

Факультет електроенергетики та електромеханіки  
Кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного  
менеджменту

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Контроль ізоляції в системах електропостачання з ізольованою нейтраллю  
напругою до 1000 В»

Виконав: студент 2-го курсу, групи ЕМ-23м  
спеціальності 141 – Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Мовчана Н. С.

(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доцент каф. ЕСЕЕМ

Кутіна М. В.

(прізвище та ініціали)

« 05 » 12 2023 р.

Опонент: к.т.н., ст. викл. кадр. ЕСС

Сікорська О. В.

(прізвище та ініціали)

« 11 » 12 2023 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ЕСЕЕМ

д.т.н., проф. Бурбело М.Й.

(прізвище та ініціали)

« 8 » 12 2023 р.

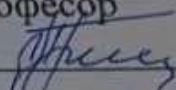
Вінниця – 2023

Вінницький національний технічний університет  
Факультет електроенергетики та електромеханіки  
Кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту  
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)  
Галузь знань 14 «Електрична інженерія»  
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
Освітньо-професійна програма – Енергетичний менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕСЕЕМ

д.т.н, професор

 М. Й. Бурбело  
19. вересня 2023 року

ЗАВДАННЯ  
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ  
МОВЧАНУ НАЗАРІЮ СЕРГІЙОВИЧУ  
(прізвище, ім'я, по батькові)

- Тема роботи: Контроль ізоляції в системах електропостачання з ізолюваною нейтраллю напругою до 1000 В  
керівник роботи к.т.н., доцент кафедри ЕСЕЕМ ВНТУ Кутіна Марина Василівна  
затверджені наказом ВНТУ від 18. 09. 2023 року № 247
- Термін подання студентом роботи “ 04 ” 12 2023 року
- Вихідні дані до роботи: 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.
- Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Стан проблеми та задачі дослідження. 2. Аналіз існуючих методів визначення провідності ізоляції. 3. Вдосконалення методів контролю ізоляції. 4. Економічна частина. 5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.
- Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)  
Аналіз існуючих методів визначення провідності ізоляції фаз відносно землі.  
Аналіз існуючих методів визначення провідності ізоляції мережі відносно землі.  
Матеріали роботи.

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видачі	завдання прийм.
Спеціальна частина	Кутіна М.В., к.т.н., доц. каф. ЕСЕЕМ		
Економічна частина	Шулле Ю. А., к.т.н., доц. каф. ЕСЕЕМ		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Кобилянський О. В., зав. кафедри БЖДПБ, д.пед.н., професор		

7. Дата видачі завдання 16.09 2023р

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Прим.
1	Стан проблеми та задачі дослідження	18.09.2023р.- 29.09.2023р.	
2	Аналіз існуючих методів визначення провідності ізоляції	2.10.2023р.- 20.10.2023р.	
3	Вдосконалення методів контролю ізоляції.	23.10.2023р.- 3.11.2023р.	
4	Економічна частина	6.11.2023р.- 17.11.2023р.	
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	20.11.2023р.- 27.11.2023р.	
6	Оформлення пояснювальної записки, графічного матеріалу та презентації	28. 11.2023р. - 4.12.2023р	

Студент  Мовчан Н. С.

(підпис)

Керівник роботи  Кутіна М. В.

(підпис)

Нормоконтроль  Войтюк Ю. П.

(підпис)

Факультет електроенергетики та електромеханіки  
Кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного  
менеджменту

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Контроль ізоляції в системах електропостачання з ізольованою нейтраллю  
напругою до 1000 В»

Виконав: студент 2-го курсу, групи ЕМ-23м  
спеціальності 141 – Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Мовчана Н. С.

(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доцент каф. ЕСЕМ

Кутіна М. В.

(прізвище та ініціали)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р.

Опонент: \_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р.

Допущено до захисту  
Завідувач кафедри ЕСЕМ  
д.т.н., проф. Бурбело М.Й.

(прізвище та ініціали)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р.

Вінниця – 2023

Вінницький національний технічний університет  
Факультет електроенергетики та електромеханіки  
Кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту  
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)  
Галузь знань 14 «Електрична інженерія»  
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
Освітньо-професійна програма – Енергетичний менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри ЕСЕЕМ  
д.т.н, професор  
\_\_\_\_\_ М. Й. Бурбело  
\_\_\_\_\_ 2023 року

З А В Д А Н Н Я  
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ  
МОВЧАНУ НАЗАРІЮ СЕРГІЙОВИЧУ  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Контроль ізоляції в системах електропостачання з ізольованою нейтраллю напругою до 1000 В  
керівник роботи к.т.н., доцент кафедри ЕСЕЕМ ВНТУ Кутіна Марина Василівна  
затверджені наказом ВНТУ від 18. 09. 2023 року № 247
2. Термін подання студентом роботи “ 04 ” 12 2023 року
3. Вихідні дані до роботи: Схеми та конструктивне виконання систем електропостачання з ізольованою нейтраллю. Правила технічної експлуатації. Методи та засоби контролю ізоляції в системах електропостачання з ізольованою нейтраллю напругою до 1000 В.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Стан проблеми та задачі дослідження. 2. Аналіз існуючих методів визначення провідності ізоляції. 3. Вдосконалення методів контролю ізоляції. 4. Економічна частина. 5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)  
Аналіз існуючих методів визначення провідності ізоляції фаз відносно землі.  
Аналіз існуючих методів визначення провідності ізоляції мережі відносно землі.  
Матеріали роботи.

## 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., зав. кафедри БЖДПБ, д.пед.н., професор		

## 7. Дата видачі завдання 16.09 2023р

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Стан проблеми та задачі дослідження	18.09.2023р.- 29.09.2023р.	
2	Аналіз існуючих методів визначення провідності ізоляції	2.10.2023р.- 20.10.2023р.	
3	Вдосконалення методів контролю ізоляції.	23.10.2023р.- 3.11.2023р.	
4	Економічна частина	6.11.2023р.- 17.11.2023р.	
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	20.11.2023р.- 27.11.2023р.	
6	Оформлення пояснювальної записки, графічного матеріалу та презентації	28. 11.2023р. - 4.12.2023р	

Студент \_\_\_\_\_ Мовчан Н. С.  
( підпис )

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Кутіна М. В.  
( підпис )

Нормоконтроль \_\_\_\_\_ Войтюк Ю. П.  
( підпис )

## АНОТАЦІЯ

УДК 621.316

Мовчан Назарій Сергійович. Контроль ізоляції в системах електропостачання з ізолюваною нейтраллю напругою до 1000 В. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітня програма – «Енергетичний менеджмент». – Вінниця, ВНТУ, 2023 – 108 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 44 назв; рис.: 27; табл. 7.

В роботі проведено дослідження існуючих методів контролю ізоляції в системах електропостачання з ізолюваною нейтраллю напругою до 1000 В.

Запропоновано метод заснований на принципі створення певного несиметричного режиму, що передбачає по чергове випробування фаз мережі, при якому вимірюють напругу випробуваної фази, струм в дроселі і потужність.

Розраховано основні техніко-економічні показники застосування запропонованого методу.

Розглянуто питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

Ключові слова: контроль ізоляції, ізолювана нейтраль, виявлення пошкодження.

## ABSTRACT

UDC 621.315.

Movchan Nazarii Serhiyovych. Control of insulation in power supply systems with an isolated neutral voltage up to 1000 V. Master's qualification thesis on specialty 141 "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics", educational program - "Energy management". – Vinnytsia, VNTU, 2023 – 108 p.

In Ukrainian speech Bibliography: 44 titles; Fig.: 27; table 7.

In the work, a study of existing insulation control methods in power supply systems with an isolated neutral voltage up to 1000 V was conducted.

The proposed method is based on the principle of creating a certain asymmetric mode, which involves alternate testing of network phases, during which the voltage of the tested phase, the current in the choke, and the power are measured.

The main technical and economic indicators of application of the offered methods are calculated.

The issues of labor protection and safety in emergency situations are considered.

Key words: insulation control, isolated neutral, damage detection.



## ЗМІСТ

ВСТУП .....	6
РОЗДІЛ 1 СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	9
1.1 Загальна характеристика об’єкту дослідження.....	9
1.2 Вибір сукупності контрольованих параметрів.....	15
1.3 Аналіз існуючих методів визначення провідності ізоляції фаз відносно землі.....	23
1.4 Висновки .....	29
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ПРОВІДНОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ.....	31
2.1 Метод, що передбачає поділ повної провідності на складові за рахунок введення додаткової провідності .....	31
2.2 Метод, що передбачає поділ повної провідності на складові фазочутливого приладу з регульованою фазою опорної напруги.....	32
2.3 Метод, що передбачає поділ повної провідності на складові фазочутливого приладу з фазою опорної напруги яка має регламентований кут зсуву.....	33
2.4 Метод, що передбачає представлення трифазної мережі у вигляді активного двухполюсника .....	36
2.5 Метод, що передбачає увімкнення вторинної обмотки трансформатора між штучно створеною нульовою точкою і землею .....	40
2.6 Висновки .....	43
РОЗДІЛ 3 ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ІЗОЛЯЦІЇ.....	45
3.1 Метод визначення провідності ізоляції мережі з урахуванням коефіцієнту її асиметрії.....	45
3.2 Дослідження похибок методу.....	51
3.3 Висновки .....	59

РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА .....	60
РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .....	65
5.1 Технічні рішення щодо безпечної експлуатації об'єкта.....	66
5.1.1 Технічні рішення щодо безпечної організації робочих місць .....	66
5.1.2 Електробезпека.....	67
5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	68
5.2.1 Мікроклімат .....	68
5.2.2. Склад повітря робочої зони.....	69
5.2.3 Виробниче освітлення .....	69
5.2.4 Виробничий шум.....	70
5.2.5 Виробничі вібрації .....	71
5.2.6 Психофізіологічні фактори .....	71
5.3 Дослідження стійкості роботи системи електропостачання з ізолюваною нейтраллю в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій.....	73
5.3.1 Дослідження стійкості роботи системи електропостачання з ізолюваною нейтраллю в умовах дії іонізуючих випромінювань.....	74
5.3.2 Дослідження стійкості роботи системи електропостачання з ізолюваною нейтраллю в умовах дії електромагнітного імпульсу .....	75
ВИСНОВОК.....	79
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	80
Додаток А .....	85
Додаток Б .....	89
Додаток В.....	97
Додаток Г .....	99

## ВСТУП

Актуальність. Підприємства гірничої промисловості з відкритою розробкою корисних копалин належать до сфери промислового виробництва, в якій питання безпеки стоять особливо суворо. Так, якщо в цілому по гірничометалургійній промисловості електротравматизм складає близько 15%, то на відкритих гірських розробках цієї галузі він досягає 47% від загального числа нещасних випадків [1-3]. В умовах криворізького басейну із загального числа нещасних випадків, пов'язаних із застосуванням електричної енергії, 40% відбулося в підземних виробках, 46,7% на кар'єрах, 13,3% на поверхні шахт, дробильно-сортувальних і збагачувальних фабриках ГЗК. Враховуючи перспективність видобутку корисних копалин відкритим способом, а також бурхливе зростання енергоозброєності підприємств, проблему підвищення електробезпеки в умовах кар'єрів слід вважати виключно актуальною.

Забезпечення електробезпеки [4-8] на відкритих гірських розробках залежить від успішного вирішення комплексу питань, серед яких основними є контроль опору ізоляції та кола заземлення електрообладнання. В даний час розроблено і експлуатується ряд пристроїв контролю опору ізоляції. Однак застосування їх не завжди виявляється ефективним. Пояснюється це тим, що розробка більшості з них проводилася без урахування специфічних особливостей об'єкта дослідження. Зосереджуючись на певному позитивному ефекті, що досягається в тому чи іншому схемному рішенні, не враховано всього комплексу вимог, яким повинен задовольняти метод вимірювання. За інших рівних умов, струм через тіло людини у випадку дотику його до струмоведучих частин електроустановки залежить від величини активної, реактивної провідностей ізоляції мережі (ІМ) і ступеня їх нерівномірного розподілу по фазах. Для вимірювання параметрів ізоляції в мережах напругою до 1000 В промисловістю випускається два прилади: мегомметр і міліамперметр, встановлений в реле витоку. Ці прилади вимірюють омичний опір ізоляції. Як показали теоретичні та експериментальні дослідження ряду авторів при вимірюванні в мережах, що

перебувають в експлуатації, омичний опір від активного може відрізнятись в десятки разів. Тому ці прилади можуть виконувати лише функції індикаторів аварійного стану ізоляції. Застосування методів, заснованих на принципі штучного зсуву нейтралі мережі, дозволило розширити область знань про активних і реактивних провідності ізоляції мережі, проте вони не передбачають визначення асиметрії провідностей ізоляції. Останнє здійснює істотний вплив на умови забезпечення електробезпеки. До недоліків деяких з цих методів слід також віднести використання режиму замикання фази на землю і великої кількості незбіжних у часі вимірювань. Таким чином, незважаючи на певні успіхи, досягнуті в напрямку розробки методів вимірювання, існує необхідність їх подальшого вдосконалення.

Метою дослідження є підвищення рівня надійності та безпеки експлуатації розподільних електричних мереж в системах електропостачання кар'єрів, шляхом вдосконалення методів і засобів контролю ізоляції.

Предметом дослідження є процеси, що відбуваються в ізоляції при експлуатації електричних мереж в умовах кар'єрів.

Об'єктом дослідження є методи і засоби контролю ізоляції електричних мереж в умовах кар'єрів.

Задачами дослідження є:

1. Аналіз об'єкта дослідження та вибір сукупності контрольованих параметрів;
2. Аналіз існуючих методів визначення провідності ізоляції фаз відносно землі;
3. Аналіз існуючих методів визначення провідності ізоляції мережі відносно землі;
4. Вдосконалення методів і засобів контролю ізоляції;
5. Визначення похибки методу та їх ефективності.

Новизна одержаних результатів. Отримав подальший розвиток метод контролю ізоляції в системах електропостачання з ізолюваною нейтраллю напругою до 1000 В, заснований на принципі створення певного несиметричного режиму, що передбачає почергове випробування фаз мережі, при якому вимірюють напругу випробуваної фази, струм в дроселі і потужність.

Апробація результатів магістерської кваліфікаційної роботи. Результати дослідження представлено на науково-технічній конференції факультету електроенергетики та електромеханіки: «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи» у 2023р./2024 р. Опубліковані тези доповідей [9]. (Контроль ізоляції в системах електропостачання з ізолюваною нейтраллю напругою до 1000 В).

## РОЗДІЛ 1 СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 1.1 Загальна характеристика об'єкту дослідження [10-13]

З метою спрощення задачі визначення параметрів ізоляції три фазної мережі з ізольованою нейтралю (ІН), що знаходиться під робочою напругою, вводять ряд припущень:

1. Напруга джерела симетрична і не залежить від параметрів ізоляції.
2. Ізоляцію струмоведучих каналів кожного елемента представляють у вигляді зосереджених паралельно включених між собою активної і реактивної провідностей.
3. При аналізі електробезпеки враховують тільки провідність між фазою і землею.
4. Провідність ізоляції не залежить від величини прикладеної напруги, а реактивна провідність носить ємнісний характер.

Враховуючи ці припущення, еквівалентну схему ізоляції електроустановки трифазного струму по відношенню до землі можна представити, як показано на рисунку 1.1.

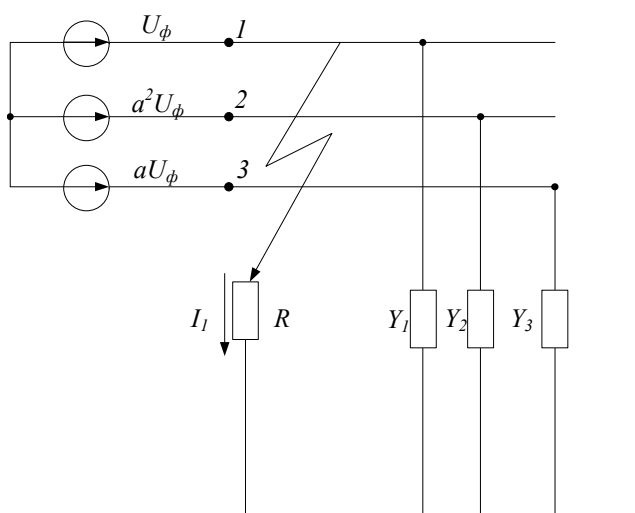


Рисунок 1.1 – Схема заміщення трифазної мережі для визначення струму через тіло людини при однополюсному дотику

Найбільш важким є випадок ураження електричним струмом внаслідок дотику людини безпосередньо до двох різних фаз електроустановки. У цих умовах результат ураження залежить від величини лінійної напруги мережі і опору тіла людини. Цей випадок не є типовим, 80-90% уражень електричним струмом відбувається при дотику до однієї фази [14, 15]. При цьому величина струму через тіло людини буде визначатися не тільки напругою мережі і опором тіла людини, а й опором ізоляції (ОІ) електросистеми. Користуючись законами електротехніки, визначимо струм через тіло людини при дотику до різних фаз мережі (рис. 1.1.). У комплексній формі:

$$\left. \begin{aligned} \dot{i}_1 &= U_{\phi} \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3}{1 + R(Y_1 + Y_2 + Y_3)} \left( 1 - \frac{Y_1 + a^2 Y_2 + a Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3} \right); \\ \dot{i}_2 &= U_{\phi} \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3}{1 + R(Y_1 + Y_2 + Y_3)} \left( a^2 - \frac{Y_1 + a^2 Y_2 + a Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3} \right); \\ \dot{i}_3 &= U_{\phi} \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3}{1 + R(Y_1 + Y_2 + Y_3)} \left( a - \frac{Y_1 + a^2 Y_2 + a Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3} \right); \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

де  $a$ ,  $a^2$  – фазні множники;  $U_{\phi}$  – фазна напруга мережі;  $R$  – опір тіла людини;  $Y_1$ ,  $Y_2$ ,  $Y_3$  – комплекси провідностей ізоляції відповідних фаз.

Із системи рівнянь (1.1) очевидно, що за інших рівних умов (напруга мережі, опір тіла людини) величина струму залежить від значень провідностей ізоляції фаз відносно землі. У загальному випадку вони не рівні між собою, тому завдання визначення стану ізоляції зводиться до знаходження трьох комплексних величин  $Y_1$ ,  $Y_2$ ,  $Y_3$ .

Рішення її пов'язане з певними труднощами. Методи, засновані на принципі накладення оперативних струмів на трифазну мережу, що знаходиться під напругою, для цих цілей непридатні. При використанні методів, заснованих на штучному зміщенні нейтралі мережі, можливо отримати лише два незалежних рівняння [14]. Це пояснюється тим, що в реальних умовах неможливо виміряти струм через ізоляцію однієї або двох фаз у разі асиметрії її активних ( $G_k$ ) і реактивних ( $b_k$ ) провідностей. З цього, звичайно, не можна зробити висновок, що

завдання визначення комплексів провідностей фаз у разі зазначеної асиметрії взагалі нерозв'язна. Для створення третього незалежного режиму в трифазній мережі можна піти шляхом штучного вирівнювання комплексів провідностей окремих фаз, тобто створити симетричний режим. Наприклад, якщо  $Y_3 > Y_2 > Y_1$ , що можливо встановити за значеннями напруг між фазами мережі і землею, то шляхом введення між першою фазою і землею  $Y_{Д1}$ , а другий  $Y_{Д2}$ , таких значень, при яких напруга між кожною фазою і землею будуть рівні, маємо :

$$Y_1 + Y_{Д2} = Y_1 + Y_{Д1} = Y_3 ,$$

звідки  $Y_3 - Y_2 = Y_{Д2}$  .

Використовуючи рівняння ще двох несиметричних режимів, наприклад, почергового замикання фази 1 і 2 на землю, маємо систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} Y_3 - Y_2 &= Y_{Д2}; \\ aY_3 - Y_2 &= \frac{\dot{I}_{K1}}{\dot{U}_{12}}; \\ Y_1 - aY_3 &= \frac{\dot{I}_{K2}}{\dot{U}_{12}}; \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

де  $I_{к1}, I_{к2}$  – комплекси струмів замикання фаз на землю;  $\dot{U}_{12}$  – комплекс лінійної напруги мережі. Визначник системи (1.2) не дорівнює нулю, система має рішення. Третій незалежний режим можна створити також шляхом зміни послідовності фаз джерела або його частоти. Здійснити це в умовах нормальної експлуатації мережі важко, тому ці методи визначення комплексів провідностей ізоляції фаз мережі представляють лише академічний інтерес. У зв'язку з цим запропоновано ряд способів обліку стану ізоляції без визначення провідностей окремих фаз. Найбільшої уваги заслуговує пропозиція [16] характеризувати стан ізоляції комплексом провідності ізоляції мережі  $Y_o$  і комплексним коефіцієнтом  $\delta$ , що враховує нерівномірний розподіл провідностей по фазах. Обидва параметра пов'язані з провідністю фаз нерівностями:



$$Y_0 = Y_1 + Y_2 + Y_3; \quad (1.3)$$

$$\delta = \frac{Y_1 + a^2 Y_2 + a Y_3}{Y_0}; \quad (1.4)$$

Аналіз впливу  $\delta$  на умови забезпечення електробезпеки виконаний в роботі [16]. Однак з деякими висновками у цій роботі не можна погодитися. Згідно [16] в граничному випадку асиметрії ізоляції  $|\delta| = 1$  і зміні аргументу комплексу  $\delta$ ,  $\varphi_\delta = 0 \div 180^\circ$ , відношення максимальної напруги фази мережі відносно землі до мінімальної, які визначалися по рівняннях

$$U_{\max} = U_\phi + U_0; \quad U_{\min} = \sqrt{U_\phi^2 + U_0^2 + U_\phi U_0},$$

не перевищує  $1,16$ , тому значенням аргументу  $\varphi_\delta$  можна знехтувати. На підставі цього наводиться спрощена формула визначення напруги дотику людини до фази мережі. Слід зауважити, що при  $|\delta| = 1$ ,  $U_0 = U_\phi$  і згідно з наведеними формулами  $U_{\max} = 2U_\phi$ , а  $U_{\min} = U_\phi$ . Відомо, що при глухому однофазному замиканні на землю в трифазній мережі з ізольованою нейтралю, модуль найбільшої напруги мережі відносно землі не може перевищувати лінійного. Винятком є мережа з відхідними від джерела повітряними і кабельними лініями, в якій однофазне замикання лінії через її значну індуктивність може викликати підвищення напруги між нешкодженими фазами і землею більше лінійного. У мережах, що мають значну ємність відносно землі, напруга між однією з фаз і землею може дещо перевищити лінійну не при глухому однофазному замиканні на землю, а при однофазному витокі через значний опір [17-18]. У зв'язку з цим виникла необхідність провести аналіз впливу  $\delta$  на умови забезпечення електробезпеки. Враховуючи рівності (1.3), (1.4), систему рівнянь (1.1) можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= U_\phi \frac{Y_0}{1+RY_0} (1-\delta); \\ \dot{I}_2 &= U_\phi \frac{Y_0}{1+RY_0} (a^2-\delta); \\ \dot{I}_3 &= U_\phi \frac{Y_0}{1+RY_0} (a-\delta). \end{aligned}$$

Модулі цих струмів визначаються рівняннями:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_0 \sqrt{1+|\delta|^2 - 2|\delta| \cos \varphi_\delta} = I_0 n_1; \\ I_2 &= I_0 \sqrt{1+|\delta|^2 - |\delta| (\cos \varphi_\delta + \sqrt{3} \sin \varphi_\delta)} = I_0 n_2; \\ I_3 &= I_0 \sqrt{1+|\delta|^2 - |\delta| (\cos \varphi_\delta - \sqrt{3} \sin \varphi_\delta)} = I_0 n_3. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Із системи рівнянь (1.5) випливає, що модуль струму однофазного дотику визначається двома співмножниками. Перший з них

$$I_0 = U_\phi \left| \frac{Y_0}{1+RY_0} \right|,$$

струм однофазного дотику при  $\delta = 0$ . Визначимо вплив модуля  $y_0$  і аргументу  $\varphi_0$  комплексу  $Y_0$  на струм однофазного дотику, коли ізоляція симетрична. Модуль цього струму представимо рівністю

$$I_0 = U_\phi \frac{y_0}{\sqrt{1+2Ry_0 \cos \varphi_0 + R^2 y_0^2}} = I_{n_0},$$

де  $I = U_\phi \frac{y_0}{1+Ry_0}$  – модуль струму при  $\varphi_0 = 0$

$$n_0 = \frac{1+Ry_0}{\sqrt{1+2Ry_0 \cos \varphi_0 + R^2 y_0^2}}$$

На рис. 1.2. представлена залежність  $n_0$  від  $y_0$  при зміні  $\varphi_0 = 0 \div 90^\circ$  і  $R = 1 \text{ кОм}$ . Максимальне значення струму маємо при  $y_0 = \frac{1}{R}$ . Якщо не враховувати аргумент комплексу  $Y_0$ , то в граничному випадку  $\varphi_0 = 90^\circ$  відносна похибка у визначенні струму досягає 42%. Другий співмножник ( $n_1, n_2, n_3$ ) враховує вплив асиметрії ізоляції на величину струму через тіло людини.

