностування систем електропостачання змінного та постійного струму (теорія, дослідження та розробка): Дис. докт. техн. наук : спец. 6.11.2002 – «Електро технічні комплекси та системи» / В.М.Кутін. – Дніпропетровськ, 2002.
14. Кутін В.М. Безперервний контроль ізоляції у розподільчих мережах 6-10 кВ / Електробезпека та надійність експлуатації електрообладнання: маркетинг розробок. / В.М.Кутін, А.Є. Рубаненко. ВНТУ, 2015. 148 с.
15. Кутін В.М. Проблеми діагностування ізоляції повітряних ліній напругою 6-10 кВ/ В.М.Кутін, М.П.Свиридов, С.В.Матвієнко // ВісникВІП. 2003. № 6. С. 238-240.
16. Кутін В.М. Система контролю технічного стану ізоляції розподільних мереж 10 кВ / В.М.Кутін, С.В.Матвієнко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Зб. наук. праць. Кременчук, 2007. № 3(44). С. 117-120.

17. Кутін В.М. Контроль провідності ізоляції фази відносно землі в трифазних системах з ізольованою нейтраллю/ В.М.Кутін, С.В.Матвієнко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2002р., №2., С.60-65.
18. Кутін В.М. Пристрій для захисту мережі змінного струму із ізольованою нейтраллю від однофазного замикання на землю / В.М. Кутін, Л.П. Любонько
19. Кутін В.М. Пристрій захисту мережі змінного струму з ізольованою нейтраллю від однофазних замикань на землю -МКІ Н02Н3/17 / В.М. Кутін, А.В. Кобилянський - № 3486774/24-07
20. Кутін В.М. Визначення технічного стану ізоляції розподільних мереж напругою 6-10 кВ з урахування впливу несиметрії параметрів ізоляції відносно землі/ В.М.Кутін, С.В.Матвієнко // Вісник Вінницького Політехнічного Інституту, 2005. С. 142-146.
21. Кутін В.М. Керування технічним станом електротехнічних комплексів в процесі їх експлуатації / В.М.Кутін, С.В.Матвієнко, В.В. Луцяк // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Зб. наук. праць.— Кременчук, 2005. С. 105-109.
22. Кутін В.М. Комбінована система керування технічним станом розподільних мереж / В.М. Кутін, С.В.Матвієнко, М.В. Кутіна // Автоматика-2006: XIII Міжнародна конференція. Вінниця, 25-28 вересня 2006р. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2024/schedConf/presentations>
23. Lemke E. Advanced diagnostic tool for PD fault location in power cables using the CDA-technology // 12th ISH Bangalore, 2001.
24. Alff J., Houhanessian V. D., Zaengl W.S., Kachler A.J. 00CH37075., 2000.
25. Roberts Jeff, Dr. Daqing Hou, Fernando Calero, Dr. Hector J. Altuve New directional ground-fault elements несприятливі sensitivity в ungrounded and compensated networks. [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://www.selinc.com/>.

26. Klaus A., Gerlach H.G. Teilentladungsmessung an Hochspannungsapparaten в ungeschirmten elektrischen Verteilanlagen // Bull. SEV/VSE 79.
27. Сабарно Л.Р. Особливості моніторингу ізоляції кабельних ліній середнього класу напруги / Л.Р.Сабарно // Автоматизація та релейний захист в енергосистемах. - К.: Наук. Думка, 1998. 183с.
28. Шуліка Н.М. Контроль стану ізоляції електричних мереж/ Н.М.Шуліка, І.М.Сирота, А.Е.Богаченко // Препр. 632 ІЕД АН УРСР. Київ, 1990.
29. Жежеленко І.В. Питання якості електроенергії в електроустановках / І.В.Жежеленко, Ю.Л.Саєнко - Маріуполь: ПДТУ. 173с.
30. Федоров М.М. До питання про вплив напруги зворотної послідовності на електромеханічні характеристики асинхронного двигуна / М.М.Федоров, О.Г.Пінчук // Збірник наукових праць Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка енергетика». Випуск 50. - Донецьк: ДонНТУ, 2002. С. 67-70.
31. ГКД 34.20.507-2003 Правила - Технічна експлуатація електричних станцій і мереж 2003р
32. ДСТУ 2.6-194:2013. Опори повітряних ліній електропередавання, відкриті розподільні пристрої, лінії контактних мереж транспорту, антенні споруди зв'язку, річкові гідротехнічні споруди, балки з гнучкою або перфорованою стінкою.
33. ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ Протипожежна безпека.
34. Пожежна безпека. Нормативні акти та інші документи. У 4-х томах. – К. : Основа, 1997-1998.
35. НПАОП 0.00-5.26-01. Інструкція з охорони праці під час виконання електромонтажних робіт на висот
36. ПУЕ 5.2.69. Допустимий рівень грозостійкості під час захисту підходів ПЛ до РУ електростанцій.

37. Буличев, А.В. Релейний захист електроенергетичних систем: Навч. посібник / А.В. Буличев, В.К. Ванін, А.А. Наволочний, М.Г. Попов. СПб.: Вироб-во Політехн. ун-та, 2008. 211 с
38. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014. [Чинний від 2014-05-30]. URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=58073]
39. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007. Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. [Чинний від 2007-12-01]. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv>.
40. ДБН А.3.2-2-2009. ССБП. Охорона праці і промислова безпека у будівництві. Основні положення. [Чинний від 2009-01-27]. Вид. офіц. К. : Мінрегіонбуд України, 2009. 116 с.
41. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. [Чинний від 2017-04-01]. Вид. офіц. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.
42. НПАОП 40.1-1.32-01. (ДНАОП 0.00-1.32-01). Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. [Чинний від 2002-01-01]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.
43. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. Постанова МОЗ № 42 від 01.12.1999. [Чинний від 1999-12-01]. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>.
44. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. [Чинний від 2014-01-01]. Вид. офіц. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с.
45. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. [Чинний від 2019-03-01]. Вид. офіц. К. : Мінрегіонбуд України, 2018. 133 с.

46. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Постанова МОЗ № 37 від 01.12.1999. [Чинний від 1999-12-01]. URL: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>.

47. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. Постанова МОЗ № 39 від 01.12.1999. [Чинний від 1999-12-01]. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>.

Додаток А (обов'язковий)

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

ВИЗНАЧЕННЯ РОБОТОЗДАТНОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ РОЗПОДІЛЬНИХ
МЕРЕЖ НАПРУГОЮ 6-35 кВ.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЗАТВЕРДЖЕНО
Зав. кафедри ЕСЕМ

д.т.н., проф. Бурбело М.Й. _____
“ ____ ” _____ 2023 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

до магістерської кваліфікаційної роботи
на тему:

«ВИЗНАЧЕННЯ РОБОТОЗДАТНОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ
НАПРУГОЮ 6-35 кВ»
08-22.МКР.009.01.23ТЗ

Науковий керівник:

к.т.н., доц. Кутіна М. В. _____
(підпис)

Виконавець: студент гр. ЕСЕ-22м

Залізницький С.М. _____
(підпис)

Вінниця 2023 р.

1. ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ (МКР)

Робота виконується на підставі наказу ВНТУ за 18.09.2023 р. № 247

Дата початку роботи 16.09.2023 р.

Дата закінчення роботи 04.12.2023 р.

2. МЕТА І ПРИЗНАЧЕННЯ МКР. ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ РОЗРОБКИ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

а) *мета* – підвищення надійності РМ шляхом врахування параметрів електробезпеки та струмів витоку під час експлуатації;

б) призначення розробки – виконання магістерської кваліфікаційної роботи.

в) вихідні дані для виконання МКР покійємо із завдання:

Схеми та конструктивне виконання систем електропостачання з ізолюваною нейтраллю. Правила технічної експлуатації. Методи та засоби контролю ізоляції в системах електропостачання з ізолюваною нейтраллю напругою до 1000 В.

3. ДЖЕРЕЛА РОЗРОБКИ

3.1 Положення про кваліфікаційні роботи на другому (магістерському) рівні вищої освіти / Уклад. А.О. Семенов, Л. П. Громова, Т.В. Макарова, О. В. Сердюк . Вінниця: ВНТУ, 2021. 122 с.

3.3. Яндульський О.С., Дмитренко О.О., Касьянов Г.П. Релейний захист електричних систем. Мікропроцесорні пристрої релейного захисту і автоматики електроенергетичних систем: навч. посіб., 2007 р. 72 с.