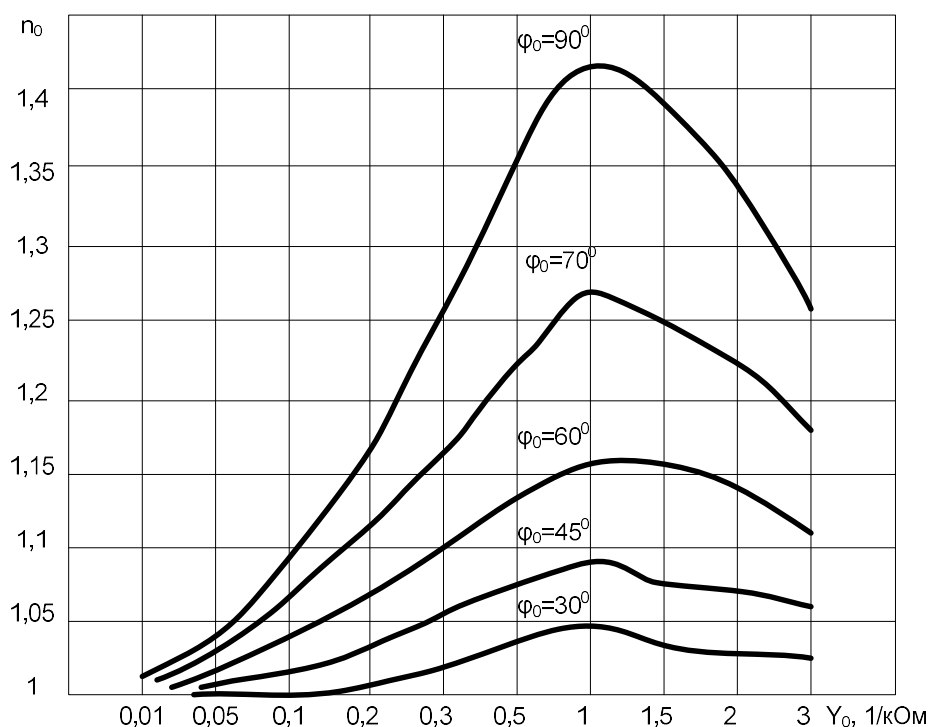


Рисунок 1.2 – Залежність коефіцієнта  $n_0$  від модуля і аргументу комплексу  $Y_0$

Графічна інтерпретація залежності  $n_K = f(\varphi_\delta)$  при  $|\delta| = const$  представлена на рис 1.3. У реальних умовах, виключаючи аварійні режими,  $|\delta| \leq 0,5$ , а  $\varphi_\delta$  може змінюватися в межах від  $0^\circ$  до  $360^\circ$ . З рис. 1.3. очевидно, що при такому діапазоні зміни  $|\delta|$  і  $\varphi_\delta$  значення коефіцієнтів  $n_1, n_2, n_3$  знаходиться в межах  $0,5 \div 1,5$ . Тому, при визначенні струму через тіло людини без урахування асиметрії, відносна похибка, визначається з рівняння

$$\varepsilon_k = \left| \frac{I_0 - I_0 n_k}{I_0 n_k} \right| \cdot 100\% ,$$

може досягати 100%. Очевидно, що наявність асиметрії підвищує небезпеку ураження людини електричним струмом, так як незалежно від значень  $|\delta|$  і  $\varphi_\delta$  один або два з коефіцієнтів  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$  завжди більше одиниці. Таким чином, завдання визначення параметрів ізоляції в трифазній мережі з ізольованою нейтраллю може бути зведена до знаходження двох комплексних величин  $Y_0$  і  $\delta$ . Як модулі, так і аргументи цих величин мають істотний вплив на умови забезпечення електробезпеки при дотику людини до струмоведучих частини електроустановки.

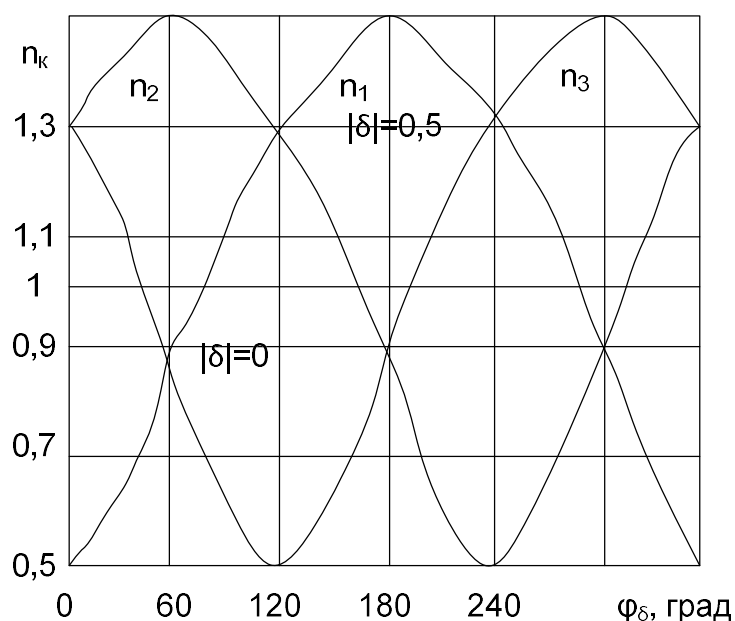


Рисунок 1.3 – Залежність  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ , від модуля і аргументу комплексу  $|\delta|$ .

## 1.2 Вибір сукупності контрольованих параметрів

Визначення параметрів ізоляції пов'язано з вирішенням завдань електробезпеки. У більшості випадків результати вимірювань піддаються статистичній обробці, де не потрібно великої точності вихідного матеріалу, а важливо знати, в якому діапазоні знаходиться те чи інше значення

досліджуваного параметра. Тому склалася думка [19], що при визначенні параметрів ізоляції достатньо мати похибка не перевищує  $\pm 20\%$ .

Правильне уявлення про похибки вимірювання будь-яким методом можна отримати в тому випадку, коли враховані всі фактори, що впливають на її величину. Сукупність цих факторів може бути визначена виходячи з аналізу об'єкта дослідження і використовуваного принципу вимірювання.

Для визначення параметрів ізоляції використовують два принципи: накладення оперативного струму на трифазну мережу і штучного створення несиметричних режимів.

На рис. 1.4. зображена принципова схема методу накладення на трифазну мережу оперативного постійного струму.

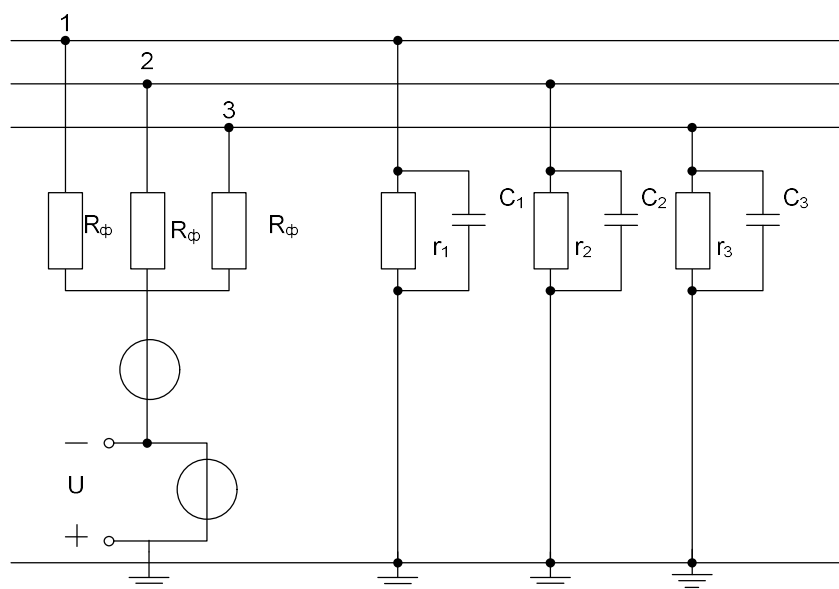


Рисунок 1.4 – Принципова схема методу накладення оперативного постійного струму на трифазну мережу

За результатами вимірювань напруги і струму визначимо активний опір ізоляції мережі:

$$R_0 = \frac{U}{I} - r_a - r_\phi ,$$

де  $r_{\phi} = \frac{R_{\phi}}{3}$ ;  $r_a$  – опір вимірювального ланцюга амперметра.

Граничну відносну похибку визначення  $R_0$  можна обчислити за рівнянням: враховуючи, що, маємо:

$$\varepsilon_{R_0} = \frac{1}{R_0} \left[ \left| \frac{\partial R_0}{\partial U} dU \right| + \left| \frac{\partial R_0}{\partial I} dI \right| \right]$$

враховуючи, що  $I = \frac{U}{R_0 + r_a + r_{\phi}}$ , маємо:

$$\varepsilon_{R_0} = (\varepsilon_i + \varepsilon_V) \left( 1 + \frac{r_a + r_{\phi}}{R_0} \right), \quad (1.6)$$

де  $\varepsilon_i$ ,  $\varepsilon_V$  – відносні похибки вимірювання відповідно струму і напруги.

З рівняння (1.6) очевидно, що похибка вимірювання залежить від класу точності використовуваних приладів, внутрішніх опорів їх вимірювальних ланцюгів і значення опору фільтра.

Однак при вимірюванні на постійному струмі визначається не активний опір, а омичний. Останнє залежить від величини оперативної напруги джерела і тривалості його застосування. Якщо вимірювання проводять тільки на постійному струмі, то значення величини омичного збігається з значенням активного при напрузі джерела 100-150 В [20-21], у той час як при накладенні оперативного постійного струму на робочу мережу вже при 15-20 В постійного можна отримати достовірні результати. При тривалому впливі постійної оперативної напруги на зволожену ізоляцію відбувається поступове зменшення постійного струму, а отже збільшення омичного опору. Причини зменшення струму можуть бути різні. Під дією постійного зовнішнього поля в результаті електролізу вологи виникає е.р.с. поляризації, яка спрямована проти зовнішнього

поля. Більш суттєвим фактором є виникнення об'ємних зарядів іонів домішок у приелектродних зонах, які при певній їх концентрації вступають в реакцію нейтралізації, утворюючи погано провідний шар. Зменшення струму може відбуватися за рахунок видалення вологи з діелектрика під дією електроосмосу.

Складність процесів в зволоженому діелектрику, що знаходиться під впливом постійної напруги та різні методики їх дослідження привели до суперечливих результатів експериментальних даних, отриманих різними авторами. Згідно [21] зменшення струму, а, отже, збільшення омичного опору відбувається тільки при підключенні «плюс» оперативного джерела до мережі, а «мінус» - до землі за рахунок видалення вологи з діелектрика. При підключенні джерела з зворотною полярністю струм залишається незмінним або зростає.

За даними інших дослідників [22-26] для деяких ділянок мереж шахт при полярності реле витоку «мінус» на мережу було виявлено значно більший омичний опір, ніж при включенні того ж реле, але з полярністю «плюс» джерела на мережу. В результаті цього був зроблений висновок, що збільшення омичного опору відбувається при будь-якій полярності оперативного джерела. Згідно з даними [22] величина омичного опору ізоляції як при прямій, так і при зворотній полярності оперативного джерела може в десятки разів перевищувати активний опір ізоляції. При накладанні джерела підвищеної частоти активна провідність також не збігається з вимірюваною на промисловій частоті [23].

Ця обставина привела до необхідності для цілей вимірювання використовувати методи, засновані на принципі штучного зсуву нейтралі мережі. Останні не вимагають спеціального джерела живлення і фільтра для приєднання його до мережі, оскільки асиметрія може бути створена шляхом введення між фазою і землею додаткової провідності. Розглянемо основні фактори, що впливають на похибки методів вимірювання, заснованих на цьому принципі. По відношенню до вітки з введеною додатковою провідністю трифазну мережу можна розглядати як активний двухполосник, внутрішній опір якого дорівнює опору ізоляції мережі. Зовнішня характеристика його може бути представлена рівнянням

$$\dot{U} = A + B\dot{I} ,$$

звідки невідомі коефіцієнти  $A$  і  $B$ , що визначають внутрішній опір двухполосника, можуть бути обчислені шляхом вимірювання струму, напруги та кута зсуву між ними для двох незалежних режимів. Нехай в першому режимі між фазою і землею вводиться провідність  $Y_{Д1}$ , а в другому  $Y_{Д2}$ . Для цих режимів напруга фази щодо землі може бути записано у вигляді:

$$\dot{U}_1 = \frac{\dot{I}_{M1}}{Y_0 + Y_{Д1}}; \quad \dot{U}_2 = \frac{\dot{I}_{M2}}{Y_0 + Y_{Д2}}, \quad (1.7)$$

де  $\dot{I}_{M1}$ ,  $\dot{I}_{M2}$  – комплекс струму короткого замикання фази на землю;  $Y_0$  – комплекс провідності ізоляції мережі.

Спільне рішення рівнянь (1.7.) дає:

$$Y_0 = \frac{Y_{Д2}\dot{U}_2 - Y_{Д1}\dot{U}_1}{\dot{U}_1 - \dot{U}_2} = g + jb \quad (1.8)$$

Розглянемо фактори, що впливають на похибку визначення складових комплексу  $Y_0$  при використанні різних режимів. Припустимо, що  $Y_{Д1} = 0$ , а  $\infty > Y_{Д2} > 0$ , тоді використовуючи рівняння (1.8) і враховуючи, що  $Y_{Д2} = jb_{Д}$ , складові комплексу  $Y_0$  можна визначити з рівнянь:

$$g_0 = \frac{m \sin \alpha b_{Д}}{m^2 - 2m \cos \alpha - 1};$$

$$b_0 = \frac{b_{Д}(m \cos \alpha - 1)}{m^2 - 2m \cos \alpha + 1},$$

де



$$m = \frac{U_1}{U_2}, \quad \cos \alpha = \frac{1 + \frac{b_{\text{д}}}{b_0} \sin \varphi_0}{m},$$

$$\sin \alpha = \frac{b_{\text{д}}}{y_0 m} \cos \varphi_0;$$

$\alpha$  – кут зсуву між векторами напруги  $U_1$  і  $U_2$ . Визначимо граничні відносні похибки обчислення складових комплексу  $Y_0$ .

$$\varepsilon_{g_0} = \frac{1}{g_0} \left( \left| \frac{\partial g_0}{\partial b_{\text{д}}} \right| db_{\text{д}} + \left| \frac{\partial g_0}{\partial \alpha} \right| d\alpha + \left| \frac{\partial g_0}{\partial m} \right| dm \right) = |\varepsilon_{b_{\text{д}}}| + \left| 2\varepsilon_v \left( 1 + \frac{2}{n} \right) \right| + \left| \frac{2\Delta\alpha (\text{ctg}^2 \delta_0 + n - 1)}{n \text{ctg} \delta_0} \right|; \quad (1.9)$$

$$\varepsilon_{b_0} = \frac{1}{b_0} \left( \left| \frac{\partial b_0}{\partial b_{\text{д}}} \right| db_{\text{д}} + \left| \frac{\partial b_0}{\partial \alpha} \right| d\alpha + \left| \frac{\partial b_0}{\partial m} \right| dm \right) = |\varepsilon_{b_{\text{д}}}| + \left| 2\varepsilon_v \left( \frac{1 - \text{ctg}^2 \delta_0}{n \text{ctg}^2 \delta_0} - 1 \right) \right| + \left| 2\Delta\alpha \text{ctg} \delta_0 \left( 1 + \frac{2}{n \text{ctg}^2 \delta_0} \right) \right|, \quad (1.10)$$

де  $\frac{db}{b_{\text{д}}}$  – межа відносної похибки установки  $b_{\text{д}}$ ;  $\varepsilon_v$  – відносна похибка вольтметра;

$\Delta\alpha$  – межа абсолютної похибки фазометра;

$$n = \frac{b_{\text{д}}}{b_0}; \quad \text{ctg} \delta_0 = \frac{b_0}{g_0};$$

З виразів (1.9), (1.10) очевидно, що похибки визначення складових залежать від класу точності використовуваних приладів, величини введеної провідності і співвідношення  $\frac{b_0}{g_0}$ . За інших рівних умов похибка зменшується з ростом величини введеної провідності. У граничних випадках:

$$n \rightarrow \infty \quad \varepsilon_{g_0} \rightarrow |2\varepsilon_v| + \left| \frac{\Delta\alpha}{\text{ctg} \delta_0} \right|;$$

$$\varepsilon_{b_0} \rightarrow |2\varepsilon_v| + |2\Delta\alpha \text{ctg} \delta_0|;$$

$$n \rightarrow 0 \quad \varepsilon_{g_0} = \varepsilon_{b_0} \rightarrow \infty.$$

Розглянемо другий випадок що  $Y_{Д1} = \infty$ , а  $\infty > Y_{Д2} > 0$ . У першому режимі вимірюється струм короткого замикання фази на землю  $I_{M1}$  і кут  $\alpha_1$  між цим струмом і одним з лінійних напруг. При введенні  $Y_{Д2}$  – напруга  $U$  і кут  $\alpha_2$  між цією напругою і вибраним лінійним.

Припустимо, що  $Y_{Д2} = G_0$ , тоді активна і реактивна провідності за результатами вимірювань обчислюються за формулами:

$$g_0 = \frac{I_{M1}}{U} \cos \alpha - g_{Д};$$

$$b_0 = \frac{I_{M1}}{U} \sin \alpha ,$$

де  $\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$ .

Граничні відносні похибки їх

$$\varepsilon_{g_0} = \left| \varepsilon_{g_{Д}} \right| + \left| \varepsilon_i \right| + \left| \varepsilon_V \right| + \left| \frac{\operatorname{ctg} \delta_0 2\Delta\alpha}{1+n_1} \right| ; \quad (1.11)$$

$$\varepsilon_{b_0} = \left| \varepsilon_i \right| + \left| \varepsilon_V \right| + \left| \frac{2\Delta\alpha}{(1+n_1) + \operatorname{ctg} \delta_0} \right| ; \quad (1.12)$$

де

$$n_1 = \frac{g_{Д}}{g_0} ;$$

$\varepsilon_i$  – гранична відносна похибка амперметра.

У граничному випадку:

$$n \rightarrow \infty, \quad \varepsilon_{g_0} = \varepsilon_{b_0} \rightarrow \left| \varepsilon_i \right| + \left| \varepsilon_V \right| ; \quad (1.13)$$

$$n \rightarrow 0, \quad \begin{aligned} \varepsilon_{g_0} &\rightarrow \left| \varepsilon_i \right| + \left| \varepsilon_V \right| + \left| 2\Delta\alpha \operatorname{ctg} \delta_0 \right| ; \\ \varepsilon_{b_0} &\rightarrow \left| \varepsilon_i \right| + \left| \varepsilon_V \right| + \left| \frac{2\Delta\alpha}{\operatorname{ctg} \delta_0} \right| . \end{aligned} \quad (1.14)$$

Таким чином, при створенні двох незалежних режимів слід прагнути до збільшення додаткової провідності, тобто мінімум похибки має місце, коли використовується два режими короткого замикання різних фаз на землю.

Крім величини провідності на похибку визначення  $g_0$  і  $b_0$  впливає їх співвідношення. Останню величину часто використовують для визначення області застосування методу, тобто знаходять значення  $\text{ctg } \delta_0$ , в межах яких похибки  $\varepsilon_{g_0}$  і  $\varepsilon_{b_0}$  не перевищують 20%. З виразів (1.9) – (1.12) очевидно, що ступінь впливу цього фактора буде тим менше, чим більша величина вводить провідності і точність у визначенні кута зсуву між векторними величинами. За інших рівних умов ( $n = \text{const}$ ,  $\Delta\alpha = \text{const}$ ) точність визначення якої-небудь із складових повної провідності  $y_0$  тим вище, чим менше інша складова цієї провідності. Наприклад, при використанні режиму короткого замикання і холостого ходу граничні відносні похибки обчислюються по рівняннях (1.13) – (1.14). Припустимо, що  $|\varepsilon_i| = |\varepsilon_v| = |\Delta\alpha| = \varepsilon_n$ , тоді

$$\varepsilon' = \frac{\varepsilon_{g_0}}{\varepsilon_{\Pi}} = 3 + 2\text{ctg}\delta_0 = 3 + 2\frac{b_0}{g_0};$$

Отже, чим більше  $b_0$ , тим менше точність визначення  $g_0$  і навпаки.

Специфіка вимірювань в трифазній мережі полягає ще й у тому, що опір ізоляції не є постійною величиною, при вимкненнях-відключеннях навантаження воно змінюється. Тому, чим більше проміжних вимірювань вимагає метод, тим більша ймовірність того, що зміна опору ізоляції відбудеться в момент проміжного вимірювання та істинне значення на невизначену величину буде відрізнитися від визначеного за результатами вимірювань. При більшій кількості незбіжних у часі вимірювань на результат обчислень може впливати коливання напруги джерела. Виключити вплив цього чинника можна шляхом зіставлення отриманих результатів при повторних вимірах, або коли метод забезпечує визначення параметрів ізоляції при використанні одного режиму. Останнє можливо при рівності провідностей окремих фаз відносно землі.

Слід також зазначити, що для виключення додаткових похибок при вимірюваннях бажано застосовувати прилади з великим внутрішнім опором паралельних обмоток і малим послідовних.

### 1.3 Аналіз існуючих методів визначення провідності ізоляції фаз відносно землі

Відомо, що для отримання достовірних результатів вимірювання необхідно проводити без порушення нормальної експлуатації мережі.

Визначимо умови забезпечення електробезпеки при використанні для вимірах методів, заснованих на принципі штучного зсуву нейтралі мережі.

Необхідним умовам, які забезпечують безпеку в даному випадку, є вимірювання без відключення реле витоку. Оскільки існуючі реле витоку засновані на принципі накладення випрямленої напруги на контрольовану мережу, то кращим варіантом слід вважати зміщення нейтралі мережі шляхом введення між фазою і землею ємностей провідності.

Однак ця умова не є достатньою. При введенні додаткової провідності напруга між струмоведучою частиною електроустановки і землею може перевищувати фазну напругу джерела  $U_{\phi}$ . Уставка ж спрацювання реле вибирається з умови

$$R_c = \frac{U_{\phi}}{I_{\text{дб}}},$$

де  $I_{\text{дб}}$  – тривалий безпечний струм через тіло людини. Тому можливе виникнення витоку  $R_y$ , струм через яку перевищує  $I_{\text{дб}}$ , хоча величина опору витоку перевищує уставку реле  $R_c$  і воно не спрацює.

У зв'язку з цим під необхідною і достатньою умовою забезпечення безпеки слід розуміти значення параметрів ізоляції мережі і введеної провідності  $b_0$ , при яких струм через  $R_y$ , що перевищує уставку реле  $R_c$ , що не більше тривалого

безпечного. Безпека від короточасних струмів витоків досягається вибором відповідного часу спрацьовування реле.

Таким чином, величина введеної провідності повинна визначатися з умов:

а) при підключенні додаткової провідності струм через виток, що перевищує уставку реле, не повинен бути більше тривало безпечного;

б) підключення додаткової провідності не повинно викликати спрацьовування реле. Визначимо співвідношення між значенням введеної провідності  $b_0$  і параметрами ізоляції мережі, при яких задовольняються ці умови. Припустимо, що ізоляція симетрична, а внутрішній опір реле витоків змінному струму нескінченно великий. Між першою фазою і землею вводиться додаткова ємнісна провідність (рис. 1.5).

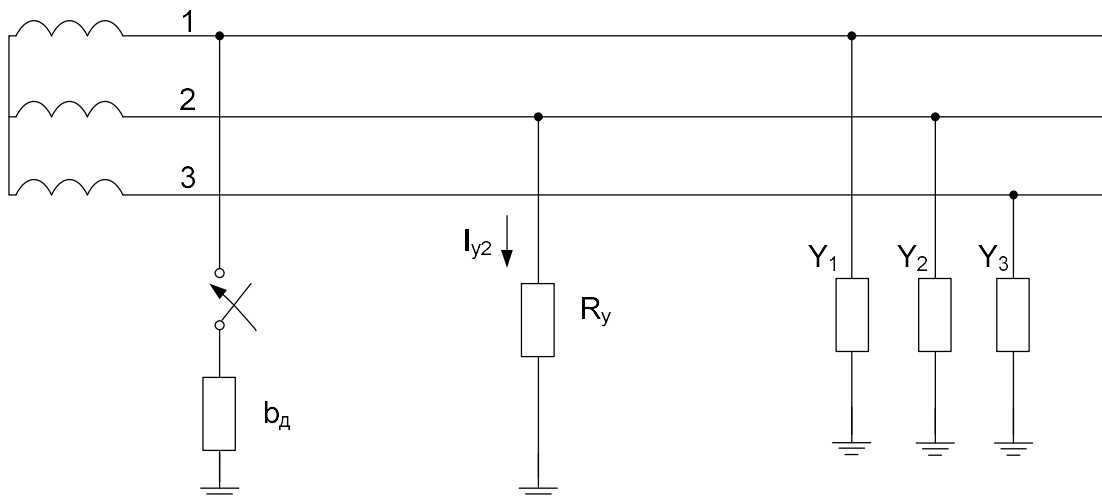


Рисунок 1.5 – Еквівалентна схема для визначення струму витоків при введенні додаткової провідності

Найбільш небезпечною, з точки зору дотику, буде наступна по послідовності фаза - друга. Струм витоків через другу фазу визначиться рівністю

$$I_{y2} = \frac{U_{\phi}}{R_y} \sqrt{\frac{g_0^2 + b_0^2 + 3b_d^2 + 3b_0b_d + \sqrt{3}g_0b_d}{g_0^2 + b_0^2 + b_d^2 + 2g_0g_y + 2b_0b_d + g_y^2}}$$

де  $U_\phi$  – фазна напруга мережі;  $g_0, b_0$  – відповідно активна і ємнісна провідності ізоляції мережі.

В якості граничного можна вважати випадок неспрацьовування реле при

$$R_y = R_c = \frac{U_\phi}{I_{д\delta}} = R_{кр}.$$

Максимальна асиметрія в мережі, незалежно від величини введеної ємнісної провідності, виникає коли  $g_0 = b_0 = 0$ , так як напруга зміщення нейтралі в цьому випадку  $U_0 = U_\phi$ . Для цих умов струм через витік у відносних одиницях визначиться рівністю

$$I_{y2*} = b_{д*} \sqrt{\frac{3}{b_{д*}^2 + 1}}, \quad (1.15)$$

$$\text{де } I_{y2*} = \frac{I_y}{I_{д\delta}}; \quad b_{д*} = R_{кр} \cdot b_{д}.$$

З рівняння (1.15) випливає, що, якщо  $I_{y2} \leq 1$ , то  $b_{д} \leq 0,707$ . Це означає, що безпека при вимірюванні буде завжди забезпечена, якщо  $b_{д} \leq \frac{0,707}{R_{кр}}$ .

При виборі величини введеної ємнісної провідності необхідно враховувати вплив її підключення на роботу реле. У схемах апаратів захисту є фільтр струмів нульової послідовності. В реле витоку, що використовують схему ЗВ (УАКІ-380), такий фільтр відсутній, крім цього в цих схемах струм нульової послідовності використовується для деформування захисних характеристик, тому вони більшою мірою схильні до впливу перехідних процесів. Існуючі роботи з дослідження перехідних процесів дають лише якісне уявлення, оскільки розглядають спрощені схеми або не враховують ємності схеми. Для дослідження кількісних співвідношень було виконано експериментальне дослідження впливу підключається ємності на роботу реле. З цією метою до моделі мережі

підключався найбільш поширене реле витоку типу УАКІ-380 і фіксувалося його спрацьовування залежно від параметрів моделі мережі і величини введеної ємності  $C_\delta$ . На рис. 1.6 представлена залежність  $C_\delta = f(C_0)$ , при якій реле уже спрацьовувало. Звідки видно, що величина введеної ємності зменшується в міру зменшення ємності і активного опору ізоляції мережі. Для виключення можливих спрацьовувань реле необхідно послідовно з ємністю вводити регульований активний опір  $R_P$ , а потім плавно зменшувати його до нуля. Експериментально встановлено, що реле не спрацює при початковому значенні  $R_P = 10 \div 15 \text{ кОм}$ , незалежно від параметрів ізоляції мережі.

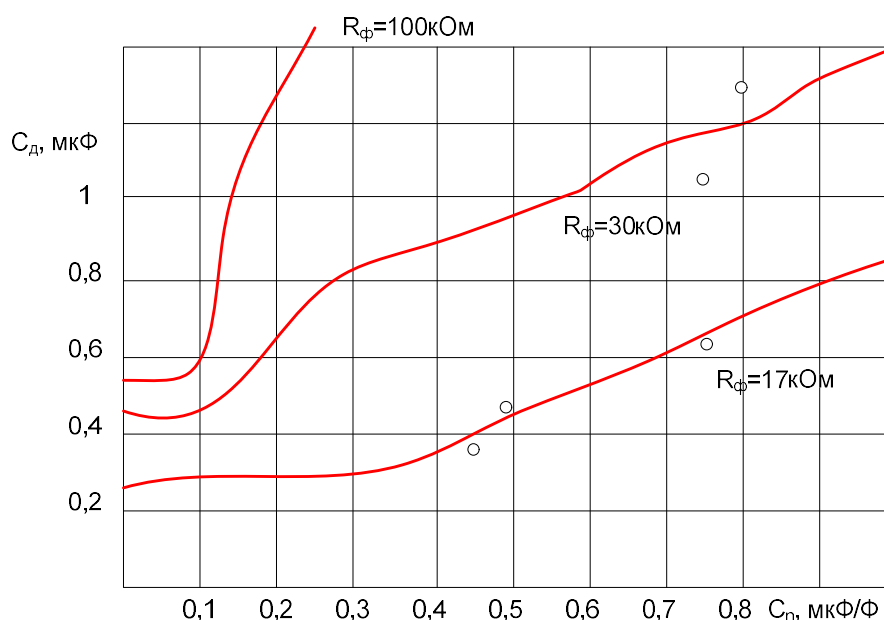


Рисунок 1.6 – Експериментальні залежності ємнісний додаткової провідності від параметрів ізоляції мережі, при яких реле витоку спрацьовує

Відомо кілька методів пофазного визначення провідностей ізоляції мережі. Всі вони можуть бути використані для визначення провідностей ізоляції лише в окремому випадку асиметрії - рівності реактивних провідностей окремих фаз відносно землі.

Найбільш широку популярність отримав метод Sahülka [23]. Завдання визначення параметрів ізоляції в цьому методі зводиться до знаходження

активних провідностей фаз  $g_1, g_2, g_3$  і реактивної провідності всієї мережі  $b_0$  в припущенні, що ємності окремих фаз мережі відносно землі рівні між собою, тобто  $C_1 = C_2 = C_3$ .

Для вирішення поставленого завдання використовується два незбіжних у часі режими: холостого ходу і введення додаткової провідності. При цьому вимірюють напруги фаз мережі відносно землі та лінійні. За результатами вимірювань будують векторні діаграми напруг для кожного режиму, з яких визначають кути між векторами фазних напруг. Так як геометрична сума активних і реактивних складових струмів витоку для кожного з двох режимів дорівнює нулю, то представляється можливим, висловлюючи ці струми через провідності ізоляції і напруги, скласти чотири рівняння, необхідні для визначення невідомих величин. Рішення системи чотирьох рівнянь вимагає попереднього визначення 14 коефіцієнтів.

Деякі методи, не вимагає громіздких обчислень, але використовує велику кількість незбіжних у часі вимірювань. В такому методі попередньо визначають  $y_0, b_0, g_0$ , потім закорочують фазу на землю і вимірюють струм короткого замикання  $I_M$ . Розділивши його на величину лінійної напруги, визначають значення додаткової провідності  $b_\Delta$ , що забезпечує мінімум похибки. Підключаючи по черзі  $b_\Delta$  до другої і третьої фаз (рис. 1.7.)

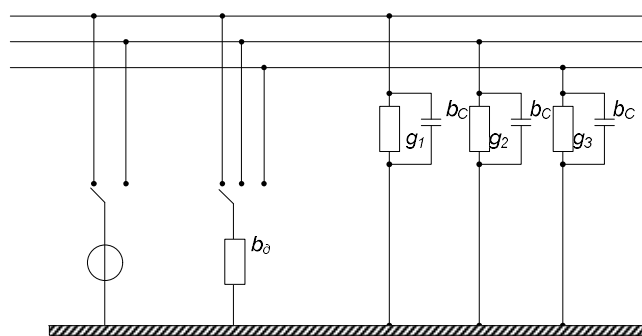


Рисунок 1.7 – Принципова схема методу пофазного визначення провідності ізоляції.



Визначають струми замикання на землю першої фази  $I_{M2}$ ,  $I_{M3}$ . За умови рівності ємнісних провідностей окремих фаз сума активних двох фаз може бути визначені за формулою

$$g_2 + g_3 = \frac{I_{M2}^2 - I_{M3}^2}{\sqrt{3}U_{\text{л}}^2 b_{\text{д}}}.$$

Проводячи аналогічний експеримент, для інших фаз маємо

$$g_3 + g_1 = \frac{I_{M3}^2 - I_{M1}^2}{\sqrt{3}U_{\text{л}}^2 b_{\text{д}}}.$$

Враховуючи, що  $g_0 = g_1 + g_2 + g_3$  отримали систему трьох рівнянь з трьома невідомими.

Інші методи відрізняється від попередніх тим, що не вимагають введення додаткових провідностей. У цьому випадку вимірюють напругу окремих фаз відносно землі  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ , потім при відомих  $y_0$ ,  $g_0$ ,  $b_0$ , шукані  $g_1$ ,  $g_2$ ,  $g_3$ , знаходять шляхом вирішення трьох рівнянь з трьома невідомими:

$$U_1 = \frac{U_{\text{л}}}{y_0} \sqrt{g_2^2 + g_3^2 + g_2 g_3 - \sqrt{3}\omega C(g_3 - g_2) + \sqrt{3}\omega^2 C^2};$$

$$U_2 = \frac{U_{\text{л}}}{y_0} \sqrt{g_1^2 + g_3^2 + g_1 g_3 - \sqrt{3}\omega C(g_1 - g_3) + \sqrt{3}\omega^2 C^2};$$

$$U_3 = \frac{U_{\text{л}}}{y_0} \sqrt{g_1^2 + g_2^2 + g_1 g_2 - \sqrt{3}\omega C(g_2 - g_1) + \sqrt{3}\omega^2 C^2}.$$

Очевидно, що процес обчислення провідностей за наведеними рівняннями складний.

Метод, описаний в [24], заснований на принципі вирівнювання потенціалів фаз мережі відносно землі. Він вимагає установки вольтметрів між фазами і

землею і двох реостатів (рис. 1.8), включених між відповідними фазами і землею таким чином, щоб покази всіх вольтметрів були рівні фазній напрузі джерела.

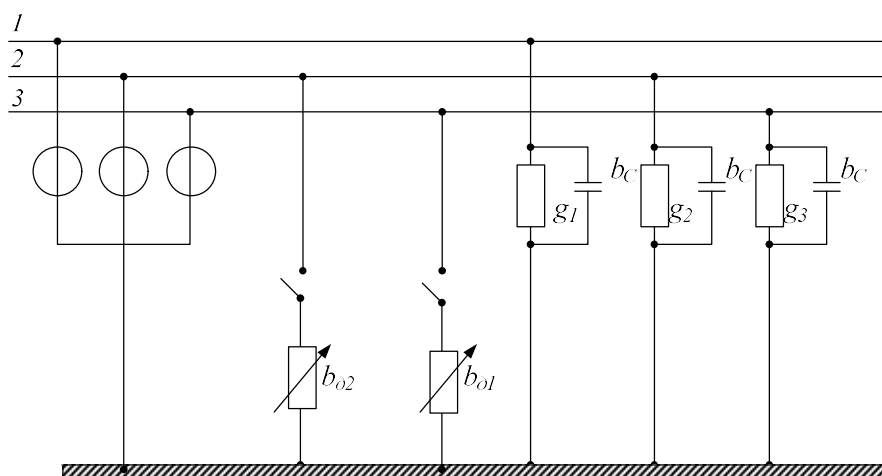


Рисунок 1.8 – Принципова схема методу пофазного визначення провідностей ізоляції, заснованого на вирівнюванні потенціалів фаз мережі відносно землі

Якщо ємності фаз мережі відносно землі рівні між собою, то будуть рівні і активні провідності. Наприклад, нехай  $g_1 > g_2 > g_3$ , тоді реостати вводяться між другою і третьою фазою. Після вирівнювання потенціалів маємо:

$$g_1 = g_2 + g_{d2} = g_3 + g_{d3}.$$

Коли відома сумарна провідність  $g_0$ , неважко визначити активні провідності ізоляції окремих фаз. Процес вирівнювання потенціалів окремих фаз складний і вимагає багато часу для проведення експерименту.

#### 1.4 Висновки

Відомо, що 80-90% уражень електричним струмом відбувається при дотику до однієї фази. При цьому величина струму через тіло людини буде визначатися не тільки напругою мережі і опором тіла людини, а й опором ізоляції електричної системи. Значення величин провідностей ізоляції фаз відносно землі в

загальному випадку не рівні між собою, тому завдання визначення стану ізоляції зводиться до знаходження трьох комплексних величин  $Y_1, Y_2, Y_3$ .

Визначення параметрів ізоляції пов'язано з вирішенням завдань електробезпеки. У більшості випадків результати вимірювань піддаються статистичній обробці, де не потрібно великої точності вихідного матеріалу, а важливо знати, в якому діапазоні знаходиться те чи інше значення досліджуваного параметра. Тому склалася думка, що при визначенні параметрів ізоляції достатньо мати похибку, що не перевищує  $\pm 20\%$ .

Метою дослідження є підвищення рівня надійності та безпеки експлуатації розподільних електричних мереж в системах електропостачання кар'єрів, шляхом вдосконалення методів і засобів контролю ізоляції.

Предметом дослідження є процеси, що відбуваються в ізоляції при експлуатації електричних мереж в умовах кар'єрів.

Об'єктом дослідження є методи і засоби контролю ізоляції електричних мереж в умовах кар'єрів.

Задачами дослідження є:

1. Аналіз об'єкта дослідження та вибір сукупності контрольованих параметрів;
2. Аналіз існуючих методів визначення провідності ізоляції фаз відносно землі;
3. Аналіз існуючих методів визначення провідності ізоляції мережі відносно землі;
4. Вдосконалення методів і засобів контролю ізоляції;
5. Визначення похибки методу та їх ефективності.

## РОЗДІЛ 2

## АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ПРОВІДНОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ

В даний час запропоновано велику кількість різних методів вимірювання провідності ізоляції мережі, однак практично застосовуються лише деякі з них.

2.1 Метод, що передбачає поділ повної провідності на складові за рахунок введення додаткової провідності

Досить широке застосування знайшов метод [25]. Він дозволяє проводити вимірювання без зняття робочої напруги і використовує три режими. Режим холостого ходу та короткого замикання фази на землю для визначення повної провідності, а для поділу її на складові - режим, при якому між фазою і землею вводиться додаткова провідність.

Простота цього методу є основним достоїнством, що виділяють його з ряду інших методів. Аналіз похибок методу [27] показав, що найбільша точність вимірювання досягається при введенні провідності, чисельно рівної за величиною повної провідності ізоляції. При допустимій вірогідною відносної похибки 20% і застосуванні вимірювальних приладів класу I, метод придатний для мереж у яких  $0,3 \leq \operatorname{tg} \delta_0 \leq 3$ . При аналізі похибок не враховувався вплив коливання лінійної напруги мережі. В роботі [28] показано, що цей фактор здійснює істотний вплив на похибку при вимірюванні даним методом. Прагнення розширити сферу застосування цього методу привело до необхідності використовувати фазочутливі прилади. В цьому відношенні характерний метод, [29] (рис. 2.1).

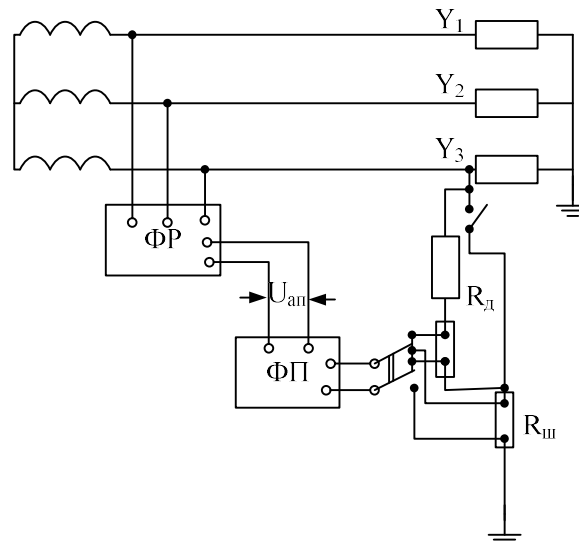


Рисунок 2.1 – Принципова схема методу визначення провідності ізоляції мережі відносно землі .

2.2 Метод, що передбачає поділ повної провідності на складові фазочутливого приладу з регульованою фазою опорної напруги

Відмінною рисою цього методу є використання для розділення повної провідності на складові з регульованою фазою опорної напруги. Припустимо, що в якості фазочутливого приладу (ФП) використовують ватметр. Тоді для визначення активної провідності фазу опорного напруги  $U_{on}$  регулюють так, щоб вона збіглася з фазою напруги між лінійним проводом і землею  $U_{\phi}$ . Покази ватметра будуть максимальними

$$P_{max} = U_{\phi} U_{on}.$$

Потім, не змінюючи фази, з'єднаємо лінійний провід із землею (рис. 2.1), покази ватметра в цьому випадку дорівнюють

$$P_l = I_{к.з} \cdot U_{on} \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_i),$$

де  $\varphi_u$  і  $\varphi_i$  – початкові фази струму замикання на землю і відповідно напруги лінійного проводу відносно землі. За результатами вимірювання обчислюють:

$$g_0 = \frac{P_1}{P_{\max}} = \frac{I_{\text{к.3}}}{U_{\phi}} \cos(\varphi_U - \varphi_i).$$

Процес визначення реактивної складової відрізняється лише тим, що фаза опорної напруги зсувається на  $90^\circ$ , тоді

$$b_0 = \frac{P_2}{P_{\max}} = \frac{I_{\text{к.3}}}{U_{\phi}} \cos(\varphi_U - \varphi_i - 90^\circ) = \frac{I_{\text{к.3}}}{U_{\phi}} \sin(\varphi_U - \varphi_i);$$

Похибка методу вимірювання залежить від співвідношення  $\frac{b_0}{g_0}$ , класу використовуваних приладів і точності установки фазочутливого приладу на максимальне і нульове відхилення стрілки приладу і досягає граничне значення  $\varepsilon = 20\%$  для мереж, у яких  $0,05 \leq \text{ctg}\delta_0 \leq 1,0$ . В подальшому було вдосконалено метод, що використовує режим холостого ходу і короткого замикання [30].

2.3 Метод, що передбачає поділ повної провідності на складові фазочутливого приладу з фазою опорної напруги яка має регламентований кут зсуву.

Тут використовуються два фазочутливі прилади - векторметри і два фазозміщуючі пристрої. Відмінною особливістю методу є те, що фази опорної напруги фазочутливих приладів зсуваються один відносно одного на  $90^\circ$  електричних. Завдяки цьому процес вимірювання в порівнянні з попереднім методом спрощується. На рис. 2.2 зображена принципова схема.

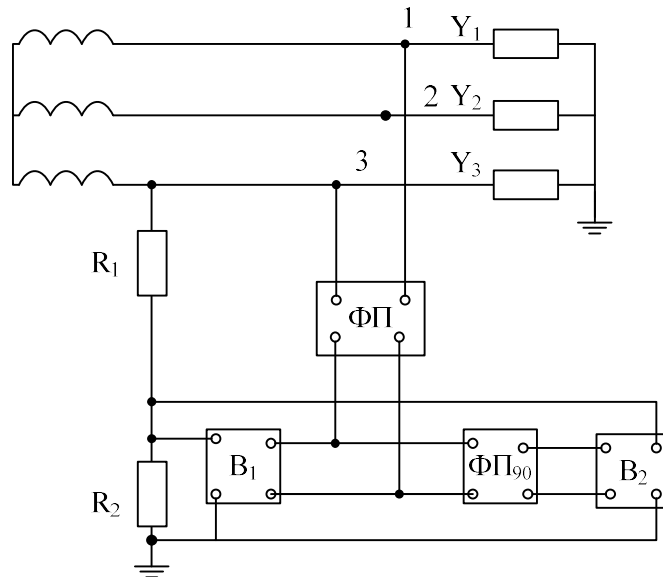


Рисунок 2.2 – Принципова схема методу визначення провідності ізоляції мережі відносно землі

Фазозміщуючий пристрій ФП служить для того, щоб подавати на входи векторметрів опорну напругу  $U_{on}$ , зміщене відносно лінійного на деякий кут  $\varphi$ . Опорна напруга на векторметр  $B_1$  подається безпосередньо, а на  $B_2$  – зі зміщенням на  $90^\circ$ . Вимірюється фазна напруга  $\dot{U}_1$  подається на входи векторметрів через потенціометр  $R_1, R_2$ , з великим внутрішнім опором. Векторметр  $B_1$  вимірює дійсну частину вектора  $\dot{U}_1$ , а  $B_2$  – уявну. У другому режимі проводять вимірювання складових струму короткого замикання, вважаючи  $R_1 = 0, R_2 = 10 \text{ Ом}$ . Розрахункова формула має вигляд:

$$g_0 = \frac{I'_{к.з.}}{U_1}; \quad b_0 = \frac{I''_{к.з.}}{U_1};$$

Отже, тривалість процесу вимірювання скорочується, але пристрій для вимірювання значно ускладнено. До того ж використання фазозміщуючих пристроїв ФП  $90^\circ$  вносить додаткові похибки у визначенні реактивної складової.

Загальним недоліком фазозміщуючих ланцюгів є залежність кута зсуву від частоти вхідної напруги. У найбільш досконалих фазозміщуючих пристроях

похибки підтримки квадратури досягає  $\pm 0,5^\circ$ , а похибка коефіцієнта передачі по модулю  $\pm 5\%$  за умови сталості частоти мережі. Середньоквадратична похибка визначення реактивної складової в даному методі може бути визначена

$$\varepsilon_{b_0} = \sqrt{2\varepsilon_B^2 + 2\varepsilon_A^2 + \left(\frac{\Delta\varphi}{\operatorname{ctg}\delta_0}\right)^2},$$

де  $\varepsilon_B$  – відносна похибка, обумовлена класом точності векторметра,  $\varepsilon_B = 1\%$ ;  $\varepsilon_A$  – відносна похибка коефіцієнта передачі по модулю,  $\varepsilon_A = 5\%$ ;  $\Delta\varphi$  – абсолютна похибка установки фази опорної напруги.

Фазовий зсув пристрої ФП визначається рівністю [31]

$$\psi = 2\operatorname{arctg}\omega CR.$$

Якщо  $\psi = 90^\circ$ , то  $\omega CR = 1$ . Похибка в установці кута опорної напруги при коливанні частоти мережі  $\Delta f = \pm 0,5 \text{ Гц}$  буде дорівнює

$$\Delta\varphi_1 = 90^\circ - 2\operatorname{arctg}\frac{310,8}{314} = 0,01.$$

З урахуванням похибки підтримки квадратури  $\Delta\varphi_2$ , загальна похибка установки кута опорної напруги

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 = 0,02$$

При необхідності визначення реактивної складової з відносною вірогідною похибкою  $\pm 20\%$  метод можна застосовувати для мереж, у яких  $\operatorname{ctg}\delta_0 \geq 0,103$ .

Похибка активної складової залежить від кута зсуву між лінійною напругою і опорною. Якщо кут регулювати так, щоб  $\varphi = 0$  або  $90^\circ$  за допомогою фазозміщувального пристрою, то похибка активної складової може бути зведена до подвоєної похибки векторметра.



Таким чином, застосування фазочутливих пристроїв з регульованою фазою опорної напруги дозволило підвищити точність визначення параметрів ізоляції. На жаль, досягається це шляхом значного ускладнення пристрою для вимірювання. Загальним недоліком розглянутих методів є використання режиму короткого замикання фази на землю, що підвищує небезпеку при вимірах, крім цього вони використовують порівняно велику кількість незбіжних у часі вимірювань.

#### 2.4 Метод, що передбачає представлення трифазної мережі у вигляді активного двухполюсника

Ці недоліки усунуті наступному методі, він заснований на представленні трифазної мережі у вигляді активного двухполюсника по відношенню до вітки замикання на землю з ємнісною провідністю  $b_0$  (рис. 2.3).

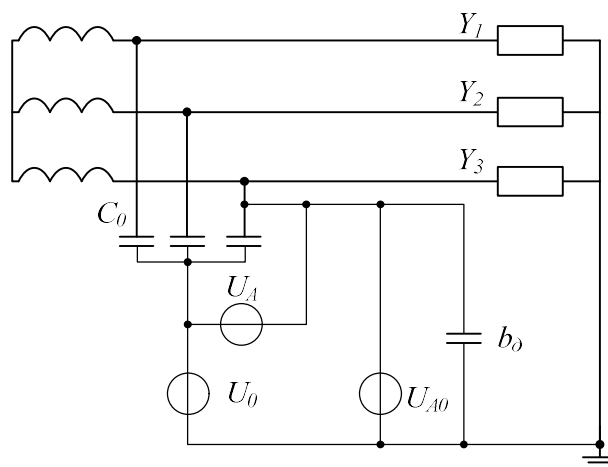


Рисунок 2.3 – Принципова схема методу 3-х вольтметрів

За умови симетрії фазних напруг джерела і провідностей фаз ізоляції мережі відносно землі е.р.с. двухполюсника буде дорівнює фазній напрузі джерела, а вхідний опір буде відповідати опору всіх гілок, включених паралельно між нейтраллю силового трансформатора і землею.

Відмінністю в даному методі є те, що стає можливим безпосередньо виміряти напругу на вхідному опорі. Дійсно, напруга, виміряна між штучно

створеної нульовою точкою і землею  $U_0$ , буде дорівнює напрузі на вхідному опорі двухполосника, якщо значенням опорів, що створюють штучну нульову точку, можна знехтувати в порівнянні з опором вимірювального ланцюга вольтметра. Вимірявши ще фазну напругу джерела  $U_A$  і напругу введеної провідності  $U_{A0}$ , визначають вхідні провідності за формулами:

$$y_{bx} = \frac{U_{A0}}{U_0} b_D; \quad b_{bx} = \frac{U_A^2 - U_{A0}^2 - U_0^2}{2U_0^2} b_D; \quad g_{bx} = \sqrt{y_{bx}^2 - b_{bx}^2}.$$

Введення між фазою і землею ємнісної провідності  $b_D$  дозволяє робити вимірювання без відключення реле витоку, а застосування трьох приладів - виключити похибку, обумовлену зміною робочої напруги і параметрами мережі. При відомих параметрах пристрої захисту та вимірювального ланцюга вольтметра визначення провідностей мережі відносно землі не представляє труднощів. Для отримання мінімальної похибки  $b_D$  необхідно встановлювати рівний вхідній провідності. Ця умова задовольняється при рівності  $U_0 = U_{A0}$ .

Визначимо похибку методу вимірювання. Середньоквадратична похибка визначення повної провідності ізоляції  $\varepsilon_{y_{bx}}$  може бути обчислена за формулою

$$\varepsilon_{y_{bx}} = \sqrt{2\varepsilon_V^2 + \varepsilon_D^2},$$

де  $\varepsilon_V$ ,  $\varepsilon_D$  – відповідно відносна похибка вольтметра, обумовлена класом точності приладу і встановленою додатковою провідністю. Похибка реактивної складової визначається рівнянням

$$\varepsilon_{b_{bx}} = \sqrt{\left(\frac{\partial b_{bx}}{\partial U_A} \frac{dU_A}{b_{bx}}\right)^2 + \left(\frac{\partial b_{bx}}{\partial U_{A0}} \frac{dU_{A0}}{b_{bx}}\right)^2 + \left(\frac{\partial b_{bx}}{\partial U_0} \frac{dU_0}{b_{bx}}\right)^2 + \left(\frac{\partial b_{bx}}{\partial b_D} \frac{db_D}{b_{bx}}\right)^2}$$

після підстановки приватних похідних

$$\varepsilon_{b_{bx}} = \sqrt{\varepsilon_v^2 \left( 8 + \frac{12}{\sin \varphi_{bx}} + \frac{6}{\sin^2 \varphi_{bx}} \right) + \varepsilon_d^2 \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{\sin \varphi_{bx}} \right)}$$

### Похибка активної складової

$$\varepsilon_{g_{bx}} = \sqrt{\varepsilon_{y_{bx}}^2 (1 + \operatorname{tg} \varphi_{bx})^2 + \varepsilon_{b_{bx}}^2 (\operatorname{tg} \varphi_{bx})^4}$$

З наведених рівнянь очевидно, що похибка складових в основному визначається значенням аргументу вхідної провідності  $\varphi_{bx}$ . При  $\varepsilon_v = \varepsilon_d = 1\%$ ,  $\varepsilon_{b_{bx}} = 20\%$ , коли  $\varphi_{bx} = 8^\circ 42'$ , а  $\varepsilon_{g_{bx}} = 20\%$ , якщо  $\varphi_{bx} = 61^\circ 31'$ , тобто при використанні приладів класу точності I і допустимої вірогідною похибки 20% метод придатний для мереж, у яких  $8^\circ 42' \leq \varphi_{bx} \leq 61^\circ 30'$ . Цими ж авторами запропонований інший метод, в якому провідності визначаються за результатами вимірювання напруги, струму і потужності (рис. 2.4).

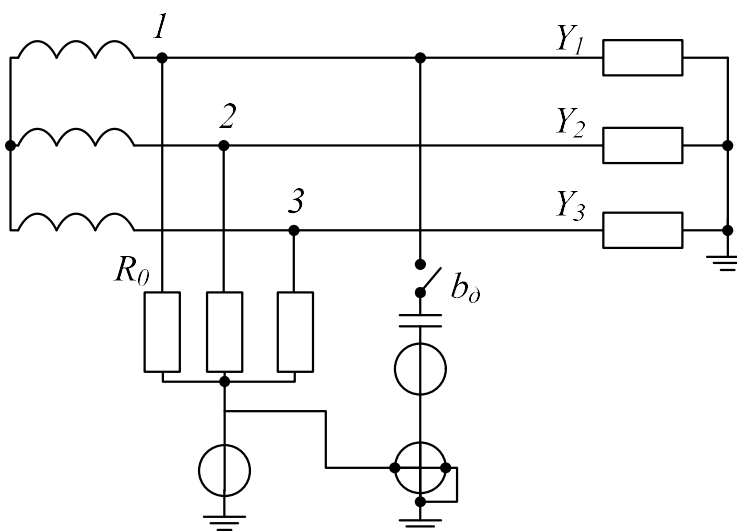


Рисунок 2.4 – Принципова схема метода амперметра, вольтметра, ватметра.