3.4 Буличев, А.В. Релейний захист електроенергетичних систем: Навч. посібник / А.В. Буличев, В.К. Ванін, А.А. Наволочний, М.Г. Попов. СПб.: Вироб-во Політехн. ун-та, 2008. 211 с

3.5 Кутін В.М. Комбінована система діагностування систем електропостачання змінного та постійного струму (теорія, дослідження та розробка): Дис. . докт. техн. наук.: 6.11.2002; Дніпропетровськ, 2002. 518 с.

4. ЕТАПИ І ТЕРМІН ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Зміст етапу	Термін виконання	
	початок	кінець
4.1 Збір інформації, яка необхідна для дослідження	18.09.2023 р.	29.09.2023 р.
4.2 Проведення дослідних розрахунків	02.10.2023 р.	17.10.2023 р.
4.3 Розробка робочих креслень	20.11.2023 р.	04.12.2023 р.
4.4 Написання розрахунково-пояснювальної записки і захист магістерської роботи	28.11.2023 р.	04.12.2023 р.

5. МАТЕРІАЛИ, ЩО ПОДАЮТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ МКР

Пояснювальна записка МКР, графічні і ілюстровані матеріали, анотація до МКР українською та іноземною мовою.

6. ПОРЯДОК КОНТРОЛЮ ВИКОНАННЯ ТА ЗАХИСТУ МКР

Робота приймається на проміжних контрольних перевірках, попередньому захисті та захисті в ДЕК.

7. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

7.1 Дані про патентоспроможність

Не передбачається

8 ОЧІКУВАНИЙ ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ

Не передбачається

Додаток Б
(обов'язковий)

ГРАФІЧНИЙ МАТЕРІАЛ

ВИЗНАЧЕННЯ РОБОТОЗДАТНОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ
НАПРУГОЮ 6-35 кВ.

Рисунок Б.1 – Схема заміщення трифазної мережі для визначення струму

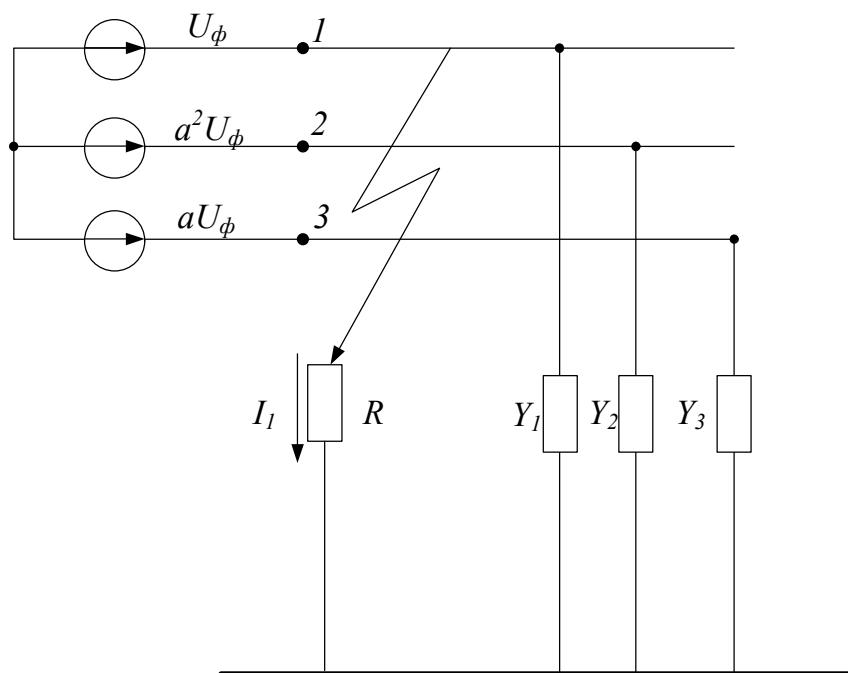


Рисунок Б.2 – Паралельна схема підключення поршня з каскадом мережі 10 кВ дугогасительного реактора.

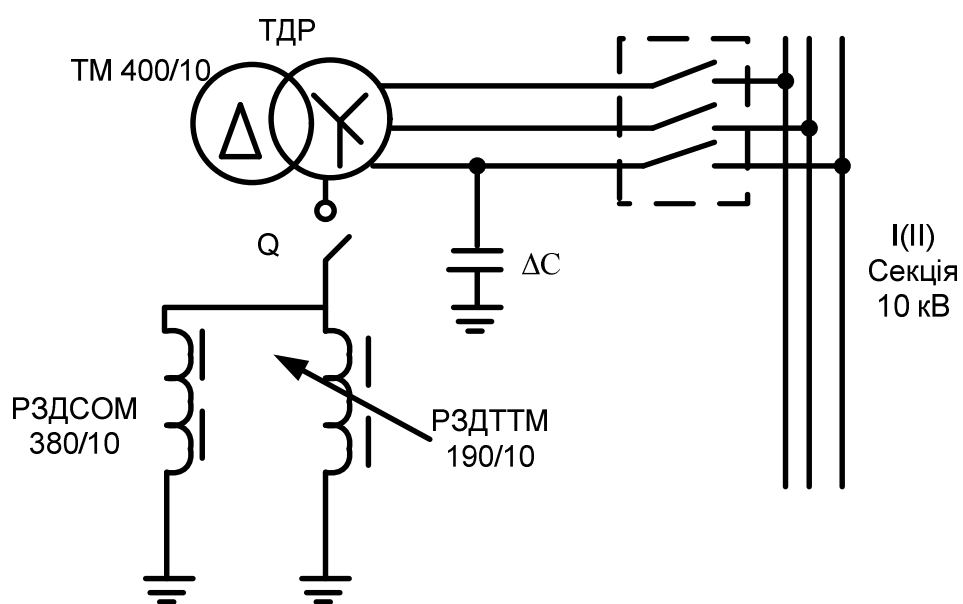


Рисунок Б.3 - Структурна схема пристрою для технічної реалізації методу контролю ізоляції на основі вимірювання загального активного опору ізоляції і напруг фаз мережі відносно землі (метод неперервного контролю ізоляції)

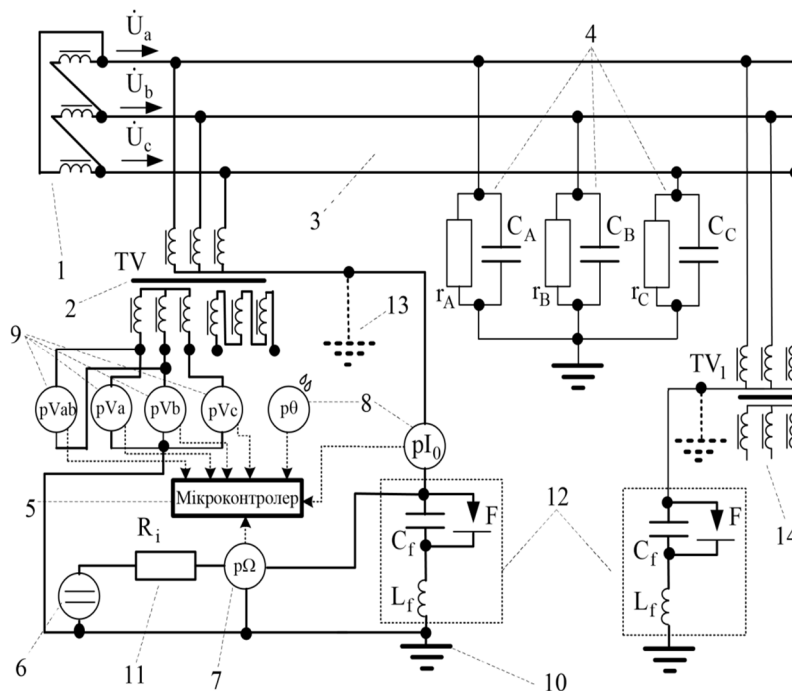


Рисунок Б.4 - Принципова схема пристрою контролю ізоляції окремих фаз відносно землі (метод періодичного контролю)