У цьому випадку розрахункові формули прості і не потребують підбір додаткової провідності:

$$y_0 = \frac{I}{U}; \quad g_0 = \frac{P}{U^2}; \quad b_0 = \sqrt{y_0^2 - g_0^2}.$$

Як зазначалося вище, обидва методи призначені для визначення параметрів ізоляції в разі рівності провідностей окремих фаз. Враховуючи переваги цих методів щодо забезпечення безпеки при вимірах і виключення похибок, обумовлених зміною напруги мережі і провідностей ізоляції, становить інтерес визначити область застосування методу у випадку асиметрії ізоляції.

Еквівалентна схема представлена на рис. 2.5.

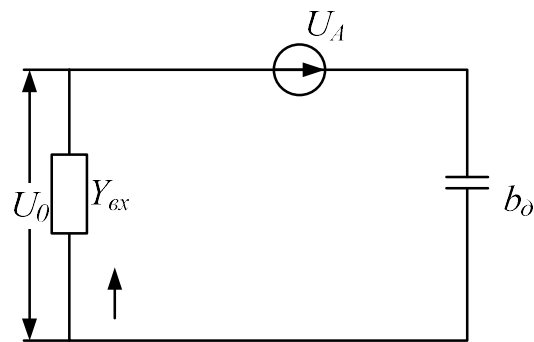


Рисунок 2.5 – Схема заміщення методу 3-х вольтметрів

Тут

$$\dot{U}_0 = U_\phi \frac{Y_{bx}\delta + b_D}{Y_{bx} + b_D}; \quad \dot{I} = U_\phi \frac{Y_{bx}b_D(1-\delta)}{Y_{bx} + b_D};$$

$$\dot{U}_A = U_\phi(1-\delta).$$

Вважаючи  $y_{bx} = b_0$  визначимо вхідні провідності

$$y_{и} = y_{bx} \sqrt{\frac{1 + |\delta|^2 - 2|\delta| \cos \varphi \delta}{1 + |\delta|^2 + 2|\delta| \cos \varphi \delta}} = y_{bx} \alpha, \quad (2.1)$$

де  $\varphi_{\delta}$  – аргумент коефіцієнта асиметрії.

Похибка формули (2.1) залежить від того, наскільки  $\alpha$  близько до одиниці. На рис. 2.7 (крива 1), наведена залежність похибки визначення вхідної провідності  $\varepsilon_{y_{bx}}$  від модуля коефіцієнта асиметрії  $\delta$  для гіршого випадку  $\varphi_{\delta} = 180^{\circ}$ . Звідки видно, що асиметрія ізоляції здійснює істотний вплив на похибки вимірювання  $\varepsilon_{y_{bx}} \leq 20\%$  для мереж у яких  $|\delta| \leq 0,091$ .

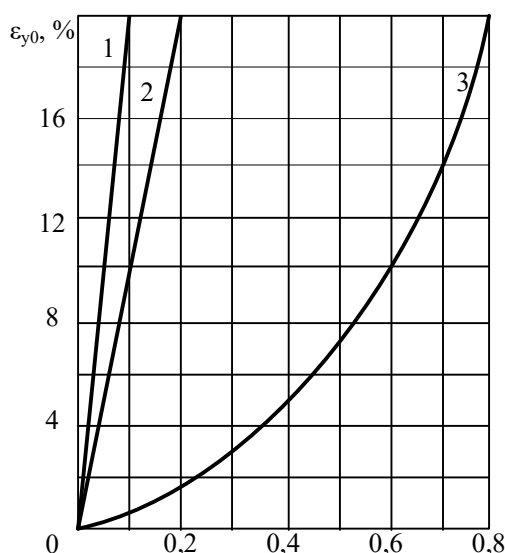


Рисунок 2.7 – Залежність граничної відносної похибки визначення провідності ізоляції мережі відносно землі від модуля коефіцієнта асиметрії.

2.5 Метод, що передбачає увімкнення вторинної обмотки трансформатора між штучно створеною нульовою точкою і землею

З точки зору способу створення несиметричного режиму перспективним є метод (рис. 2.8) в якому вторинна обмотка трансформатора включена між штучно створеною нульовою точкою і землею, а на первинну обмотку послідовно подаються три лінійні напруги мережі.

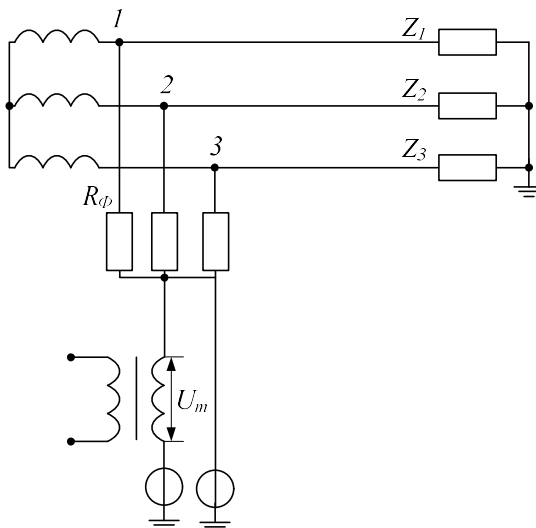


Рисунок 2.8 – Принципова схема методу визначення провідностей ізоляції мережі.

За результатами вимірювання напруги і струму визначаються виміряні провідності  $y_{11}$ ,  $y_{12}$ ,  $y_{13}$ . Провідність ізоляції мережі відносно землі обчислюється як середнє трьох вимірів:

$$y_0 = y_{\text{cp}} = \frac{y_{11} + y_{12} + y_{13}}{3}.$$

Еквівалентна схема методу представлена на рис. 2.9.

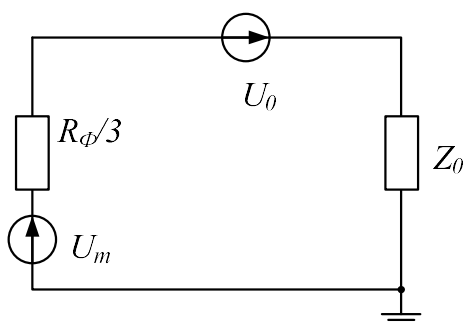


Рисунок 2.9 – Схема заміщення за методом к.т.н. Л.С. Тонкошкур

При не черговій подачі лінійних напруг на первинну обмотку трансформатора, комплекси струмів в опорі мережі  $Z_0$  визначаються рівністю:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 &= (U_T + U_0) \frac{3}{3Z_0 + R_\phi}; \\ \dot{I}_2 &= (a^2 U_T + U_0) \frac{3}{3Z_0 + R_\phi}; \\ \dot{I}_3 &= (a U_T + U_0) \frac{3}{3Z_0 + R_\phi}; \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

Напруги, що входять в систему рівнянь (2.2), можуть бути визначені з рис. 2.10.

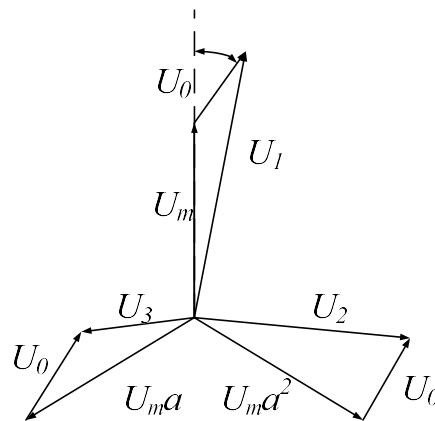


Рисунок 2.10 – Векторна діаграма напруг фаз мережі відносно землі при накладенні джерела змінного струму

Нехтуючи значенням  $\frac{R_\phi}{3}$  в порівнянні з опором ізоляції мережі та враховуючи,

що  $U_0 = U_\phi \delta$ , а параметри трансформатора підбрані так, що  $\frac{U_\phi}{U_T} = 1$  маємо:

$$y_{11} = \frac{I_1}{U_T} = y_0 \sqrt{1 + |\delta|^2 - 2|\delta| \cos(180^\circ - \gamma)} = \kappa_1 y_0;$$

$$y_{12} = \frac{I_2}{U_T} = y_0 \sqrt{1 + |\delta|^2 - 2|\delta| \cos(60^\circ + \gamma)} = \kappa_2 y_0;$$

$$y_{13} = \frac{I_3}{U_T} = y_0 \sqrt{1 + |\delta|^2 - 2|\delta| \cos(60^\circ - \gamma)} = \kappa_3 y_0;$$

З останніх рівнянь випливає, що похибка визначення залежить від коефіцієнта асиметрії ізоляції  $\delta$  і величини кута  $\gamma$ . При  $\gamma = \text{const}$  коефіцієнти мають максимальне значення відповідно коли  $\gamma = 0, 120^\circ$  і  $-120^\circ$ .

Для цих значень кутів на рис. 2.7 (крива 2.3), представлена залежністю  $\epsilon_{y_0}$  від  $|\delta|$ . Якщо провідність ізоляції мережі обчислювати за результатами вимірювання струму і напруги одного режиму, то  $\epsilon_{y_0} \leq 20\%$ , коли  $|\delta| \leq 0,2$  (крива 2), трьох режимів  $\epsilon_{y_0} \leq 20\%$ , коли  $|\delta| \leq 0,8$  (крива 3). У реальних умовах  $|\delta| \leq 0,5$ , тому на результати обчислення  $y_0$  по трьом режимам асиметрія ізоляції не робить істотного впливу.

## 2.6 Висновки

Правильне уявлення про похибки вимірювання будь-яким методом можна отримати в тому випадку, коли враховані всі фактори, що впливають на її величину. Сукупність цих факторів може бути визначена виходячи з аналізу об'єкта дослідження і використовуваного принципу вимірювання. Для визначення параметрів ізоляції використовують два принципи: накладення оперативного струму на трифазну мережу і штучного створення несиметричних режимів. При накладанні джерела підвищеної частоти активна провідність також не збігається з вимірною на промисловій частоті.

Ця обставина привела до необхідності використовувати методи, засновані на принципі штучного зсуву нейтралі мережі.

Досить широке застосування знайшов метод, що метод дозволяє проводити вимірювання без зняття робочої напруги і використовує три режими. Режим холостого ходу та короткого замикання фази на землю для визначення повної провідності, а для поділу її на складові - режим, при якому між фазою і землею вводиться додаткова провідність.

Подальше вдосконалення методу, що використовує режим холостого ходу і короткого замикання полягало у використанні двох фазочутливих приладів - векторметрів і двох фазозміщуючих пристроїв. Відмінною особливістю методу є



те, що фази опорного напруги фазочутливі приладів зсуваються один щодо одного на  $90^\circ$  електричних. Завдяки цьому процес вимірювання в порівнянні з попереднім методом спрощується.

Загальним недоліком фазозміщуючих ланцюгів є залежність кута зсуву від частоти вхідної напруги. У найбільш досконалих фазозміщуючих пристроях похибки підтримки квадратури досягає  $\pm 0,5^\circ$ , а похибка коефіцієнта передачі по модулю  $\pm 5\%$  за умови сталості частоти мережі.

Таким чином, застосування фазочутливих пристроїв з регульованою фазою опорної напруги дозволило підвищити точність визначення параметрів ізоляції. На жаль, досягається це шляхом значного ускладнення пристрою для вимірювання. Загальним недоліком розглянутих методів є використання режиму короткого замикання фази на землю, що підвищує небезпеку при вимірах, крім цього вони використовують порівняно велику кількість незбіжних у часі вимірювань.

## РОЗДІЛ 3

### ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ІЗОЛЯЦІЇ

#### 3.1 Метод визначення провідності ізоляції мережі з урахуванням коефіцієнту її асиметрії

Найбільш поширені методи [22-31] дозволяють визначити лише провідності ізоляції всієї мережі без врахування її асиметрії. До того ж ряд з них [22-26, 31] передбачають проведення досліду однофазного замикання на землю, що підвищує небезпеку ураження людей електричним струмом, виникнення пожеж та вибухів рудничного газу і пилу. Для визначення асиметрії ізоляції за рівнянням (1.4) необхідно знати провідності ізоляції окремих фаз мережі. Існуючими методами провідності окремих фаз обчислюються за результатами великої кількості незбіжних у часі вимірювань або по складних рівняннях, що призводить до великих погрешностей. Придатні вони лише для окремих випадків стану ізоляції, коли має місце асиметрія тільки активних або тільки реактивних провідностей. Остання обставина не дозволяє використовувати ці методи для визначення асиметрії ізоляції мереж, оскільки в реальних умовах невідомо, яка з провідностей, активна або реактивна, нерівномірно розподілена по фазах. Запропонований метод, що не має цих недоліків. Він дозволяє визначити провідність ізоляції всієї мережі і коефіцієнт асиметрії не тільки в окремому, але й у загальному випадку асиметрії ізоляції (нерівності активних і реактивних провідностей фаз). Цей метод [9] (рис. 3.1), заснований на принципі створення певного несиметричного режиму, передбачає почергове випробування фаз мережі, при якому вимірюють напругу на випробуваній фазі, струм в дроселі і потужність.

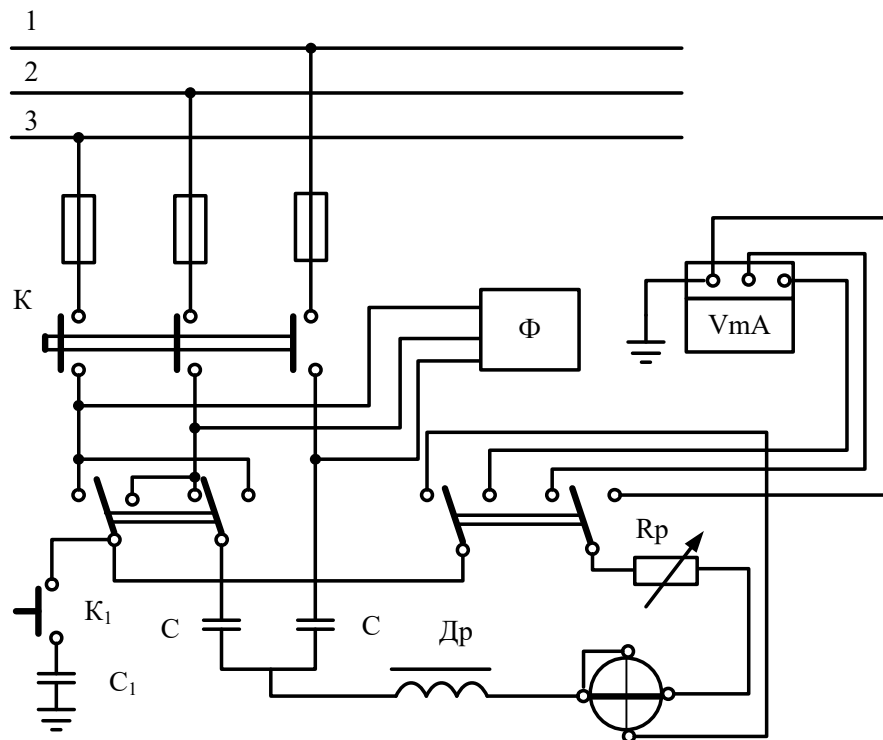


Рисунок 3.1 – Принципова схема методу визначення провідності ізоляції мережі і коефіцієнта її асиметрії

На відміну від існуючих методів у запропонованому використовується режим зміщення нейтральної точки на середину вектора лінійної напруги. Досягається це наступним чином. При випробуванні будь-якої фази, до лінійних затискачів двох інших приєднуються конденсатори однакової ємності  $C$ , між загальною точкою яких і землею підключений дросель  $D_r$  через міліамперметр і послідовний ланцюг ватметра. Паралельні ланцюги ватметра і вольтметр включені між випробуваною фазою і землею. Параметри дроселя і конденсаторів підібрані так, що реактивний опір дроселя дорівнює половині реактивного опору конденсатора, а активне незначне (порядку декількох Ом). Теоретичним обґрунтуванням методу служать наступні положення. При випробуванні, наприклад, першої фази (рис. 3.2) напруга зміщення нейтралі визначається виразом

$$\dot{U}_N = U_\phi \frac{Y_1 + a^2(Y_2 + Y_D) + a(Y_3 + Y_D)}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + 2Y_D},$$

де

$$Y_d = \frac{1}{2j\omega L - j\frac{1}{\omega C} + 2r_d};$$

$r_d$  – активний опір дроселя.

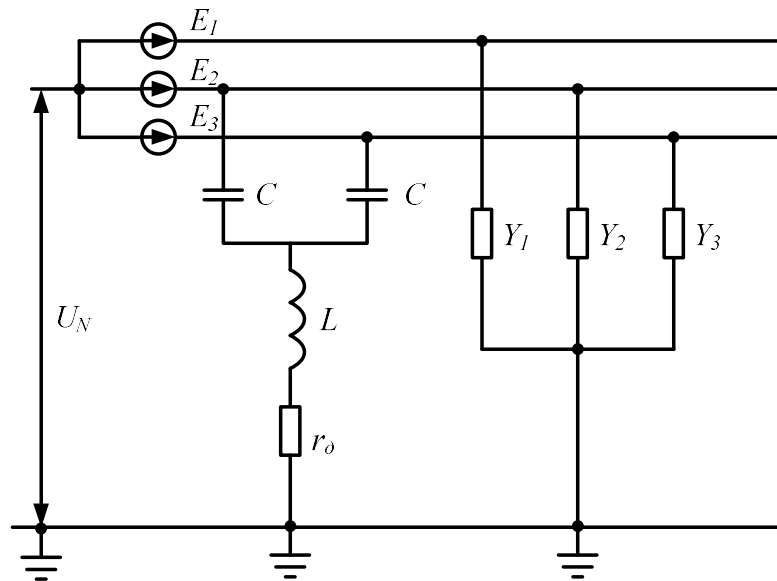


Рисунок 3.2 – Схема заміщення методу визначення провідності ізоляції мережі і коефіцієнта її асиметрії

З урахуванням того, що  $\omega L = \frac{1}{2\omega C}$  і вирази (1.4), напруги зміщення нейтралі можна представити у вигляді

$$\dot{U}_N = \frac{U_\phi}{2} \left( \frac{2\delta r_d - Z_0}{r_d + Z_0} \right),$$

де  $Z_0 = \frac{1}{Y_0}$  - комплекс опорів ізоляції мережі відносно землі.

При допустимому, з точки зору поставленої задачі, неврахуванні активного опорів дроселя в порівнянні з опором ізоляції мережі та враховуючи, що  $|\delta| < 1$ , з виразу (1.18) отримаємо рівність:

$$U_N = -\frac{U_\phi}{2}.$$

Використовуючи цю рівність, можна визначити комплекси напруг фаз мережі відносно землі при випробуванні першої фази:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 - \dot{U}_N = \frac{\sqrt{3}}{2} U_{л};$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{U}_N = -\frac{j}{2} U_{л};$$

$$\dot{U}_3 = \dot{E}_3 - \dot{U}_N = \frac{j}{2} U_{л}.$$

З цих рівнянь випливає, що незалежно від стану ізоляції, напруга випробувальної фази відносно землі зростає до  $\frac{\sqrt{3}}{2}$  лінійного, а двох інших - знижуються до половини лінійного і знаходяться в протифазі. Такий же висновок можна отримати при випробуванні двох інших фаз, тобто режим зміщення нейтральної точки на середину вектора лінійної напруги досягається. Векторні діаграми напруг фаз мережі відносно землі при випробуванні різних фаз наведено на рис. 3.3.

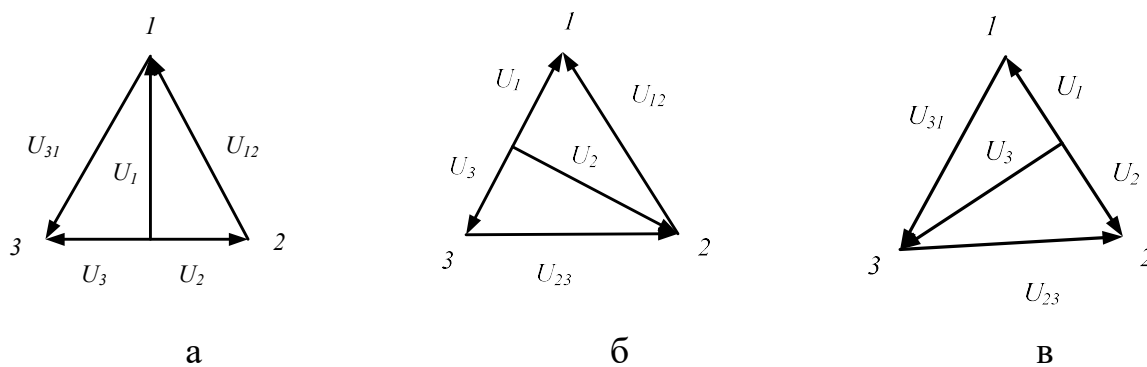


Рисунок 3.2 – Векторні діаграми напруг при випробуванні різних фаз мережі: а) - перша, б) - друга, в) - третя.

Комплекс струму в дроселі при випробуванні будь фази (рис. 3.2) визначиться рівністю

$$\dot{I}_k = \dot{U}_1 Y_1 + \dot{U}_2 Y_2 + \dot{U}_3 Y_3.$$

Використовуючи векторні діаграми і рівняння струму, можна знайти зв'язок між комплексами вимірних провідностей  $Y_{11}$ ,  $Y_{12}$ ,  $Y_{13}$  і комплексами провідностей фаз мережі:

$$\left. \begin{aligned} Y_{21} = \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_1} &= Y_1 - \frac{j}{\sqrt{3}}(Y_2 - Y_3); \\ Y_{22} = \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2} &= Y_2 - \frac{j}{\sqrt{3}}(Y_3 - Y_1); \\ Y_{23} = \frac{\dot{I}_3}{\dot{U}_3} &= Y_3 - \frac{j}{\sqrt{3}}(Y_1 - Y_2); \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

складові яких визначаються за результатами вимірювання напруги, струму і потужності:

$$g_{ik} = \frac{I_k}{U_k} \cos \varphi_{ik}; \quad (3.2)$$

$$b_{ik} = \frac{I_k}{U_k} \sin \varphi_{ik}; \quad (3.3)$$

$$\varphi_{ik} = \arccos \frac{P_k}{U_k I_k}, \quad (3.4)$$

де  $k = 1, 2, 3$ ;  $g_{ik}$ ,  $b_{ik}$  - відповідно активна і реактивна вимірні провідності. Із системи рівняння (3.1) випливає, що при симетрії комплекс вимірної провідності дорівнює комплексу провідності ізоляції фази і значення його

складових визначається рівняннями (3.2-3.4). Активна  $g_0$  і реактивна  $b_0$  провідності ізоляції всієї мережі в цьому випадку рівні:

$$g_0 = 3g_{ik}; b_0 = 3b_{ik}.$$

У разі несиметрії провідностей ізоляції така рівність не має місця. Однак, використовуючи систему рівнянь (3.1) і рівнянні (1.4), можна знайти зв'язок між комплексами вимірної провідності, провідністю ізоляції всієї мережі і коефіцієнтом асиметрії:

$$\left. \begin{aligned} Y_{11} &= \frac{Y_0}{3}(1 + 2\delta); \\ Y_{12} &= \frac{Y_0}{3}(1 + 2a\delta); \\ Y_{13} &= \frac{Y_0}{3}(1 + 2a^2\delta); \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

Оскільки ці рівняння містять лише 2 невідомих  $Y_0$  і  $\delta$ , то для знаходження їх досить провести випробування двох будь-яких фаз. Незалежно від того які дві фази випробовуються

$$Y_0 = 3 \frac{Y_{iE-1} - aY_{iE}}{1 - a};$$

Розклавши отримане рівняння  $Y_0$  на дійсну і уявну частини, маємо:

$$g_0 = \sqrt{3} [y_{IK+1} \cos(\varphi_{IK+1} + 30^\circ) - y_{IK} \cos(150^\circ + \varphi_{IK})] \quad (3.6)$$

$$b_0 = \sqrt{3} [y_{IK+1} \sin(\varphi_{IK+1} + 30^\circ) - y_{IK} \sin(150^\circ + \varphi_{IK})];$$

$$y_{IK} = \frac{I_K}{U_{IK}}; y_0 = \sqrt{g_0^2 + b_0^2}; \varphi_0 = \arctg \frac{b_0}{g_0}. \quad (3.7)$$

При відомому значенні  $y_0$  і  $\varphi_0$  модуль  $|\delta|$  і аргумент  $\varphi_\delta$  коефіцієнта асиметрії може бути визначений по одному з рівнянь системи (3.5)

$$|\delta| = \frac{1}{2} \sqrt{1 - 2m_k \cos(\varphi_{ik} - \varphi_0) + m_k^2}; \quad (3.8)$$

$$\varphi_\delta = \arctg \frac{\sin(\varphi_{ik} - \varphi_0)}{\cos(\varphi_{ik} - \varphi_0) - \frac{1}{m_k}} + \psi_k; \quad (3.9)$$

де  $m_k = \frac{3y_{ik}}{y_0}$ .

У рівнянні (3.9) залежно від того, яка фаза випробовується,  $\psi_k$  приймає різні значення:  $0$  при  $k = 1$ ;  $-120^\circ$  при  $k = 2$ ;  $120^\circ$  при  $k = 3$ . Слід зазначити, що при визначенні  $Y_0$  і  $\delta$  необхідно знати послідовність фаз мережі.

### 3.2 Дослідження похибок методу.

У разі симетрії завдання визначення параметрів ізоляції зводиться до знаходження  $y_{ik}$ ,  $b_{ik}$ ,  $g_{ik}$ . Останні обчислюються за результатами вимірювання напруги на випробуваній фазі, струму в дроселі і кута зсуву між ними. Припустимо, що для вимірювання використовують міліамперметр, вольтметр і фазометр.

Середньоквадратичну похибку визначення повної провідності можна знайти з виразу:

$$\varepsilon_{y_{ik}} = \sqrt{\left(\frac{\partial y_{ik}}{\partial I_k} \frac{dI_k}{y_{ik}}\right)^2 + \left(\frac{\partial y_{ik}}{\partial U_k} \frac{dU_k}{y_{ik}}\right)^2}.$$

Після підстановки приватних похідних

$$\varepsilon_{y_{ik}} = \sqrt{\varepsilon_i^2 + \varepsilon_U^2}, \quad (3.9)$$



де  $\varepsilon_i$ ,  $\varepsilon_U$  - відповідно граничні відносні похибки визначення струму і напруги.

Для активної і реактивної складових:

$$\varepsilon_{g_{IK}} = \sqrt{\left(\frac{\partial g_{IK}}{\partial I_K} \frac{dI_K}{g_{IK}}\right)^2 + \left(\frac{\partial g_{IK}}{\partial U_K} \frac{dU_K}{g_{IK}}\right)^2 + \left(\frac{\partial g_{IK}}{\partial \varphi_K} \frac{d\varphi_K}{g_{IK}}\right)^2};$$

$$\varepsilon_{b_{IK}} = \sqrt{\left(\frac{\partial b_{IK}}{\partial I_K} \frac{dI_K}{b_{IK}}\right)^2 + \left(\frac{\partial b_{IK}}{\partial U_K} \frac{dU_K}{b_{IK}}\right)^2 + \left(\frac{\partial b_{IK}}{\partial \varphi_K} \frac{d\varphi_K}{b_{IK}}\right)^2};$$

Після підстановки приватних похідних маємо:

$$\varepsilon_{g_{IK}} = \sqrt{\varepsilon_i^2 + \varepsilon_U^2 + (\Delta\varphi \operatorname{ctg} \delta_0)^2}; \quad (3.11)$$

$$\varepsilon_{b_{IK}} = \sqrt{\varepsilon_i^2 + \varepsilon_U^2 + \left(\frac{\Delta\varphi}{\operatorname{ctg} \delta_0}\right)^2}, \quad (3.12)$$

де  $\operatorname{ctg} \delta_0 = \frac{b_{IK}}{g_{IK}}$ ,  $\Delta\varphi$  - абсолютна похибка визначення кута. З рівнянь (3.10), (3.12)

очевидно, що точність визначення цих величин залежить від похибки вимірювання струму, напруги та кута зсуву між ними, а також від співвідношення

$$\frac{b_{IK}}{g_{IK}}.$$

Визначимо похибки вимірювання струму, напруги та кута зсуву між ними враховуючи, що  $r_d > 0$ ,  $\omega L - \frac{1}{2\omega C} = \pm \Delta X$ , а внутрішній опір вимірювальних ланцюгів приладів має кінцеве значення. При випробуванні першої фази розрахункова схема може бути представлена, як показано на рис 3.3.

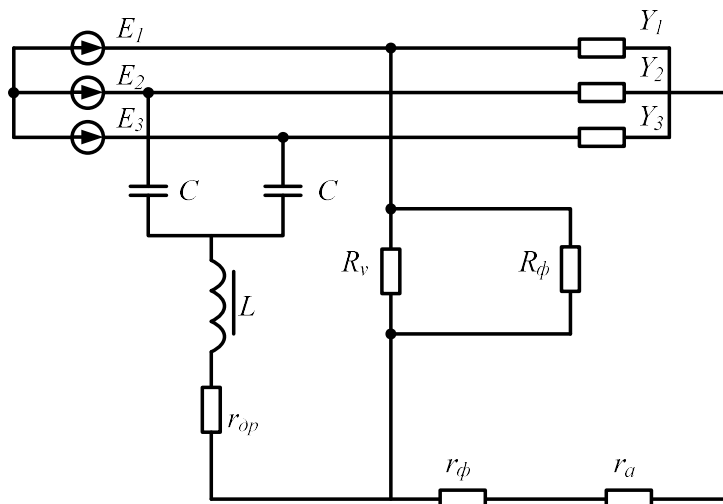


Рисунок 3.3 - Розрахункова схема для визначення напруги, струму й кута зрушення між ними

Користуючись законами електротехніки визначимо струм в дроселі, напруга на випробуваній фазі і кут зсуву між ними. Опускаючи проміжні перетворення їх можна представити у вигляді:

$$I_{11} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_{л} \frac{y_{11}}{\sqrt{\left[1 + g_0(r_a + r_d + r_\phi) \mp b_0 \Delta X\right]^2 + \left[b_0(r_d + r_\phi + r_a) \pm g_0 \Delta X\right]^2}} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_{л} y_{11} k_1 = I_1 k_1; \quad (3.13)$$

$$U_{11} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_{л} \frac{\sqrt{\left[1 - g_1(r_\phi + r_a + 2r_d) \pm 2b_1 \Delta X\right]^2 + \left[-b_1(r_\phi + r_a + 2r_d) \pm 2\Delta X\right]^2}}{1 + \frac{(R_\phi + R_V)}{R_\phi R_V} \sqrt{r_d^2 + \Delta X^2}} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_{л} k_2 = U_1 k_2; \quad (3.14)$$

$$\varphi_{11} = -\arctg \frac{b_1}{g_1} + \arctg \frac{b_0(r_\phi + r_d + r_a) \pm g_0 \Delta X}{1 + g_0(r_d + r_\phi + r_a) \mp b_0 \Delta X} + \arctg \frac{-b_1(r_\phi + r_a + 2r_d) \mp 2g_1 \Delta X}{1 + g_1(r_\phi + r_a + 2r_d) \pm 2b_1 \Delta X} = \varphi_1 + \Delta \varphi_1; \quad (3.15)$$

де  $r_a, r_\phi$  - активний опір вимірювального ланцюга міліамперметра і послідовного ланцюга фазометра;  $R_\phi, R_V$  - відповідно активний опір паралельної ланцюга

фазометра і вольтметра. Використовуючи рівняння (1.31, 1.32), можна визначити граничні відносні похибки при вимірюванні напруги і струму:

$$\varepsilon_i = |\varepsilon_a| + \left| \frac{I_1 - I_{M1}}{I_1} \right| = |\varepsilon_a| + |1 - K_1|;$$

$$\varepsilon_U = |\varepsilon_V| + \left| \frac{U_1 - U_{M1}}{U_1} \right| = |\varepsilon_V| + |1 - K_2|.$$

Абсолютна похибка визначення кута

$$\Delta\varphi = |\Delta\varphi_\phi| + |\varphi_1 - \varphi_{M1}| = |\Delta\varphi_\phi| + |\Delta\varphi_1|,$$

де  $\varepsilon_a$ ,  $\varepsilon_V$  - граничні відносні похибки міліамперметра, вольтметра;  $\Delta\varphi_\phi$  - похибка, обумовлена класом точності фазометра.

Визначимо чисельні значення похибок. Для серійно виготовляються приладів можна вважати

$$R_V = R_\phi = 1000 \frac{O_M}{B}, \quad r_\phi = 0,5 \text{ Ом.}$$

Опір вимірювального ланцюга міліамперметра залежить від межі вимірювання струму і може бути визначене

$$r_a = \frac{0,6}{\sqrt{3}U_{ЛЮК}}.$$

Припустимо, що для виміру напруги й струму використовуються прилади класу 1,0, а кута - 0,5. Параметри пристрою, що підключається легко підібрати таким чином, щоб  $r_d \leq \Delta X \leq 10 \text{ Ом}$ .

На рис. 3.3 а, б, в відповідно представлені залежності похибок  $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_g$ ,  $\varepsilon_b$  від величини активної провідності фази при різних значеннях  $\text{ctgd}_0$ . Граничне значення  $\text{ctgd}_0$ , при якому похибки досягають 20%, можна визначити, якщо в рівнянні (3.10) - (3.12) підставити критичне значення активної провідності фази. Враховуючи, що реле витоку відключає мережу при симетричному зниженні

ізоляції 3-х фаз до 3,3 кОм ( УАКІ-380), в якості критичної можна прийняти  $g_{кр} = 1 \cdot 10^{-4}$  См. Після обчислення маємо  $\varepsilon_g = 20$  %, коли  $\text{ctg}\delta_0 = 10,8$ ;  $\varepsilon_b = 20\%$  при  $\text{ctg}\delta_0 = 0,0304$ . Похибка обчислення повної провідності не перевищує 4%, коли  $\text{ctg}\delta_0 \leq 10,8$ .

Використання трьох приладів пов'язано з прагненням отримати збігаються в часі вимірювання і тим самим виключити додаткові похибки, зумовлені зміною провідності ізоляції та лінійної напруги в процесі вимірювання. Розглянемо, як зміняться похибки, якщо використовувати два прилади - фазометр і вольтміліамперметр. Співпадаючими в часі будуть вимірювання струму й кута.

Як впливає з виразу (3.14), напруга на випробуваній фазі визначається двома факторами: величиною лінійної напруги мережі і провідності ізоляції фази. Якщо припустити, що лінійна напруга в процесі вимірювання постійне, а активна провідність фази змінюється в широких межах  $g_{кр} \leq g_k \leq \infty$ , то величина вимірюваної напруги зміниться не більше ніж на 2%, так як для цих значень провідності  $0,98 \leq k \leq 1,02$ .

У реальних мережах межі зміни провідності ізоляції значно менше. В дільничних електричних мережах шахт Криворізького басейну відхилення від стійкого рівня активного опору ізоляції мережі протягом зміни, як правило, не перевищує  $\pm 12\%$ , рідко досягаючи  $\pm 30\%$ . Вимірювання в Донецькому басейні показали, що ставлення максимальної величини ємності ізоляції дільничної електричної мережі до мінімальної може досягати 1,5 - 2,5. У зв'язку з цим можна вважати, що напруга на випробуваній фазі залежить тільки від величини лінійної напруги. Вимірювальний пристрій звичайно підключають у силового трансформатора, де лінійна напруга може змінюватися на 3-5%, Визначимо похибка вимірювання напруги на випробуваній фазі з урахуванням коливання лінійної напруги мережі

$$\varepsilon_U = \varepsilon_V + |1 - k_2| + |\varepsilon'_U|$$

де  $\varepsilon'_U$  - відносна похибка, що вноситься коливанням лінійної напруги мережі.

Припустимо найгірший випадок  $\varepsilon'_U = 5\%$ . Підставляючи нове значення  $\varepsilon_U$  в рівнянні (3.10)-(3.12) маємо:  $\varepsilon_y \leq 7,8\%$ ,  $\varepsilon_g \leq 20\%$ , коли  $\text{ctg}\delta_0 \leq 10,3$  і  $\varepsilon_b \leq 20\%$ , коли  $\text{ctg}\delta_0 = 0,0337$ .

Результати обчислень показують, що область застосування методу ( $0,0337 \leq \text{ctg}\delta_0 \leq 10,3$ ) звужується несуттєво порівняно з випадком використання трьох приладів ( $0,0304 \leq \text{ctg}\delta_0 \leq 10,8$ ).

В якості фазочутливого приладу можна використовувати ватметр, тоді кут  $\varphi_{IK}$  обчислюється за результатами вимірювання напруги, струму і потужності

$$\varphi_{IK} = \arccos \frac{P_{IK}}{U_K I_K};$$

абсолютна похибка обчислення кута визначиться рівністю

$$\Delta\varphi = \left| \frac{\partial\varphi_{IK}}{\partial P_{IK}} \right| |\Delta P_{IK}| + \left| \frac{\partial\varphi_{IK}}{\partial I_{IK}} \right| |\Delta I_{IK}| + \left| \frac{\partial\varphi_{IK}}{\partial U_{IK}} \right| |\Delta U_{IK}|;$$

Після підстановки приватних похідних маємо

$$\Delta\varphi = \frac{1}{\text{ctg}\delta_0} (|\varepsilon_i| + |\varepsilon_U| + |\varepsilon_P|), \quad (3.16)$$

де  $\varepsilon_P$  - гранична відносна похибка вимірювання потужності. Враховуючи рівняння (3.13)-(3.15), остання визначається

$$|\varepsilon_P| = |\varepsilon_W| + \left| \text{ctg}\delta_0 g_K \left[ \text{ctg}\delta_0 (2r_a + r_d) \pm \Delta X \right] \right|,$$

де  $\varepsilon_W$  - гранична відносна похибка ватметра,  $\varepsilon_W = 0,5\%$ .

Підставляючи нове значення  $\Delta\varphi$  в рівняння (3.11),(3.12), маємо:

$$\varepsilon_{g_{IK}} = \sqrt{\varepsilon_i^2 + \varepsilon_U^2 + \left( \varepsilon_i + \varepsilon_U + \varepsilon_W + g_K \left[ \operatorname{ctg}^2 \delta_0 (2r_a + r_d) \pm \operatorname{ctg} \delta_0 \Delta X \right] \right)^2};$$

$$\varepsilon_{b_{IK}} = \sqrt{\varepsilon_i^2 + \varepsilon_U^2 + \left[ \frac{\varepsilon_i + \varepsilon_U + \varepsilon_W}{\operatorname{ctg}^2 \delta_0} + g_K \left( 2r_a + r_d \pm \frac{\Delta X}{\operatorname{ctg}^2 \delta_0} \right) \right]^2}.$$

Оскільки  $g_{K \leq g_{кр}} = 1 \cdot 10^{-4}$  См, то похибка визначення активної складової провідності практично не залежить від  $\operatorname{ctg} \delta_0$ ,  $\varepsilon_g \leq 20\%$ , коли  $\operatorname{ctg} \delta_0 \leq 625$ . Точність реактивної складової знижується  $\varepsilon_{b_{IK}} \leq 20\%$  при  $\operatorname{ctg} \delta_0 \geq 0,275$ .

У разі нерівності провідностей готельних фаз активна і реактивна провідності ізоляції мережі обчислюються за формулами (3.6), (3.7). Похибки їх визначення можуть бути представлені у вигляді:

$$\varepsilon_{g_0} = \sqrt{\left[ \left( \frac{\partial g_0}{\partial y_{IK+1}} dy_{IK+1} \right)^2 + \left( \frac{\partial g_0}{\partial \varphi_{IK+1}} d\varphi_{IK+1} \right)^2 + \left( \frac{\partial g_0}{\partial y_{IK}} dy_{IK} \right)^2 + \left( \frac{\partial g_0}{\partial \varphi_{IK}} d\varphi_{IK} \right)^2 \right] \frac{1}{g_0^2}};$$

$$\varepsilon_{b_0} = \sqrt{\frac{1}{b_0^2} \left[ \left( \frac{\partial b_0}{\partial y_{IK+1}} dy_{IK+1} \right)^2 + \left( \frac{\partial b_0}{\partial \varphi_{IK+1}} d\varphi_{IK+1} \right)^2 + \left( \frac{\partial b_0}{\partial y_{IK}} dy_{IK} \right)^2 + \left( \frac{\partial b_0}{\partial \varphi_{IK}} d\varphi_{IK} \right)^2 \right]}.$$

Для простоти аналізу припустимо, що похибки визначення модуля і аргументу вимірних провідностей різних фаз рівні, а  $3g_{IK} = g_0$  і  $3b_{IK} = b_0$ , тоді після підстановки приватних похідних маємо:

$$\varepsilon_{g_0} = \sqrt{\frac{3}{2} \varepsilon_{y_i}^2 + \frac{\Delta \varphi_i^2}{2} + \frac{\operatorname{ctg}^2 \delta_0}{2} (\varepsilon_{y_i}^2 + 3\Delta \varphi_i^2)};$$

$$\varepsilon_{b_0} = \sqrt{\frac{3}{2} \varepsilon_{y_i}^2 + \frac{\Delta \varphi_i^2}{2} + \frac{1}{2 \operatorname{ctg}^2 \delta_0} (\varepsilon_{y_i}^2 + 3\Delta \varphi_i^2)},$$

де  $\varepsilon_{y_i}$ ,  $\Delta \varphi_i$  - відповідно похибки визначення модуля і аргументу вимірної провідності.

Підставивши замість  $\varepsilon_{yi}$ ,  $\Delta\varphi_i$  їх значення з рівнянь (3.10), (3.16), після перетворення отримаємо:

$$\varepsilon_{g_0} = \sqrt{\left(\frac{3}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{ctg}^2 \delta_0\right) (\varepsilon_i + \varepsilon_U)^2 + \left(\frac{3}{2} + \frac{1}{2 \operatorname{ctg}^2 \delta_0}\right) (\varepsilon_i + \varepsilon_U + \varepsilon_W)^2};$$

$$\varepsilon_{b_0} = \sqrt{\left(\frac{3}{2} + \frac{1}{2 \operatorname{ctg}^2 \delta_0}\right) (\varepsilon_i + \varepsilon_U)^2 + \left(\frac{1}{2 \operatorname{ctg}^2 \delta_0} + \frac{3}{2 \operatorname{ctg}^4 \delta_0}\right) (\varepsilon_i + \varepsilon_W + \varepsilon_U)^2};$$

Використовуючи останні рівності, визначимо критичні значення  $\operatorname{ctg} \delta_0$ , для яких похибки  $\varepsilon_{g_0}$  і  $\varepsilon_{b_0}$  не перевищують 20%. Після обчислення маємо:  $\varepsilon_{g_0} \leq 20\%$ , коли  $0,08 \leq \operatorname{ctg} \delta_0 \leq 9,05$ , а  $\varepsilon_b \leq 20\%$  при  $\operatorname{ctg} \delta_0 \geq 0,4$ .

Як було показано вище, при відомих  $y_{iK}$ ,  $y_0$  і  $\varphi_{iK}$ ,  $\varphi_0$  модуль  $|\delta|$  і аргумент  $\varphi_\delta$  коефіцієнта асиметрії обчислюються по рівняннях (3.8), (3.9). Визначимо похибки їх обчислення:

$$\varepsilon_{|\delta|} = \sqrt{\left(\frac{\partial |\delta|}{\partial m} dm\right)^2 + \left(\frac{\partial |\delta|}{\partial \alpha} \Delta \alpha\right)^2} \frac{1}{|\delta|^2};$$

$$\Delta \varphi_\delta = \left| \frac{\partial \varphi_\delta}{\partial m} dm \right| + \left| \frac{\partial \varphi_\delta}{\partial \alpha} \Delta \alpha \right|,$$

де  $\alpha = \varphi_{iK} - \varphi_0$ ,  $m = 3 \frac{y_{iK}}{y_0}$ .

Після підстановки приватних похідних маємо:

$$\varepsilon_{|\delta|} = m \sqrt{(\cos \alpha - m_K)^2 \varepsilon_m^2 + \sin^2 \alpha (\Delta \alpha)^2};$$

$$\Delta \varphi_\delta = \left| \varepsilon_m \frac{m \sin \alpha}{m^2 - 2m \cos \alpha + 1} \right| + \left| \Delta \alpha \frac{m(m \cos \alpha - \cos \alpha + \sin \alpha)}{m^2 - 2m \cos \alpha + 1} \right|,$$

де  $\varepsilon_m = \frac{dm}{m}$  - межа відносної похибки обчислення коефіцієнта  $m$ ;  $\Delta \alpha = d\alpha$  - межа відносної помилки при визначенні кута  $\alpha$ , що дорівнює сумі абсолютних похибок

визначення  $\varphi_{\text{ік}}$  і  $\varphi_0$ . З останніх рівнянь очевидно, що точність визначення  $|\delta|$  і  $\varphi_\delta$  залежить від значень  $m$ ,  $\alpha$  і похибок їх обчислення. Погрішність модуля коефіцієнта асиметрії, при інших рівних умовах, зростає із збільшенням коефіцієнта  $m$ ;  $\Delta\varphi_\delta$  має максимальне значення при  $m \rightarrow 1$  і  $\alpha = 0$ .

### 3.3 Висновки

Найбільш поширені методи дозволяють визначити лише провідності ізоляції всієї мережі без врахування її асиметрії. До того ж ряд з них передбачають проведення досліду однофазного замикання на землю, що підвищує небезпеку ураження людей електричним струмом, виникнення пожеж та вибухів рудничного газу і пилу. Для визначення асиметрії ізоляції необхідно знати провідності ізоляції окремих фаз мережі. Існуючими методами провідності окремих фаз обчислюються за результатами великої кількості незбіжних у часі вимірювань або по складних рівняннях, що призводить до великих погрішностей. Придатні вони лише для окремих випадків стану ізоляції, коли має місце асиметрія тільки активних або тільки реактивних провідностей. Остання обставина не дозволяє використовувати ці методи для визначення асиметрії ізоляції мереж, оскільки в реальних умовах невідомо, яка з провідностей, активна або реактивна, нерівномірно розподілена по фазах. Запропонований метод не має цих недоліків.



## РОЗДІЛ 4

### ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Запропонований метод контролю роботоздатності ізоляції дозволяє зменшити кількість відмов, підвищити рівень надійності та безпеки експлуатації РМ.

Для оцінювання ефективності застосування метод контролю роботоздатності ізоляції в якості критерія, будемо використовувати річний недовідпуск електроенергії.

Виходячі з цього [32, 33], річний недовідпуск електроенергії в розподільних мережах кар'єрів можна визначити

$$\Delta W = P \cdot L \cdot \omega_{O33}^0 (\tau_{O33} + p_{K3} \tau_{K3}), \quad (4.1)$$

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

$L$  – сумарна протяжність мережі, км;

$\omega_{O33}^0$  - питома частота ОЗЗ (рік·км)<sup>-1</sup> ( $\omega_{O33}^0 = 0.88$ );

$\tau_{O33}$ ,  $\tau_{K3}$  - відповідно, час пошуку ОЗЗ та к.з. (год);

$p_{K3}$  - ймовірність переходу ОЗЗ в стійкі відмови, якщо час існування режиму  $t_{o.з.з.} \geq 4$  год ( $p_{K3} = 0.35$ ).

Застосування методу контролю роботоздатності ізоляції дозволяє зменшити кількість відмов та час їх пошуку, а тому і недовідпуск електроенергії, тобто

$$\delta \Delta W = P \cdot L \cdot \frac{\omega_{O33}^0 (\tau_{O33} + p_{K3} \tau_{K3}) - \xi \omega_{O33}^0 \tau_{O33}}{M_e}, \quad (4.2)$$

де  $M_e$  – коефіцієнт ефективності обраної стратегії пошуку місць пошкоджень ізоляції при застосуванні запропонованого методу контролю роботоздатності ізоляції (для спрощення методики розрахунку приймаємо рівним 1.5, вважаючи,

що запропонований метод контролю роботоздатності ізоляції дозволяє підвищити ефективність пошуку місць пошкодження і знизити час простою на 50% при почерговій перевірці всіх ділянок мережі шляхом проведення комутацій за спеціальним алгоритмом);  $\xi = 0,33$  – коефіцієнт, що враховує зменшення наслідків відновлення електропостачання за результатами контролю ізоляції в порівнянні з раптовими відмовами.

Частоту відмов ПЛ можна визначити як

$$\omega = \left( \omega_{\text{оп}}^{\circ} + \omega_{\text{д}}^{\circ} + \omega_{\text{із}}^{\circ} + \omega_{\text{сп}}^{\circ} + \omega_{\text{ип}}^{\circ} \right) L,$$

де складові правої частини формули – частоти відмов через пошкодження опор, дротів, ізоляції, складних пошкоджень та інших причин, що визначаються за статистичними даними:

$$\begin{aligned} \omega_{\text{оп}}^{\circ} &= 0,04; \quad \omega_{\text{д}}^{\circ} = 0,035; \quad \omega_{\text{із}}^{\circ} = \omega_{\text{кз}}^{\circ} + \omega_{\text{озз}}^{\circ} = 0,25 + 0,88 = 1,1; \\ \omega_{\text{сп}}^{\circ} &= 0,025; \quad \omega_{\text{ип}}^{\circ} = 0,05 \text{ (рік} \cdot \text{км)}^{-1} \end{aligned}$$

Для визначення оціночного значення рівня понаднормативних втрат електроенергії від струмів стікання на землю в реальній розподільній мережі з визначеною сумарною довжиною всіх ділянок повітряних і кабельних ЛЕП пропонується наступна формула:

$$\Delta W_{\text{із}}^{\text{понаднорм.оц}} = \Delta W_{\text{із}}^{\text{норм}} \cdot (k_{\text{н.н}} \cdot k_{\text{н.і}} \cdot k_{\text{ох.з}} \cdot k_{\text{с.із}} - 1), \quad (4.3)$$

де  $\Delta W_{\text{із}}^{\text{норм}}$  – нормативні втрати електроенергії в ізоляції РМ від струмів стікання на землю;

$k_{\text{н.н}}$  – коефіцієнт, що враховує виникнення понаднормативних втрат в ізоляції

через підвищення рівня напруги на збірних шинах підстанцій ( $1.1-1.15U_{ном}$ ) для компенсації падіння напруги в мережі (в т.ч. і в ізоляції – приймається рівним  $k_{п.н} = 1.15^2 = 1.32$ );

$k_{п.і}$  – коефіцієнт, що враховує збільшення кількості пошкоджень ізоляції через підвищення напруги на збірних шинах вище номінальної (пропонується приймати рівним  $k_{п.і} = 1.05$ );

$k_{ох.з}$  – коефіцієнт, що враховує стан охоронної зони ПЛЕП (наявність елементів, через які може виникати пробій на землю – пропонується приймати рівним  $k_{ох.з} = 1.2$ );

$k_{с.із}$  – коефіцієнт, що враховує стан ізоляторів (наявність значних забруднень і пошкоджень на поверхні ізоляторів через недостатні експлуатаційні заходи – пропонується приймати рівним  $k_{с.із} = 1.1$ ).

Значення коефіцієнтів  $k_{п.н}$ ,  $k_{п.і}$ ,  $k_{ох.з}$ ,  $k_{с.із}$  отримані шляхом аналізу статистичних даних по основним причинам відключень в мережах «Криворізька Енергетична Компанія».

Проведемо усі необхідні техніко-економічні розрахунки, використовуючи наступні початкові дані:

1. Розглядається мережа одного із структурних підрозділів енергопостачальної компанії (Криворізька Енергетична Компанія) з сумарною довжиною всіх при середньому коефіцієнті завантаженості  $k_3 = 0.13$ . Отже, середньозважена сумарна потужність усіх підключених споживачів становить  $P = 0.13 * 80.162 = 19,489$  МВт).

2. За 2020р. кількість пошкоджень ізоляції склала 46. При цьому середній час пошуку місця виникнення ОЗЗ склав  $\tau_{\text{ОЗЗ}} = 12$  год, а час пошуку місця к.з.  $\tau_{\text{кз}} = 5$  год.

3. Загальні витрати на ремонт і обслуговування розподільних мереж в 2020р. склали 184.3 тис. Грн.

Визначимо річний недовідпуск електроенергії із-за виникнення ОЗЗ по формулі (4.2), враховуючи, що максимум 2 фідери 10 кВ з 60 наявних вимикаються при виникненні пошкоджень ізоляції.

В базовому варіанті (без застосування запропонованого методу контролю ізоляції):

$$\Delta W_{\text{ОЗЗ}}^{\text{б}} = \frac{2}{60} \cdot 19489 \cdot 75,8 \cdot 0,88 \cdot (12 + 0,35 \cdot 5) = 43333 \text{ кВт.год.}$$

При застосуванні запропонованого методу контролю ізоляції зменшення річного недовідпуску від виникнення ОЗЗ становить

$$\delta \Delta W_{\text{ОЗЗ}}^{\text{кз}} = \frac{2}{60} \cdot 19489 \cdot 75,8 \cdot \frac{0,88 \cdot (12 + 0,35 \cdot 5) - 0,33 \cdot 0,85 \cdot 12}{1,5} = 282947 \text{ кВт.год.}$$

Економія коштів від зменшення річного недовідпуску електроенергії при застосуванні запропонованого методу контролю ізоляції:

$$E_{K_{O33}}^{KI} = (\delta \Delta W_{O33}^{KI}) \cdot E_{e_n}, \quad (4.4)$$

де  $E_{e_n}$  – питомі економічні втрати енергопостачальної компанії від нереалізованої комерційної вигоди із-за недовідпуску електроенергії споживачу, грн/кВт.год.

$$E_{e_n} = c_{сер} - C_{пок} \cdot K_{норм},$$

де  $C_{пок}$  – базовий тариф на покупку електроенергії з енергоринку (для енергопостачальної компанії може знаходитись в межах  $C_{пок}=3.3-3.6$  грн/кВт.год – приймаємо рівним  $C_{пок}=3.4$  грн/кВт.год;  $K_{норм}=1.05$  – коефіцієнт, що враховує подорожчання електроенергії.

$$E_{e_n} = 3.6 - 1.88 \cdot 1.05 = 1.626 \text{ грн/кВт.год.}$$

$$E_{K_{O33}}^{KI} = 282947 \cdot 1,626 = 460072,9 \text{ грн.}$$

Економія коштів від зменшення річного недовідпуску електроенергії при застосуванні запропонованого методу контролю ізоляції 460072,9 грн.