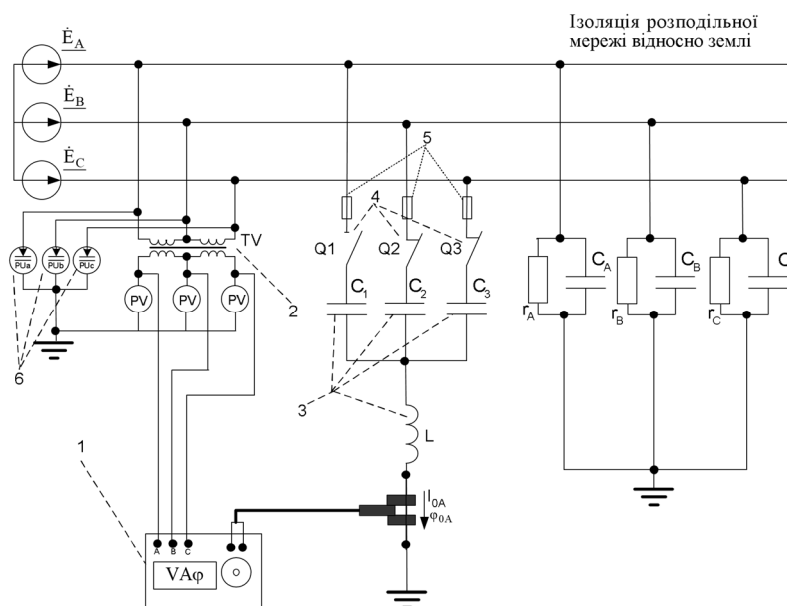


Рисунок Б.5 - Ізольована нейтраль

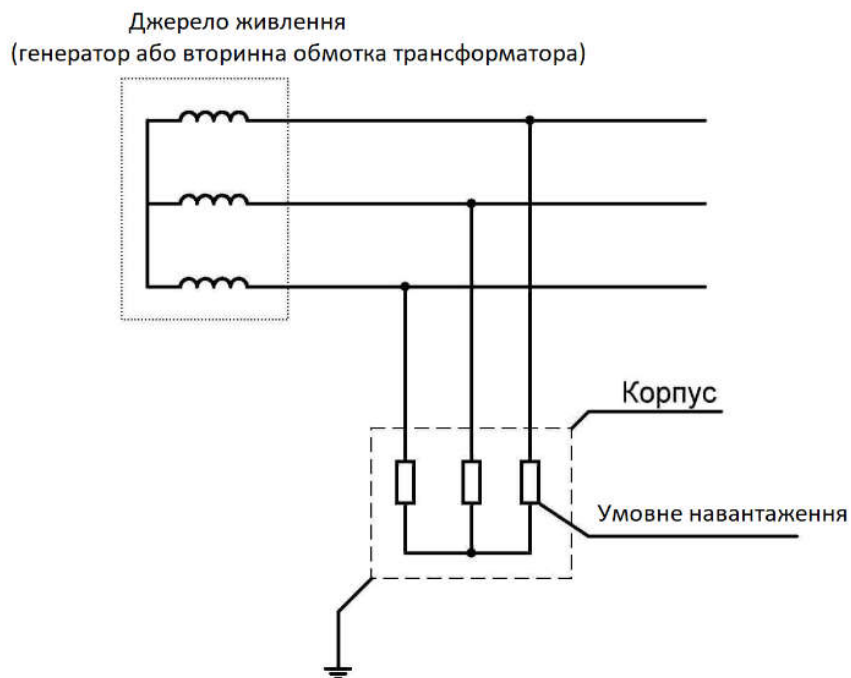


Рисунок Б.6 – Графічне представлення зміни значення напруги справної фази під час однофазного замикання на землю в мережі з ізольованою нейтральністю.

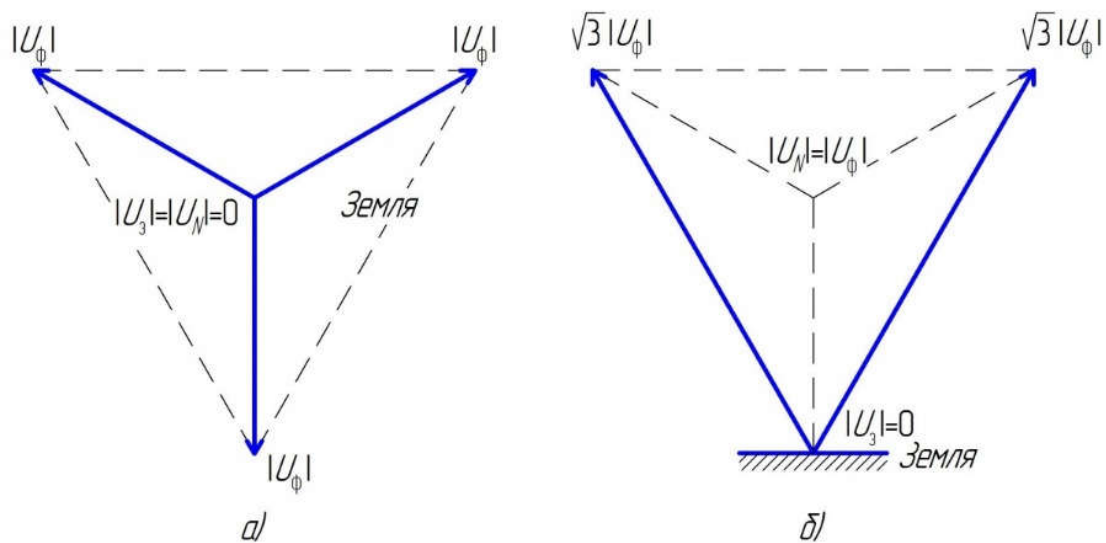


Рисунок Б.7 - Заступна схема для опису процесу виникнення шунтувального зв'язку в РМ і дотику людини до заземлених елементів електроустановки

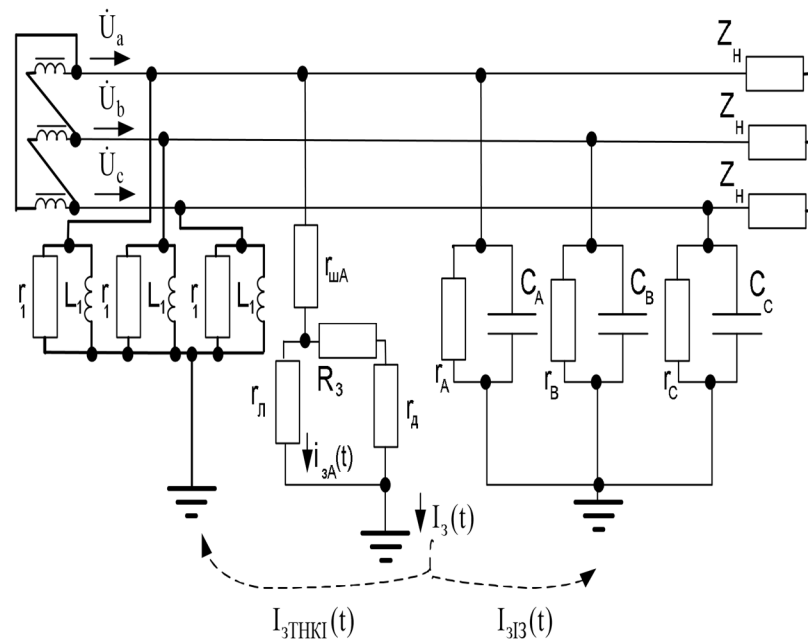


Рисунок Б.8 – Розрахункові схеми струму дугового замикання на землю:
а – при горінні дуги; б – після погасання дуги