## РОЗДІЛ 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 контролю ізоляції в системах електропостачання з ізольованою нейтраллю напругою до 1000 В.

Аналіз потенційних небезпек для електротехнічного оперативного персоналу, який розробляє та реалізує заходи і встановлює пристрої для підвищення надійності електричних мереж, проведемо за [35, 36]. Отже, 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; вібрація (локальна, загальна); освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо).

Хімічні фактори: речовини хімічного походження, переважно аерозолі фіброгенної дії (металевий і будівельний пил).

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

У цьому розділі будуть досліджені такі питання як технічні рішення щодо безпечної організації робочих місць, електробезпека, мікроклімат, склад повітря робочої зони, виробниче освітлення, виробничий шум, виробничі вібрації, безпеки в надзвичайних ситуаціях для працівників в цілому та 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 оперативно-ремонтним персоналом електричних станцій і підстанцій [38, 39].

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 допускач 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 струмовідні 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 струмовідних частин, після перевірки відсутності напруги.

Після інструктажу допускателя 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 допускателя 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 допускателя. Коли керівник робіт суміщає обов'язки допускателя, 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: двохпровідна постійного струму напругою 110 та 220 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 [40], де встановлена лінія, наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Нормування параметрів мікроклімату на непостійних робочих місцях

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

Для забезпечення потрібних за нормативами параметрів мікроклімату проектом передбачено [41]:

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 [40].

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 <sup>3</sup>		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньодобова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4

Для забезпечення складу повітря робочої зони в роботі передбачені такі рішення [41]:

- 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 кондиціювання 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). Нормовані значення виробничого освітлення наведені в таблиці 5.3.

Характеристика зорових робіт – середньої точності.

Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [44] розряд зорової роботи IV, підрозряд «г».

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

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

#### 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.

### 5.2.5 Виробничі вібрації

Вібрацією називають механічні коливання пружних тіл або систем, коли відбувається переміщення центра їх ваги в просторі відносно статичного стану. Загальна вібрація передається на тіло через опорні поверхні людини, що стоїть чи сидить (підшви ніг або сидниці).

Допустимі рівні загальної вібрації на постійних місцях у виробничих приміщеннях наведені в таблиці 5.5

Таблиця 5.5 – Допустимі рівні вібрації на постійних місцях

Вид вібрації	Октавні смуги з середньгеометричними частотами, Гц									
	2	4	8	16	31,5	63	125	250	500	1000
Загальна вібрація:	<u>1,3</u>	<u>0,45</u>	<u>0,22</u>	<u>0,2</u>	<u>0,2</u>	<u>0,2</u>	-	-	-	-
На постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях	108	99	93	92	92	92				

В чисельнику середньоквадратичне значення вібрації, м/с  $10^{-2}$ , знаменнику - логарифмічні рівні вібрації, дБ.

Основними методами колективного віброзахисту є зниження вібрації шляхом дії на джерело виникнення: відстрочка від режиму резонанс; динамічне гасіння коливань, заміна конструктивних елементів уставок і будівельних конструкцій. Засоби індивідуального захисту діляться на засоби для ніг, рук та тіла працюючого.

### 5.2.6 Психофізіологічні фактори

- а) Класи умов праці за показниками важкості праці:

Загальні енергозатрати організму (кг/м): Зовнішнє фізичне динамічне навантаження, виражене в одиницях механічної роботи за зміну, кг/(Вт); При регіональному навантаженні (для чоловіків) – 12000(40); При загальному навантаженні (за участю м'язів рук, тулуба, ніг) – 40000(80); Маса вантажу, що постійно підіймається – до 25.

Стереотипні робочі рухи: При локальному навантаженні (участь м'язів кистей та пальців рук) – до 60 000; При регіональному навантаженні (участь рук та плечового суглоба) – до 30 000; Статичне навантаження (кг/с): Двома руками (чоловіки) – до 70 000; За участю м'язів тулуба та ніг – до 200 000.

Робоча поза: Періодичне перебування в незручній позі (робота з поворотом тулуба, незручним розташуванням кінцівок) до 25% часу зміни.

Нахил тулуба: Вимушені нахили протягом зміни – 150 разів; Переміщення у просторі (переходи задля технологічного процесу) – більше 12

б) 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.

Сенсорні навантаження: Зосередження (% за зміну) – до 50; Щільність сигналів (звукові за 1 год) – до 150; Навантаження на слуховий аналізатор (%) – розбірливість слів та сигналів від 50 до 80; 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 – більше 8 год; Змінність роботи – однозмінна (без нічної зміни).

### 5.3 Дослідження стійкості роботи системи електропостачання з ізольованою нейтраллю в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій

Всі системи електроспоживання є досить вразливими до дії загрозливих чинників, що виникають у надзвичайних ситуаціях. Тому важливим питанням є забезпечення високої стійкості роботи СЕП з ізольованою нейтраллю. В даному випадку оцінка стійкості може бути проведена за допомогою моделювання його ураження, що враховують можливі наслідки ураження людей, виникнення пожеж, виходу з ладу енергетичних систем.

Дія радіації на матеріали залежить від виду випромінювання, дози, природи опроміненої речовини та від умов навколишнього середовища. В енергетичних системах використовують різні матеріали: метали, напівпровідники та різні органічні сполуки (діелектрики, смоли), найбільш чутливими до радіації є метали, бо в них велика концентрація вільних носіїв. Основними заходами підвищення радіаційної стійкості є: використання радіаційно-стійких елементів та матеріалів; застосування різних екранів, або активного захисту від дії радіації.

При взаємодії гама-випромінювань та деяким середовищем, йому передається певна кількість енергії. Більша частина цієї енергії йде на поступальний рух електронів та іонів, що були утворені в процесі іонізації. Подальшу іонізацію викликають первинні електрони, що мають велику енергію. Як наслідок виникають тимчасові електричні та магнітні поля.

Виникнення електромагнітного імпульсу (ЕМІ), може викликати високі імпульси струму та напруги в кабельних лініях електропередач, системи зв'язку, обчислювальних машин, антен радіостанцій тощо. В результаті імпульс струму чи напруги проникає в систему і спричиняє пошкодження, ступінь яких залежить від чутливості складових системи вузлів. ЕМІ може поширюватись на десятки кілометрів в навколишньому СЕП з ізольованою нейтраллю середовищі і по різних комунікаціях, здійснюючи вплив на об'єкти там, де ударна хвиля, світлове

вимірювання і проникаюча радіація втрачають своє значення, як вражаючі фактори.

Результатом такого впливу може бути вихід із ладу різних пристроїв та спорядження. Особливо негативний вплив електромагнітного імпульсу на обладнання, яке не має спеціального захисту (вимикачі, різні «домішки» до системи проводів, електромагнітне екранування і т.п.).

Електромагнітний імпульс являє собою велику небезпеку для елементів СЕП з ізольованою нейтраллю, зокрема вимикачі та трансформатори, добре захищених від дії інших вражаючих факторів. Тому захист елементів від механічних пошкоджень не захищає від дії електромагнітного імпульсу. Саме тому, обов'язковим для обладнання СЕП з ізольованою нейтраллю є дослідження стійкості його роботи в умовах впливу електромагнітного імпульсу та іонізуючих випромінювань.

### 5.3.1 Дослідження стійкості роботи системи електропостачання з ізольованою нейтраллю в умовах дії іонізуючих випромінювань

Критерієм стійкості роботи енергетичного обладнання СЕП з ізольованою нейтраллю є граничне значення експозиційної дози ( $D_{гр, P}$ ), при якому в елементній базі можуть виникати зворотні зміни. Визначаємо граничні значення експозиційних доз для елементів СЕП з ізольованою нейтраллю. По мінімальному значенню  $D_{гр}$ , визначаємо границю стійкості системи в цілому. Так як трансформатори та вимикачі мають мінімальне значення  $D_{гр}$ , то далі для них розрахована Дослідження стійкості роботи при дії ІВ та ЕМІ, а кабельні лінії та повітряна лінія мають грозозахист, і стійкі до дії ЕМІ, то подальші розрахунки для них не виконуються. Результати заносимо у таблицю .6.

Таблиця 5.6- Граничні дози для елементів СЕП з ізольованою нейтраллю

№	Елементи СЕП з ізольованою нейтраллю	$D_{гр, P}$	$D_{гр, P}$
1	Кабельні лінії ААБ (3x70 мм <sup>2</sup> )	10 <sup>8</sup>	10 <sup>2</sup>
2	Кабельна лінії ААБ (3x120 мм <sup>2</sup> )	10 <sup>9</sup>	
3	Трансформатори	10 <sup>2</sup>	
4	Вимикачі	10 <sup>4</sup>	

Розрахуємо можливу дозу для СЕП з ізольованою нейтраллю, граничний час експлуатації 10р.

$$D_{em} = \frac{2 \cdot P_{1max} \cdot (\sqrt{t_k} - \sqrt{t_n})}{k_{ocл}} = \frac{2 \cdot 6,71 \cdot (\sqrt{87660} - \sqrt{1})}{1} = 3959,897 \text{ (P)}.$$

Таким чином система буде працювати стійко, так як, можлива експозиційна доза менша за граничну  $3009,7 < 100000$ .  $P_1=6,71$  Р/Год.,  $K_{ocл}=2$ ,  $E_B=9,70$  кВ/м.

Визначаємо допустимий час роботи елементів СЕП з ізольованою нейтраллю:

$$t_{дон} = \left( \frac{D_{ep} \cdot K_{ocл} + 2 \cdot p_{1max} \cdot \sqrt{t_p}}{2 \cdot p_{1max}} \right)^2$$

$$t_{донтр-р} = \left( \frac{10^2 \cdot 1 + 2 \cdot 6,71 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot 6,71} \right)^2 = 116,7 \cdot 10^2 \text{ год} = 13,3 \text{ (років)}$$

$$t_{донвим} = \left( \frac{10^4 \cdot 1 + 2 \cdot 6,71 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot 6,71} \right)^2 = 9631 \cdot 10^4 \text{ год} = 10,9 \text{ (років)}$$

Отже допустимий час роботи трансформаторів складатиме не менше 13 років, а вимикачів близько 11 років.

5.3.2 Дослідження стійкості роботи системи електропостачання з ізольованою нейтраллю в умовах дії електромагнітного імпульсу

Напряга наводки в горизонтальній і вертикальній струмопровідній частині:

$$U_{Г} = E_B \cdot l_{Г},$$

$$U_{В} = E_B \cdot l_{В},$$

де  $E_B$  – величина електромагнітного імпульсу (кВ/м);

$l_{Г}$  – довжина горизонтальної струмопровідної частини системи (м),

$l_{В}$  – довжина вертикальної струмопровідної частини системи (м).

Розрахуємо  $U_{Г}$  для трансформаторів та вимикачів:

$$U_{Гтр-р} = 9,7 \cdot 1,8 \cdot 10^3 = 17460 \text{ (кВ/м)},$$



$$U_{ГВим} = 9,7 * 0,83 * 10^3 = 8051 (\text{кВ/м}).$$

Допустиме коливання напруги живлення:

$$U_{доп} = U_{ж} + \frac{U_{ж}}{100} \cdot N,$$

де  $N$  – відсоток допуску,

$U_{ж}$  – напруга живлення;

$$U_{доп} = 10 + \frac{10}{100} \cdot (\pm 5) = 9,5 - 10,5 (\text{кВ})$$

За критерієм стійкості роботи радіоелектронних систем, або окремих їх елементів в умовах дії електромагнітних випромінювань можна прийняти коефіцієнт безпеки, який для нормальної роботи механізму повинен бути рівним:

$$K_{\sigma} \geq 40 (\text{дБ}).$$

Визначаємо коефіцієнти горизонтальної і вертикальної безпеки:

$$K_{\sigma_{ei}} = 20 \cdot \lg(U_{\delta} / U_{ei}),$$

$$K_{\sigma_{zi}} = 20 \cdot \lg(U_{\delta} / U_{zi}).$$

$$K_{\sigma_{ВТр-р}} = 20 \lg\left(\frac{9500}{17460}\right) = -9,3 (\text{дБ}),$$

$$K_{\sigma_{ГВим}} = 20 \lg\left(\frac{9500}{8051}\right) = 5,43 (\text{дБ}).$$

Так як для трансформатора і вимикача  $K_{\sigma} < 40$  дБ, то обладнання не буде працювати стійко.

Для збільшення стійкості слід застосувати екранування. Перехідне затухання екрану:

$$A = K_{\text{Бном}} - K_{\text{Бмін}}, (\text{дБ});$$

де  $K_{\text{Бном}}$  – номінальний коефіцієнт безпеки (40 дБ),

$K_{\text{Бмін}}$  – мінімальний коефіцієнт безпеки, отриманий при розрахунку;

$$A = 40 - 5,43 = 34,57 (\text{дБ}).$$

Товщина захисного екрану

$$t = \frac{A}{5,2 \cdot \sqrt{f}}$$

де  $f$  – частота,

$$t = \frac{34,57}{5,2 \cdot \sqrt{50}} = 0,15 \text{ (см).}$$

Розрахуємо  $U_B$  трансформатора 630 кВА:

$$U_{BTP} = 9,7 * 0,3 = 2,91 \text{ (кВ/м).}$$

Визначаємо коефіцієнти горизонтальної безпеки для трансформатора:

$$K_{\text{бзГр-р}} = 20 \lg\left(\frac{9500}{2,91}\right) = 70,2 \text{ (дБ).}$$

Так як  $K_{\text{бз}} < 40$  дБ, то обладнання буде працювати не стійко.

Розрахуємо  $U_B$  для вимикача 10 кВ:

$$U_B = 9,70 * 0,4 = 3,88 \text{ (кВ/м).}$$

Визначаємо коефіцієнти безпеки для вимикача:

$$K_{\text{б}} = 20 \lg\left(\frac{9500}{3,88}\right) = 67,7 \text{ (дБ),}$$

Так як  $K_{\text{бз}} < 40$  дБ, то обладнання буде працювати не стійко.

Результати зведемо у таблицю 5.7

Таблиця 5.7- Значення коефіцієнтів безпеки для елементів СЕП з ізолюваною нейтраллю.

Елементи СЕП з ізолюваною нейтраллю	$U_G$ ,кВ	$U_B$ ,кВ	$K_{\text{бв}}$ ,дБ	$K_{\text{б,г}}$ ,дБ	Товщина захисного екрану, см
Трансформатори	17460	2,91	70,2	-9,3	0,15
Вимикачі	8051	3,88	67,7	5,43	0,15

Приймаємо, що вибір товщини захисного екрану для кабельних ліній не розглядається.

Отже, спроектована система електропостачання буде працювати стійко до дії іонізуючих випромінювань. А до дії ЕМІ – не стійко, але при застосуванні

захисного екрану для трансформаторів та вимикачів (0,15см), буде працювати стійко.

Таким чином наша СЕП при застосуванні вище вказаних заходів буде працювати стійко в умовах НС.

Провівши аналіз, щодо стійкості системи електроспоживання до дії ЕМІ, видно, що трансформатори та вимикачі найбільш уразливі, тому передбачила застосування захисного екрану (0,15см). Інші елементи (кабельні лінії) стійкі до дії ЕМІ, з коефіцієнтами безпеки 70,2 та 67,7 відповідно.

Отже дія ЕМІ та іонізуючого випромінювання негативно впливають на роботу СЕП з ізольованою нейтраллю, що призводить до виходу з ладу, або ж повного знищення елементів системи електроспоживання, зокрема трансформатори та вимикачі.

В результаті оцінки стійкості СЕП з ізольованою нейтраллю до дії іонізуючих випромінювань, були визначено, що елементи СЕП з ізольованою нейтраллю стійкі, тому проводити додаткові заходи не потрібно.

Також в даному розділі було проведене дослідження стійкості роботи системи електропостачання з ізольованою нейтраллю в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій. Досліджена стійкість роботи СЕП з ізольованою нейтраллю в умовах дії іонізуючих випромінювань, час роботи якої в заданих умовах становить 13 років, для трансформаторів та 11 років для вимикачів, при рівні радіації 6,71 Р/год. Досліджена стійкість роботи СЕП з ізольованою нейтраллю в умовах впливу електромагнітного імпульсу.

## ВИСНОВОК

У магістерській роботі було розглянуто науково-прикладну проблему розвитку теорії підвищення рівня надійності та безпеки експлуатації розподільних електричних мереж в системах електропостачання кар'єрів, шляхом вдосконалення методів і засобів контролю ізоляції.

Стан ізоляції можна характеризувати двома комплексними величинами  $Y_0$  і  $\delta$ . Як модулі, так і аргументи цих величин істотно впливають на умови забезпечення електробезпеки.

Як об'єкт дослідження стану ізоляції трифазна мережа з ізольованою нейтралю має ряд особливостей, які крім звичайних вимог до методів вимірювання пред'являють ряд специфічних. Ця обставина є однією з причин різноманіття існуючих методів вимірювання. Правильний вибір найбільш раціональних з них можна здійснити, знаючи весь комплекс вимог, яким вони повинні задовольняти. Основні з них: вимір необхідно проводити без порушення нормальної експлуатації мережі; при вимірах повинна забезпечуватися безпека; метод вимірювання повинен бути універсальним, тобто забезпечувати визначення всіх параметрів, що характеризують стан ізоляції; метод повинен забезпечити необхідну точність вимірювання; вимірювальна апаратура повинна бути компактною та надійною.

Запропонований метод дозволяє визначити провідність ізоляції всієї мережі і коефіцієнт асиметрії не тільки в окремому, але й у загальному випадку асиметрії ізоляції (нерівності активних і реактивних провідностей фаз). Цей метод заснований на принципі створення певного несиметричного режиму, передбачає по чергове випробування фаз мережі, при якому вимірюють напругу на випробуваній фазі, струм в дроселі і потужність.

Точність визначення  $|\delta|$  і  $\varphi_\delta$  залежить від значень  $m$ ,  $\alpha$  і похибок їх обчислення. Погрішність модуля коефіцієнта асиметрії, при інших рівних умовах, зростає із збільшенням коефіцієнта  $m$ ;  $\Delta\varphi_\delta$  має максимальне значення при  $m \rightarrow 1$  і  $\alpha = 0$ .

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці /В. Ц. Жидецький, В. С. Джигирей, О. В. Мельников. Вид. 2-е, стереотипне. Львів: Афіша, 2000. 348 с.
2. Міністерство надзвичайних ситуацій України. Наказ. 05.04.2012 № 671. Про затвердження Правил охорони праці під час експлуатації електроустаткування та електромереж на відкритих гірничих роботах.
3. Кідиба В.П., Шелепетень Т.М. Захист ліній електропересилання: навч. посіб. НУ «ЛП», 2004. 184 с
4. Єдині правила безпеки при розробці родовищ корисних копалин відкритим способом. НАОП 1.2.90-1.01-93, затверджені Держнаглядохоронпраці 21.07.93. НПАОП 0.00-1.32-97 (ДНАОП 1.1.70-1.01-97)
5. Єдині правила безпеки при дрібленні, сортуванні, збагаченні корисних копалин та огрудкуванні руд і концентратів, НАОП 1.2.90 - 1.01-77, затверджені Держгіртехнаглядом 09.08.77.
6. Загальні правила безпеки для підприємств і організацій металургійної промисловості, НАОП 1.2.00 - 1.01-87, затверджені Держгіртехнаглядом 13.05.87.
7. Правила безпеки при експлуатації електрообладнання та електромереж на відкритих гірничих роботах, ДНАОП 1.2.90-1.07.93, затверджені Держнаглядохоронпраці України від 28.02.93.
8. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. ДНАОП 0.00-1.32-01. К.: Укрархбуд-інформ, 2001. 118 с.
9. Кутіна М. В., Мовчан Н. С. Контроль ізоляції в системах електропостачання з ізолюваною нейтраллю напругою до 1000 В. Матеріали науково-технічної конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи». Збірник наукових праць [Електронний ресурс], Вінниця: ВНТУ, 2023-2024. Режим доступу:

<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2024/paper/viewFile/19399/16198>

10. Бурбело, М. Й. Системи електропостачання. Елементи теорії та приклади розрахунків : навчальний посібник / М. Й. Бурбело, О. О. Бірюков, Л. М. Мельничук. Вінниця : ВНТУ, 2011. 204 с.
11. Шестеренко В.Є. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств . Підручник. – Вінниця: Нова книга, 2004. 656с.
12. Півняк Г. Г., Білий М. М., Бажін Г. М. Електропостачання гірничих підприємств: Довідковий посібник. Д.: Національний гірничий університет, 2008. 550 с.
13. Василега П.О. Електропостачання: Навчальний посібник. Сми : ВТД «Університетська книга», 2008. 415с
14. 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. 2002. №2. С.60-65.
15. Кутін В.М., Свиридов М.П., Матвієнко С.В. Проблеми діагностування ізоляції повітряних ліній напругою 6-10 кВ // Вісник ВПІ. 2003. №6. С.238-240.
16. Вдосконалення системи керування технічним станом розподільних мереж /В.М. Кутін, М.О. Ілюхін // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія Електротехніка і енергетика. 2011. Вип. 11. С 226 -230.
17. Кутін В.М. Діагностика електрообладнання : навчальний посібник / В.М. Кутін, м. О. Ілюхін, М.В. Кутіна. Вінниця: ВНТУ, 2014 161 с
18. Лабзун М. П. Вдосконалення системи контролю стану опорно- стрижневих ізоляторів в експлуатації./ М. П Лабзун, В. Л. Таловеря., О. Є. Рубаненко, П. І. Пірожок//Новини енергетики. 2009. №9. С.53-53.

19. Основи релейного захисту та автоматизації енергосистем: навчальний посібник. Ч. 2 / укл.: Д.П. Козярьський, Е.В. Майструк, І.П. Козярьський. Чернівці: Чернівецький нац. ун., 2019. 133 с.
20. 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
21. 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.
22. Патент 120126 Україна. МКИ G01N 27/00, G02R 54/00. Пристрій контролю стану ізоляції і захисту електроустаткування / В. Є. Кривонос С. М. Злепко, С. В. Павлов, С. В. Тимчик, В. В. Кривонос // Бюл. №19, 2019. 6 с.
23. Sahulka E. Bestimmung des Isolationswiderstandes und der Kapazität einzelner Leiter von Wechselströmanlagen während des Betriebes. Ets. 2000. 250s.
24. Electrical Safety in Mining Operations High-Risk Environments and Safety Measures. Energy5. 12 Nov. 2023.
25. Nick Schiltz . Why Mining is One of the Most Dangerous Industries for Electrical Safety. Automation.com August 31, 2022.
26. Хілов В. С. Основні вимоги до безперервного контролю опору ізоляції в мережі з ізолюваною нейтраллю напругою до 1000 В та тенденції розвитку даних систем // Форум гірників. 2014 : матеріали міжнар. конф., 1-4 жовтня 2014 р. Дніпропетровськ, 2014. Т. 3. С. 232-241.
27. Патент 34689 Україна. МКИ G01N 27/00, G01R 31/00. Пристрій автоматичного контролю ізоляції електричної мережі змінного струму / Н.В. Гребченко// Бюл. №6, 2002. 4 с.
28. Кідиба В.П., Шелепетень Т.М. Захист трансформаторів та автотрансформаторів: навч. посіб. НУ «ЛП», 2004. 180 с.
29. Albright M. W., Starr W. T. Методи досліджування на стійкість до утворення провідячого сліда // Trans. AIEE. 1956. Pt. III, vol.75. P.441-448.

30. 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.
31. Луцяк В. В. Дослідження параметрів аварійного режиму при визначенні місця пошкодження в РМ дистанційними методами/ В. В. Луцяк // Проблеми і перспективи енергозбереження комунального господарства і промислових підприємств: науково-технічний семінар: тез. доп. Луцк, 2007. С.22-25.
32. Тарифи на електроенергію для споживачів. - URL: [http://www.hoe.com.ua/index\\_21.html](http://www.hoe.com.ua/index_21.html)
33. Криворізька Енергетична Компанія URL: <https://kr-energo.com/>
34. Методичні вказівки щодо опрацювання розділу «Охорона праці» в дипломних проектах і роботах студентів електротехнічних спеціальностей/ Уклад. О. В. Кобилянський, О.П. Терещенко : ВНТУ. 2003. 46 с.
35. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.
36. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->
37. ДБН А.3.2-2-2009. ССБП. Охорона праці і промислова безпека у будівництві. Основні положення. URL: [https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/dbn\\_a322\\_2009/1-1-0-945](https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/dbn_a322_2009/1-1-0-945).
38. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.
39. НПАОП 40.1-1.32-01 (ДНАОП 0.00-1.32-01) Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок (Правила



- устройства электроустановок. Электрооборудование специальных установок). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.
40. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>.
41. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с.
42. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=79885](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885)
43. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. URL: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>.
44. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>.

Додаток А (обов'язковий)

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

КОНТРОЛЬ ІЗОЛЯЦІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З  
ІЗОЛЬОВАНОЮ НЕЙТРАЛІЮ НАПРУГОЮ ДО 1000 В

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:

«Контроль ізоляції в системах електропостачання з ізольованою нейтраллю  
напругою до 1000 В»  
08-22.МКР.007.01.23ТЗ

Науковий керівник:

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

Виконавець: студент гр. ЕМ - 22м

Мовчан Н. С. \_\_\_\_\_  
(підпис)

Вінниця 2023 р.

## 1. ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ (МКР)

Робота виконується на підставі наказу ВНТУ за 18. 09. 2023 року №\_\_247\_\_

Дата початку роботи \_\_\_\_\_ 16. 09. 2023 \_\_\_\_\_ р.

Дата закінчення роботи \_\_\_\_\_ 4. 12. 2023 \_\_\_\_\_ р.

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

а) *мета* – є підвищення рівня надійності та безпеки експлуатації розподільних електричних мереж в системах електропостачання кар'єрів, шляхом вдосконалення методів і засобів контролю ізоляції.;

б) *призначення розробки* – виконання магістерської кваліфікаційної роботи.

в) *вихідні дані для виконання МКР:*

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.

3.2 Правила улаштування електроустановок. - 5-те вид., переробл. й доповн. - X .: Міненерговугілля України, 2014.

3.3 Півняк Г. Г., Білий М. М., Бажін Г. М. Електропостачання гірничих підприємств: Довідковий посібник. Д.: Національний гірничий університет, 2008. 550 с

3.4. 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.

3.5 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	18.09.2023р.	29.09.2023р.
4.2 Проведення дослідних розрахунків	2.10.2023р.	17.11.2023р.
4.3 Розробка робочих креслень	20.11.2023р.	4.12.2023р.
4.4 Написання розрахунково-пояснювальної записки і захист магістерської роботи	28. 11.2023р.	4.12.2023р.

#### 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

КОНТРОЛЬ ІЗОЛЯЦІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З  
ІЗОЛЬОВАНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ НАПРУГОЮ ДО 1000 В

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

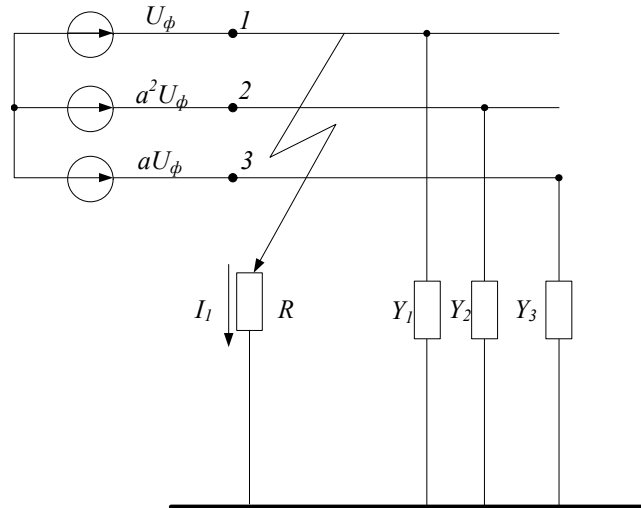


Рисунок Б.2 – Принципова схема методу накладення оперативного постійного струму на трифазну мережу

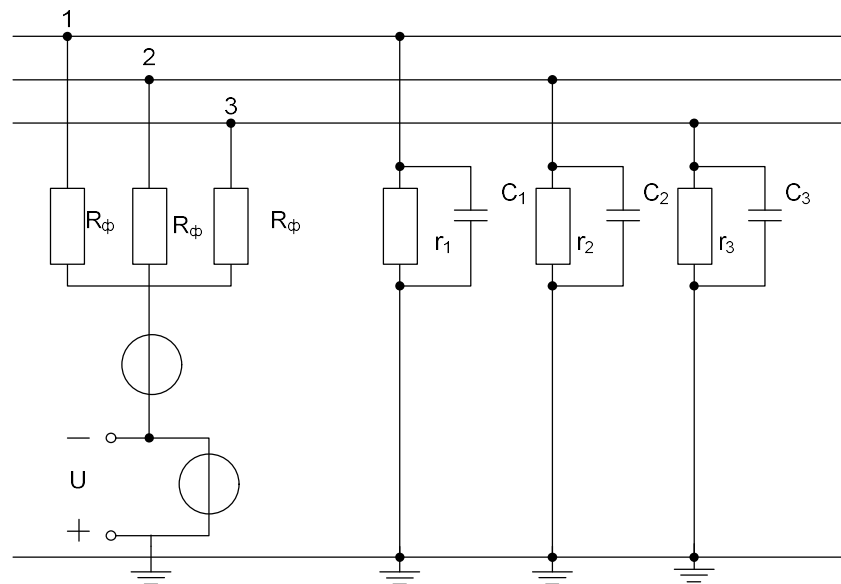


Рисунок Б.3 – Еквівалентна схема для визначення струму витоку при введенні додаткової провідності

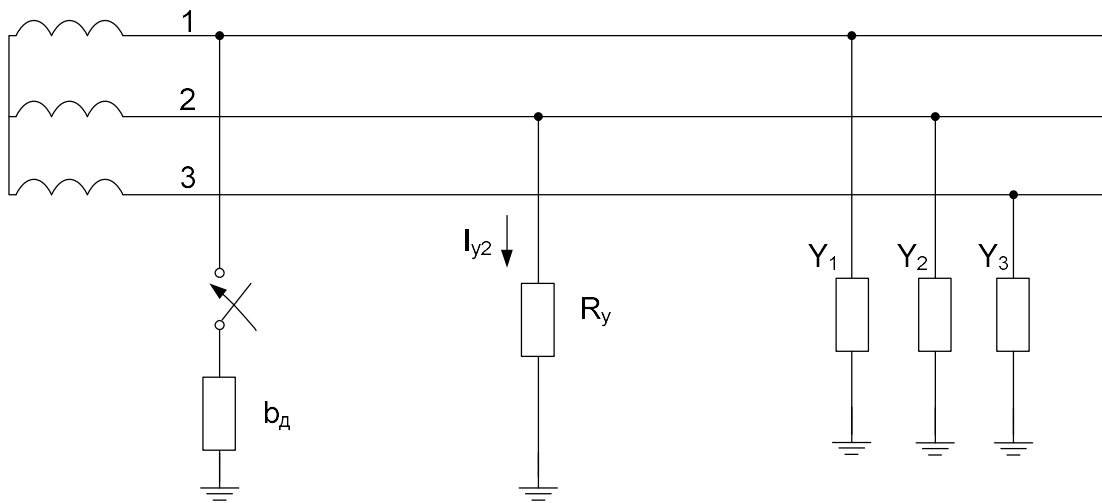


Рисунок Б.4 – Принципова схема методу пофазного визначення провідності ізоляції.

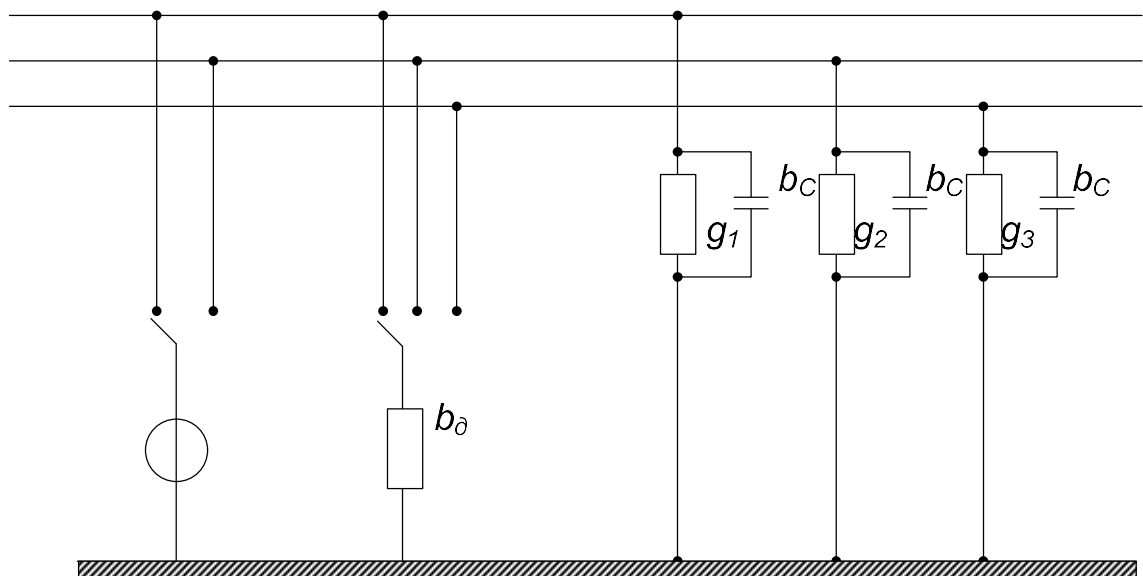




Рисунок Б.5 – Принципова схема методу пофазного визначення провідностей ізоляції, заснованого на вирівнюванні потенціалів фаз мережі відносно землі

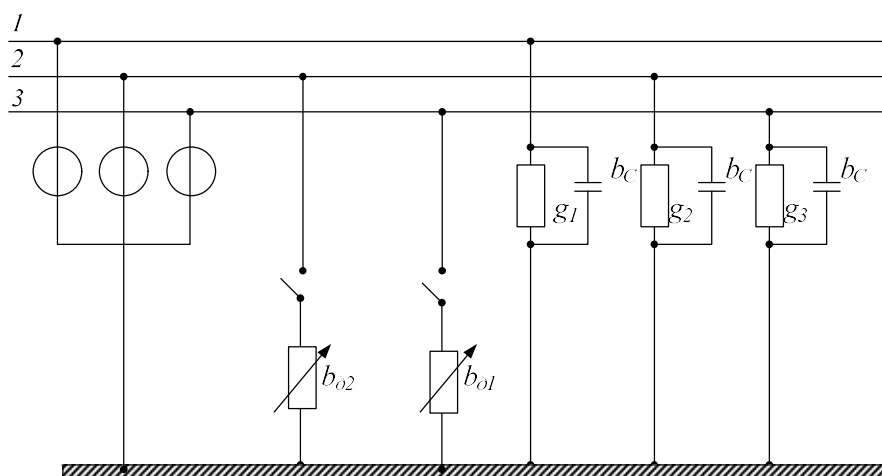


Рисунок Б.6 – Принципова схема методу визначення провідності ізоляції мережі відносно землі, що передбачає поділ повної провідності на складові за рахунок введення додаткової провідності.

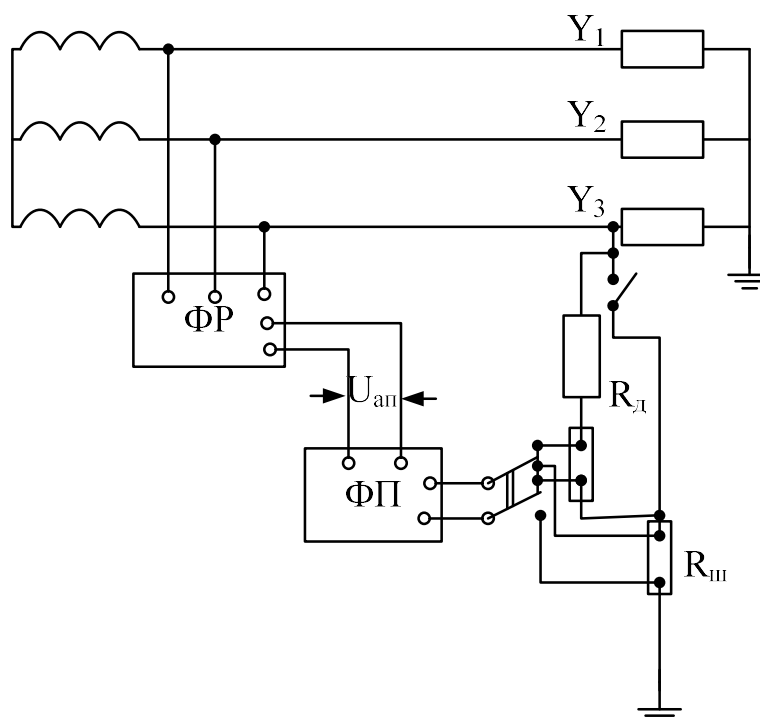


Рисунок Б.7 – Принципова схема методу визначення провідності ізоляції мережі відносно землі, що передбачає поділ повної провідності на складові фазочутливого приладу з фазою опорної напруги яка має регламентований кут зсуву.

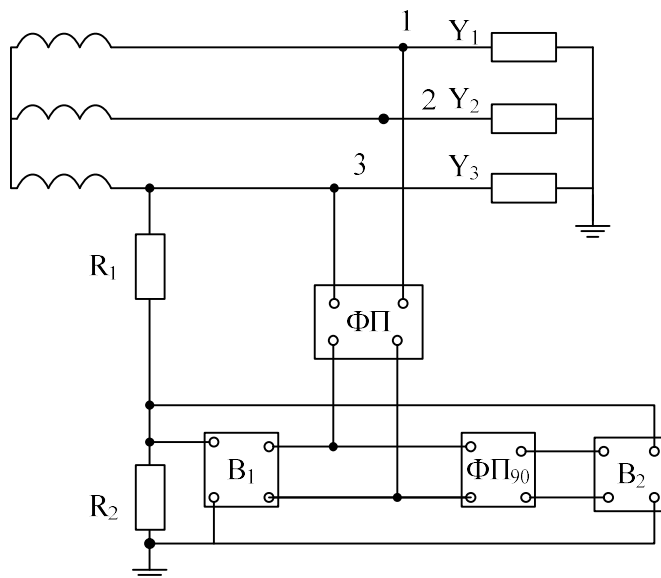


Рисунок Б.8 – Принципова схема методу 3-х вольтметрів, що передбачає представлення трифазної мережі у вигляді активного двухполюсника.

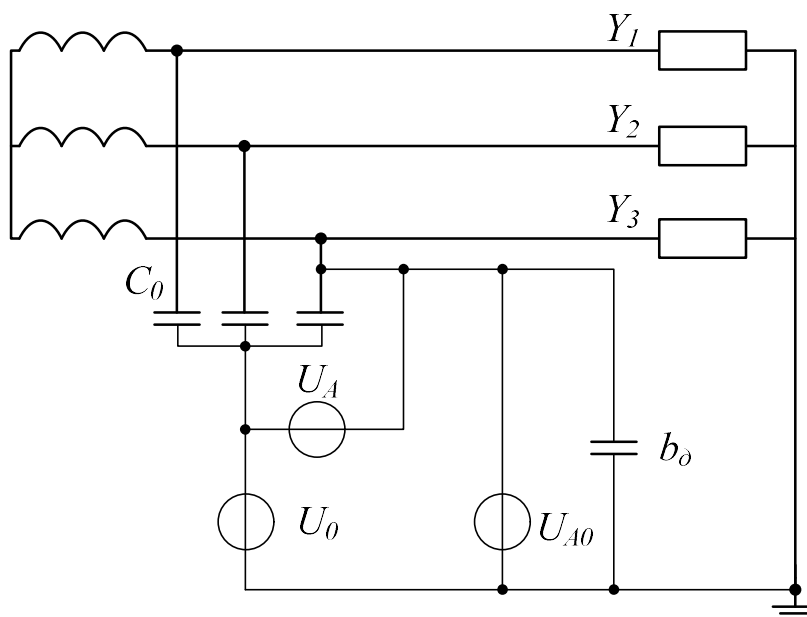


Рисунок Б.9 – Принципова схема метода амперметра, вольтметра, ватметра в якому провідності визначаються за результатами вимірювання напруги, струму і потужності.

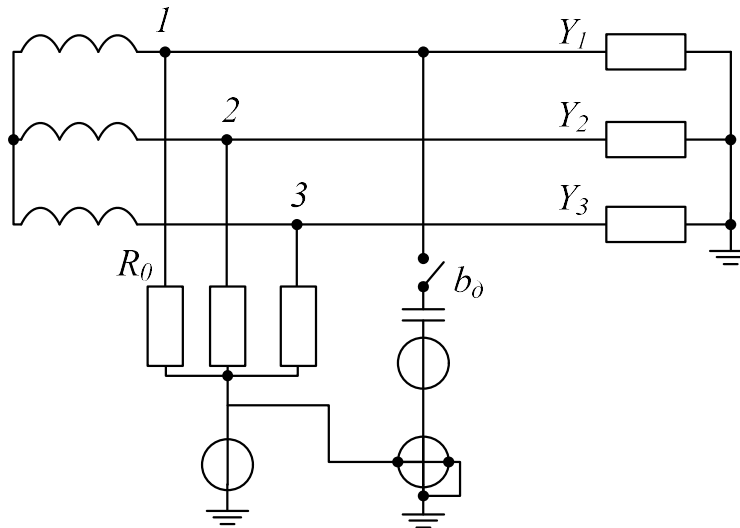


Рисунок Б.10 – Принципова схема методу визначення провідностей ізоляції мережі, що передбачає увімкнення вторинної обмотки трансформатора між штучно створеною нульовою точкою і землею.

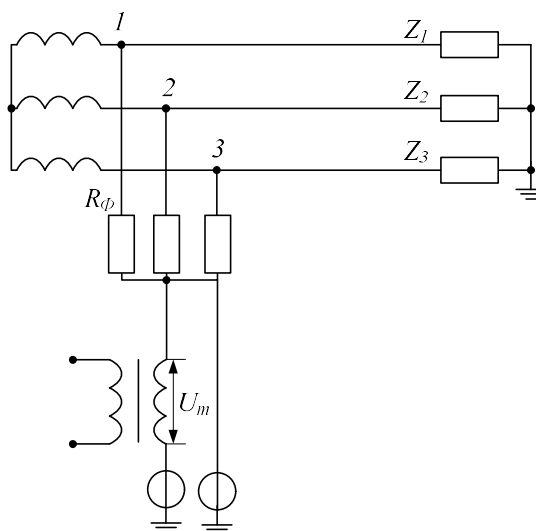


Рисунок Б.11 – Принципова схема методу визначення провідності ізоляції мережі і коефіцієнта її асиметрії.

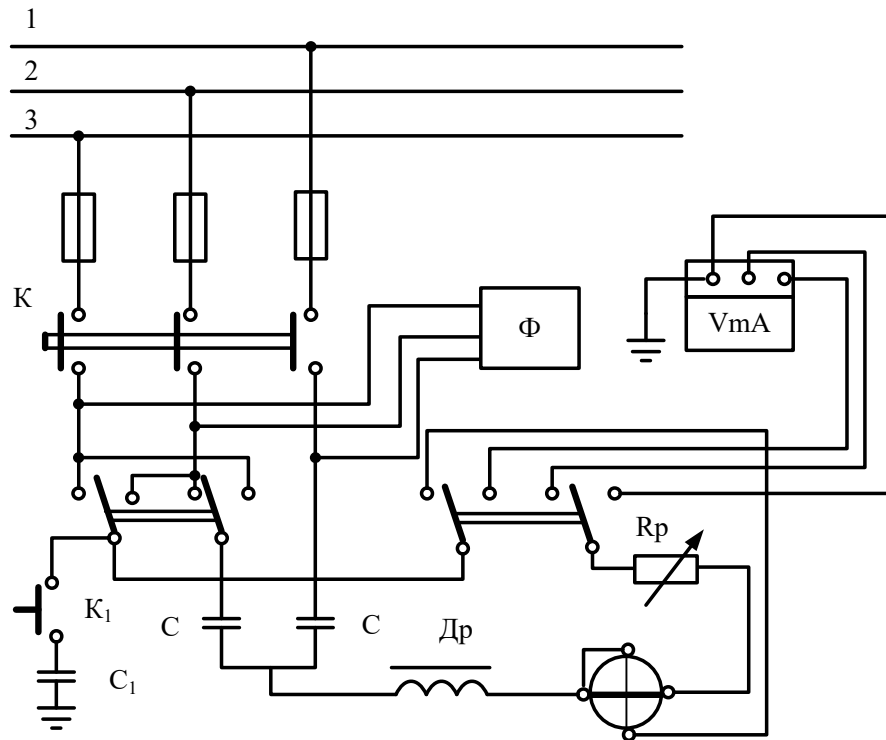


Рисунок Б.12 – Схема заміщення методу визначення провідності ізоляції мережі і коефіцієнта її асиметрії

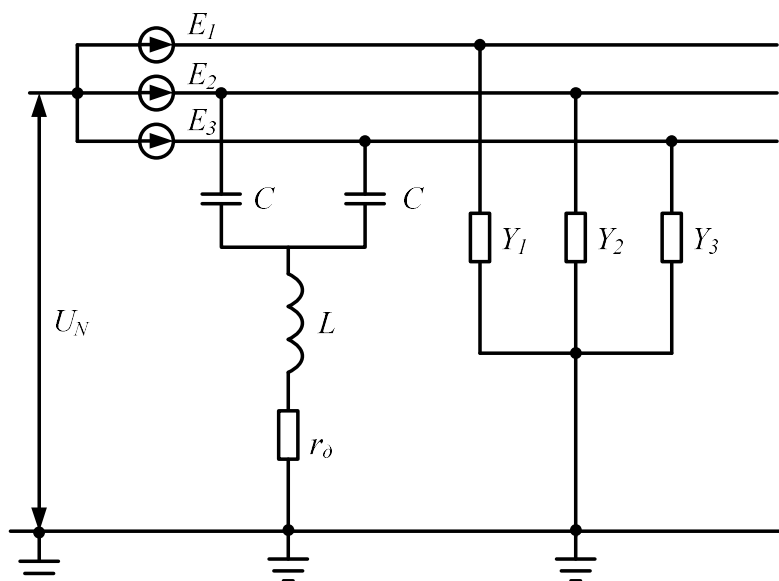


Рисунок Б.13 – Векторні діаграми напруг при випробуванні різних фаз мережі:  
а) - перша, б) - друга, в) - третя.

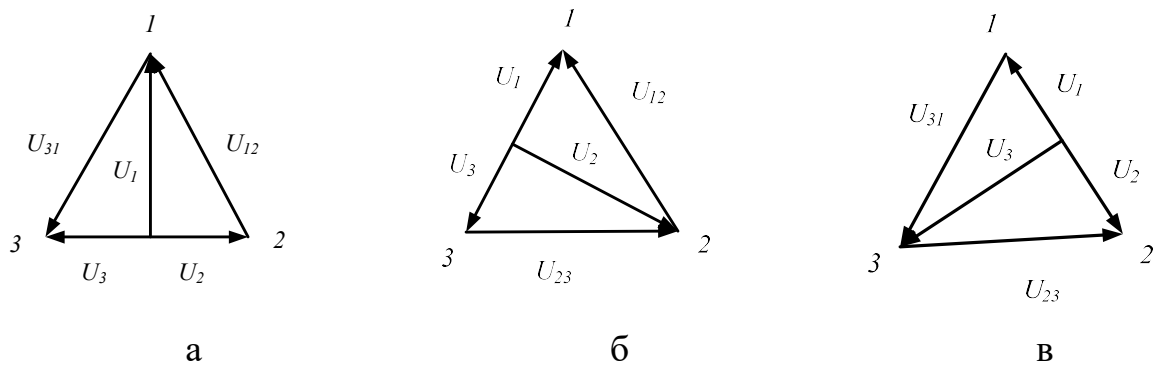
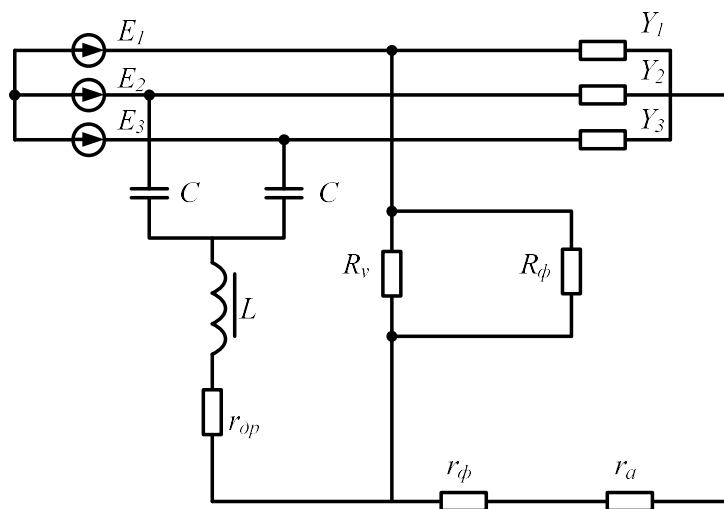


Рисунок Б.14 - Розрахункова схема для визначення напруги, струму й кута зрушення між ними.



Додаток В  
(обов'язковий)

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ) РОБОТИ

КОНТРОЛЬ ІЗОЛЯЦІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З  
ІЗОЛЬОВАНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ НАПРУГОЮ ДО 1000 В

ПРОТОКОЛ

## ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Контроль ізоляції в системах електропостачання з ізольованою нейтраллю напругою до 1000 В.

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 Unischek

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 Unischek щодо роботи.

Автор роботи \_\_\_\_\_ Мовчан Н. С.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

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

Додаток Г (обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ

КОНТРОЛЬ ІЗОЛЯЦІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З  
ІЗОЛЬОВАНОЮ НЕЙТРАЛІЮ НАПРУГОЮ ДО 1000 В



Факультет електроенергетики та електромеханіки  
Кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту

### МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Контроль ізоляції в системах електропостачання з ізольованою нейтраллю  
напругою до 1000 В»

Виконав: студент 2-го курсу, групи ЕСЕ-23м  
спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)  
Мовчана Н. С.

Керівник: к.т.н., доцент каф. ЕСЕЕМ  
Кутіна М. В.

2023

### ВСТУП

Підприємства гірничої промисловості з відкритою розробкою корисних копалин належать до сфери промислового виробництва, в якій питання безпеки стоять особливо суворо. Так, якщо в цілому по гірничометалургійній промисловості електротравматизм складає близько 15%, то на відкритих гірничих розробках цієї галузі він досягає 47% від загального числа нещасних випадків. Наприклад в умовах криворізького басейну із загального числа нещасних випадків, пов'язаних із застосуванням електричної енергії, 40% відбулося в підземних виробках, 46,7% на кар'єрах, 13,3% на поверхні шахт, дробильно-сортувальних і збагачувальних фабриках ГЗК. Враховуючи перспективність видобутку корисних копалин відкритим способом, а також бурхливе зростання енергоозброєності підприємств, проблему підвищення електробезпеки в умовах кар'єрів слід вважати виключно актуальною.

Забезпечення електробезпеки на відкритих гірських розробках залежить від успішного вирішення комплексу питань, серед яких основними є контроль опору ізоляції та кола заземлення електрообладнання. В даний час розроблено і експлуатується ряд пристроїв контролю опору ізоляції. Однак застосування їх не завжди виявляється ефективним. Пояснюється це тим, що розробка більшості з них проводилася без урахування специфічних особливостей об'єкта дослідження. Зосереджуючись на певному позитивному ефекті, що досягається в тому чи іншому схемному рішенні, не враховано всього комплексу вимог, яким повинен задовольняти метод вимірювання. За інших рівних умов, струм через тіло людини у випадку дотику його до струмоведучих частин електроустановки залежить від величини активної, реактивної провідностей ізоляції мережі і ступеня їх нерівномірного розподілу по фазах. Для вимірювання параметрів ізоляції в мережах напругою до 1000 В промисловістю випускається два прилади: мегомметр і міліамперметр, встановлений в реле витоку. Ці прилади вимірюють омичний опір ізоляції. Як показали теоретичні та експериментальні дослідження ряду авторів при вимірюванні в мережах, що перебувають в експлуатації, омичний опір від активного може відрізнитися в десятки разів. Тому ці прилади можуть виконувати лише функції індикаторів аварійного стану ізоляції. Застосування методів, заснованих на принципі штучного зсуву нейтралі мережі, дозволило розширити область знань про активних і реактивних провідностей ізоляції мережі, проте вони не передбачають визначення асиметрії провідностей ізоляції. Останнє здійснює істотний вплив на умови забезпечення електробезпеки. До недоліків деяких з цих методів слід також віднести використання режиму замикання фази на землю і великої кількості незбіжних у часі вимірювань. Таким чином, незважаючи на певні успіхи, досягнуті в напрямку розробки методів вимірювання, існує необхідність їх подальшого вдосконалення.