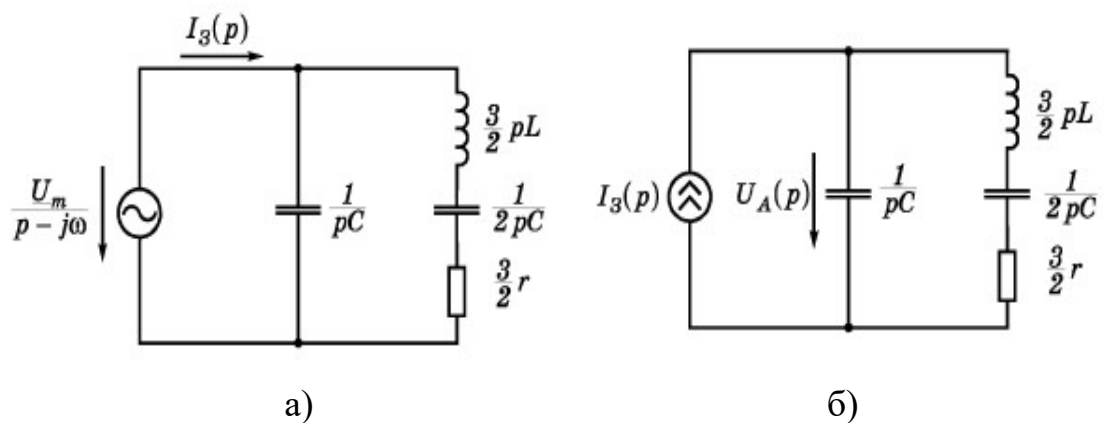


Рисунок Б.9 – Схема трифазної мережі з врахуванням опорів трансформатора напруги

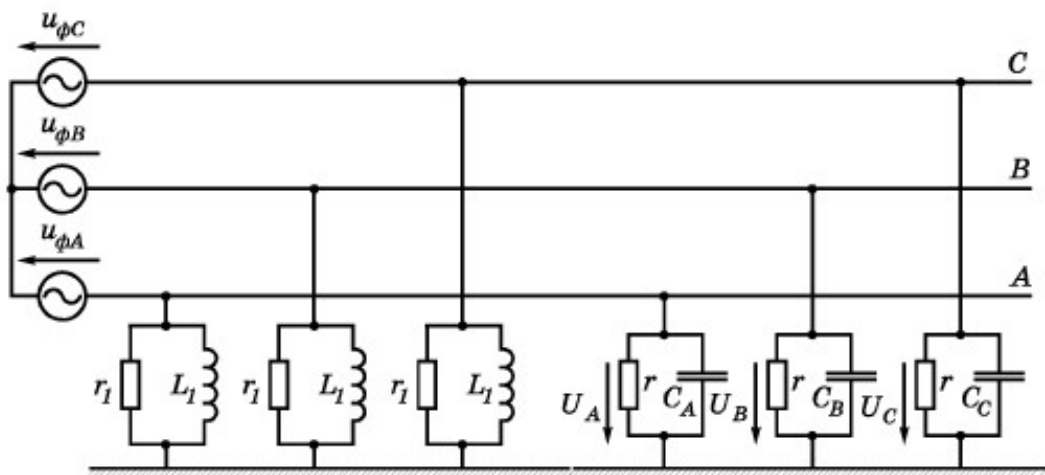
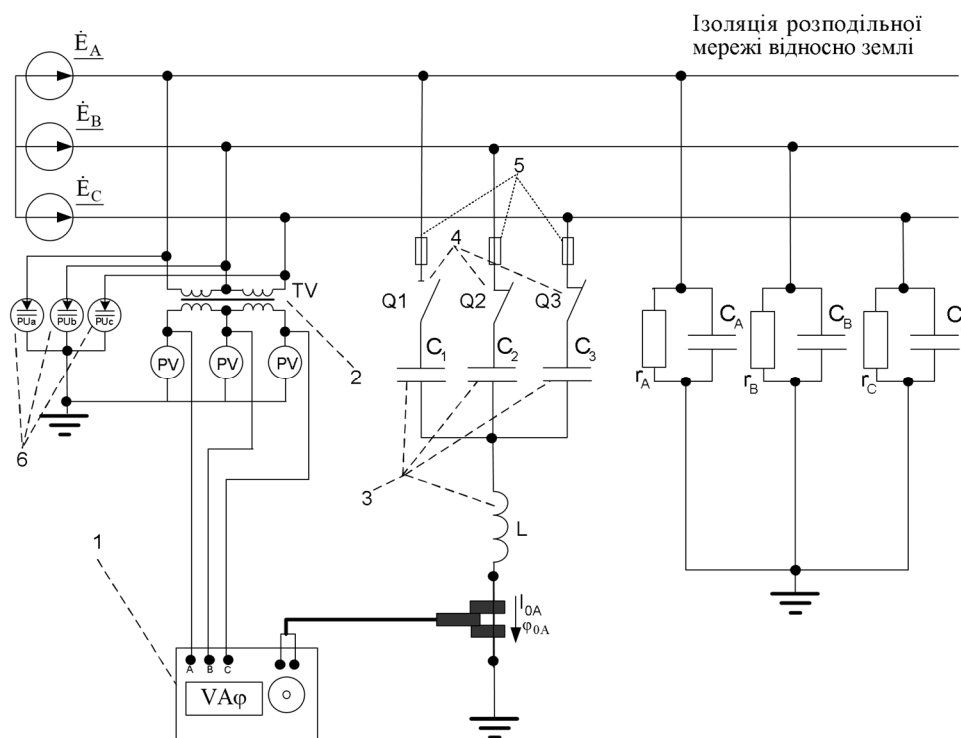


Рисунок Б.10 – Схема пристрою контролю ізоляції окремих фаз (відносно землі)



Додаток В
(обов'язковий)

**ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ)
РОБОТИ**

ВИЗНАЧЕННЯ РОБОТОЗДАТНОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ
НАПРУГОЮ 6-35 кВ.

**ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ**

Назва роботи: Визначення роботоздатності ізоляції розподільних мереж напругою 6-35 кв.

Тип роботи: магістерська дипломна робота
(БДР, МКР)

Підрозділ: кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту

факультет електроенергетики, електротехніки та електромеханіки
(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unichек

Оригінальність 95,02% Схожість 4,98%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.

2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.

3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа, відповідальна за перевірку _____ Лобода Ю.В.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unichек щодо роботи.

Автор роботи _____ Залізницький С.М.
(підпис) (прізвище, ініціали)

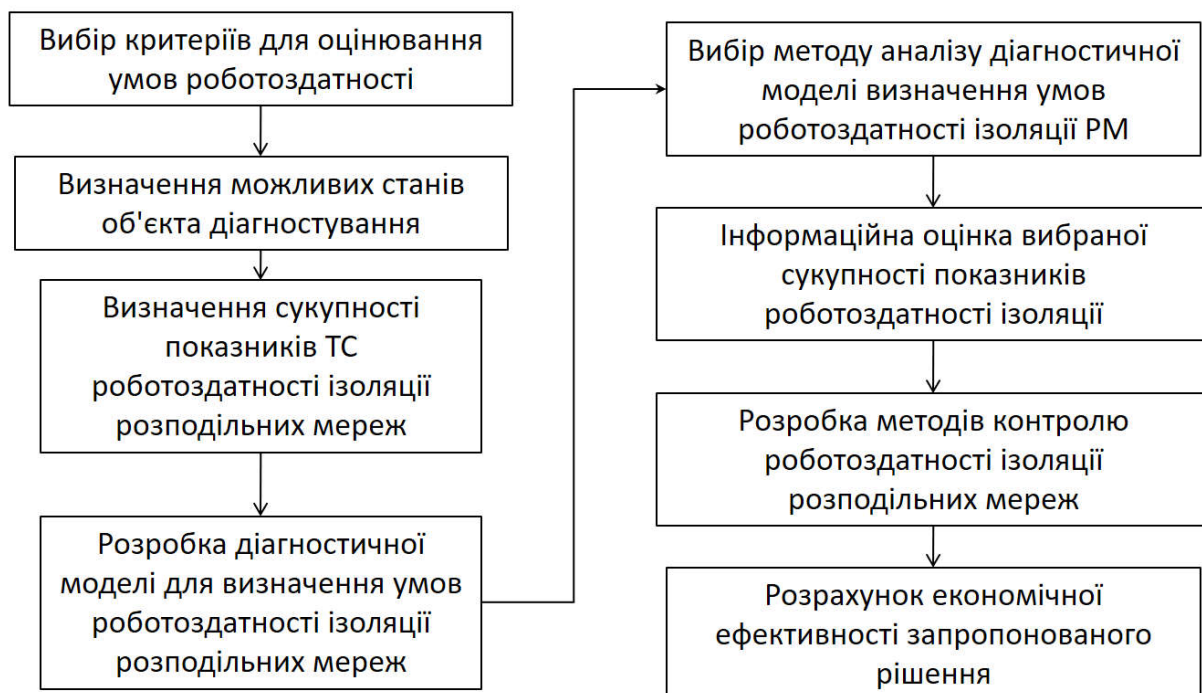
Керівник роботи _____ Кутіна М. В.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Додаток Г (обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ

ВИЗНАЧЕННЯ РОБОТОЗДАТНОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ
НАПРУГОЮ 6-35 кВ.

Рисунок Г.1 – Визначення умов роботоздатності РМ



Графік Г.2 – Три струми показані в залежності від часу

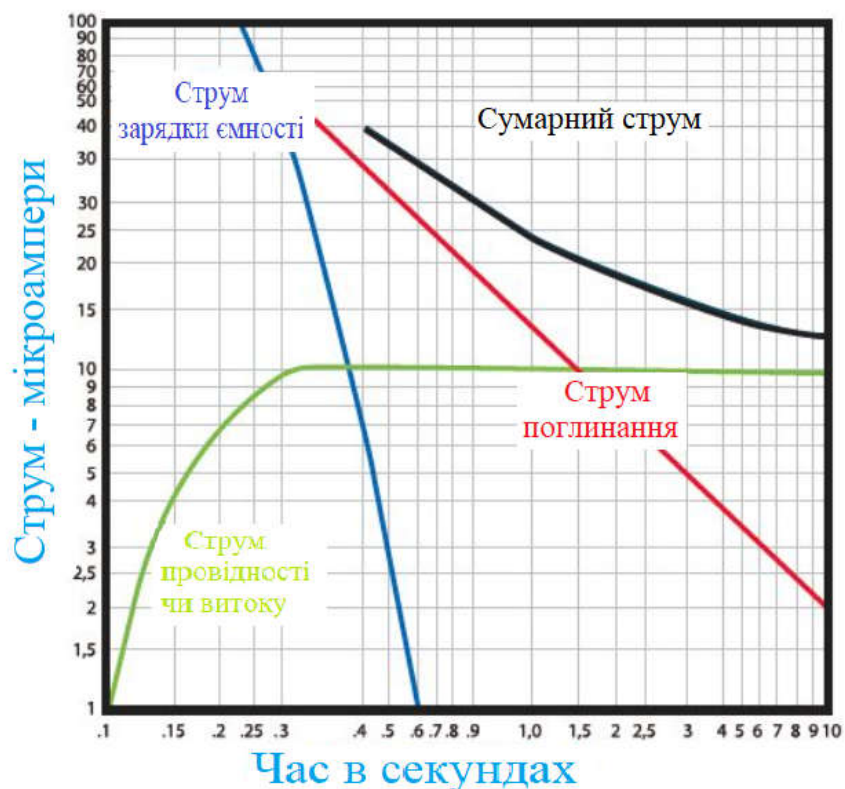


Рисунок Г.3 – Векторна діаграма до методу контролю ізоляції

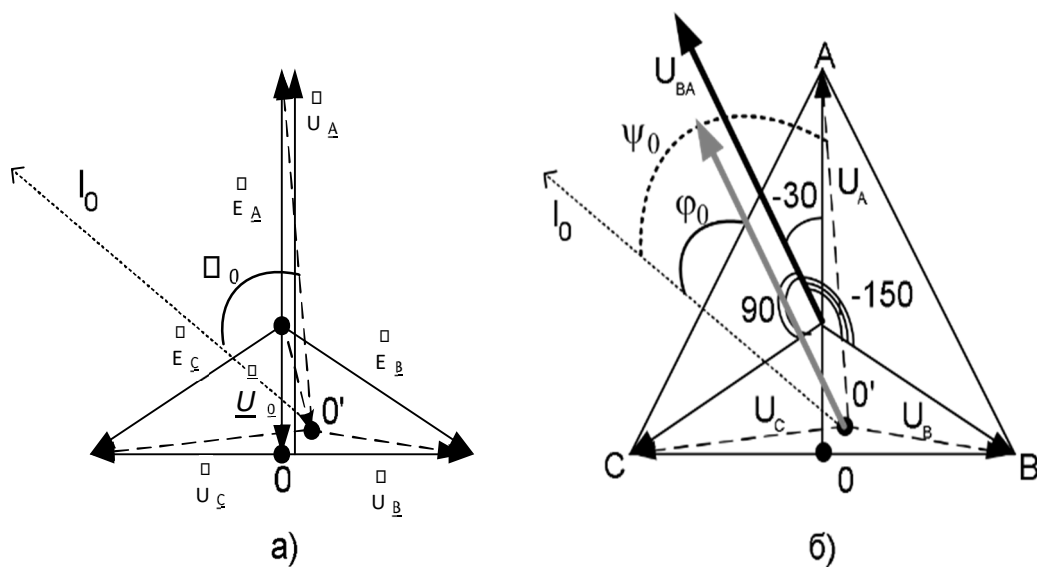
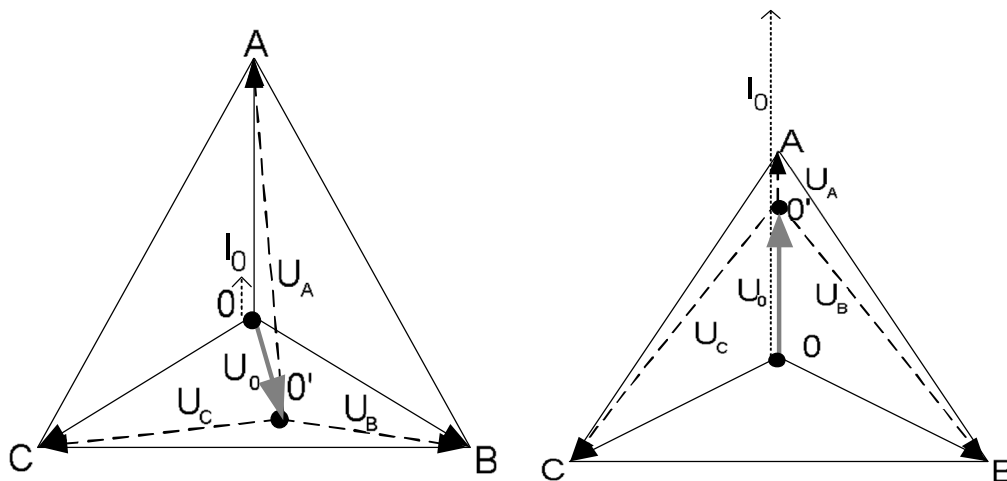


Рисунок Г.4 – Векторна діаграма при реалізації умови дослідження 1 та умови дослідження 2



Пояснювальна записка до магістерської кваліфікаційної роботи

на тему:

« ВИЗНАЧЕННЯ РОБОТОЗДАТНОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ НАПРУГОЮ 6-35 кВ. »

Виконав: студент 2-го курсу, групи ЕСЕ-22м

Залізницький С.М.

Керівник: к.т.н., доц. каф. ЕСЕМ

Кутіна М. В.

АКТУАЛЬНІСТЬ

Найпоширенішим пошкодженням в розподільчих мережах є замикання на землю, на які припадає близько 80% всіх пошкоджень. Замикання на землю призводять до ризику ураження людей електричним струмом, значного зниження якості та надійності електропостачання та значних втрат надлишкової технічної електроенергії.

Основною причиною замикань на землю є утворення шунтуючого зв'язку між струмоведучою частиною РП та землею; моніторинг провідності ізоляції кожної фази РП відносно землі надає найбільш повну інформацію для виявлення пошкоджень ізоляції окремих елементів на ранніх стадіях розвитку пошкодження за допомогою неруйнівних методів. Слід зазначити, що не існує критеріїв, які б обмежували зміни параметрів ізоляції.

Методи моніторингу ізоляції, що базуються на вимірюванні струмів і напруги нульової послідовності та напруги зсуву нейтралі, через свою низьку чутливість не можуть виявити пошкодження ізоляції на землю на ранніх стадіях їх розвитку.

МЕТА І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета і завдання дослідження. Підвищення надійності РМ шляхом врахування параметрів електробезпеки та струмів витоку під час експлуатації.

Відповідно до поставленої мети в роботі вирішуються наступні завдання:

- Аналіз об'єкта дослідження (характер пошкоджень, причини пошкоджень);
- Аналіз існуючих методів та заходів щодо підвищення достовірності моніторингу ізоляції;
- дослідження діагностичних моделей для визначення умов працездатності ізоляції РМ;
- розробка методики розрахунку економічної ефективності використання діагностичних комплексів для моніторингу працездатності ізоляції ПЛ відносно ґрунту;

Об'єктом дослідження є процес зміни технічного стану елементів РМ.

Предметом дослідження є діагностична модель стану працездатності ізоляції РМ.

3

Методи дослідження. Використано теоретичні та експериментальні методи, зокрема аналіз нормальних, аномальних та аварійних режимів роботи РМ. Фізичне моделювання та емпіричні методи використовувалися для верифікації математичної моделі.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в розробці методу визначення умов працездатності ізоляції з урахуванням параметрів безпеки та струмів витоку в процесі експлуатації розподільчої мережі, що дозволяє підвищити рівень надійності електричної мережі.

Практичне значення отриманих результатів. Дана робота дозволила розробити уніфікований діагностичний пристрій для моніторингу стану ізоляції, що дозволяє підвищити надійність та безпеку ліній електропередачі 6-35 кВ

4

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Роботоздатність ізоляції розподільних мереж - це здатність ізоляції виконувати свої функції, тобто запобігати витоку струму з фази в землю.

Роботоздатність ізоляції залежить від багатьох факторів, таких як:

- Якість матеріалів ізоляції
- Вікова деградація ізоляції
- Наявність пошкоджень ізоляції
- Вплив зовнішніх факторів, таких як атмосферні впливи, перевантаження мережі та механічні пошкодження

Ізоляція розподільних мереж може бути пошкоджена внаслідок:

- Механічних пошкоджень, таких як удари, падіння предметів.
- Хімічних впливів, таких як корозія, окиснення, тощо.
- Термічних впливів, таких як перегрів, пожежа, тощо.
- Пошкодження ізоляції може призвести до короткого замикання, що може викликати пожежу, вибух або навіть смерть людей.

5

АНАЛІЗ ПРИЧИН ЗМІНИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ



Рисунок 1 – Фактори, які впливають на зміну технічного стану ізолятора

6

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ІНФОРМАЦІЇ

Методи контролю	Функціональний	Тестовий	Комбінований
Періодичність контролю	Неперервний	Періодичний	Неперервний та періодичний
Види сигналів, що використовуються	Вимірювання робочих сигналів	Накладання зовнішніх джерел енергії, введення додаткової провідності	Вимірювання робочих сигналів. Дублювання експерименту шляхом накладання сигналів сторонніх джерел живлення
Контрольовані величини	$U_A, U_B, U_C, U_{AB}, U_{\phi}$	$U_{\text{дп}}, I_{\text{кл}}$, введення додаткових провідностей та вимірювання струму провідності і фазних напруг; накладання постійного та змінного <i>сигналу</i> : $f < 50 \text{ Гц}$	U_A, U_B, U_C, U_{ϕ} та струму через додаткову провідність, або сигналу постійного чи змінного струму $f < 50 \text{ Гц}$ зовнішнього джерела живлення
Недоліки	Складність розрахунку за результатами вимірювання величини	Похибки через неспівпадіння в часі вимірювання	Складність реалізації засобів проведення експерименту

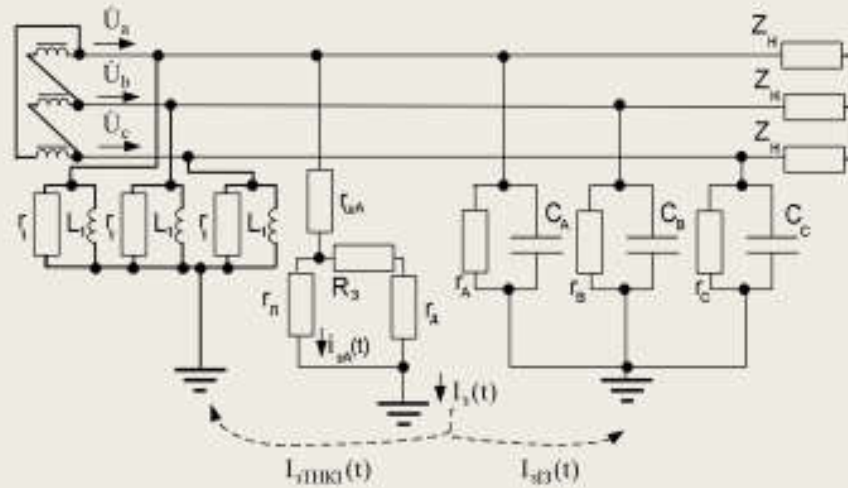
7

Визначення умов роботоздатності РМ



8

Заступна схема для опису процесу виникнення шунтувального зв'язку в РМ і дотику людини до заземлених елементів електроустановки



Задача вибору показників технічного стану ізоляції полягає у розгляді всіх можливих електротехнічних характеристик ізоляції, виходячи з аналізу на основі вибраних критеріїв (безпеки експлуатації і економічності функціонування).

9

ВИБІР ПОКАЗНИКІВ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РОБОТОЗДАТНОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ

Математичної моделі критерію безпеки для визначення роботоздатності ізоляції має вигляд:

$$\left\{ \begin{aligned} I_{a1} &= \frac{g_{a1} \cdot g_1}{g_{a1} + g_1 + g_2} \times \frac{1,5 \cdot U_1}{\sqrt{(g_1 + g_2 + g_3)^2 + (\alpha(C_1 + C_2 + C_3) - B_1)^2}} \times \\ &\times \sqrt{\left[g_1 + g_2 + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(C_1 - C_2) \right]^2 + \left[\frac{g_1 + g_2}{\sqrt{3}} + \alpha(C_1 - C_2) - \frac{2B_1}{3} \right]^2}; \\ I_{a2} &= \frac{g_{a2} \cdot g_2}{g_{a2} + g_2 + g_3} \times \frac{1,5 \cdot U_1}{\sqrt{(g_1 + g_2 + g_3)^2 + (\alpha(C_1 + C_2 + C_3) - B_1)^2}} \times \\ &\times \sqrt{\left[g_1 + g_2 + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(C_1 - C_2) \right]^2 + \left[\frac{g_1 + g_2}{\sqrt{3}} + \alpha(C_1 - C_2) - \frac{2B_1}{3} \right]^2}; \\ I_{a3} &= \frac{g_{a3} \cdot g_3}{g_{a3} + g_3 + g_1} \times \frac{1,5 \cdot U_1}{\sqrt{(g_1 + g_2 + g_3)^2 + (\alpha(C_1 + C_2 + C_3) - B_1)^2}} \times \\ &\times \sqrt{\left[g_1 + g_2 + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(C_1 - C_2) \right]^2 + \left[\frac{g_1 + g_2}{\sqrt{3}} + \alpha(C_1 - C_2) - \frac{2B_1}{3} \right]^2}. \end{aligned} \right. \quad (1)$$

Математична модель критерію економічності функціонування для визначення роботоздатності ізоляції матиме наступний вигляд:

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta P_{a1} &= \frac{2,25 \cdot U_1^2 \cdot g_1}{\sqrt{(g_1 + g_2 + g_3)^2 + (\alpha(C_1 + C_2 + C_3) - B_1)^2}} \times \\ &\times \left[\left[g_1 + g_2 + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(C_1 - C_2) \right]^2 + \left[\frac{g_1 + g_2}{\sqrt{3}} + \alpha(C_1 - C_2) - \frac{2B_1}{3} \right]^2 \right]; \\ \Delta P_{a2} &= \frac{2,25 \cdot U_1^2 \cdot g_2}{\sqrt{(g_1 + g_2 + g_3)^2 + (\alpha(C_1 + C_2 + C_3) - B_1)^2}} \times \\ &\times \left[\left[g_1 + g_2 + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(C_1 - C_2) \right]^2 + \left[\frac{g_1 + g_2}{\sqrt{3}} + \alpha(C_1 - C_2) - \frac{2B_1}{3} \right]^2 \right]; \\ \Delta P_{a3} &= \frac{2,25 \cdot U_1^2 \cdot g_3}{\sqrt{(g_1 + g_2 + g_3)^2 + (\alpha(C_1 + C_2 + C_3) - B_1)^2}} \times \\ &\times \left[\left[g_1 + g_2 + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(C_1 - C_2) \right]^2 + \left[\frac{g_1 + g_2}{\sqrt{3}} + \alpha(C_1 - C_2) - \frac{2B_1}{3} \right]^2 \right]. \end{aligned} \right. \quad (2)$$

10

Діагностичне моделювання для визначення умов роботоздатності

$$(1) \quad W_x(i\omega) = \frac{U_x}{U_f}$$

$$(4) \quad a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0 = 0.$$

$$W_x(i\omega) = \frac{\sqrt{3} \cdot [(g_b + i\omega \cdot C_b) \cdot e^{i\omega t} + (g_c + i\omega \cdot C_c) \cdot e^{-i\omega t}]}{(g_a + g_b + g_c) + i\omega \cdot (C_a + C_b + C_c)}$$

$$(2) \quad W_y(i\omega) = \frac{\sqrt{3} \cdot [(g_a + i\omega \cdot C_a) \cdot e^{i\omega t} + (g_b + i\omega \cdot C_b) \cdot e^{-i\omega t}]}{(g_a + g_b + g_c) + i\omega \cdot (C_a + C_b + C_c)}$$

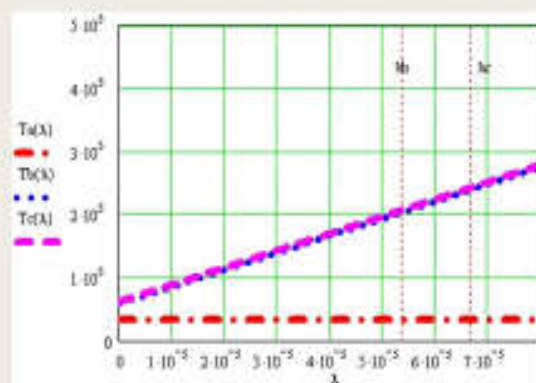
$$W_c(i\omega) = \frac{\sqrt{3} \cdot [(g_a + i\omega \cdot C_a) \cdot e^{i\omega t} + (g_b + i\omega \cdot C_b) \cdot e^{-i\omega t}]}{(g_a + g_b + g_c) + i\omega \cdot (C_a + C_b + C_c)}$$

$$(3) \quad W(p) = \frac{\sqrt{3} \cdot (a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0)}{(g_a + g_b + g_c)^2 + \omega^2 \cdot (C_a + C_b + C_c)^2}$$

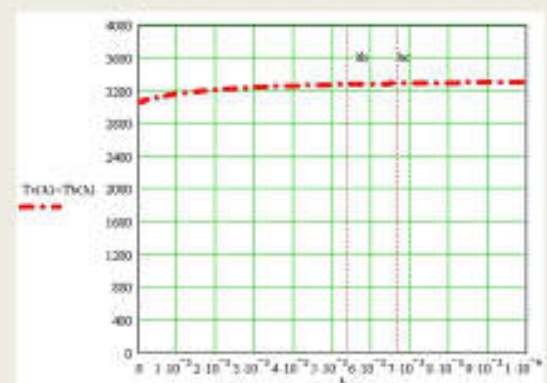
$$(5) \quad \begin{cases} a_3 = -\left[\frac{1}{2 \cdot \omega} \cdot (C_b + C_c) \cdot (C_a + C_b + C_c) \right]; \\ a_2 = \frac{1}{2 \cdot \omega} \cdot (C_b + C_c) \cdot (g_a + g_b + g_c) - \\ - \left[\frac{1}{2 \cdot \omega} \cdot (g_b + g_c) + \frac{1.5}{\sqrt{3}} \cdot (C_b + C_c) \right] \cdot (C_a + C_b + C_c); \\ a_1 = \left[\frac{1}{2 \cdot \omega} \cdot (g_b + g_c) + \frac{1.5}{\sqrt{3}} \cdot (C_b + C_c) \right] \cdot (g_a + g_b + g_c) - \\ - \frac{1.5}{\sqrt{3}} \cdot (g_b + g_c) \cdot (C_a + C_b + C_c); \\ a_0 = \frac{1.5}{\sqrt{3}} \cdot (g_a + g_c) \cdot (g_a + g_b + g_c). \end{cases}$$

11

ПЕРЕВІРКА ІНФОРМАТИВНОСТІ ВИБОРУ ПОКАЗНИКІВ РОБОТОЗДАТНОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ



а)

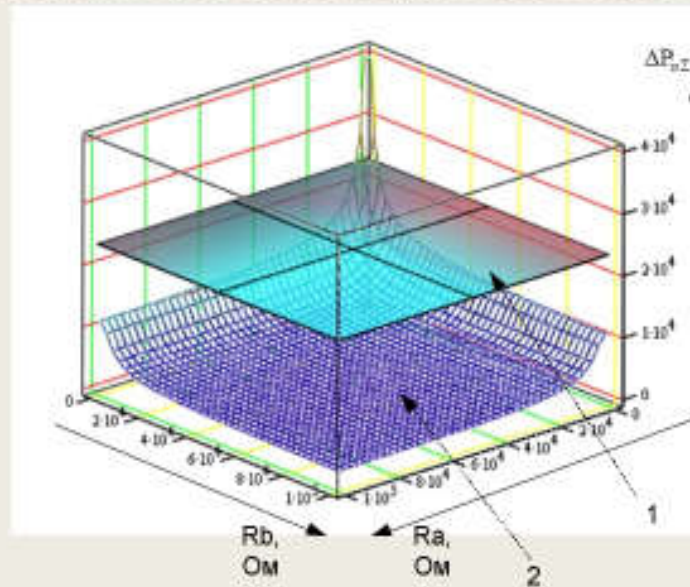


б)

Залежності норм векторів відносних чутливостей від відхилення:
а – загальний графік залежностей;
б – функція різниці норми чутливості до g_c і норми чутливості до g_b .

12

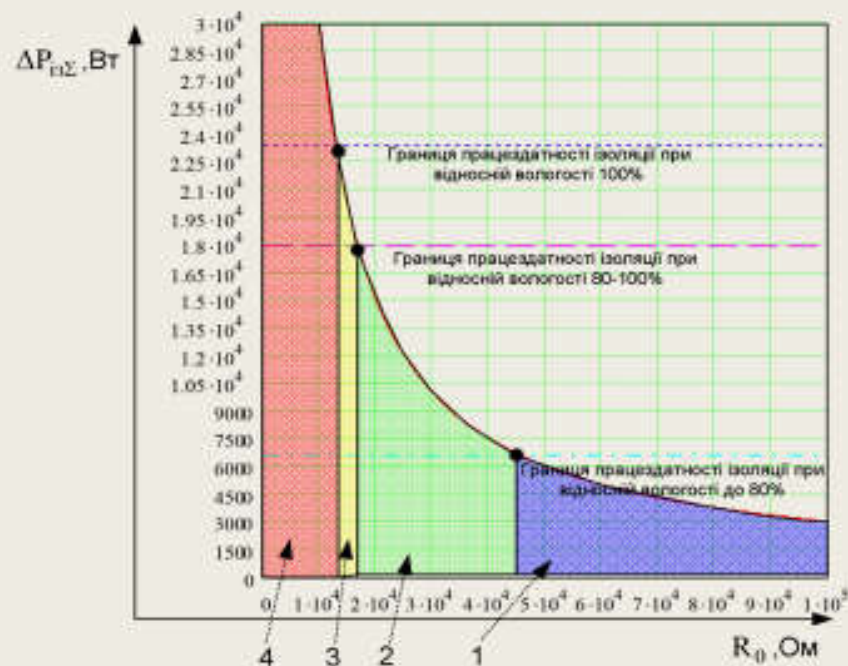
АНАЛІЗ ПРОСТОРУ ЗМІНИ ЗНАЧЕНЬ ДІАГНОСТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ РОБОТОЗДАТНОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ



Поверхня залежності потужності втрат в ізоляції із за струмів стікання на землю від обернених величин діагностичних показників для вологої погоди

13

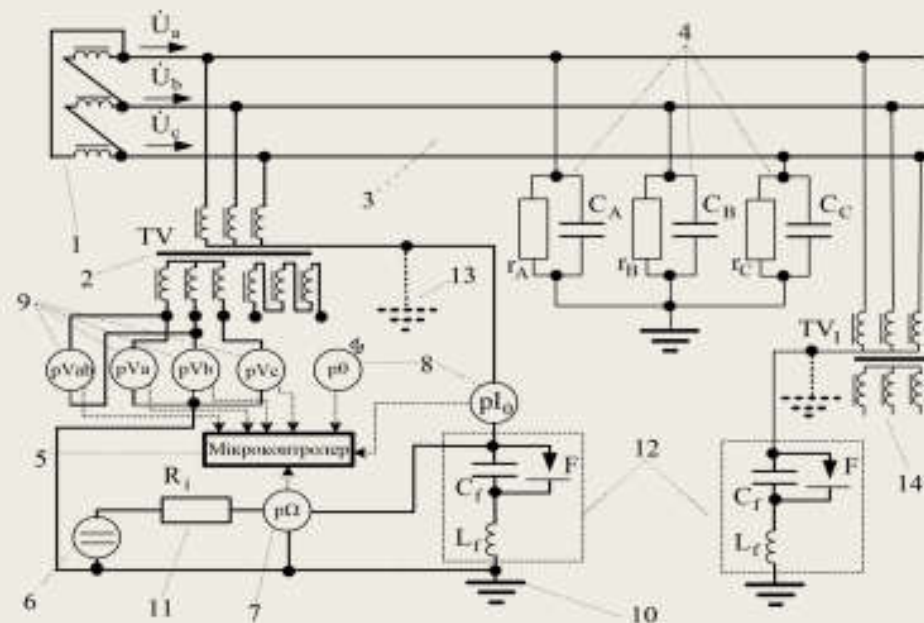
АНАЛІЗ ПРОСТОРУ ЗМІНИ ЗНАЧЕНЬ ДІАГНОСТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ РОБОТОЗДАТНОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ



Залежність потужності втрат в ізоляції через струми стікання на землю від загального опору ізоляції відносно землі $P_{в} = f(R_0)$

14

МЕТОД НЕПЕРЕРВНОГО КОНТРОЛЮ ІЗОЛЯЦІЇ



Структурна схема пристрою для технічної реалізації методу контролю ізоляції на основі вимірювання загального активного опору ізоляції і напруг фаз мережі відносно землі

15

МЕТОД НЕПЕРЕРВНОГО КОНТРОЛЮ ІЗОЛЯЦІЇ

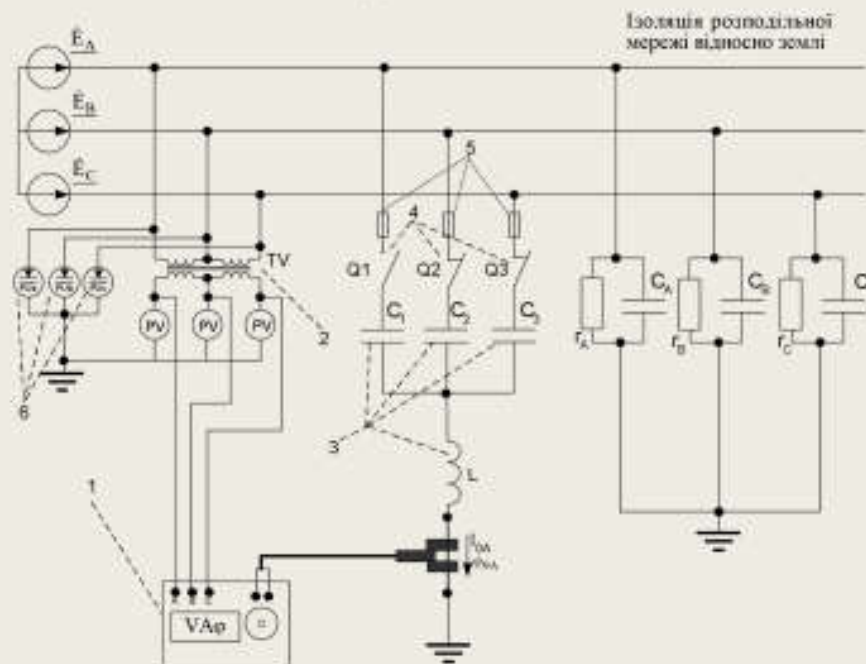
Функція розрахункового алгоритму методу:

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \frac{1.5 \cdot U_f}{\sqrt{(1/R_0)^2 + (\omega C - B_L)^2}} \times \right. \\
 & \left. \times \sqrt{\left[g_b + g_c + \frac{\omega C_0 (K_c - 1)}{3\sqrt{3}} \right]^2 + \left[\frac{g_a - g_c}{\sqrt{3}} + \frac{\omega C_0 \cdot (1 + K_c) - 2B_L}{3} \right]^2} = U_A; \right. \\
 & \left. \times \frac{1.5 \cdot U_f}{\sqrt{(1/R_0)^2 + (\omega C - B_L)^2}} \times \right. \\
 & \left. \sqrt{\left[g_a + g_c \right]^2 + \left[\frac{g_c - g_a}{\sqrt{3}} + \frac{2\omega C_0 \cdot K_c - 2B_L}{3} \right]^2} = U_B; \right. \\
 & \left. \times \frac{1.5 \cdot U_f}{\sqrt{(1/R_0)^2 + (\omega C - B_L)^2}} \times \right. \\
 & \left. \sqrt{\left[g_a + g_b + \frac{\omega C_0 \cdot (K_c - 1)}{3\sqrt{3}} \right]^2 + \left[\frac{g_a - g_b}{\sqrt{3}} + \frac{\omega C_0 \cdot (1 + K_c) - 2B_L}{3} \right]^2} = U_C, \right.
 \end{aligned}$$

де $K_c = C_{ap} / C_{сер}$ – коефіцієнт несиметрії ємностей крайніх фаз мережі відносно землі; C_0 – загальна ємність мережі відносно землі; B_L – сумарна реактивна провідність всіх індуктивних елементів

16

МЕТОД ПЕРІОДИЧНОГО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ІЗОЛЯЦІЇ ФАЗ РМ ВІДНОСНО ЗЕМЛІ



Принципова схема пристрою контролю ізоляції окремих фаз відносно землі

17

МЕТОД ПЕРІОДИЧНОГО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ІЗОЛЯЦІЇ ФАЗ РМ ВІДНОСНО ЗЕМЛІ

Параметри ізоляції згідно рисунку

$$\left\{ \begin{array}{l} g_a + \frac{\omega}{\sqrt{3}} \cdot (C_b - C_c) = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{0A}}{1.5U_n} \cdot \cos(\varphi_{0A} - 30^\circ); \\ g_b + \frac{\omega}{\sqrt{3}} \cdot (C_c - C_a) = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{0B}}{1.5U_n} \cdot \cos(\varphi_{0B} - 150^\circ); \\ g_c + \frac{\omega}{\sqrt{3}} \cdot (C_a - C_b) = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{0C}}{1.5U_n} \cdot \cos(\varphi_{0C} + 90^\circ); \\ \frac{g_c - g_b}{\sqrt{3}} + \omega \cdot C_a - \frac{B_L}{3} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{0A}}{1.5U_n} \cdot \cos(\varphi_{0A} - 30^\circ); \\ \frac{g_a - g_c}{\sqrt{3}} + \omega \cdot C_b - \frac{B_L}{3} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{0B}}{1.5U_n} \cdot \cos(\varphi_{0B} - 150^\circ); \\ \frac{g_b - g_a}{\sqrt{3}} + \omega \cdot C_c - \frac{B_L}{3} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{0C}}{1.5U_n} \cdot \cos(\varphi_{0C} - 30^\circ). \end{array} \right.$$

18

ВИСНОВКИ

МКР вирішує науково-практичну задачу розробки єдиної теорії діагностичних методів для забезпечення діагностичної підтримки індивідуальних систем контролю надійності під час експлуатації та ремонту РП 6-35 кВ. Розвиток теорії полягає у визначенні закономірностей побудови уніфікованої системи моніторингу стану ізоляції для РП 6-35 кВ, що працюють в режимі нейтралі ізоляції. Впровадження комбінованої системи діагностики контролю стану ізоляції дозволить підвищити надійність, безпеку та ефективність експлуатації обладнання РП.

Виявилось доцільним використовувати динамічні характеристики ефективного опору ізоляції всієї мережі як базовий діагностичний параметр технічного стану ізоляції РМ. Показано, що зміни технічного стану ізоляції окремих елементів РЕМ зумовлені утворенням шунтуючих зв'язків між струмоведучими частинами та землею.

Запропоновано принципи визначення працездатності ізоляції РМ щодо заземлення, які базуються на використанні норм електробезпеки та мінімізації втрат потужності в ізоляції за рахунок струмів витoku.

Для підвищення достовірності діагностування технічного стану ізоляції пропонується використовувати метод регулярного контролю параметрів ізоляції фази мережі відносно землі, заснований на принципі переміщення нульової точки трикутника напруг до центру вектора міжфазної напруги.

19

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ

ДОПОВІДЬ ЗАКІНЧЕНО

20