*Метою дослідження є підвищення рівня надійності та безпеки експлуатації розподільних електричних мереж в системах електропостачання кар'єрів, шляхом вдосконалення методів і засобів контролю ізоляції.*

*Предметом дослідження є процеси, що відбуваються в ізоляції при експлуатації електричних мереж в умовах кар'єрів.*

*Об'єктом дослідження є методи і засоби контролю ізоляції електричних мереж в умовах кар'єрів.*

Задачами дослідження є:

1. Аналіз об'єкта дослідження та вибір сукупності контрольованих параметрів;
2. Аналіз існуючих методів визначення провідності ізоляції фаз відносно землі;
3. Аналіз існуючих методів визначення провідності ізоляції мережі відносно землі;
4. Вдосконалення методів і засобів контролю ізоляції;
5. Визначення похибки методу та їх ефективності.

*Новизна одержаних результатів.* Отримав подальший розвиток метод контролю ізоляції в системах електропостачання з ізольованою нейтраллю напругою до 1000 В, заснований на принципі створення певного несиметричного режиму, що передбачає почергове випробування фаз мережі, при якому вимірюють напругу випробуваної фази, струм в дроселі і потужність.

*Апробація результатів магістерської кваліфікаційної роботи.* Результати роботи представлялися на НТК «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи», 2023р.

*Публікації результатів магістерської кваліфікаційної роботи* Результати дослідження представлено на науково-технічній конференції факультету електроенергетики та електромеханіки у 2023. Опубліковані тези доповідей. (Контроль ізоляції в системах електропостачання з ізольованою нейтраллю напругою до 1000 В).

#### ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ

З метою спрощення задачі визначення параметрів ізоляції три фазної мережі з ізольованою нейтраллю, що знаходиться під робочою напругою, вводять ряд припущень:

1. Напруга джерела симетрична і не залежить від параметрів ізоляції.
2. Ізоляцію струмоведучих каналів кожного елемента представляють у вигляді зосереджених паралельно включених між собою активної і реактивної провідностей.
3. При аналізі електробезпеки враховують тільки провідність між фазою і землею.
4. Провідність ізоляції не залежить від величини прикладеної напруги, а реактивна провідність носить ємнісний характер.

Враховуючи ці припущення, еквівалентну схему ізоляції електроустановки трифазного струму по відношенню до землі можна представити, як показано на рисунку 1.1.

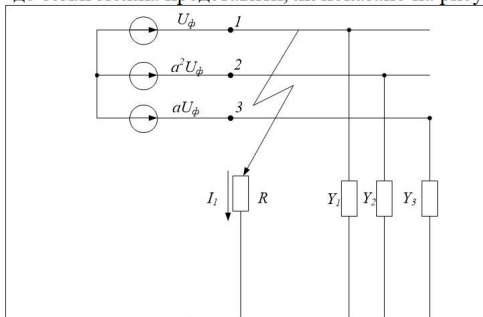


Рисунок 1.1 – Схема заміння трифазної мережі для визначення струму через тіло людини при однополюсному дотику

Користуючись законами електротехніки, визначимо струм через тіло людини при дотику до різних фаз мережі (рис. 1.1.). У комплексній формі:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = U_\phi \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3}{1 + R(Y_1 + Y_2 + Y_3)} \left( 1 - \frac{Y_1 + a^2 Y_2 + a Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3} \right); \\ \dot{I}_2 = U_\phi \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3}{1 + R(Y_1 + Y_2 + Y_3)} \left( a^2 - \frac{Y_1 + a^2 Y_2 + a Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3} \right); \\ \dot{I}_3 = U_\phi \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3}{1 + R(Y_1 + Y_2 + Y_3)} \left( a - \frac{Y_1 + a^2 Y_2 + a Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3} \right); \end{cases} \quad (1.1)$$

де  $a, a^2$  – фазні множники;  $U_\phi$  – фазна напруга мережі;  $R$  – опір тіла людини;  $Y_1, Y_2, Y_3$  – комплекси провідностей ізоляції відповідних фаз.

Із системи рівнянь (1.1) очевидно, що за інших рівних умов (напруга мережі, опір тіла людини) величина струму залежить від значень провідностей ізоляції фаз відносно землі. У загальному випадку вони не рівні між собою, тому завдання визначення стану ізоляції зводиться до знаходження трьох комплексних величин  $Y_1, Y_2, Y_3$ .

Також можливо характеризувати стан ізоляції комплексом провідності ізоляції мережі  $Y_0$  і комплексним коефіцієнтом  $\delta$ , що враховує нерівномірний розподіл провідностей по фазах. Обидва параметра пов'язані з провідністю фаз рівностями:

$$Y_0 = Y_1 + Y_2 + Y_3; \quad (1.3)$$

$$\delta = \frac{Y_1 + a^2 Y_2 + a Y_3}{Y_0}; \quad (1.4)$$

Враховуючи рівності (1.3), (1.4), систему рівнянь (1.1) можна представити у вигляді:

$$\dot{I}_1 = U_\phi \frac{Y_0}{1 + RY_0} (1 - \delta);$$

$$\dot{I}_2 = U_\phi \frac{Y_0}{1 + RY_0} (a^2 - \delta);$$

$$\dot{I}_3 = U_\phi \frac{Y_0}{1 + RY_0} (a - \delta).$$

5

## АНАЛІЗ ІСНЮЮЧИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ПРОВІДНОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ

### АНАЛІЗ ІСНЮЮЧИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ПРОВІДНОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ ФАЗ ВІДНОСНО ЗЕМЛІ

Метод 1. Метод дозволяє проводити вимірювання без зняття робочої напруги і використовує три режими. Режим холостого ходу та короткого замикання фази на землю для визначення повної провідності, а для поділу її на складові - режим, при якому між фазою і землею вводиться додаткова провідність. Не вимагає громіздких обчислень, але використовує велику кількість незбіжних у часі вимірювань.

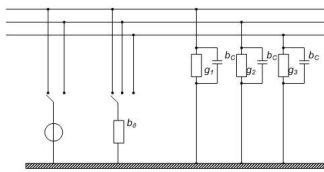


Рисунок 1 – Принципова схема методу пофазного визначення провідності ізоляції

Метод 2. Не вимагає введення додаткових провідностей. У цьому випадку вимірюють напругу окремих фаз відносно землі  $U_1, U_2, U_3$ , потім при відомих  $Y_0, g_0, b_0$ , шукані  $g_1, g_2, g_3$ , знаходять шляхом вирішення трьох рівнянь з трьома невідомими. Очевидно, що процес обчислення провідностей за наведеними рівняннями складний.

Метод 3. Метод, заснований на принципі вирівнювання потенціалів фаз мережі відносно землі. Вимагає установки вольтметрів між фазами і землею і двох реостатів, включених між відповідними фазами і землею таким чином, щоб покази всіх вольтметрів були рівні фазній напрузі джерела. Процес вирівнювання потенціалів окремих фаз складний і вимагає багато часу для проведення експерименту.

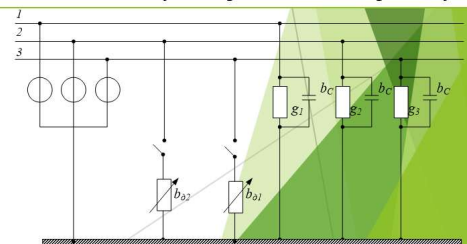


Рисунок 2 – Принципова схема методу пофазного визначення провідностей ізоляції, заснованого на вирівнюванні потенціалів фаз мережі відносно землі

6

## АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ПРОВІДНОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ МЕРЕЖІ ВІДНОСНО ЗЕМЛІ

Метод 4. Цей метод дозволяє проводити вимірювання без зняття робочої напруги і використовує три режими. Режим холостого ходу та короткого замикання фази на землю для визначення повної провідності, а для поділу її на складові - режим, при якому між фазою і землею вводиться додаткова провідність. Простота цього методу є основним достоїнством, що виділяють його з ряду інших методів. Аналіз похибок методу показав, що найбільша точність вимірювання досягається при введенні провідності, чисельно рівної за величиною повної провідності ізоляції. При аналізі похибок не враховувався вплив коливання лінійної напруги мережі, цей фактор здійснює істотний вплив на похибку при вимірюванні даним методом.

Метод 5. Відмінною його рисою є використання для розділення повної провідності на складові фазочутливого приладу з регульованою фазою опорної напруги. Похибка методу вимірювання залежить від співвідношення, класу використовуваних приладів і точності установки фазочутливого приладу на максимальне і нульове відхилення стрілки приладу і досягає граничне значення  $\epsilon = 20\%$  для мереж, у яких  $0,05 \leq \text{ctg}\delta \leq 1,0$ .

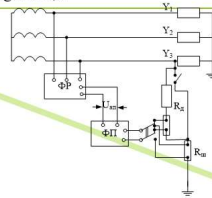


Рисунок 1 – Принципова схема методу визначення провідності ізоляції мережі відносно землі, що передбачає поділ повної провідності на складові за рахунок введення додаткової провідності (Метод 5)

Загальним недоліком фазозміщуючих ланцюгів є залежність кута зсуву від частоти вхідної напруги. У найбільш досконалих фазозміщуючих пристроях похибка підтримки квадратури досягає  $\pm 0,5^\circ$ , а похибка коефіцієнта передачі по модулю  $\pm 5\%$  за умов сталості частоти мережі. Ці недоліки усуваються в наступних методах

Метод 6. Відмінною особливістю методу є те, що фаза опорної напруги фазочутливих приладів зсуваються одні відносно одного на  $90^\circ$  електричних. Завдяки цьому процес вимірювання в порівнянні з попереднім методом спрощується. Отже, тривалість процесу вимірювання значно скорочується, але пристрій для вимірювання значно ускладнено. До того ж використання фазозміщуючих пристроїв ФП  $90^\circ$  вносить додаткові похибки у визначенні реактивної складової.

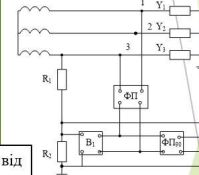


Рисунок 2 – Принципова схема методу визначення провідності ізоляції мережі відносно землі, що передбачає поділ повної провідності на складові фазочутливого приладу з фазою опорної напруги яка має регламентований кут зсуву. (Метод 6)

Метод 7. Заснований на представленні трифазної мережі у вигляді активного двухполосника по відношенню до вітки змикання на землю з ємнісною провідністю відносно даному методу є те, що стає можливим безпосередньо виміряти напругу на вхідному опорі. Дійсно, напруга, виміряна між штучно створеною нульовою точкою і землею 0, буде дорівнює напрузі на вхідному опорі двухполосника, що значенням опорів, що створюють штучну нульову точку, можна знехтувати в порівнянні з опором вимірювального вимірювача.

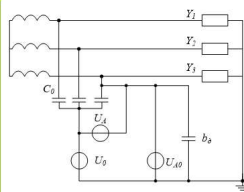


Рисунок 3 – Принципова схема методу визначення провідності ізоляції мережі відносно землі, що передбачає представлення трифазної мережі у вигляді активного двухполосника. (Метод 7)

Метод 8. У цьому методі вторинна обмотка трансформатора включена між штучно створеною нульовою точкою і землею, а на первинну обмотку послідовно подаються три лінійні напруги мережі.



Рисунок 4 – Принципова схема методу визначення провідності ізоляції мережі, що передбачає увімкнення вторинної обмотки трансформатора між штучно створеною нульовою точкою і землею. (Метод 8)

## РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ

Найбільш поширені методи дозволяють визначити лише провідності ізоляції всієї мережі без врахування її асиметрії. До того ж ряд з них передбачають проведення досліду однофазного замикання на землю, що підвищує небезпеку ураження людей електричним струмом, виникнення пожеж та вибухів рудничного газу і пилу. Для визначення асиметрії ізоляції необхідно знати провідності ізоляції окремих фаз мережі. Існуючими методами провідності окремих фаз обчислюються за результатами великої кількості незбіжних у часі вимірювань або по складних рівняннях, що призводить до великих погрешностей. Придатні вони лише для окремих випадків стану ізоляції, коли має місце асиметрія тільки активних або тільки реактивних провідностей. Остання обставина не дозволяє використовувати ці методи для визначення асиметрії ізоляції мереж, оскільки в реальних умовах невідомо, яка з провідностей, активна або реактивна, нерівномірно розподілена по фазах.

### ПРИНЦИПОВА СХЕМА МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ПРОВІДНОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ МЕРЕЖІ І КОЕФІЦІЄНТА її АСИМЕТРІЇ

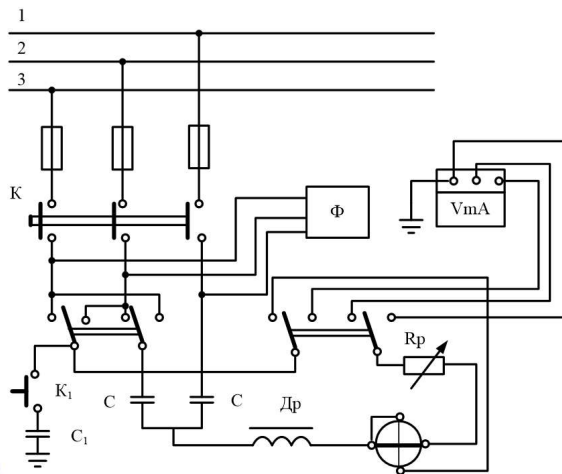


Рисунок 1 – Принципова схема методу визначення провідності ізоляції мережі і коефіцієнта її асиметрії

На відміну від існуючих методів у запропонованому використовується режим зміщення нейтральної точки на середину вектора лінійної напруги. Досягається це наступним чином. При випробуванні будь-якої фази, до лінійних затискачів двох інших приєднуються конденсатори однакової ємності  $C$ , між загальною точкою яких і землею підключений дросель  $Dr$  через міліамперметр і послідовний ланцюг ватметра. Паралельні ланцюги ватметра і вольтметра включені між випробуваною фазою і землею. Параметри дроселя і конденсаторів підібрані так, що реактивний опір дроселя дорівнює половині реактивного опору конденсатора, а активне незначне (порядку декількох Ом). Теоретичним обґрунтуванням методу служать наступні положення.

9

При випробуванні, наприклад, першої фази (рис. 2) напруга зміщення нейтралі визначається виразом

$$\dot{U}_N = U_\phi \frac{Y_1 + a^2(Y_2 + Y_d) + a(Y_3 + Y_d)}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + 2Y_d}, \text{ де } Y_d = \frac{1}{2j\omega L - j\frac{1}{\omega C} + 2r_d}; \text{ } r_d - \text{ активний опір дроселя.}$$

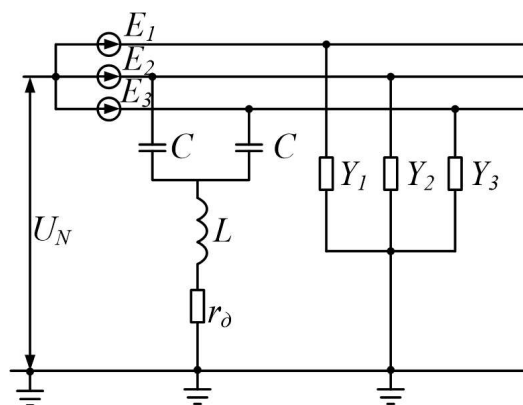


Рисунок 2 – Схема заміщення методу визначення провідності ізоляції мережі і коефіцієнта її асиметрії

10

З урахуванням того, що  $\omega L = \frac{1}{2\omega C}$  напругу зміщення нейтралі можна представити у вигляді

$$\dot{U}_N = \frac{U_\Phi}{2} \left( \frac{2\delta r_D - Z_0}{r_D + Z_0} \right),$$

де  $Z_0 = \frac{1}{Y_0}$  - комплекс опоры ізоляції мережі відносно землі.

При допустимому, з точки зору поставленої задачі, неврахуванні активного опоры дроселя в порівнянні з опором ізоляції мережі та враховуючи, що  $|\delta| < 1$ , з виразу отримаємо рівність:

$$U_N = -\frac{U_\Phi}{2}.$$

Використовуючи цю рівність, можна визначити комплекси напруг фаз мережі відносно землі при випробуванні першої фази:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 - \dot{U}_N = \frac{\sqrt{3}}{2} U_\Delta;$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{U}_N = -\frac{j}{2} U_\Delta;$$

$$\dot{U}_3 = \dot{E}_3 - \dot{U}_N = \frac{j}{2} U_\Delta.$$

11

З отриманих рівнянь, що незалежно від стану ізоляції, напруга випробувальної фази відносно землі зростає до  $\frac{\sqrt{3}}{2}$  лінійного, а двох інших - знижуються до половини лінійного і знаходяться в протифазі. Такий же висновок можна отримати при випробуванні двох інших фаз, тобто режим зміщення нейтральної точки на середину вектора лінійної напруги досягається. Векторні діаграми напруг фаз мережі відносно землі при випробуванні різних фаз наведено на рис. 3.

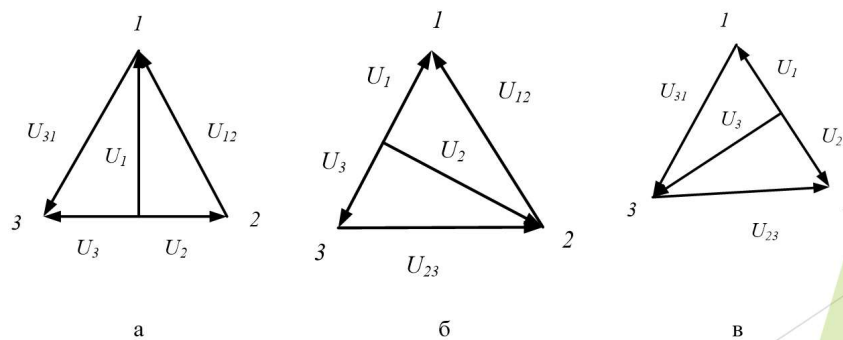


Рисунок 3 – Векторні діаграми напруг при випробуванні різних фаз мережі: а) - перша, б) - друга, в) - третя.

12

Комплекс струму в дроселі при випробуванні будь фази (2) визначиться рівністю

$$\dot{I}_K = \dot{U}_1 Y_1 + \dot{U}_2 Y_2 + \dot{U}_3 Y_3.$$

Використовуючи векторні діаграми і рівняння струму, можна знайти зв'язок між комплексами вимірених провідностей  $Y_{11}$ ,  $Y_{12}$ ,  $Y_{13}$  і комплексами провідностей фаз мережі:

$$\left. \begin{aligned} Y_{11} &= \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_1} = Y_1 - \frac{j}{\sqrt{3}}(Y_2 - Y_3); \\ Y_{12} &= \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2} = Y_2 - \frac{j}{\sqrt{3}}(Y_3 - Y_1); \\ Y_{13} &= \frac{\dot{I}_3}{\dot{U}_3} = Y_3 - \frac{j}{\sqrt{3}}(Y_1 - Y_2); \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

складові яких визначаються за результатами вимірювання напруги, струму і потужності:

$$g_{IK} = \frac{I_K}{U_K} \cos \varphi_{IK}; \quad (3.2) \quad b_{IK} = \frac{I_K}{U_K} \sin \varphi_{IK}; \quad (3.3) \quad \varphi_{IK} = \arccos \frac{P_K}{U_K I_K}, \quad (3.4)$$

де  $k = 1, 2, 3$ ;  $g_{ik}$ ,  $b_{ik}$  - відповідно активна і реактивна вимірні провідності. Із системи рівняння (3.1) випливає, що при симетрії комплекс вимірної провідності дорівнює комплексу провідності ізоляції фази і значення його складових визначається рівняннями (3.2-3.4).

13

Активна  $g_0$  і реактивна  $b_0$  провідності ізоляції всієї мережі в цьому випадку рівні:

$$g_0 = 3g_{ik}; \quad b_0 = 3b_{ik}.$$

У разі несиметрії провідностей ізоляції така рівність не має місця. Однак, використовуючи систему рівнянь (3.1) і рівняння (1.4), можна знайти зв'язок між комплексами вимірної провідності, провідністю ізоляції всієї мережі і коефіцієнтом асиметрії:

$$\left. \begin{aligned} Y_{11} &= \frac{Y_0}{3}(1 + 2\delta); \\ Y_{12} &= \frac{Y_0}{3}(1 + 2a\delta); \\ Y_{13} &= \frac{Y_0}{3}(1 + 2a^2\delta); \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

Оскільки ці рівняння містять лише 2 невідомих  $Y_0$  і  $\delta$ , то для знаходження їх досить провести випробування двох будь-яких фаз. Незалежно від того які дві фази випробовуються

$$Y_0 = 3 \frac{Y_{IK-1} - a Y_{IK}}{1 - a};$$

14

Розклавши отримане рівняння  $Y_0$  на дійсну і уявну частини, маємо:

$$\begin{aligned} g_0 &= \sqrt{3} [y_{IK+1} \cos(\varphi_{IK+1} + 30^\circ) - y_{IK} \cos(150^\circ + \varphi_{IK})] \\ b_0 &= \sqrt{3} [y_{IK+1} \sin(\varphi_{IK+1} + 30^\circ) - y_{IK} \sin(150^\circ + \varphi_{IK})]; \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$y_{IK} = \frac{I_K}{U_{IK}}; \quad y_0 = \sqrt{g_0^2 + b_0^2}; \quad \varphi_0 = \arctg \frac{b_0}{g_0}. \quad (3.7)$$

При відомому значенні  $y_0$  і  $\varphi_0$  модуль  $|\delta|$  і аргумент  $\varphi_\delta$  коефіцієнта асиметрії може бути визначений по одному з рівнянь системи (3.5)

$$|\delta| = \frac{1}{2} \sqrt{1 - 2m_K \cos(\varphi_{IK} - \varphi_0) + m_K^2}; \quad (3.8)$$

$$\varphi_\delta = \arctg \frac{\sin(\varphi_{IK} - \varphi_0)}{\cos(\varphi_{IK} - \varphi_0) - \frac{1}{m_K}} + \psi_K; \quad (3.9)$$

де  $m_K = \frac{3y_{IK}}{y_0}$ .

У рівнянні (3.9) залежно від того, яка фаза випробовується,  $\psi_K$  приймає різні значення:  $0$  при  $k = 1$ ;  $-120^\circ$  при  $k = 2$ ;  $120^\circ$  при  $k = 3$ . Слід зазначити, що при визначенні  $Y_0$  і  $\delta$  необхідно знати послідовність фаз мережі.

15

## ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Запропонований метод контролю роботоздатності ізоляції дозволяє зменшити кількість відмов, підвищити рівень надійності та безпеки експлуатації РМ.

Для оцінювання ефективності застосування метод контролю роботоздатності ізоляції в якості критерія, будемо використовувати річний невідпуск електроенергії.

$$\Delta W_{O33}^{\delta} = \frac{2}{60} \cdot 19489 \cdot 75,8 \cdot 0,88 \cdot (12 + 0,35 \cdot 5) = 43333 \text{ кВт.год.}$$

При застосуванні запропонованого методу контролю ізоляції зменшення річного невідпуску від виникнення ОЗЗ становить

$$\delta \Delta W_{O33}^{KI} = \frac{2}{60} \cdot 19489 \cdot 75,8 \cdot \frac{0,88 \cdot (12 + 0,35 \cdot 5) - 0,33 \cdot 0,85 \cdot 12}{1,5} = 282947 \text{ кВт.год.}$$

Економія коштів від зменшення річного невідпуску електроенергії при застосуванні запропонованого методу контролю ізоляції:

$$EK_{O33}^{KI} = (\delta \Delta W_{O33}^{KI}) \cdot E_{\delta_n},$$

де  $E_{\delta_n}$  – питомі економічні втрати енергопостачальної компанії від нереалізованої комерційної вигоди із-за невідпуску електроенергії споживачу, грн/кВт.год.

$$E_{\delta_n} = c_{сер} - C_{пок} \times K_{норм},$$

де  $C_{пок}$  – базовий тариф на покупку електроенергії з енергоринку (для енергопостачальної компанії може знаходитись в межах  $C_{пок} = 3.3 - 3.6$  грн/кВт.год – приймаємо рівним  $C_{пок} = 3.4$  грн/кВт.год;  $K_{норм} = 1.05$  – коефіцієнт, що враховує подорожчання електроенергії.

$$E_{\delta_n} = 3,6 - 1,88 \cdot 1,05 = 1,626 \text{ грн/кВт.год.}$$

$$EK_{O33}^{KI} = 282947 \cdot 1,626 = 460072,9 \text{ грн.}$$

Економія коштів від зменшення річного невідпуску електроенергії при застосуванні запропонованого методу контролю ізоляції 460072,9 грн.

16



## ВИСНОВОК

У магістерській роботі було розглянуто науково-прикладну проблему розвитку теорії підвищення рівня надійності та безпеки експлуатації розподільних електричних мереж в системах електропостачання кар'єрів, шляхом вдосконалення методів і засобів контролю ізоляції.

Стан ізоляції можна характеризувати двома комплексними величинами  $Y_0$  і  $\delta$ . Як модулі, так і аргументи цих величин істотно впливають на умови забезпечення електробезпеки.

Як об'єкт дослідження стану ізоляції трифазна мережа з ізольованою нейтраллю має ряд особливостей, які крім звичайних вимог до методів вимірювання пред'являють ряд специфічних. Ця обставина є однією з причин різноманіття існуючих методів вимірювання. Правильний вибір найбільш раціональних з них можна здійснити, знаючи весь комплекс вимог, яким вони повинні задовольняти. Основні з них зводяться до наступного:

- а) вимір необхідно проводити без порушення нормальної експлуатації мережі;
- б) при вимірах повинна забезпечуватися безпека;
- в) метод вимірювання повинен бути універсальним, тобто забезпечувати визначення всіх параметрів, що характеризують стан ізоляції;
- г) метод повинен забезпечити необхідну точність вимірювання як в практичних так і в дослідницьких цілях;
- д) вимірювальна апаратура повинна бути компактною та надійною.

Запропонований метод дозволяє визначити провідність ізоляції всієї мережі і коефіцієнт асиметрії не тільки в окремому, але й у загальному випадку асиметрії ізоляції. Цей метод заснований на принципі створення певного несиметричного режиму, передбачає почергове випробування фаз мережі, при якому вимірюють напругу на випробуваній фазі, струм в дроселі і потужність.

Точність визначення  $|\delta|$  і  $\varphi_\delta$  залежить від значень  $m$ ,  $\alpha$  і похибок їх обчислення. Погрішність модуля коефіцієнта асиметрії, при інших рівних умовах, зростає із збільшенням коефіцієнта  $m$ ;  $\Delta\varphi_\delta$  має максимальне значення при  $m \rightarrow 1$  і  $\alpha = 0$ .

Економія коштів від зменшення річного недовідпуску електроенергії при застосуванні запропонованого методу контролю ізоляції 460072,9 грн.

В роботі розглянуті питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях