

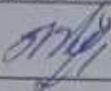
Вінницький національний технічний університет  
Факультет електроенергетики та електромеханіки  
Кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту

## МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Оптимізація режиму роботи нейтралі в розподільній мережі напругою 6-35 кВ»

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

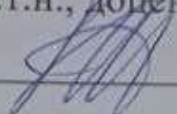
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

  
Завальнюка О.В.

(прізвище та ініціали)

*Марина Василівна*

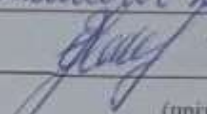
Керівник: к.т.н., доцент каф. ЕСЕЕМ

  
Кутіна М. В.

(прізвище та ініціали)

« 11 » 12 2023 р.

Опонент: к.т.н., ст. викладач каф. ЕСС

Сікорське 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.

Вінницький національний технічний університет

Факультет Електроенергетики та електромеханіки


Кафедра Електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
ОП «Електротехнічні системи електроспоживання»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри ЕСЕЕМ**

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

## **ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Завальнюк Олег Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Оптимізація режиму роботи нейтралі в розподільній мережі напругою 6-35 кВ

керівник роботи Кутіна М. В. к.т.н., доц. каф. ЕСЕЕМ

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

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

2. Строк подання студентом роботи “04” 12 2023 року

3. Вихідні дані до роботи Відомості щодо системи електропостачання промисловості і сільського господарства напругою 6-10 кВ. Основні характеристики. Конструктивне виконання. Режими роботи. Система технічного обслуговування. Засоби автоматики.



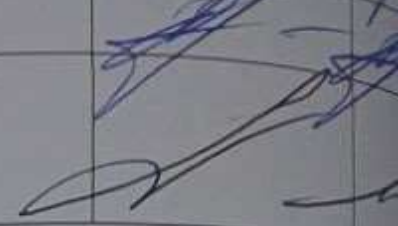
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Стан проблеми та задачі дослідження. 2. Аналіз засобів релейного захисту та методів контролю ізоляції. 3. Дослідження ефективності режиму роботи нейтралі. 4. Економічна частина. 5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки. Список використаних джерел.

Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу:

впровадження розроблених методик.

## 6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 16.09 2023р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи             | Строк виконання етапів роботи |
|-------|---|-------------------------------|
| 1     | Стан проблеми та задачі дослідження.                          | 18.09.2023р.- 29.09.2023р.    |
| 2     | Аналіз засобів релейного захисту та методів контролю ізоляції | 2.10.2023р.- 20.10.2023р.     |
| 3     | Дослідження ефективності режиму роботи нейтралі               | 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     | Графічна частина  | 28. 11.2023р. -4.12.2023р.    |

Студент



(підпис)

Завальнюк . О. П.

(прізвище та ім'я)

Керівник роботи



(підпис)

Кутіна М. В.

(прізвище та ім'я)

Нормоконтроль



(підпис)

Войтюк Ю.

(прізвище та ім'я)

Вінницький національний технічний університет  
Факультет електроенергетики та електромеханіки  
Кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного  
менеджменту

## МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Оптимізація режиму роботи нейтралі в розподільній мережі напругою  
6-35 кВ»

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

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Завальнюка О.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доцент каф. ЕСЕЕМ

Кутіна М. В.

(прізвище та ініціали)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р.

Опонент: \_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р.

**Допущено до захисту**

Завідувач кафедри ЕСЕЕМ

д.т.н., проф. Бурбело М.Й.

(прізвище та ініціали)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р.

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

### ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕСЕМ

проф. М. Й. Бурбело

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 року

## ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Завальнюк Олег Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Оптимізація режиму роботи нейтралі в розподільній мережі напругою 6-35 кВ

керівник роботи Кутіна М. В. к.т.н., доц. каф. ЕСЕМ

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

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

2. Строк подання студентом роботи “ 04 ” 12 2023 року

3. Вихідні дані до роботи Відомості щодо системи електропостачання промисловості і сільського господарства напругою 6-10 кВ. Основні характеристики. Конструктивне виконання. Режими роботи. Система технічного обслуговування. Засоби автоматики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Стан проблеми та задачі дослідження. 2. Аналіз засобів релейного захисту та методів контролю ізоляції. 3. Дослідження ефективності режиму роботи нейтралі. 4. Економічна частина. 5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу:



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

## 6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 16.09 2023р. \_\_\_\_\_

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи             | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---|-------------------------------|----------|
| 1     | Стан проблеми та задачі дослідження.                          | 18.09.2023р.- 29.09.2023р.    |          |
| 2     | Аналіз засобів релейного захисту та методів контролю ізоляції | 2.10.2023р.- 20.10.2023р.     |          |
| 3     | Дослідження ефективності режиму роботи нейтралі               | 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     | Графічна частина  | 28. 11.2023р. -4.12.2023р     |          |

Студент \_\_\_\_\_ Завальнюк . О. В.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

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

Нормоконтроль \_\_\_\_\_ Войтюк Ю. П.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

УДК 621.316

Завальнюк Олег Володимирович. Оптимізація режиму роботи нейтралі в розподільній мережі напругою 6-35 кВ. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітня програма – «Електротехнічні системи електроспоживання». – Вінниця, ВНТУ, 2023 – 134 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 36 назв; рис.: 27; табл. 11.

У дослідженні вирішено науково-прикладне завдання вибору оптимального режиму роботи нейтралі та оцінки його впливу на ефективність автоматичних засобів та рівень безпеки експлуатації розподільної мережі. Під час проведених досліджень встановлено, що комплексний показник ефективності режиму нейтралі слід використовувати як оціночний параметр, що визначає ступінь наближення використовуваної мережі до еталону - мережі, в якій режим нейтралі забезпечує рівність цільової функції до відносного максимального значення.

Заземлення нейтралі розподільної мережі через резистор ефективно обмежує рівень внутрішніх перенапруг не лише при перекидних однофазних замиканнях на землю, але й в інших сценаріях, наприклад, при виникненні ферорезонансних явищ. Це призводить до зменшення кількості однофазних замикань на землю, уникненню подвійних замикань, а також зниження напруги кроку та напруги дотику при однофазних замиканнях на землю. Розраховано основні техніко-економічні показники застосування запропонованого методу.

Розглянуто питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

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

## ABSTRACT

UDC 621.316.

Oleg Volodymyrovych Zavalnyuk. Optimization of the operating mode of the neutral in the distribution network with a voltage of 6-35 kV. Master's qualification thesis on specialty 141 "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics", educational program - "Electrotechnical systems of electricity consumption". – Vinnytsia, VNTU, 2023 – 134 p.

In Ukrainian speech Bibliography: 36 titles; Fig.: 27; table 11.

The research has solved the scientific and applied task of choosing the optimal operating mode of the neutral and evaluating its impact on the efficiency of automatic devices and the safety level of operation of the distribution network. During the conducted studies, it was established that the complex indicator of the efficiency of the neutral mode should be used as an evaluation parameter that determines the degree of approximation of the used network to the standard - a network in which the neutral mode ensures the equality of the objective function to the relative maximum value.

Earthing of the neutral of the distribution network through a resistor effectively limits the level of internal overvoltages not only in the case of reverse single-phase earth faults, but also in other scenarios, for example, when ferroresonance phenomena occur. This results in a reduction in the number of single-phase ground faults, the avoidance of double faults, and a reduction in the step voltage and touch voltage of single-phase ground faults. The main technical and economic indicators of the application of the proposed method are calculated.

The issue of occupational health and safety in emergency situations was considered.

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



## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| ВСТУП .....   | 5  |
| РОЗДІЛ 1 СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ .....  | 10 |
| 1.1 Загальна характеристика об'єкта дослідження .....   | 10 |
| 1.2 Характеристики фазних напруг у мережі з ізольованою нейтраллю .....   | 13 |
| 1.3 Аналіз режиму роботи при однофазних замиканнях на землю в мережі з ізольованою нейтраллю .....                | 18 |
| 1.4 Методи та засоби компенсації ємнісних струмів при однофазному замиканні на землю.....                         | 27 |
| Висновки.....   | 38 |
| РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ЗАСОБІВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ТА МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ІЗОЛЯЦІЇ .....                                      | 39 |
| 2.1 Методи та засоби релейного захисту від однофазних замикань на землю ...                                       | 39 |
| 2.2 Особливості застосування методу захисного шунтування при однофазних пошкодженнях електроустановок .....       | 40 |
| 2.3 Методи та засоби контролю ізоляції .....  | 43 |
| Висновки.....   | 46 |
| РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕЖИМУ РОБОТИ НЕЙТРАЛІ .....  | 47 |
| 3.1 Вибір критеріїв ефективності режиму роботи нейтралі.....  | 47 |
| 3.2 Перенапруга при однофазних замиканнях на землю .....  | 51 |
| 3.3 Наслідки аварійних вимикань .....   | 55 |
| 3.4 Напруга дотику та кроку при однофазних замиканнях на землю .....  | 58 |
| 3.5 Підвищення безпеки експлуатації розподільних мереж шляхом застосування захисного вимикання .....              | 61 |
| 3.6 Ефективність роботи засобів релейного захисту від однофазних замикань при різних режимах роботи нейтралі..... | 62 |
| 3.7 Ефективність роботи засобів заземлення нейтралі .....   | 65 |
| Висновки.....   | 76 |

|   |     |
|---|-----|
| РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕЖИМУ РОБОТИ НЕЙТРАЛІ .....   | 78  |
| РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....   | 87  |
| 5.1 Технічні рішення з безпечної організації робіт .....  | 87  |
| 5.1.1 Електробезпека .....  | 87  |
| 5.1.2 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць підл час виконання робіт з вимірювальними приладами, пристроями релейного захисту, автоматики, телемеханіки і зв'язку, з електролічильниками ..... | 89  |
| 5.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії .....   | 91  |
| 5.2.1 Мікроклімат .....   | 91  |
| 5.2.2 Склад повітря робочої зони.....   | 92  |
| 5.2.3 Виробниче освітлення .....  | 92  |
| 5.2.4 Виробничий шум.....   | 93  |
| 5.2.5 Психофізіологічні фактори .....   | 94  |
| 5.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи розподільної мережі в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій. ....  | 96  |
| 5.3.1 Дослідження стійкості роботи розподільної мережі в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій. ....  | 96  |
| 5.3.2 Дослідження стійкості роботи розподільної мережі в умовах дії електромагнітного імпульсу.....   | 99  |
| ПІДСУМОК.....   | 105 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....  | 106 |
| Додаток А .....   | 114 |
| Додаток В .....   | 124 |
| Додаток Г .....   | 126 |

## ВСТУП

Мережа розподілу напруги в діапазоні 6-35 кВ представляє собою складну, просторово розподілену електротехнічну систему з неоднорідною структурою. Вона складається з різноманітних конструктивних елементів, що відрізняються за принципом дії, функціональним призначенням та фізичними характеристиками [1, 2].

Протягом тривалого періоду проводяться заходи з метою забезпечення високого рівня надійності, безпеки та ефективності використання розподільчих мереж. Це досягається за допомогою створення додаткових центрів живлення, скорочення довжини радіальних ліній, використання комутаційних апаратів, впровадження засобів релейного захисту та автоматики протиаварійного захисту.

Незважаючи на ці заходи, в електроустановках з ізольованою нейтраллю залишається проблема значної кількості однофазних замикань на землю (ОЗЗ) [1- 6]. Кабельні мережі відзначаються переважанням однофазних замикань на землю, тоді як у повітряних мережах спостерігається обрив проводів з наступним замиканням на землю і ОЗЗ викликані пробоями ізоляції та перекриттям ізоляторів.

Однофазні замикання на землю негативно впливають на показники надійності, безпеки та ефективності використання систем електропостачання. Вони призводять до значних внутрішніх перенапруг, характерних для мереж з ізольованою нейтраллю, і компенсації ємнісних струмів ОЗЗ. Також існує ризик виникнення як подвійних замикань на землю так і пошкодження засобів контролю ізоляції і трансформаторів напруги, що призводить до зниження ефективності компенсації струмів ОЗЗ, зростання числа коротких замикань, довготривалої наявності небезпечної напруги дотику і кроку, підвищення ймовірності помилкових дій обслуговуючого персоналу та погіршення селективності, швидкодії, чутливості та надійності релейного захисту.

Режим нейтралі у системі електропостачання ускладнює умови безпечної

експлуатації мережі. Небезпечна напруга дотику може тривати продовжений час, однофазні замикання можуть виникнути через залізобетонні опори із спіканням ґрунту в їхній основі, а також через обрив і падіння провідника повітряної лінії. Збільшується ризик помилкових дій експлуатаційного персоналу, а також можливість перекриття ізоляції комутаційних апаратів при здійсненні оперативних перемикань, що виконують з метою визначення пошкодженої ділянки мережі.

Правила облаштування електроустановок та Правила технічної експлуатації станцій і мереж передбачають для розподільних мережах 6, 10, 20 і 35 кВ два варіанти стану нейтралі. Для ємнісних струмів ОЗЗ до 30, 20, 15 і 10 А приєднання нейтралі силового трансформатора до заземлюючого пристрою не передбачено. За умови більших струмів між нейтраллю і землею використовують реактор для компенсації ємнісних струмів ОЗЗ, а також допускається заземлення через резистори [2-6].

Зменшення кількості однофазних замикань на землю і їх вплив на надійність, безпеку та ефективність експлуатації систем електропостачання значно залежить від режиму роботи нейтралі. Тому виникає завдання пошуку ефективних методів роботи нейтралі систем електропостачання, і саме цьому присвячена дана робота.

Мета і завдання дослідження. Мета цього дослідження полягає в підвищенні рівня надійності, безпеки та ефективності експлуатації розподільних мереж напругою 6-10 кВ. Це досягається шляхом оптимізації режиму роботи нейтралі з використанням комплексного діагностичного показника.

Об'єкт дослідження – процеси, що відбуваються під час експлуатації розподільної мережі і пов'язані із зміною її технічного стану.

Предмет дослідження – вплив режиму роботи нейтралі на технічний стан ізоляції у розподільних мережах напругою 6-10 кВ.

Задачі дослідження

1. Загальна характеристика об'єкта дослідження.
2. Визначення критеріїв ефективності для оцінки роботи нейтралі у

розподільних мережах.

3. Аналіз перенапруги при випадках однофазних замикань на землю у розподільних мережах.

4. Вивчення захисного вимикання як ефективного засобу підвищення безпеки експлуатації розподільних мереж напругою 6-10 кВ.

5. Оцінка впливу режиму нейтралі на роботу релейного захисту в умовах однофазного замикання на землю та аналіз засобів заземлення нейтралі в розподільних мережах.

6. Аналіз економічної ефективності роботи нейтралі в розподільних мережах напругою 6-10 кВ.

Методи досліджень. Дослідження використовували різноманітні теоретичні та експериментальні методи, включаючи алгоритмічний підхід для аналізу технічного стану системи електропостачання; сигнально-параметричні методи для опису технічного стану розподільної мережі як групи розподілених в просторі елементів; фізичні методи, що використовують електротехнічні підходи для визначення струмів через шунтувальний зв'язок та виявлення пошкоджень ізоляції; а також евристичні методи для оптимізації режиму роботи нейтралі, аналізу чутливості та врахування інформаційного аспекту при виборі контрольованих показників.

Також застосовувались методи кваліметрії для оптимізації режиму нейтралі та аналізу чутливості, врахування інформаційного аспекту при виборі контрольованих показників; об'єктно-орієнтований аналіз для визначення структури та алгоритму функціонування системи контролю технічного стану ізоляції.

У дослідженні також застосовувалися методи аналізу експериментальних даних та їх порівняння з результатами теоретичних досліджень для підтвердження отриманих результатів.

Новизна одержаних результатів.

1. Метод вибору критерію ефективності заземлення нейтралі отримав подальший розвиток. Доведено, що при визначенні оптимального варіанту необхідно враховувати різноманітні параметри та процеси, такі як: кратність

перенапруг при однофазних замиканнях; час існування однофазного замикання на землю; значення напруги дотику та розподіл струму, що виникає при однофазних замиканнях на землю; величина і характеристика струму однофазних замикань на землю; характеристики та властивості релейного захисту від однофазних замикань; технічні параметри пристроїв шунтування пошкодженої фази. Отже, у виборі критерію ефективності заземлення нейтралі важливо враховувати комплекс параметрів та взаємодію різних факторів для забезпечення оптимального функціонування системи.

2. Було підтверджено, що при дослідженні впливу режиму нейтралі на рівень перенапруг розумно враховувати лише внутрішні перенапруги, такі як комутаційні, ферорезонансні і ті, що виникають при однофазних замиканнях, супроводжених перекидною дугою. Як критерій для оцінки перенапруг в залежності від режиму нейтралі доцільно використовувати відношення площин густин розподілу коефіцієнта кратності перенапруг на пошкоджених фазах до максимально можливої перенапруги.

3. Для аналізу впливу режиму нейтралі на кількість та тривалість пошуку пошкоджень рекомендовано використовувати відношення середнього часу відключеного стану споживачів, обумовленого причинами, що залежать від режиму нейтралі. Це включає період від ізоляції нейтралі до моменту, коли вона стає заземленою за допомогою пристроїв компенсації ємнісного струму або резистора.

Практичне значення одержаних результатів. У даному випадку стратегія полягає в обґрунтованому використанні комплексного показника ефективності режиму нейтралі. Цей показник виступає як міра відстані між мережею, яка використовує конкретний метод заземлення нейтралі, та еталонною мережею. Еталонна мережа характеризується тим, що режим нейтралі в ній забезпечує рівність цільової функції до відносного максимального значення.

Було підтверджено, що заземлення нейтралі розподільної мережі за допомогою резистора не лише обмежує рівень внутрішніх перенапруг при перекидних однофазних замиканнях, але і в інших сценаріях, наприклад, при виникненні ферорезонансних явищ. Це призводить до зменшення кількості

однофазних замикань на землю і загальної кількості пошкоджень мережі, що прямо пов'язано з експлуатаційними витратами на відновлення. Заземлення нейтралі через резистор також запобігає виникненню подвійних замикань на землю.

Особистий внесок студента.

Подальший розвиток дослідженні впливу режиму роботи нейтралі на технічний стану ізоляції розподільних мереж.

Апробації результатів МКР

Основні теоретичні положення й найвагоміші практичні результати виконаного дослідження було обговорено на LIII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ. За результатами опубліковані тези доповідей [4].



## РОЗДІЛ 1 СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 1.1 Загальна характеристика об'єкта дослідження

Високо імовірно, наділення на досягнення високої надійності в електроенергетичних системах вимагає правильного обрання режиму заземлення нейтралей мереж. Це є важливим завданням у функціонуванні таких систем, оскільки воно визначає, наскільки ефективно може бути забезпечено електропостачання споживачів електроенергією. Одним із ключових факторів, що впливає на це завдання, є правильний вибір режиму заземлення нейтралі установлених в силових трансформаторах, автотрансформаторах та генераторах.

Замикання фаз на землю може виникати з різних причин, таких як електричні та механічні пошкодження ізоляції, дефекти в ізоляторах, забруднення та зволоження ізоляції, обриви проводів та тросів, розриви струмоведучих частин і фаз кабелів, часткові розряди тощо [7-9].

Способи підвищення надійності роботи високовольтних мереж спрямовані на збереження певних рівнів електричної міцності ізоляції та запобігання умовам, що сприяють розвитку аварій, зокрема, однофазних замикань на землю. Це може включати заходи щодо моніторингу та обслуговування ізоляції, захисту від перенапруг, покращення конструкції та якості матеріалів ізоляційних елементів, а також систем грозозахисту.

Замикання однієї з фаз на землю є домінуючим видом пошкоджень у мережах різних класів напруги. У розподільних мережах 6-35 кВ ці події становлять не менше 76% загальної кількості пошкоджень. У мережах 110 і 220 кВ однофазні замикання на землю становлять відповідно 79% і 92% [10].

Ризик замикання однієї з фаз на землю перш за все залежить від впливу на струмоведучі, ізоляційні та магнітопровідні конструкції електроустаткування, тепловиділення і іонізації, що супроводжують горіння в місці замикання електричної дуги. Також враховується можливість підвищення напруги в мережі та розміру перенапруги.

Заземлюючі дуги поділяються на дві категорії: розтяжні дуги, що розтягуються, та нерозтяжні дуги, які горять в ізолюючому або напівпровідниковому середовищі.

Розтяжні дуги можуть виникати внаслідок перекриття нормальної чи ослабленої ізоляції при грозових ураженнях, комутаційних, резонансних або феррорезонансних перенапругах, обривах струмоведучих елементів тощо. Нерозтяжні дуги виникають переважно при пошкодженнях кабельної ізоляції та інших елементів.

Для гасіння заземлюючих дуг у високовольтних мережах застосовують два способи: негайне відключення та включення після відновлення діелектричних властивостей, а також обмеження струму через місце замикання для самогасіння дуги. Ефективність цих методів може варіюватися в залежності від класу напруги мережі.

Мережі з напругою 110-1150 кВ, згідно з Правилами улаштування електроустановок (ПУЕ), працюють з ефективно заземленою нейтраллю. У таких мережах використовується "глухе" заземлення всіх нейтралей автотрансформаторів, а також всіх або частини нейтралей силових заземлені через порівняно малі індуктивні опори. Кількість заземлених нейтралей і значення опорів, через які вони можуть бути заземлені, повинні бути налаштовані так, щоб при виникненні однофазних або двофазних замикань на землю в будь-якій точці мережі відношення найбільшої фазної напруги частоти 50 Гц на "здорових" фазах в точці замикання до фазної напруги на цих же фазах в цій же крапці, з'являється після усунення замикання (коефіцієнт несиметрії  $h_{к.з.}$ ), і не перевищувало б 1,4.

Важливо, щоб кількість заземлених нейтралей в цих мережах була такою, щоб величини струмів при однофазних і двофазних коротких замиканнях на землю в них якнайменше можливо не перевищували величин струмів трифазного короткого замикання.  $(1 \leq x_{ex}^{(0)} / x_{ex}^{(1)} \leq 3, r_{ex}^{(0)} / r_{ex}^{(1)} \leq 1)$ .

Обмеження напруги несиметрії при замиканнях на землю в мережах з

ефективно заземленою нейтраллю може бути досягнуте шляхом управління коефіцієнтом несиметрії. Коефіцієнт несиметрії, який менший або рівний 1,4, сприяє створенню сприятливих умов для функціонування обмежувачів перенапруг (ОПН) та розрядників, підвищуючи їх захисні характеристики [10-13]. Такі умови полегшують відновлення електропостачання після коротких замикань.

У мережах з ефективно заземленою нейтраллю, коротке замикання однієї фази на землю може викликати однофазне коротке замикання, що потребує негайного відключення пошкодженої ділянки. Однак завдяки великим ізоляційним відстаням у цих мережах, таке відключення зазвичай дозволяє уникнути переходу до дво- або трифазного короткого замикання, зменшуючи пошкодження обладнання та сприяючи швидкому відновленню нормального електропостачання.

Розподільні мережі 6-35 кВ мають менші міжфазні відстані, що робить їх більш вразливими до коротких замикань та електричних дуг. Грозозахист у таких мережах менш ефективний, і частіше можуть виникати механічні пошкодження. З цієї причини для їхньої безпеки передбачений режим роботи з ізольованою нейтраллю.

У мережах з ізольованою нейтраллю коротке замикання однієї фази на землю не призводить до однофазного короткого замикання і, зазвичай, не вимагає відключення пошкодженої ділянки. Це дозволяє вести пошук та усунення місця замикання без негайного відключення, забезпечуючи більш гнучкі умови експлуатації.

У разі великих ємнісних струмів однофазних замикань в мережах з ізольованою нейтраллю, може виникнути тривале горіння дуг, що потребує спеціальних заходів, таких як резонансна заземлення нейтралі, для уникнення переходу до тривалого короткого замикання. Однак цей режим роботи має свої обмеження та недоліки, які потрібно враховувати при проектуванні та експлуатації мереж.

## 1.2 Характеристики фазних напруг у мережі з ізольованою нейтраллю

Як було вказано раніше, під мережею з ізольованою нейтраллю (рис. 1.1) розуміється мережа, в якій всі нейтралі силових трансформаторів, генераторів, синхронних компенсаторів і двигунів не мають заземлення або заземлені через високоомні опори. У випадку фазної симетрії параметрів елементів такої мережі, вона не відрізняється від мережі з заземленою нейтраллю (рис. 1.1). Іншими словами, струми і напруги її фаз мають однаковий модуль і відстають один від одного на  $120^\circ$ , а напруга в нейтралі дорівнює нулю. Фактично, залишаючи осторонь невеликі опори живлячого еквівалентного джерела (зокрема силового трансформатора) і поздовжні опори ліній електропередачі порівняно з провідністю фаз мережі до землі (рис. 1.1), за другим законом Кірхгофа можемо отримати:

$$\begin{aligned}\underline{U}_A &= \underline{E}_A + \underline{U}_N; \\ \underline{U}_B &= \underline{E}_B + \underline{U}_N; \\ \underline{U}_C &= \underline{E}_C + \underline{U}_N,\end{aligned}\tag{1.1}$$

де  $\underline{E}_A \cdot e^{j0}$ ,  $\underline{E}_B \cdot e^{-j120}$ ,  $\underline{E}_C \cdot e^{j120}$  - зрівноважена симетрична система фазних ЕРС еквівалентного джерела живлення (трансформатора);

$\underline{U}_A$ ,  $\underline{U}_B$ ,  $\underline{U}_C$  - напруги фаз мережі;

$\underline{U}_N$  - напруга в нейтралі мережі.

Розширимо рівняння (1.1) за допомогою рівняння першого закону Кірхгофа для струмів провідності на землю:

$$\underline{I}_{Ay} + \underline{I}_{By} + \underline{I}_{Cy} = 0\tag{1.2}$$

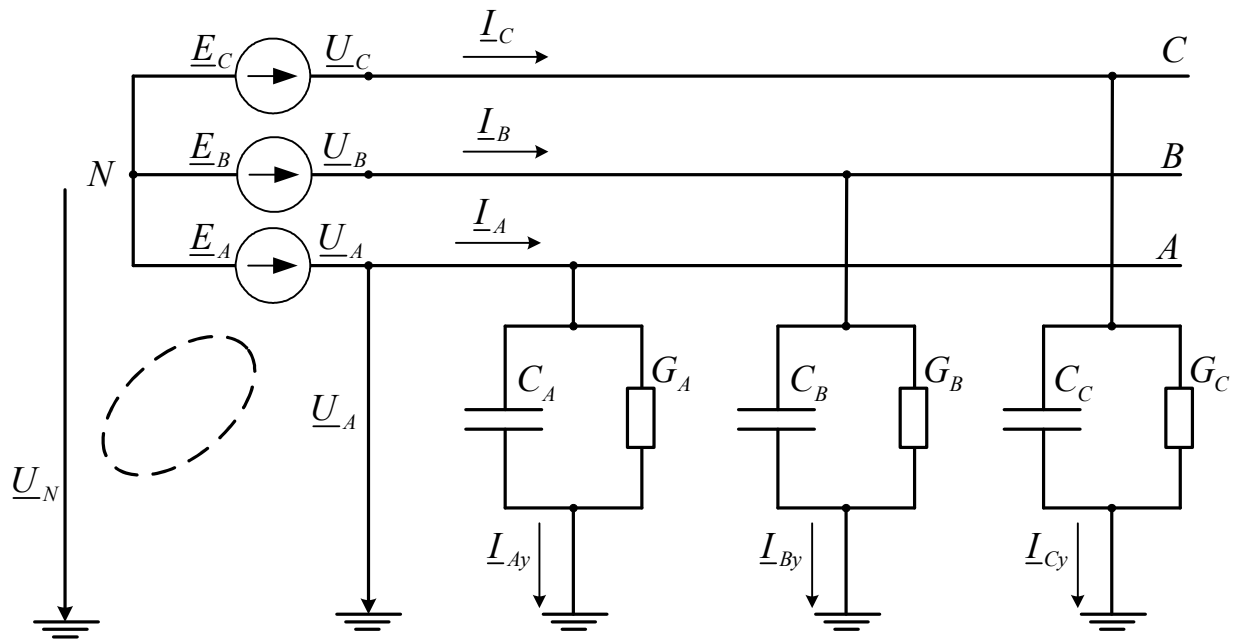


Рисунок 1.1 – Графічне зображення мережі з ізолюваною нейтраллю

або

$$\underline{U}_A \underline{Y}_A + \underline{U}_B \underline{Y}_B + \underline{U}_C \underline{Y}_C = 0, \quad (1.3)$$

де  $\underline{Y}_A$ ,  $\underline{Y}_B$ ,  $\underline{Y}_C$  - провідності фаз мережі на землю, які мають, в загальному випадку, як активну ( $G_{fA}$ ,  $G_{fB}$ ,  $G_{fC}$ ), так і ємнісну ( $C_A$ ,  $C_B$ ,  $C_C$ ) складові:

$$\underline{Y}_A = G_{fA} + jC_A;$$

$$\underline{Y}_B = G_{fB} + jC_B;$$

$$\underline{Y}_C = G_{fC} + jC_C.$$

Вважатимемо, що активні провідності є еквівалентами, для відображення втрат в мережі через витік струму по ізоляції та в активних опорах проводів трансформаторів і інше.

Розв'язуючи сумісно (1.1) і (1.3), напругу нейтралі визначимо в наступному вигляді:

$$\underline{U}_N = -\frac{\underline{E}_A \underline{Y}_A + \underline{E}_B \underline{Y}_B + \underline{E}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} \quad (1.4)$$

Вирази (1.1) і (1.4) повністю визначають характеристики напруг у системі з ізольованою нейтраллю. Якщо  $\underline{Y}_A = \underline{Y}_B = \underline{Y}_C$ , то у відповідності з (1.4)  $\underline{U}_N = 0$  і мережа працює в симетричному режимі:  $\underline{U}_A = \underline{E}_A$ ,  $\underline{U}_B = \underline{E}_B$ ,  $\underline{U}_C = \underline{E}_C$  (рис. 1.2 а). Якщо параметри в системі з ізольованою нейтраллю демонструють пофазну несиметрію,  $\underline{Y}_A \neq \underline{Y}_B \neq \underline{Y}_C$ , то згідно (1.4), в її нейтралі з'являється напруга несиметрії  $\underline{U}_N \neq 0$  (напруга “зміщення нейтралі“), і фазні напруги  $\underline{U}_A$ ,  $\underline{U}_B$ ,  $\underline{U}_C$  в загальному випадку є нерівними за величиною (рис. 1.2, б).

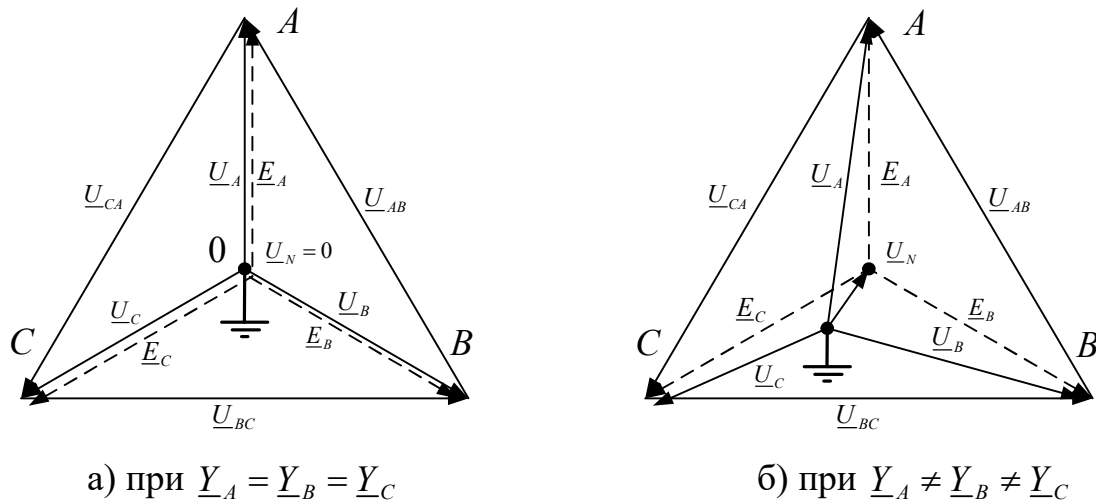


Рисунок 1.2 – Режим напруг в мережі з ізольованою нейтраллю

У кабельних мережах фазна провідність до землі практично однакова, тому можна очікувати спотворень фазної напруги лише у випадку аварійних несиметричних режимів. Ці режими можуть виникнути внаслідок неповнофазної роботи вимикачів, обривів приєднань або несиметричних замикань, як між фазами, так і до землі. У повітряних мережах, завдяки особливостям підвіски проводів на опорах різних конструкцій, ємнісна провідність фаз до землі може бути нерівною. ( $C_A \neq C_B \neq C_C$ ) або якщо ступінь

забрудненості ізоляції варіюється, що призводить до різниці в струмах витоку фаз, активні провідності фаз можуть бути різними ( $G_{fA} \neq G_{fB} \neq G_{fC}$ ),  $\underline{U}_N$  може не дорівнювати нулю і в нормальних режимах, іншими словами в мережі може тривало існувати несиметрія фазної напруги.

Величину тривало існуючої напруги несиметрії  $\underline{U}_N$  в нейтралі мережі зазвичай визначають за допомогою поняття відносної несиметрії мережі, яка виражається як відносна величина.

$$u = \frac{|\underline{U}_N|}{|\underline{U}_A|} = |u' - ju''| \cdot \frac{1}{\sqrt{1-d^2}} \cdot 100\% \quad (1.5)$$

де  $\underline{U}_A = \underline{E}_A$  - при симетричному режимі фазна напруга мережі, якщо  $C_A = C_B = C_C$  і  $G_{fA} = G_{fB} = G_{fC}$ ;  $u'$  і  $u''$  - відносні показники несиметрії мережі, які визначаються відповідно для ємнісних і активних провідностей:

$$u' = \frac{C_A + aC_B + a^2C_C}{C_A + C_B + C_C}; \quad (1.6)$$

$$u'' = \frac{G_{fA} + aG_{fB} + a^2G_{fC}}{\omega \cdot (C_A + C_B + C_C)}; \quad (1.7)$$

$$a = e^{120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2};$$

$$a^2 = e^{240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2},$$

де  $d$  - коефіцієнт, який відомий як коефіцієнт заспокоєння вільних процесів в мережі:



$$d = \frac{G_{fA} + G_{fB} + G_{fC}}{\omega \cdot (C_A + C_B + C_C)};$$

де  $\omega = 314$  рад/с — кутова промислова частота.

У повітряних мережах з нормальною ізоляцією, коефіцієнт демпфування (виражений у відсотках) становить приблизно 2,6%. Однак при забрудненнях та зволоженні ізоляції цей коефіцієнт може збільшитися до 10%. У кабельних мережах значення  $d$  становить 2,4%. Але у випадку застарілої ізоляції в кабельній мережі цей коефіцієнт може досягати 6% [14].

Ступінь відносної несиметрії (визначена за формулою 1.5) головним чином залежить від несиметрії ємнісної провідності мережі до землі. Наприклад, у нормально працюючих повітряних мережах вона переважно обумовлена несиметричним розташуванням проводів на опорах ліній передачі і може змінюватися від 0,5% до 5%. При нерівномірному розподілі конденсаторів високочастотного зв'язку та нерівності ємностей конденсаторів, встановлених для захисту обертаючихся машин від грозових перенапруг, вона може мати значні значення. Проте несиметрія фазної напруги, яка виникає в повітряних мережах, не є небезпечною для ізоляції.

Важливо відзначити, що вектор напруги несиметрії (рис. 1.2, б) направлений в бік фаз із збільшеною провідністю фаз до землі. Тому за його допомогою можна оцінити, як ємнісна провідність мережі повинна змінюватися при переналаштуванні окремих ліній або перерозподілі конденсаторів високочастотного зв'язку для зниження ступеня відносної несиметрії.

Як видно з аналізу (1.1) та діаграм на рис. 1.2, а і 1.2, б, наявність напруги несиметрії в мережі з ізольованою нейтраллю не змінює трикутник міжфазних напруг.

### 1.3 Аналіз режиму роботи при однофазних замиканнях на землю в мережі з ізольованою нейтраллю

Виникнення однофазного замикання на землю в мережі з ізольованою нейтраллю (рис. 1.3) можна розглядати як один з екстремальних випадків порушення симетрії її параметрів. Провідність ушкодженої фази щодо землі в цьому випадку буде залежати, зокрема, від опору заземлюючої дуги, тому, аналогічно (1.2) і (1.3), ми можемо записати:

$$\underline{I}_{Ay} + \underline{I}_{By} + \underline{I}_{Cy} + \underline{I}_c = 0, \quad (1.9)$$

або

$$\underline{U}_{A033} \left( \underline{Y}_A + \frac{1}{r_\delta} \right) + \underline{U}_{B033} \underline{Y}_B + \underline{U}_{C033} \underline{Y}_C = 0 \quad (1.10)$$

де  $r_\delta$  - еквівалент опору дуги, тліючої ізоляції, опору розтіканню струму замикання  $\underline{I}_c$  в землі.

Отже, коли в мережі з ізольованою нейтраллю стається однофазне замикання на землю, формула (1.4) може бути переписана так:

$$\underline{U}_{N033} = \frac{\underline{E}_A \left( \underline{Y}_A + \frac{1}{r_\delta} \right) + \underline{E}_B \underline{Y}_B + \underline{E}_C \underline{Y}_C = 0}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \frac{1}{r_\delta}}. \quad (1.11)$$

Враховуючи невеликий вплив асиметрій ємнісних і активних провідностей фаз до землі в нормально працюючій мережі з ізольованою нейтраллю на її напругу, ураховуючи це в (1.11)  $C_A = C_B = C_C = C_{cp}$  і  $G_{fA} = G_{fB} = G_{fC}$ , будемо мати:

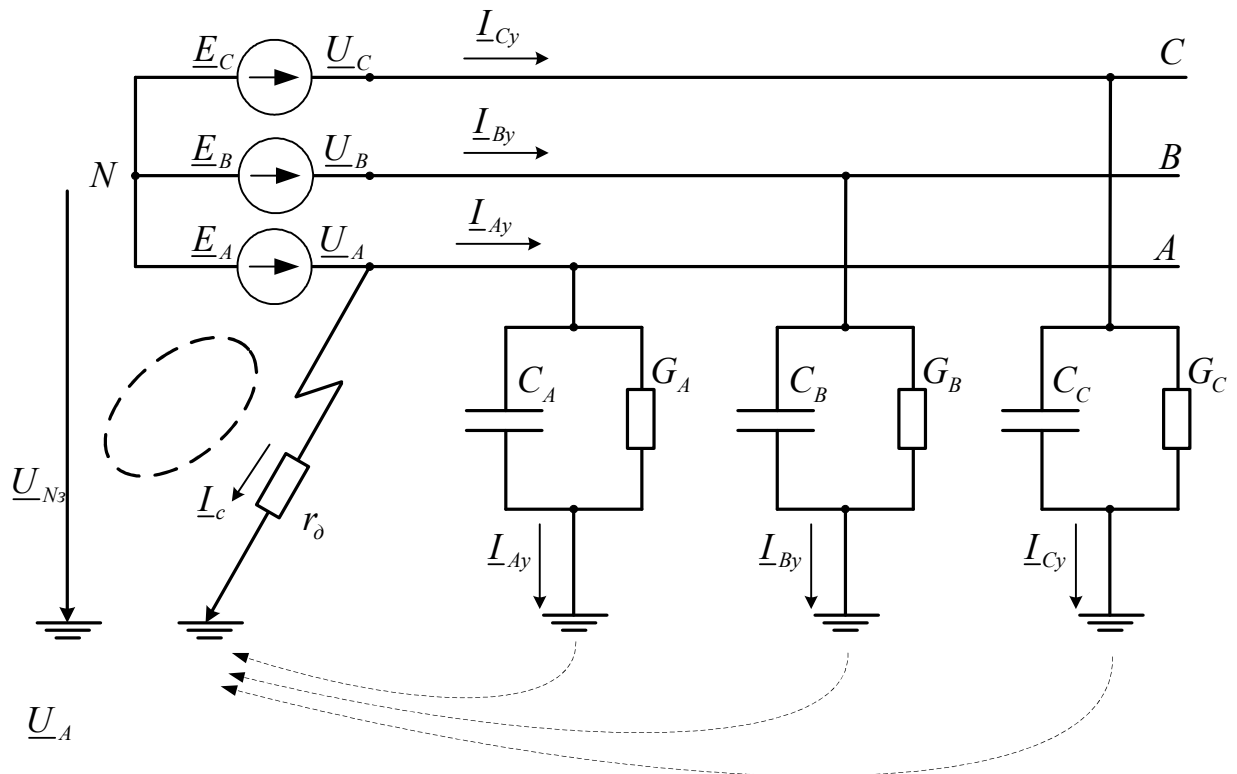


Рисунок 1.3 – Замикання однієї фази на землю в мережі з ізолюваною нейтраллю

$$\underline{U}_{Nозз} = -\underline{E}_A \frac{r_\delta}{\frac{1}{r_\delta} + j3\omega C_{cp}} = -\underline{E}_A \frac{1}{1 + j3\omega C_{cp} r_\delta}, \quad (1.12)$$

де

$$C_{cp} = \frac{C_A + C_B + C_C}{3}, \quad (1.13)$$

Отже, відповідно до (1.12), при однофазному замиканні на землю в мережі з ізолюваною нейтраллю напруга несиметрії в основному буде визначатися опором заземлюючої дуги. У випадку, коли опір дуги дорівнює 0 (замикання на землю з металевим контактом), то

$$\underline{U}_{Nозз} = -\underline{E}_A = -\underline{U}_A, \quad (1.14)$$

у відповідності з (1.1):

$$\underline{U}_{Aозз} = 0, \quad (1.15)$$

$$\underline{U}_{B033} = \underline{E}_B - \underline{E}_A = \underline{U}_B - \underline{U}_A = -\underline{U}_{AB}; \quad (1.16)$$

$$\underline{U}_{C033} = \underline{E}_C - \underline{E}_A = \underline{U}_C - \underline{U}_A = -\underline{U}_{CA}; \quad (1.17)$$

де -  $\underline{U}_{N033}$ ,  $\underline{U}_{A033}$ ,  $\underline{U}_{B033}$ ,  $\underline{U}_{C033}$  напруги мережі, яка функціонує в умовах з однофазним замиканням на землю, а  $\underline{U}_A$ ,  $\underline{U}_B$ ,  $\underline{U}_C$ ,  $\underline{U}_{AB}$ ,  $\underline{U}_{CA}$  - напруги мережі, в симетричному режимі.

З (1.14) – (1.17) випливає, що при металевому однофазному замиканні на землю в мережі з ізольованою нейтраллю напруга на ушкодженій фазі стає нульовою (рис. 1.4). Напруга несиметрії в нейтралі виявляється такою, як напруга на ушкодженій фазі в попередньому режимі, але з протилежним знаком.

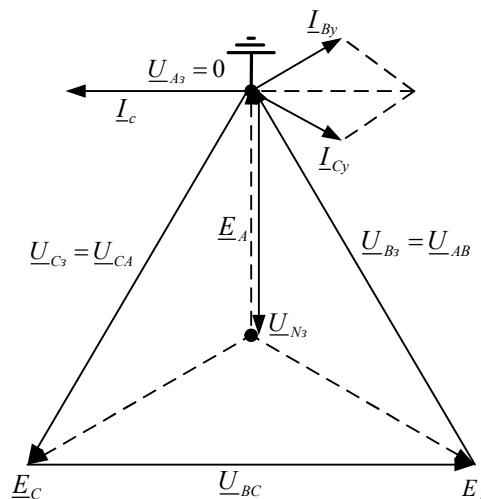


Рисунок 1.4 – Діаграма векторів напруг і струмів при однофазному замиканні на землю в мережі з ізольованою нейтраллю при опорі дуги, що дорівнює нулю

За кінцевих значень опорів дуги для фазних напруг мережі, що перебуває в умовах однофазного замикання на землю, за (1.1), отримаємо вирази:

$$\underline{U}_{A033} = \underline{E}_A + \underline{U}_{N033} = \underline{U}_A \frac{j3\omega C_{cp} r_{\partial}}{1 + j3\omega C_{cp} r_{\partial}}; \quad (1.18)$$

$$\underline{U}_{B033} = \underline{E}_B + \underline{U}_{N033} = \underline{U}_A \frac{a^2(1 + j3\omega C_{cp} r_\partial) - 1}{1 + j3\omega C_{cp} r_\partial}; \quad (1.19)$$

$$\underline{U}_{C033} = \underline{E}_C + \underline{U}_{N033} = \underline{U}_A \frac{a(1 + j3\omega C_{cp} r_\partial) - 1}{1 + j3\omega C_{cp} r_\partial}. \quad (1.20)$$

Зміни векторної діаграми напруги в мережі зі замиканням на землю фази А представлені на рис. 1.5. Суцільні лінії на діаграмі відображають вектори напруги, що відповідають стандартному режиму роботи мережі, та вектори і для режиму замикання на землю фази А при  $r_\partial = 0$ .

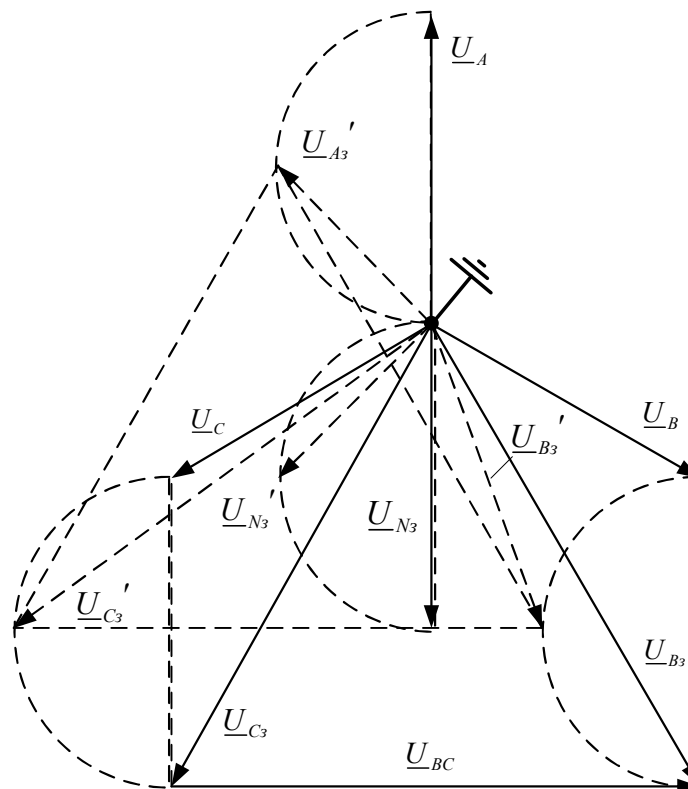


Рисунок 1.5 – Динаміка змін векторів напруг в мережі з ізольованою нейтраллю в залежності від  $r_\partial$  при замиканні на землю фази А

Пунктиром зображено положення векторів при відношенні  $r_\partial$  до  $1/3\omega C_{cp}$ , що відповідає одиниці.

На рисунку 1.6 представлені відносні зміни модулів напруг, при

однофазному замиканні на землю фази А, враховуючи різні значення опору заземлюючої дуги, вираженого у відсотках ємнісного опору мережі  $1/3\omega C_{cp}$ .

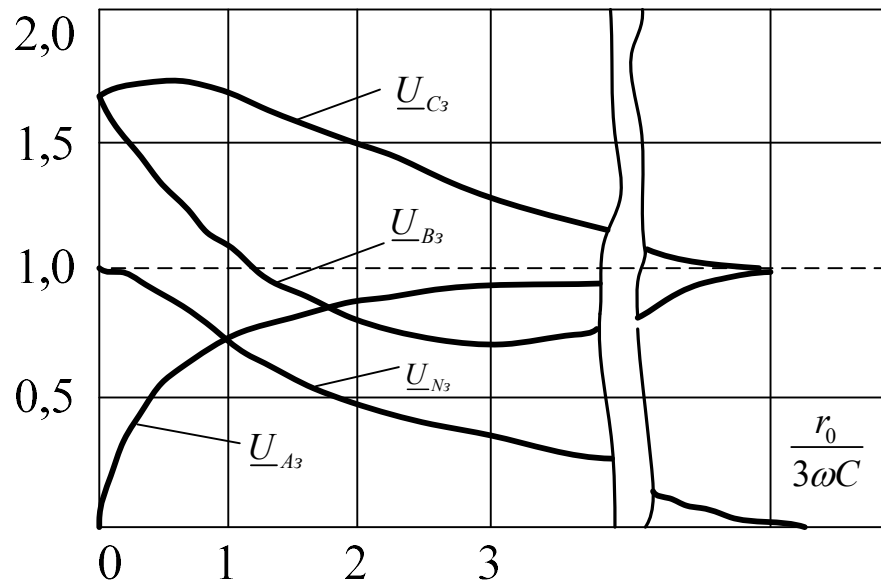


Рисунок 1.6 – Варіації модулів напруги несиметрії та фазової напруги в мережі з ізольованою нейтраллю, враховуючи опір в місці замикання, змінюються відповідно до їхньої залежності від опору в точці утворення короткого замикання ( $i = A, B, C, N$ )

Як видно з діаграми рис. 1.5 і залежностей рис. 1.6 по мірі збільшення опору дуги напруга несиметрії в нейтралі зменшується від  $\underline{U}_{N033} = -\underline{U}_A$  до нуля, при цьому кінець вектора  $\underline{U}_{N033}$  переміщується по деякому півколу. Вектори фазних напруг  $\underline{U}_{A033}$ ,  $\underline{U}_{B033}$  і  $\underline{U}_{C033}$  також переміщуються по напівколах, що супроводжується зміною напруги на пошкодженій фазі  $\underline{U}_{A033}$  від значення, що дорівнює нулю, до значення  $\underline{U}_{A033} = \underline{U}_A$  і зміною напруги на пошкоджених фазах, відповідно  $\underline{U}_{B033}$  і  $\underline{U}_{C033}$ , від міжфазних значень  $\underline{U}_{B033} = -\underline{U}_{AB}$  і  $\underline{U}_{C033} = -\underline{U}_{CB}$  до фазних  $\underline{U}_{B033} = \underline{U}_B$  і  $\underline{U}_{C033} = \underline{U}_C$ . В той же час трикутник міжфазної напруги мережі  $\underline{U}_{AB}$ ,  $\underline{U}_{BC}$  і  $\underline{U}_{CA}$  залишається незмінним при будь-яких значеннях  $r_0$ . Це дозволяє зробити висновок, що виникнення

даного порушення нормального режиму мережі не вплине на операцію приєднаних до неї трифазних споживачів електроенергії. У зв'язку з цим ключовим є аналіз величини струму, що протікає в місці замикання, і характеру його впливу на електротехнічне обладнання для вирішення питання про допустимість тривалого функціонування мережі при однофазному замиканні на землю. Відповідно до (1.1) і (1.9) вираз для розрахунку струму замикання на землю пошкодженої фази  $\underline{I}_c$  (рис. 1.3) можна представити в наступному вигляді:

$$\underline{I}_c = -\left[ (\underline{E}_A + \underline{U}_{No33}) \underline{Y}_A + (\underline{E}_B + \underline{U}_{No33}) \underline{Y}_B + (\underline{E}_C + \underline{U}_{No33}) \underline{Y}_C \right] \quad (1.21)$$

або

$$\underline{I}_c = -\underline{E}_A (\underline{Y}_A + a\underline{Y}_B + a^2\underline{Y}_C) - \underline{U}_{No33} (\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C) \quad (1.22)$$

Використовуючи (1.4), будемо мати:

$$\underline{I}_c = \underline{U}_N (\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C) - \underline{U}_{No33} (\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C) \quad (1.23)$$

де  $\underline{U}_N$  визначено за (1.4) при нормальному режимі роботи мережі, а  $\underline{U}_{No33}$  визначено за (1.12) при режиму роботи мережі з замиканням фази на землю.

Після перетворення (1.23) отримаємо:

$$\underline{I}_c = \underline{I}_{aC} + \underline{I}_{aG} + \underline{I}_{3C} + \underline{I}_{3G} \quad (1.24)$$

де  $\underline{I}_{aC}$  - компонента струму при замиканні на землю, обумовлена асиметрією ємностей провідностей фаз:

$$\underline{I}_{aC} = \underline{U}_N j\omega (C_A + C_B + C_C), \text{ де} \quad (1.25)$$



$\underline{I}_{aG}$  - компонента, зумовлена асиметрією активних провідностей фаз

$$\underline{I}_{aG} = \underline{U}_N (G_A + G_B + G_C) \quad (1.26)$$

$\underline{I}_{3C}$  - ємнісна компонента струму замикання на землю, викликана спотворенням параметрів мережі власне замиканням

$$\underline{I}_{3C} = -\underline{U}_{N3} j\omega (C_A + C_B + C_C), \quad (1.27)$$

де  $\underline{I}_{3G}$  - активна компонента струму, зумовлена замиканням

$$\underline{I}_{3G} = -\underline{U}_{N3} (G_A + G_B + G_C) \quad (1.28)$$

Сума струмів ( $\underline{I}_{aC} + \underline{I}_{aG}$ ) як правило не перевищує 2%  $\underline{I}_{3C}$ , визначеної при максимальному значенні напруги несиметрії нейтралі при замиканні на землю:  $\underline{U}_{N3} = -\underline{E}_A = -\underline{U}_A$ ,  $r_\delta = 0$ . Активна складова струму замикання на землю  $\underline{I}_{3G}$  також, як правило, не велика і зазвичай не перевищує 6% від ємнісної складової  $\underline{I}_{3C}$ , так як активні провідності мереж з ізолюваною нейтраллю зазвичай не перевищують 4-7% від ємнісних і лише в рідких випадках досягають 11% [14]. Таким чином, основною складовою струму замикання на землю є ємнісна складова  $\underline{I}_{3C}$ . Виходячи з (1.27) і (1.12) її значення залежить від сумарної ємнісної провідності мережі на землю і опору дуги  $r_\delta$ . При  $r_\delta = 0$  струм  $\underline{I}_C = \underline{I}_{3C}$  досягає великих значень:

$$\underline{I}_C = j\underline{E}_A \omega (C_A + C_B + C_C) = j\underline{E}_A 3\omega C_{cp}, \quad (1.29)$$

або

$$\underline{I}_C = j3\omega C_{cp} \underline{U}_A. \quad (1.30)$$

Відповідно модуль струму однофазного замикання на землю в цьому випадку можна визначити:

$$\underline{I}_c = 3\omega C_{cp} U_\phi \quad (1.31)$$

або

$$\underline{I}_c = \sqrt{3}\omega C_{cp} U, \quad (1.32)$$

де  $U_\phi$  і  $U$  - модулі фазної і міжфазної (лінійної) напруги в попередньому режимі.

При ємнісному характері (рис. 1.4) струми однофазних замикань на землю  $\underline{I}_c$  у мережах з ізольованою нейтраллю в залежності від розгалуженості мереж і їх конструкції (повітря, кабельні) можуть приймати значення від долей ампера до декількох сотень ампер. Отже, якщо протікання такого струму не породжує небезпеку руйнування ізоляції, переходу від однофазного до двофазного чи трифазного короткого замикання, або коли протікання такого струму не загрожує "випалюванням" заліза сердечників машин і трансформаторів, руйнуванням залізобетонних опор і інших систем, тоді можна допустити наявність режиму мережі з однофазним замиканням на землю протягом тривалого часу. Звісно, фазна ізоляція мережі повинна бути розрахована на тривалу дію міжфазної (лінійної) напруги.

Важливо врахувати, що крім розглянутих компонентів струму однофазного замикання на землю, можуть бути присутні вищі гармонійні складові, що виникають внаслідок несинусоїдальності ЕРС генераторів і трансформаторів, або вищі гармонійні складові від випрямлячів і дугових печей. Вищі гармонії першого виду зазвичай невеликі і можуть бути ігноровані, тоді як вищі гармонії другого виду можуть бути суттєвими і повинні враховуватися за необхідності.

Заземлюючі дуги від малих ємнісних струмів однофазних замикань на землю в мережах із ізольованою нейтраллю зазвичай не призводять до

значного тепловиділення і, відповідно, не мають високої температури, що робить їхню дію безпечною для фарфорових ізоляторів, мідних і алюмінієвих струмоведучих частин, та інших елементів системи. Проте при великих значеннях ємнісних струмів, які перевищують критичні значення, заземлюючі дуги можуть стати стійкими, що може призвести до серйозних наслідків, таких як виток витоків енергії, розплавлення елементів системи і навіть до виникнення коротких замикань в лініях електропередачі і розподільних пристроях.

У мережах з ізолюваною нейтраллю у високовольтних генераторах та двигунах, де використовується клас ізоляції В, яка включає мікастрічку на слюдяній основі, просочену асфальтовим лаком, значення допустимого струму замикання визначається стійкістю ізоляції. При порушенні ізоляції фази статора на корпус розмір і характер руйнування залежать від значення струму і тривалості. Якщо струм не перевищує 30 А, замикання зазвичай не виникає з дуговим горінням. Проте тривале протікання через ізоляцію може призводити до її нагрівання, зниження електричної міцності та навіть до пробою, тобто виткового або міжфазного короткого замикання. При струмах поряд із 30 А, зазвичай виникають дугові замикання, що призводять до виплавлення сталі магнітопроводу статора. Ремонт генератора в цьому випадку вимагає повної перешихтовки магнітопроводу.

В кабельних мережах напругою 6-20 кВ з трижильними кабелями із паперовою ізоляцією, просоченою оливоканифольною масою, в свинцевій або алюмінієвій оболонці із пластмасовою ізоляцією, допустимий струм залежить від товщини ізоляції кабеля та номінальної напруги мережі.

|  |    |    |       |
|--|----|----|-------|
| Номінальна напруга кабельних мереж, кВ                     | 6  | 10 | 15-20 |
| Допустимі струми замикання на землю у кабельних мережах, А | 30 | 20 | 15    |

Розвиток пошкоджень у повітряних мережах також залежить від амплітуди струмів у точці замикання. З'ясовано, що у випадку перевищення

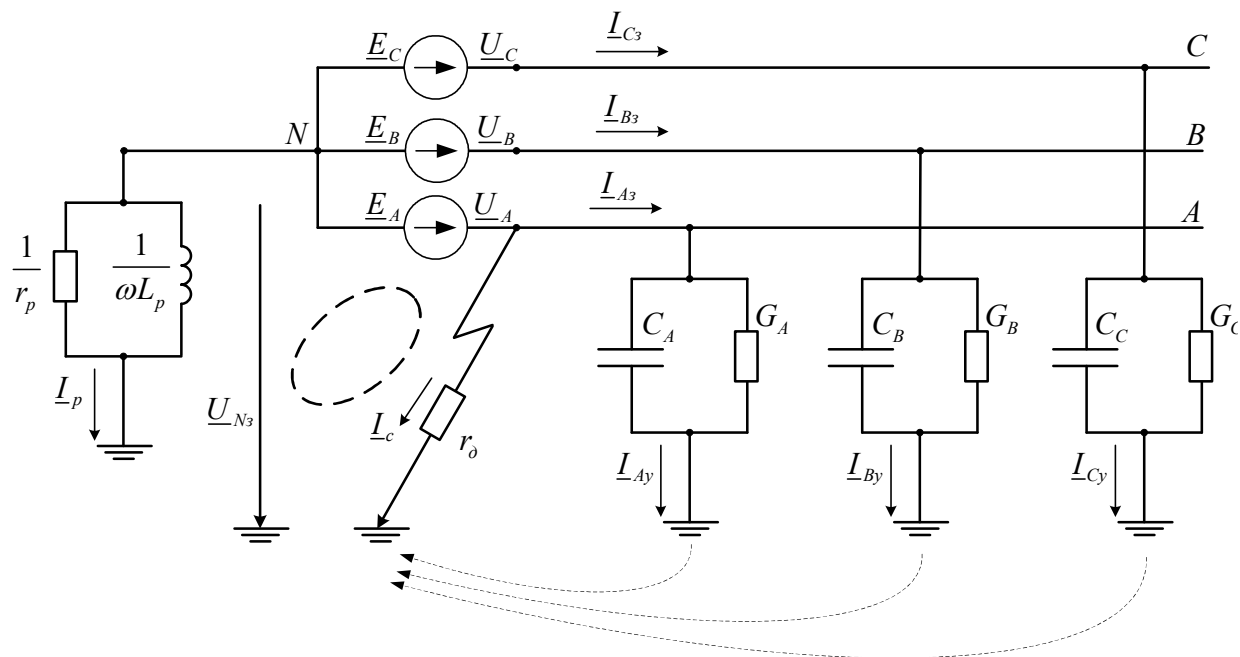
допустимого рівня струму замикання на землю в мережі напругою до 35 кВ може виникнути пошкодження фарфорових ізоляторів, а також залізобетонних опор і виткової ізоляції трансформаторів. Водночас відомо, що у повітряній мережі, якщо струм замикання фази на землю не перевищує встановленого допустимого значення, може відбутися процес самогасіння дуги, що еквівалентно відновленню її звичайного режиму роботи. Отже, для цих мереж встановлені сталі допустимі значення струмів, які враховують можливість самогасіння замикань.

|  |    |    |    |    |
|--|----|----|----|----|
| Номинальна напруга повітряних мереж, кВ  | 6  | 10 | 15 | 20 |
| Допустимі струми замикання на землю при наявності в мережі ліній на залізобетонних і металевих опорах, А | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Допустимі струми замикання на землю у мережах, що не мають залізобетонних і металевих опор, А            | 30 | 20 | 15 | 10 |

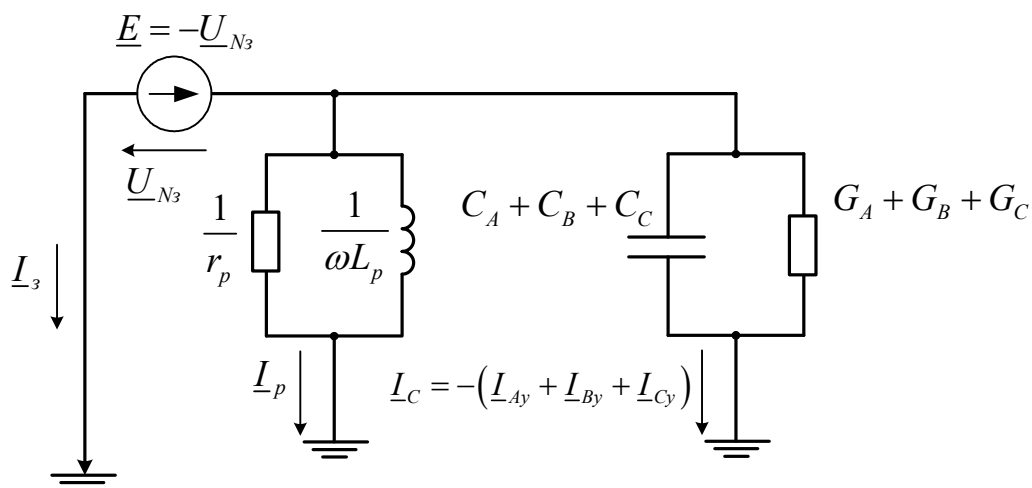
У мережах напругою 6 - 35 кВ, де ставлять підвищені вимоги до електробезпеки, таких як мережі відкритих гірничих і торф'яних розробок або шахтні мережі, тривалий допустимий струм однофазного замикання на землю встановлено на рівні 5 А. У випадку, коли струм однофазного замикання на землю не перевищує визначені допустимі межі, негайне автоматичне відключення пошкодженої ділянки мережі не є обов'язковим. Релейний захист виконується на сигнал. Однак, якщо струм замикання перевищує визначені допустимі межі, його компенсують за допомогою дугогасних реакторів.

#### 1.4 Методи та засоби компенсації ємнісних струмів при однофазному замиканні на землю

Ефективним методом зниження величини струму однофазного замикання на землю в мережі з ізольованою нейтраллю до рівня, що не перевищує вищезазначені допустимі значення, є компенсація ємнісної складової цього струму за допомогою дугогасного реактора, включеного в нейтраль мережі (див. рис. 1.7, а). У вигідних умовах такий метод компенсації може ефективно виявитися безконтактним способом загасання заземлюючої дуги в місці пошкодження.



а)



б)

Рисунок 1.7 – Замикання на землю в мережі з резонансно заземленою нейтраллю: а) схема мережі; б) еквівалентна схема для визначення умов резонансу струмів

Методика компенсації використовує відоме в електротехніці явище резонансу струмів і полягає, власне, в накладенні на ємнісну складову струму в місці замикання на землю  $\underline{I}_c$  (рис.1.7, б) індуктивної складової  $\underline{I}_p$ , зумовленою індуктивним опором включеним в нейтраль мережі ДГР. Тому, умова вибору оптимальної величини індуктивного опору реактора, що

забезпечує мінімум струму ємності  $\underline{I}_c$ , може бути отримане в припущенні, що в ланцюзі, що відповідає резонансу струмів  $\underline{I}_c$  і  $\underline{I}_p$ , реактивна складова струму зовнішнього джерела  $\underline{E}$  повинна дорівнювати нулю. Визначимо цю умову.

Рівновагу струмів в місці замикання на землю для схеми, зображеної на рис. 1.7, а, з урахуванням виразу (1.9), можна виразити таким чином:

$$\underline{I}_3 = \underline{I}_c - \underline{I}_p \quad (1.33)$$

із застосуванням (1.24):

$$\underline{I}_c = \underline{I}_{aC} + \underline{I}_{aG} + \underline{I}_{3C} + \underline{I}_{3G} - \underline{I}_p \quad (1.34)$$

де

$$\underline{I}_p = \underline{U}_{N3} \underline{Y}_p = \underline{U}_{N033} \left( \frac{1}{r_p} + \frac{1}{j\omega L_p} \right);$$

$\frac{1}{r_p}$  і  $\frac{1}{j\omega L_p}$  - активна та індуктивна складові провідності реактора  $\underline{Y}_p$ .

Відкидаючи в (1.34) компоненти струму, що виникають внаслідок асиметрії провідностей фази до землі, і враховуючи (1.27) і (1.28), ми отримаємо:

$$\underline{I}_3 = -\underline{U}_{N033} j \left[ \omega ((C_A + C_B + C_C)) - \frac{1}{\omega L_p} \right] - \underline{U}_{N033} \left( G_A + G_B + G_C + \frac{1}{r_p} \right) \quad (1.36)$$

З останнього виразу можна зрозуміти, що у випадку відсутності активних втрат в мережі умову вибору індуктивного опору реактора, який забезпечує повну компенсацію струму однофазного замикання на землю ( $I_3 = 0$ ), можна виразити так:

$$\omega L_p = \frac{1}{\omega (C_A + C_B + C_C)}, \quad (1.37)$$

чи

$$\omega L_p = \frac{1}{3\omega C_{cp}} \quad (1.38)$$

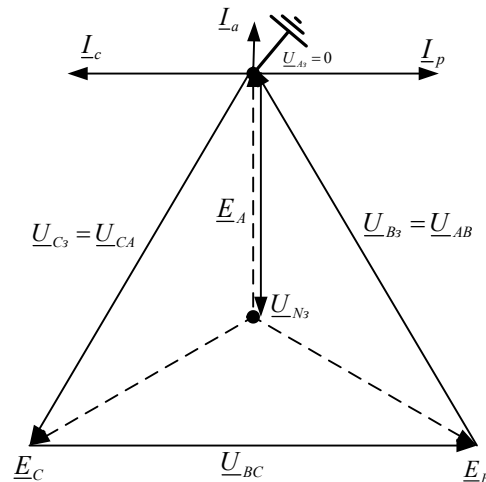


Рисунок 1.8 – Графічне зображення напруг і струмів у вигляді векторної діаграми під час однофазного замикання на землю в мережі з резонансно заземленою нейтраллю ( $r_\partial = 0$ )

З виразу (1.36) можна зрозуміти, що в реальних мережах, навіть виконавши настройку дугогасного реактора за умовами (1.37) і (1.38), неможливо досягти повної компенсації струму однофазного замикання на землю (рис. 1.8). Це виникає тому, що через місце замикання продовжуватиме протікати залишковий активний струм, обумовлений активною провідністю фаз та самого реактора:

$$\underline{I}_3 = \underline{I}_a = -\underline{U}_{N033} \left( G_A + G_B + G_C + \frac{1}{r_p} \right), \quad (1.39)$$

чи

$$\underline{I}_a = -\underline{U}_{N033} \left( 3G_{cp} + \frac{1}{r_p} \right), \quad (1.40)$$

де

$$G_{cp} = \frac{G_A + G_B + G_C}{3}$$

Величину активної складової струму в точці замикання на землю в мережі з резонансно заземленою нейтраллю зазвичай описують за допомогою раніше згаданого коефіцієнта демпфування. Проте в цьому випадку коефіцієнт демпфування визначається як співвідношення модуля активної складової струму в місці замикання на землю, яка враховує реактор і обчислена за допомогою (1.39) або (1.40), до ємнісної складової струму замикання, що визначена за (1.27) або (1.31) і (1.32):

$$d = \frac{I_a}{I_c} \cdot 100\% = \frac{G_A + G_B + G_C + \frac{1}{r_p}}{\omega(C_A + C_B + C_C)} \cdot 100\% \quad (1.41)$$

На основі обширного набору вимірювань для повітряних мереж з нормальною ізоляцією, коефіцієнт, який описує цей процес, можна прийняти зазначеним чином: для повітряних мереж напругою 6 кВ - 5%, 10 кВ - 4%, 35 кВ - 3%; при наявності забруднень і вологи в ізоляції повітряних мереж, параметр  $d$  можна взяти рівним 10%. У випадку кабельних мереж параметр  $d$  можна встановити на рівні 3%, а для застарілої ізоляції в кабельних мережах - 6% [15].

Отже, активна складова струму при однофазному замиканні на землю в мережах із ізольованою, і в мережах із резонансно заземленою нейтраллю, як правило, невелика і здебільшого не заважає самогасінню дуги. Тим не менше, в дуже розгалужених мережах це може призвести до погіршення ефекту самогасіння.

У зв'язку з обмеженістю потужностей реакторів, ступінчастим регулюванням їх індуктивності, обмеженим зміною конфігурації мережі і зміною ємностей ліній електропередачі при зміні погодних умов, а також можливістю виникнення неприпустимих зсувів нейтралі, резонансу



компенсацію ємнісною складовою струму при замиканні на землю не завжди можна забезпечити. Ступінь розладу компенсації визначається відношенням реактивної складової струму при замиканні на землю в мережі з дугогасним реактором в нейтралі до ємнісної складової струму при замиканні на землю в цій самій мережі при відсутності дугогасного реактора.

$$\nu = \frac{\underline{I}_c - \underline{I}_p}{\underline{I}_c} \cdot 100\% . \quad (1.42)$$

Якщо  $\nu = 0$ , має місце резонансна (повною) компенсація ємнісного струму однофазного замикання на землю. При  $\nu > 0$ , та  $\underline{I}_c > \underline{I}_p$ , мережа працює в режимі недокомпенсації ємнісного струму. У випадку  $\nu < 0$ , та  $\underline{I}_c < \underline{I}_p$  перекомпенсації.

Для досягнення максимальної ефективності компенсації під час вибору індуктивного опору дугогасного реактора важливо максимально зблизити ступінь розладу компенсації до нуля, тобто досягти співвідношення,  $\underline{I}_c = \underline{I}_p$ . У випадках, коли резонансна настройка реактора не є можливою, Правила Технічної Експлуатації (ПТЕ) рекомендують налаштування реактора з перекомпенсацією від 5% до 10%. В екстремальних випадках, після перевірки придатності такого режиму, може використовуватися налаштування з недокомпенсацією до 5% [15].

При відомих значеннях ступеня розладу компенсації і коефіцієнта демпфування  $d$ , приблизне значення однофазного замикання на землю в мережі з резонансно заземленою нейтраллю може бути обчислене за наступним виразом.

$$\underline{I}_3 = 0,01 \cdot \underline{I}_c \cdot \sqrt{\nu^2 + d^2} \quad (1.43)$$

Ефективне використання компенсації ємнісного струму замикання на

землю сприяє підвищенню надійності функціонування мереж з ізольованою нейтраллю. Це є головною метою використання так званих мереж з резонансно заземленою нейтраллю. Ефективність компенсації визначається відношенням кількості випадків, коли не виникає міжфазних коротких замикань, до загальної кількості аварійних відключень. У випадку мереж з резонансно заземленою нейтраллю це відношення може сягати від 0,6 до 0,9, тоді як для мереж з ізольованою нейтраллю воно, у деяких випадках, може не перевищувати 0,3.

Відповідно до рекомендацій, якщо кількість двофазних коротких замикань в мережі з ізольованою нейтраллю не перевищує 10% від загальної кількості аварійних відключень, то встановлення ДГР (дугогасного реактора) не рекомендується. З обґрунтованим використанням компенсації не менше 85% випадків замикань на землю можна уникнути відключення мережі без шкоди для електропостачання споживачів. Автоматичне повторне включення застосовується лише при виникненні дво- або трифазних коротких замикань, які у таких мережах стають досить рідкісними.

Як і у випадку мереж з ізольованою нейтраллю, мережі з резонансно заземленою нейтраллю можуть працювати з однією фазою, що замкнулася на землю. У таких мережах полегшуються вимоги до заземлюючих пристроїв, обмежуються комутаційні перенапруги при дугових замиканнях на землю до значень 2,5-2,6 Уф (при ступені розладу компенсації 0-5%), що є безпечними для ізоляції експлуатаційного устаткування і ліній електропередачі. Важливою перевагою є значне зниження швидкості відновлення напруги на пошкодженій фазі, що сприяє відновленню діелектричних властивостей місця пошкодження мережі після кожного гасіння перекидної заземлюючої дуги. При наявності обмежень на застосування плавких запобіжників на лініях електропередачі в мережі, наявність ДГР в нейтралі запобігає розвитку ферорезонансних процесів, зокрема мімовільного зсуву нейтралі. Встановлення ДГР в нейтралі мережі з ізольованою нейтраллю, спрямоване на оптимізацію ємнісного струму однофазного замикання на землю і

створення умов для самогасіння заземлюючої дуги, може в деяких випадках призводити до значних резонансних перенапруг в ній. Ця можливість зумовлена тим, що в такому випадку еквівалентна схема мережі є ланцюгом резонансу напруги, в якому еквівалентне джерело послідовно з'єднане з дугогасним реактором і провідністю фаз мережі на землю.

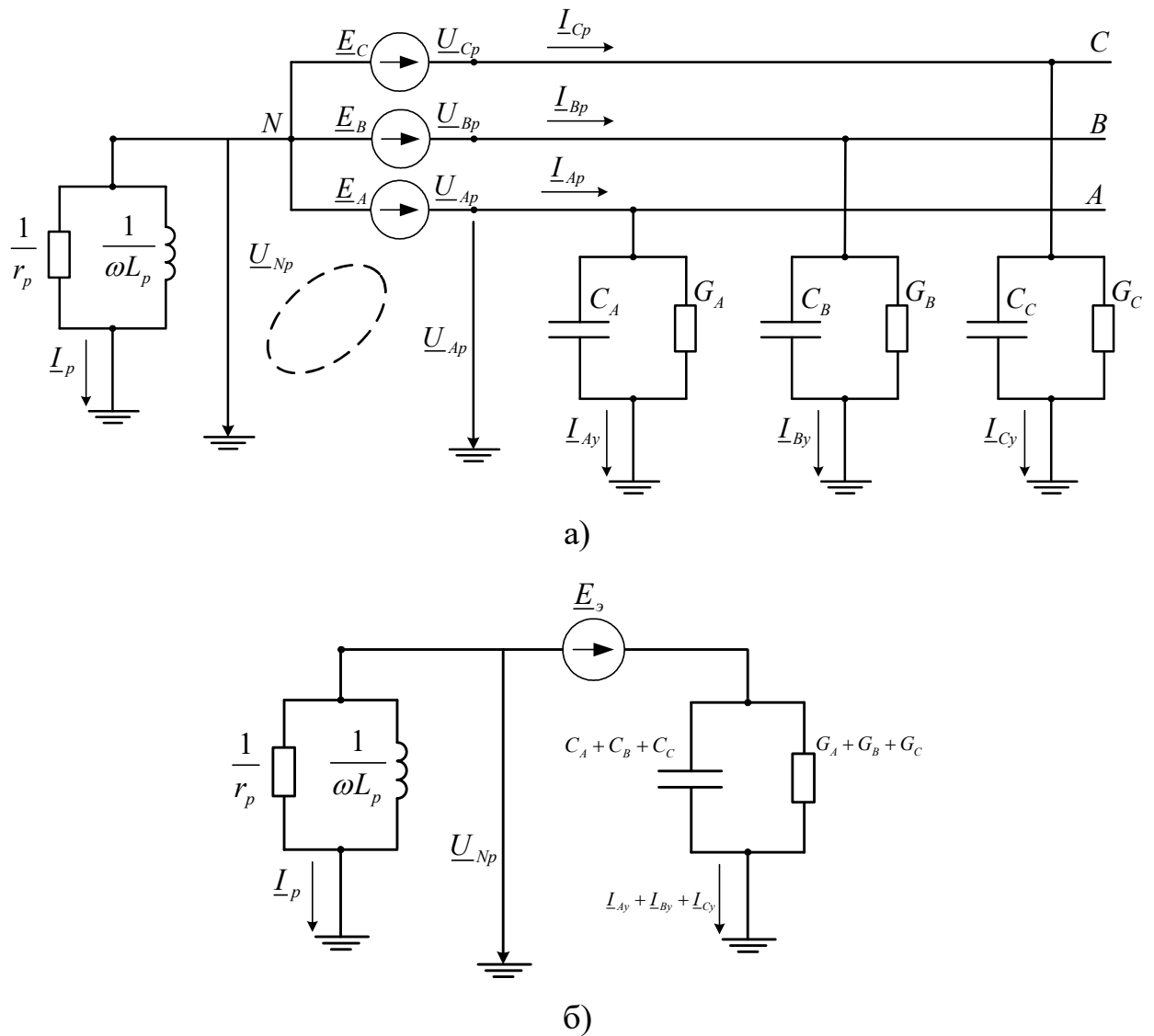


Рисунок 1.9 – Графічне зображення мережі з резонансно заземленою нейтраллю:

а) трифазна схема мережі; б) еквівалентна схема заміщення мережі

$$\omega L_p = \frac{1}{\omega(C_A + C_B + C_C)} \quad (1.44)$$

Виникнення резонансу в цьому ланцюзі узгоджується з умовою (1.37) ідеальної резонансної настройки дугогасного реактора, який встановлено для компенсації ємнісного струму замикання на землю. Отже, якщо у нормально функціонуючій мережі з певних причин  $\underline{E}_s$  дорівнює нулю і виконується умова (1.44), то у контурі (рис. 1.9, б) відбувається виникнення резонансу напруг. У такому випадку струм  $\underline{I}_p$  обмежується лише втратами в  $G_A$ ,  $G_B$ ,  $G_C$  і  $\frac{1}{r_p}$ , а напруга в нейтралі  $\underline{U}_{Np}$  і напруги на фазах  $\underline{U}_{Ap}$ ,  $\underline{U}_{Bp}$  і  $\underline{U}_{Cp}$  (відповідно до (1.1)) можуть досягати значень, які значно перевищують допустимі для ізоляції електроустаткування.

Розглянемо фактори, що визначають режим напруг в нормально функціонуючій мережі з резонансним заземленням нейтралі. За аналогією з (1.2) і (1.3) для вузла схеми на рис. 1.9, а, що пов'язаною з землею, запишемо рівняння балансу струмів у вигляді:

$$\underline{I}_{Ay} + \underline{I}_{By} + \underline{I}_{Cy} + \underline{I}_p = 0 \quad (1.45)$$

чи

$$\underline{U}_{Ap} \underline{Y}_A + \underline{U}_{Bp} \underline{Y}_B + \underline{U}_{Cp} \underline{Y}_C + \underline{U}_{Np} \underline{Y}_p = 0 \quad (1.46)$$

Отримавши спільне рішення для (1.1) і (1.46), ми отримаємо вираз для розрахунку напруги несиметрії в нормально працюючій мережі з резонансно заземленою нейтраллю:

$$\underline{U}_{Np} = \frac{\underline{E}_A \underline{Y}_A + \underline{E}_B \underline{Y}_B + \underline{E}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_p} \quad (1.34)$$

Використавши в (1.47), наприклад,  $\underline{Y}_A = \infty$ , отримаємо результат, що при однофазному замиканні на землю значення напруги в такій мережі майже співпадають з напругою в мережі з ізольованою нейтраллю (рис. 1.8), так як

$$\underline{U}_{Np} = \underline{U}_{Nz} = -\underline{E}_A,$$

а  $\underline{U}_{Ap}$ ,  $\underline{U}_{Bp}$ ,  $\underline{U}_{Cp}$  згідно (1.1) відповідатимуть виразам (1.15) - (1.17).

При нормальному режимі роботи мережі з резонансно заземленою нейтраллю (1.47) можна подати наступного вигляду:

$$\underline{U}_{Np} = -\underline{E}_A (u' - ju'') \frac{1}{d - jv} \quad (1.48)$$

де  $u'$  і  $u''$  — відповідають виразам (1.6) і (1.7); тоді як  $d$  та  $v$  - (1.41) і (1.42).

Як правило  $\underline{U}_{Np}$ , подають у вигляді відносної величини  $u_p$ , яка отримала назву ступеня відносного зсуву нейтралі мережі, що у відсотках визначається за виразом, аналогічним (1.15):

$$u_p = \frac{|\underline{U}_{Np}|}{|\underline{U}_A|} = |u' - ju''| \frac{1}{\sqrt{d^2 + v^2}} \cdot 100\% \quad (1.49)$$

З (1.48) та (1.49) можна зробити висновок, несиметрія ємнісних чи активних провідностей фаз на землю ( $|u' - ju''| \neq 0$ ) в мережі з резонансно заземленою нейтраллю також супроводжується наявністю в нейтралі напруги несиметрії  $\underline{U}_{Np}$ . Але, в цьому випадку модуль такої напруги, крім цього має резонансну залежність від величини розладу компенсації  $v$  (рис. 1.10).

У випадку, коли реактор налаштований в резонанс ( $v = 0$ ), то відносне значення модуля напруги  $\underline{U}_{Np}$  досягає свого максимального значення:

$$\underline{U}_{Np}^*(v) = u_p = \frac{|u' - ju''|}{d}, \quad (1.50)$$

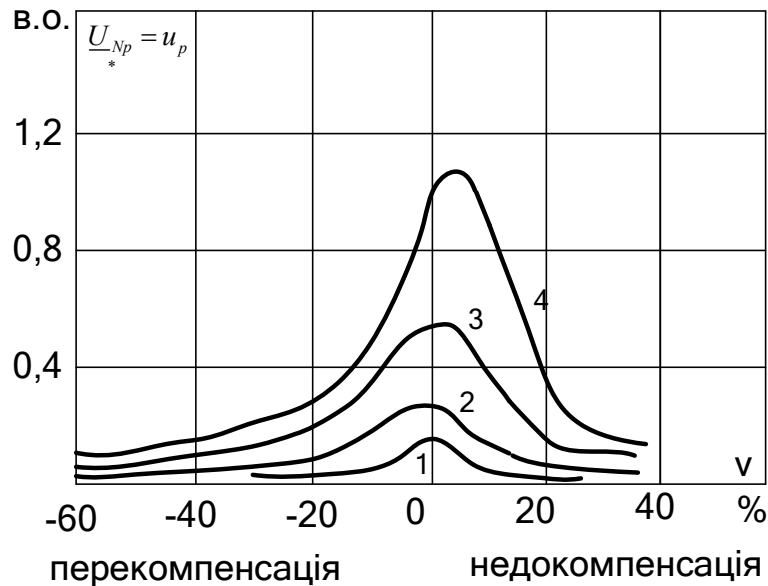


Рисунок 1.10 – Криві резонансного відносного зміщення нейтралі мережі: 1 -  $\underline{U}_{Np}(\nu)$  - при нормальному режимі роботи мережі; 2,3,4 – те ж саме при втраті частини ємнісної провідності фази А мережі, відповідно 4,4%, 12,6%, і 18%

У цьому випадку сама напруга, а отже, і напруга на фазах буде більшою, коли коефіцієнт демпфування  $d$  менший. Наприклад, при значенні  $d=0,02$ , модуль напруги  $\nu=0$  в мережі з резонансно заземленою нейтраллю буде перевищувати його значення ( $\underline{U}_{Np}$ ) в мережі без дугогасного реактора в 50 разів.

З метою утримання перенапруг на безпечному рівні для ізоляції електрообладнання, Правила Технічної Експлуатації (ПТЕ) встановлюють, що в мережах з резонансним заземленням ступінь відносної несиметрії не повинен перевищувати 0,75% перед встановленням дугогасного реактора. При цьому ступінь відносної зсуву нейтралі мережі під час підключення резонансно настроєного реактора не повинен перевищувати 15% фазної напруги. Якщо ця умова не виконується, необхідно вжити заходів для симетризації ємності провідності мережі, наприклад, за допомогою транспозиції фаз ліній електропередачі або підключення симетризуючих конденсаторів.

У мережах з резонансним заземленням можливі аварійні обриви фаз, які не призводять до падіння ліній на землю. Це може значно збільшити несиметрію мережі, створюючи передумови для збільшення електростатичного надтривоження (ЕРС) і відповідно резонансних перенапруг. ПТЕ рекомендує резонансну настройку компенсації як основну стратегію. Якщо це неможливо, то реактор може бути настроєний з перекомпенсацією в межах 5-10%. Недокомпенсація допускається в обмежених випадках і не більше 5%. Важливо перевірити рівні напруги в мережі при відключенні найбільш довгої фази лінії електропередачі. У цьому випадку ступінь відносної зсуву нейтралі мережі не повинен перевищувати 70% фазної напруги. Невиконання цих умов вимагає вибору іншого реактора для забезпечення необхідного зниження напруги в нейтралі мережі в аварійних режимах.

## Висновки

Сучасні електропостачальні системи з напругою 6-35 кВ представляють собою складні та технічно вдосконалені мережі. Вони характеризуються функціональною різноманітністю, складною конструкцією, високою вартістю експлуатації та автономністю.

Головним видом пошкоджень, які становлять до 82%, є однофазні короткі замикання на землю. Ці види пошкоджень супроводжуються виникненням небезпечних ситуацій експлуатації, таких як підвищення напруги на обладнанні, витоку струму, спікання ґрунту біля заземлюючого пристрою, можливість пожежі та вибуху.

## РОЗДІЛ 2

### АНАЛІЗ ЗАСОБІВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ТА МЕТОДІВ КОНРОЛЮ ІЗОЛЯЦІЇ

#### 2.1 Методи та засоби релейного захисту від однофазних замикань на землю

В даний момент завдання створення повністю відповідних сучасним вимогам пристроїв релейного захисту для мереж із компенсацією ємнісних струмів однофазних замикань та мереж із ізольованою нейтраллю залишається нерозв'язаним. Більшість наявних розробок пристроїв захисту від однофазних замикань реагують на значення чи напрям струму нульової послідовності в лініях. У сталому режимі однофазного замикання напрям струму визначається щодо напруги нульової послідовності, а в перехідному режимі - першої півхвилі струму. Також використовується принцип порівняння напрямів перших півхвиль перехідного струму. Деякі розробки пропонують комплексні пристрої захисту з роздільною фіксацією короточасних пробіїв, металевих і дугових замикань.

Використання простих струмових захистів, що не здатні забезпечити необхідну чутливість і селективність, як правило призводить до значних економічних збитків. Реле захисту, які налаштовані реагувати на першу півхвилю перехідного струму при однофазному замиканні, можуть відмовляти при пошкодженні з великим перехідним опором або несприятливою початковою фазою коливання напруги пошкодженої фази. Для пристроїв, що реагують на напрям струму в сталому режимі однофазного замикання, характерні відмови при перекидних замиканнях.

Реле захисту від замикань, які діють на накладеному струмі непромислової частоти, функціонують в режимі сталого однофазного замикання. Проте їхній принцип побудови, заснований на фільтрації корисного сигналу непромислової частоти, не дає можливість забезпечити селективне спрацьовування захисту за умов виникнення перекидних однофазних замиканнях. Пристрої, які порівнюють амплітуди перехідних струмів в лініях, що відходять, виявляються більш ефективними.



Аналіз існуючих розробок пристроїв захисту від однофазних замикань свідчить про складність їхньої схеми та ускладнення їх управління під час експлуатації. Велика кількість пропонованих пристроїв та пошук оптимального варіанту свідчать про відсутність ідеального пристрою з задовільними характеристиками. Це пояснюється тим, що розробники засобів релейного захисту від однофазних замикань, зазвичай, не враховують можливості поліпшення їхніх параметрів за рахунок оптимізації режиму нейтралі мережі. Це вимагає підвищення чутливості направлених захистів до значення 0,06 А відносно первинного струму.

## 2.2 Особливості застосування методу захисного шунтування при однофазних пошкодженнях електроустановок

Процес шунтування будь-якого електричного ланцюга слід розглядати, в першу чергу, як окремий випадок, що існує в природі і широко використовується в техніці, призводячи до зменшення струму, що протікає через шунтований ланцюг. При використанні шунтування однофазних замикань на землю в електроустановках з ізолюваною нейтраллю, крім зниження струму через місце замикання, також знижується напруга пошкодженої фази відносно землі. Саме цю властивість використовували в 20-х роках в США для боротьби з дуговими замиканнями на землю в повітряних мережах високого напруги (за допомогою методу Arcing ground suppressor) [13]. Останнім часом шунтування однофазних замикань застосовується для забезпечення електробезпеки і, передусім, для зниження струму, який протікає через тіло людини при однофазному дотику.

На зображеній на рисунку 2.1 електричній схемі представлено систему, що складається з джерела напруги  $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ , однорідної лінії передачі із зосередженими параметрами  $R_l, jX_l, -jX_c$ , і  $R_{i3}$ , а також споживача з опором навантаження  $Z_n$ . У випадку виникнення однофазного замикання, наприклад, в точці K1, струм  $\underline{I}^{(1)}$  протікає через опір  $R_{\psi}$  в місці замикання. Якщо опір  $R_{\psi}$  штучно замінити опором  $Z_{ш}$ , значно меншим за  $R_{\psi}$ , струм, який протікає через

Рц, різко зменшується до рівня  $I_{\text{зал}}^{(1)}$ . Водночас, у ланцюгу, утвореному опорами  $Z_{\text{ш}} - R_{\text{грунт}} - R_{\text{ц}}$ , виникає додатковий струм  $I_{\text{д}}$ , який визначається різницею напруги між точками К2 і К1 від струмів навантаження.

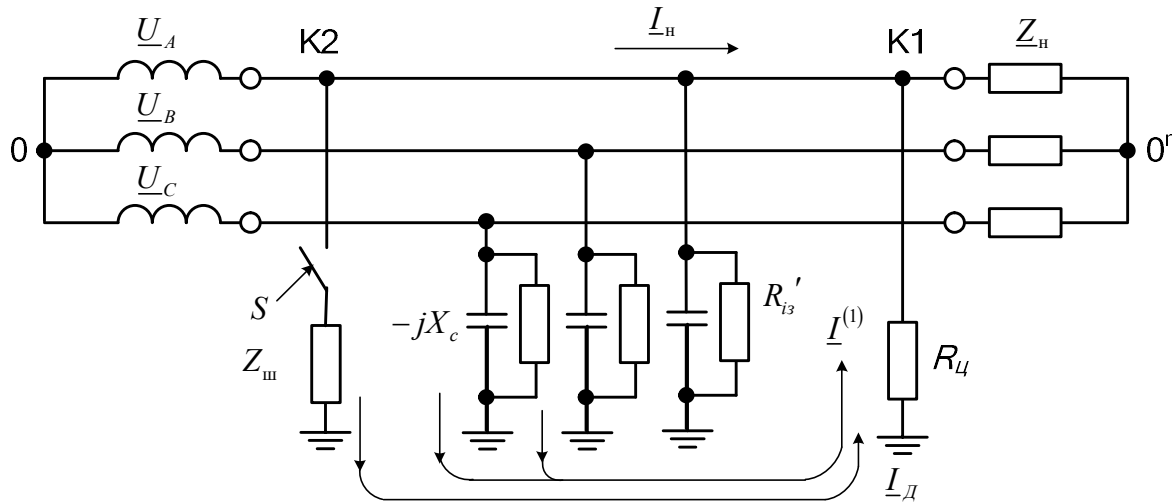


Рисунок 2.1 – Основна схема електричної мережі із шунтованим однофазним замиканням на землю

Термін "захисне шунтування" в електроустановках з ізольованою нейтраллю вказує на метод захисту, який автоматично встановлює штучне з'єднання пошкодженої фази з землею в одній або кількох задалегідь визначених точках мережі. Цей метод призначений для зниження напруги цієї фази відносно землі та струму в місці природного однофазного замикання до значень, що відповідають установленим умовам електробезпеки або іншим критеріям. Початковий опір в місці однофазного замикання, що позначається як  $R_{\text{ц}}$ , визначає активний опір ланцюгу між пошкодженою фазою та умовною землею (лінією нульового потенціалу) до моменту шунтування місця замикання.

Залишкова напруга пошкодженої фази, позначена як  $U_{\text{зал}}$ , визначається як напруга цієї фази відносно землі, викликана природним замиканням на землю через опір  $R_{\text{ц}}$ .

Після застосування захисного шунтування, залишкова напруга фази,

визначена як  $U_{ocm}'$ , представляє собою напругу, знижену в порівнянні з  $U_{ocm}$ , що виникає в результаті штучного з'єднання фази із землею через шунтуючий пристрій.

Додаткова напруга в місці однофазного замикання після його шунтування, позначена як  $U_d$ , описує напругу між точкою шунтування і точкою природного замикання, яка виникає внаслідок втрат напруги лінії від струмів навантаження.

Напруга в місці однофазного замикання  $\sum U_{ш}$  після застосування захисного шунтування, що називається результатуною напругою, визначається як сума залишкової напруги фази відносно землі та додаткової напруги.

Залишковий опір в місці однофазного замикання, позначений як  $R_{ц}'$ , описує опір в місці замикання між пошкодженою фазою та умовною землею після застосування захисного шунтування. Значення  $R_{ц}'$  може значно відрізнятись від  $R_{ц}$ . Наприклад, для дугового однофазного замикання  $R_{ц}$  становить 5-30 Ом, а після шунтування опір дуги  $R_{ц}' \rightarrow \infty$  може мати значення  $R_{ц}' \rightarrow R_{ц}$  в разі бездугових металевих однофазних замикань.

Струм, який протікає через місце однофазного замикання після його захисного шунтування  $I_{зал}^{(1)}$ , і що визначається залишковою напругою фази відносно землі  $R_{ц}'$  та залишковим опором в місці замикання  $U_{зал}'$ , називається залишковим струмом.

Опір в точці шунтування - це сума опорів самого шунтувального пристрою  $Z_{ш}$  і опору розпливання струму від заземлюючого пристрою  $R_p$ . Шунтувальний пристрій може мати активний, ємнісний, індуктивний або комбінований характер.

Струм, спричинений додатковою напругою між точкою шунтування і місцем замикання  $I_d$ , і обумовлений сумарним опором  $R_{ц}'$ , включаючи опір шунту, називається додатковим струмом через шунт і місце замикання.

Результуючий струм через місце однофазного замикання після його шунтування  $\sum I_{\text{ш}}^{(1)}$  визначається як сума струмів  $I_{\text{зал}}^{(1)}$  і  $I_{\text{д}}$ .

Квазістійким рівнем ізоляції  $E_{\text{в,ш}}$  в місці однофазного замикання із пробоем або перекриттям ізоляції називається кількісне значення відновленої електричної міцності ізоляції в місці пошкодження, здійсненої за допомогою шунтування.

Під ефективністю шунтування розуміється зміна струму через місце однофазного замикання до та після застосування шунтування.

Коефіцієнтом ефективності шунтування  $K_{\text{е,ш}}$  називається кількісний показник ефективності шунтування, що визначається за виразом

$$K_{\text{е,ш}} = 1 - \frac{\sum I_{\text{ш}}^{(1)}}{I^{(1)}} \quad (2.1)$$

де  $I^{(1)}$  - струм що протікає через місце ОЗЗ до моменту його шунтування.

Кількісне значення  $K_{\text{е,ш}}$  розглядається в таких межах: а) при ефективному шунтуванні  $K_{\text{е,ш}} = 1$  або  $K_{\text{е,ш}} \rightarrow 1$ ; б) при обмежено ефективному шунтуванні  $0 < K_{\text{е,ш}} < 1$ ; в) при неефективному шунтуванні  $0 < K_{\text{е,ш}}$ .

Швидкість шунтування  $t_{\text{ш}}$  визначається як час від моменту виникнення однофазного замикання до зниження напруги на ураженій фазі відносно землі до значення  $U_{\text{ост}}'$ , внаслідок її штучного з'єднання з землею.

### 2.3 Методи та засоби контролю ізоляції

При визначенні оптимальної чутливості захистів від однофазних замикань в даний час ігнорується можливість та ефективність впровадження постійного контролю за станом ізоляції мережі. Деякі дослідження, наприклад, [16], вказують на доцільність впровадження такого контролю та приводять

схеми пристроїв, які дозволяють вивчати стан ізоляції різних розподільчих мереж. Однак об'єм впровадження пристроїв для експлуатаційного контролю залишається низьким через складність розроблених пристроїв. Зокрема, для ефективного виявлення пошкоджень на ранній стадії їх розвитку може бути використаний контроль ізоляції в кар'єрних і сільських мережах з напругою понад 1000 В та застосуванням накладеного постійного струму.

Також ефективними вважаються пристрої контролю, які виявляють пошкодження за опором до 10 Ом в місці пошкодження. Використання пристроїв контролю з накладеним постійним струмом, особливо в сільських мережах, дозволяє виявити пошкоджені лінії та реагувати на загальне зниження опору ізоляції, що може виникнути через погодні умови та збільшення активної провідності ізоляції повітряних ліній.

Узгодження чутливості розроблених пристроїв контролю ізоляції та захисту від однофазних замикань також викликає серйозні труднощі. Сумісне використання цих пристроїв може сприяти виявленню однофазних замикань, які можуть бути небезпечними для людей, і допомагати уникнути ситуацій, коли реле захисту неспроможні спрацювати, навіть маючи високу чутливість. Це може обґрунтувати розгляд можливості підвищення уставки спрацьовування захисту на рівень 0,5...1,0 А.

Розробники систем контролю ізоляції та релейного захисту допускають можливість збільшення напруги несиметрії в мережі до 5 або навіть 10% від фазної напруги ( $U_{нс} \leq 0,1 \cdot U_{\phi}$ ). Втім, важливо зауважити, що режим, в якому  $U_{нс}$  досягає  $0,1 \cdot U_{\phi}$ , не може бути вважений нормальним. Вивчення, проведене в більш ніж 200 мережах різного призначення, показало, що, як правило,  $U_{нс}$  не перевищує  $0,1 \cdot U_{\phi}$ . Зокрема, у мережах напругою 6 і 10 кВ немає суттєвих напруг несиметрії: в кабельних мережах це обумовлено практичною рівністю ємностей фаз до землі, у повітряних мережах — малими відстанями між проводами та відповідно невеликим розривом відстаней між проводами та землею, а в наявності кабельних вставок створюється додатковий

симетричний ефект. У повітряних мережах напругою 35 кВ значення  $U_{\text{нс}}$  трохи вище, ніж у мережах напругою 6 і 10 кВ. Також слід відзначити, що, за рідкісним винятком, напруга несиметрії зазвичай не перевищує  $0,05 \cdot U_{\phi}$ . Причини, які можуть викликати значення  $U_{\text{нс}}$  вищі, ніж вказані, включають значущі порушення симетрії або активної провідності фаз мережі, а також ферорезонансні процеси, пов'язані з наявністю несиметричних токів короткого замикання (НТМІ). Важливо відзначити, що жоден із цих процесів не може бути вважений нормальним режимом, і тривале утримання підвищених значень  $U_{\text{нс}}$  може бути пояснено незадовільним станом технічної експлуатації мережі. Контроль ізоляції в мережах, де відключення лінії при однофазному замиканні не є обов'язковим, виконується за допомогою реле напруги з уставкою спрацьовування на рівні 20-30% номінальної фазної напруги [17-19]. Однак це не завжди дозволяє ефективно виявляти небезпечні пошкодження, такі як обриви та падіння повітряних ліній, замикання через залізобетонні опори у ґрунті, що струснувся, а також інші несприятливі сценарії. До теперішнього часу не було вирішено завдання впровадження пристроїв селективної сигналізації, які могли б ідентифікувати лінію з однофазним пошкодженням. Такі пристрої, за достатньої чутливості, могли б виконувати функції контролю ізоляції, що робить їх селективними пристроями для контролю ізоляції мережі. Такий селективний контроль повинен ефективно працювати при перекидних і сталих замиканнях, включаючи випадки великого опору в місці пошкодження. Нинішні реле сигналізації в основному придатні для режиму повного однофазного замикання, що вказує на відсутність універсального пристрою селективного контролю ізоляції для мереж напругою 6-35 кВ.

## Висновки

Для підвищення рівня безпеки використовують різні методи упередження виникнення однофазних замикань. Серед них — системи неперервного контролю ізоляції, компенсація ємнісних струмів, релейний захист, а також шунтування пошкодженої фази відносно землі. Ефективність роботи усіх цих пристроїв значно залежить від режиму роботи нейтралі. Саме тому виникає потреба в проведенні досліджень, щоб визначити вплив режиму нейтралі на функціонування засобів підвищення безпеки та оптимізувати їх взаємодію.

## РОЗДІЛ 3

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕЖИМУ РОБОТИ НЕЙТРАЛІ

#### 3.1 Вибір критеріїв ефективності режиму роботи нейтралі

Режим нейтралі є важливим фактором, що визначає надійність та безпеку експлуатації розподільних мереж. Проблема оптимізації режиму нейтралі досліджувалася на різних етапах розвитку мереж напругою 6-35 кВ [17-20]. Результати досліджень режимів нейтралі та процесів при однофазних замиканнях, а також пристроїв для компенсації ємнісного струму, представлені в [15]. Однак в опублікованих роботах, включаючи [15], лише частково враховується необхідність комплексного вирішення завдання мінімізації експлуатаційних витрат, яке залежить від режиму нейтралі мережі та використовуваних пристроїв автоматики. Більш повно, але лише для кар'єрних мереж, ці аспекти розглянуті в [20].

У цьому дослідженні оптимізація режиму нейтралі розглядається в контексті вимог до захисту мереж напругою 6-35 кВ від однофазних замикань. Спосіб заземлення нейтралі впливає не лише на умови експлуатації ізоляції мережі, але й на функціонування пристроїв автоматики та релейного захисту. Крім того, він визначає принципи їх побудови (рис. 3.1).

Критерії ефективності режиму нейтралі (рис. 3.2) формулюються на основі аналізу сучасних засобів захисту мереж 6-35 кВ від однофазних замикань. Подана схема відповідає моделі розподільної мережі, враховуючи її основні властивості, що залежать від стану нейтралі.

Для оцінки комплексного показника ефективності (якості) режиму нейтралі використовуються методи кваліметрії [15], за якими властивості об'єкту, тобто розподільної мережі, представлені точкою  $n$  у мірному просторі (де  $n$  - число незалежних показників, які визначають ефективність режиму нейтралі після порівняння об'єктів між собою та з еталоном).



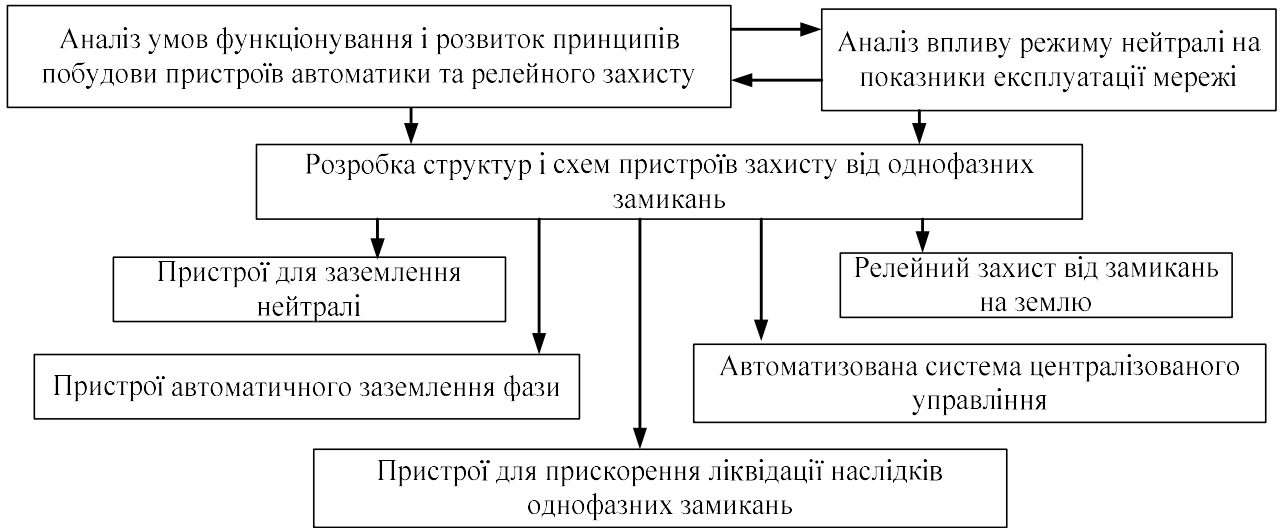


Рисунок 3.1 – Вирішення завдань комплексного захисту мереж напругою 6 - 35 кВ від однофазних замикань

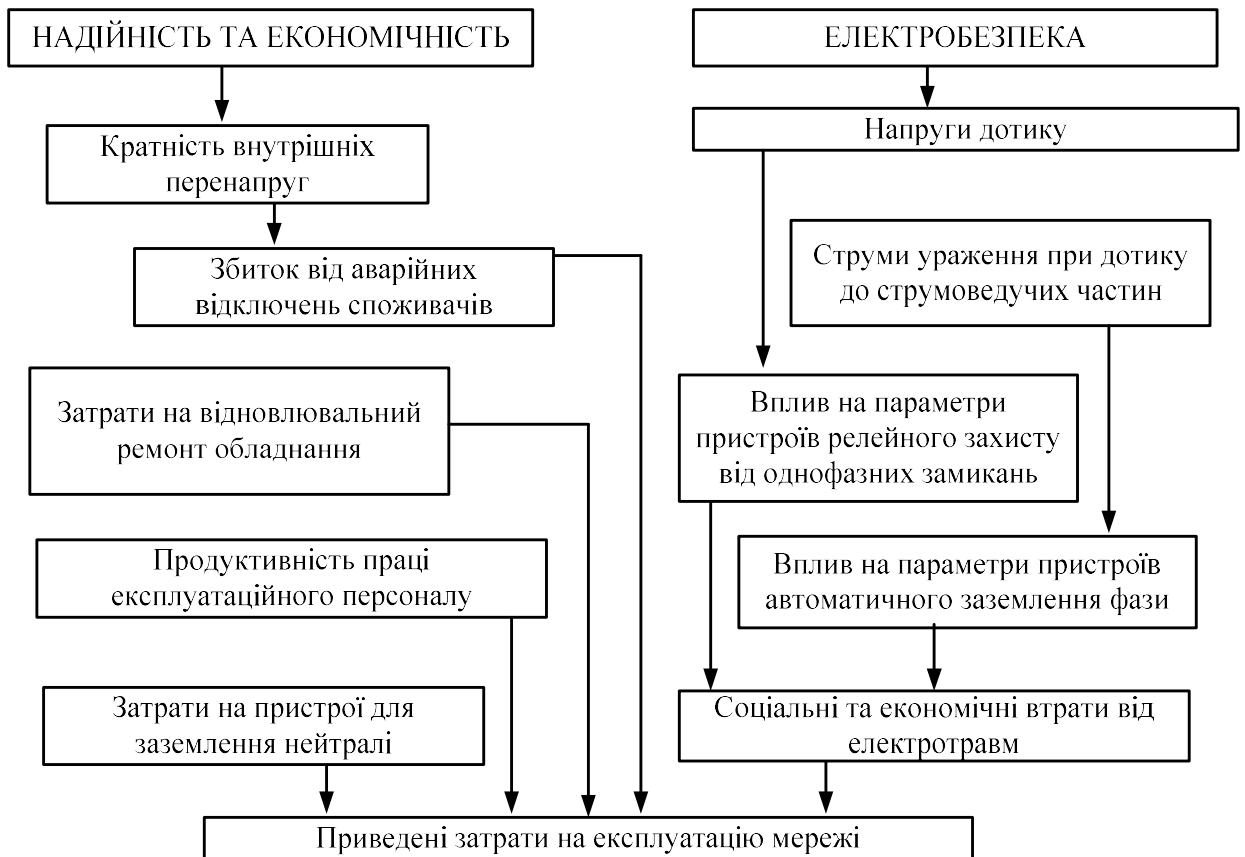


Рисунок 3.2 – Показники ефективності режиму нейтралі

Цільова функція комплексного показника ефективності режиму нейтралі є мірою апроксимації мережі, де використовується певний метод заземлення нейтралі, до еталону – мережі, в якій режим нейтралі забезпечує рівність цільової функції одиниці. Форма цільової функції обирається з урахуванням наступних основних вимог: вона повинна дозволяти чисельно оцінювати весь комплекс критеріальних властивостей мережі; кожен параметр відображається в цільовій функції своєю ваговою характеристикою; показники ефективності вимірюються у відносних одиницях; нормування в інтервалі  $(0;1)$  повинно забезпечувати умову, що цільова функція = 1 в ідеальній мережі.

Для визначення цільової функції  $E_k$  застосована найбільше розповсюджена оцінка - середня арифметична лінійна форма цільової функції

$$E_k = \sum_{i=1}^n V_i \rho_{ik} \quad (3.1)$$

де  $n$  - кількість критеріальних властивостей, які були враховані (незалежні показники ефективності режиму нейтралі);  $k$  - ідентифікатор обраного варіанту режиму роботи нейтралі;  $V_i$  - вагові коефіцієнти показників;  $\rho_{ik} = f_{ik}(y)$  - залежності оцінок ефективності режиму нейтралі від експлуатаційних характеристик мережі і відповідних параметрів.

Склад властивостей мережі для вирішення даного завдання визначається на основі критеріїв ефективності режиму нейтралі, які залежать від наступних факторів: кратності перенапруг при однофазних замиканнях; тривалості існування в мережі однофазного пошкодження, що створює небезпеку ураження через дію напруги дотику; струму однофазного замикання, що визначає напругу дотику; параметрів пристроїв релейного захисту від однофазних замикань (селективність, завадостійкість, кількість відмов); параметрів пристроїв автоматичного заземлення фази, чутливості та швидкодії. Всі зазначені показники визначаються аналітично у відносних

одиницях і використовуються для розрахунків оцінок.

Вагові коефіцієнти для показників ефективності режиму нейтралі були отримані з групових експертних оцінок фахівців, що мають досвід у дослідженні, проектуванні та експлуатації розподільних мереж [23-25].

Відповідно до експертних даних  $W_{j,i}$  шляхом усереднювання відповідних оцінок були обчислені вагові коефіцієнти

$$V_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n W_{j,i} , \quad (3.2)$$

які використані в розрахунках цільової функції  $E_k$ .

Друга група критеріїв ефективності режиму нейтралі дозволяє оцінити заземлювальні витрати на експлуатацію мережі залежно від методу заземлення її нейтралі. До цієї групи входять: збитки від аварійних відключень споживачів при однофазних пошкодженнях мережі; витрати на відновлювальний ремонт обладнання; продуктивність праці експлуатаційного персоналу під час локалізації ділянки лінії з однофазним пошкодженням, що включає витрати на розробку, виготовлення, монтаж та експлуатацію пристроїв для заземлення нейтралі, а також пристроїв релейного захисту від однофазних замикань.

Тому процес вибору оптимального варіанту заземлення нейтралі здійснюється шляхом аналізу набору показників, та приведених затрат на експлуатацію мережі. Завдання вирішується однозначно, у випадку коли по одному з варіантів значення  $E_k$  виявляється вищим, і відповідно  $Z_k$  - менше, ніж у інших варіантах. В тому випадку, коли в двох кращих варіантах  $E_{k1} > E_{k2}$  і  $Z_{k1} > Z_{k2}$  перевага може отримати перший або другий варіант режиму нейтралі, виходячи з конкретних умов експлуатації мережі. Розглянемо ситуацію, коли в мережах з підвищеною небезпекою обслуговування електроустаткування перевага може бути надана варіанту з великим

значенням  $E_k$ . Однак ймовірність великої розбіжності між оцінками ефективності режимів нейтралі за показниками  $E_k$  і  $Z_k$  є мала. Це пояснюється тим, що критеріальні властивості мережі, які враховуються при визначенні цих показників, настільки тісно пов'язані, що якщо  $E_{k1} > E_{k2}$ , то обов'язково  $Z_{k1} < Z_{k2}$ .

### 3.2. Перенапруга при однофазних замиканнях на землю

Група критеріїв ефективності режиму нейтралі другого типу дозволяє оцінити витрати на заземлення при експлуатації мережі, враховуючи конкретний метод заземлення нейтралі. До цієї групи включаються: втрати від аварійних відключень споживачів під час однофазних пошкоджень мережі; витрати на відновлювальний ремонт обладнання; продуктивність праці експлуатаційного персоналу при локалізації ділянки лінії з однофазним пошкодженням, включаючи витрати на розробку, виготовлення, монтаж та експлуатацію пристроїв для заземлення нейтралі, а також пристроїв релейного захисту, що захищають від однофазних замикань.

$$y_{п2} = S_1 / S_2 ; y_{п3} = S_1 / S_3 \quad (3.3)$$

де  $S_1, S_2, S_3$  - відповідно площі під кривими  $P = f(k_{п})$  (рис. 3.3) між ординатами, що проходять через значення  $k_{п1} = 2,4$  і  $k_{п2} = k_{п.макс}$ , де  $P = f(k_{п})$  - графік розподілу кратностей перенапруг на непошкоджених фаз при будь-яких випадках однофазних замикань, при цьому  $k_{п1} = 2,4$  є точкою на вісі  $k_{п}$ , що відповідає перенапругам, безпечним для ізоляції розподільної мережі при середньому рівні експлуатації.  $k_{п.макс}$  представляє максимально можливі перенапруги (згідно з визнаними теоріями, перенапруги практично не перевищують 3,6 в будь-якому режимі роботи нейтралі  $k_{п.макс}$ ). Установлений у такий спосіб показник  $y_n$  управління допустимою перенапругою достатньо

повно визначає ефективність режиму нейтралі, оскільки він враховує лише найбільш небезпечні перенапруги, частота яких розташована за визначеною точкою  $k_{нл}$ .

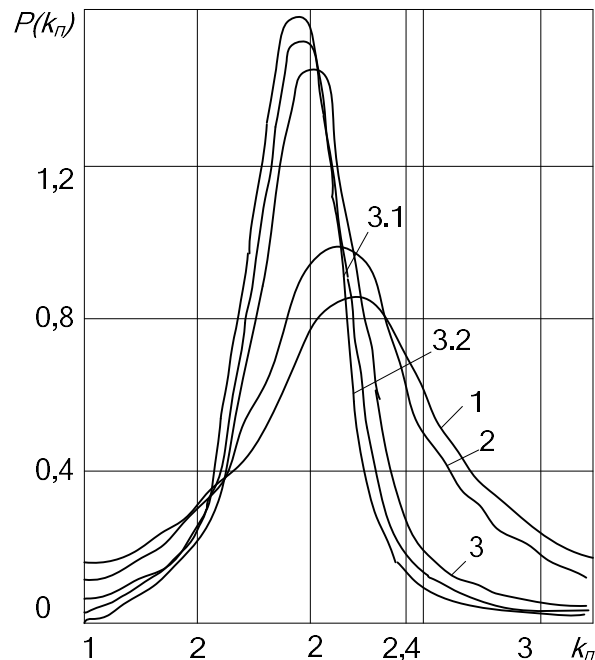


Рисунок 3.3 – Криві розподілу кратностей перенапруг при однофазних замиканнях

Значення  $k_{нл} = 2,4$ , вибір був здійснений на основі експериментів, проведених автором під час випробувань ізоляційних конструкцій мереж, які функціонують при напрузі 10 і 35 кВ (зокрема, ізолятори повітряних ліній що можуть бути класифіковані як штирьові та підвісні, а також можна виділити ділянки кабельних ліній, опорні та спеціальні ізолятори для розподільних пристроїв, комутаційних апаратів та компоненти для ізоляції силових і вимірювальних трансформаторів). У цих експериментах не було виявлено електричних пошкоджень при амплітуді прикладеної напруги нижче значень, що відповідають даній точці  $k_{нл} = 2,4$ . З метою обґрунтування вибору цієї точки взяті до уваги також результати досліджень, опубліковані в [4].

З урахуванням інформації, що була опублікована щодо перенапруг при

однофазних замиканнях, особливо у джерелах [4, 15], а також враховуючи результати вимірювань перенапруг в мережах 6-35 кВ різного призначення, на рис. 3.3 представлені диференціальні криві розподілу кратностей перенапруг. Для нейтралі, яка заземлена через резистор, наведено три графіки: 3.1, який був отриманий на основі деяких досліджень відомих іноземних авторів [19, 20]  $k_1 = I_A/I_C > 2$ ; 3.2, побудована на їх основі результатів та експериментів, проведених співробітниками ЦНІЕЛ "Київенерго" у Київській міській кабельній мережі при  $I_c=50\div 80$  А,  $k_1 = 0,6\div 0,8$ . З іншого боку, залежність 3 отримана під час тривалих вимірювань, проведених автором у сільських мережах за умов  $I_c=4\div 9$  А,  $k_1 = 0,5\div 0,8$ , а також на основі аналізу результатів моделювання перекидних однофазних замикань. Дана залежність, яка виявила найвищі перенапруги при заземленні нейтралі через резистор, взята для подальшого вивчення.

В результаті обробки результатів вимірювань визначено, що нормальний закон розподілу можна використати з метою опису кратності перенапруг

$$P = \frac{k}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} e^{-\frac{(k_n - a)^2}{2\sigma^2}}. \quad (3.4)$$

Таблиця 3.1 – Характеристики розподілу за нормальним законом при різних режимах нейтралі

| Нейтраль мережі              | $\sigma$ | $a$   | $k$   |
|------------------------------|----------|-------|-------|
| (1) Ізольована               | 0,462    | 2,274 | 1,012 |
| (2) Заземлена через реактор  | 0,397    | 2,067 | 1,004 |
| (3) Заземлена через резистор | 0,261    | 1,924 | 1,001 |

Коефіцієнт  $k_n$  у виразі (3.5) забезпечує рівність одиниці площі, що обмежена кривою  $P = f(k_n)$  на проміжку  $1 < k_n < 3,61$ . Значення коефіцієнтів різні для трьох режимів роботи нейтралі, як і математичне очікування ( $a$ ) і

середньоквадратичне відхилення ( $\sigma$ ), вони приведені в таблиці 3.1.

Узагальнені критерії ефективності режиму нейтралі при обмеженні перенапруг визначаються за допомогою виразу

$$y_{n2(3)} = \int_{2,4}^{3,6} f_1(k_n) dk_n \left[ \int_{2,4}^{3,6} f_{2(3)}(k_n) dk_n \right]^{-1}. \quad (3.5)$$

Використання виразу (3.5) для обчислень призвело до наступних результатів:  $y_{n2} = 1,53$ ;  $y_{n3} = 8,2$ . Для визначення оцінок  $\rho_{n1}$ , прийнявши для важчого варіанту рівність оцінки нулю, Використаємо вираз

$$\rho_{n1} = 1 - \frac{1}{y_{n1}}. \quad (3.6)$$

У випадку  $\rho_{n1} = 0$ ;  $\rho_{n2} = 0,351$ ,  $\rho_{n3} = 0,876$ , враховуючи зроблені та обґрунтовані припущення, виявляється, що заземлення нейтралі через високоомний резистор проявляє високу ефективність. У випадку значного обмеження перенапруг, коли ймовірність виникнення кратних значень  $k_n > 2,4$  наближається до значення, яке можна вважати досить невеликим, оцінка  $\rho_n$  прямує до одиниці.

Порівнюючи значення  $\rho_{n2}$  і  $\rho_{n3}$ , слід враховувати, що крива 2 на рис. 3.3 побудована на основі даних, отриманих в мережах із неточною компенсацією ємнісних струмів, яка не перевищувала  $\pm 5\%$ . Однак, як вказано в [4] і підтверджено досвідом експлуатації мереж в реальних умовах, коли неправильна компенсація досягає 10-15% (застосування нерегульованих автоматичних реакторів, несправності реакторів та, зокрема, їх регуляторів і ін.), максимальні перенапруги збільшуються порівняно з значеннями, що визначені кривою 2, що призводить до зменшення в  $\rho_{n2}$ .

Позитивний вплив режиму заземлення нейтралі в розподільній мережі

через резистор на обмеження внутрішніх перенапруг спостерігається не лише при перекидних однофазних замиканнях, але й під час інших процесів, таких як ферорезонансні явища [15]. Це призводить до зменшення кількості однофазних замикань та загального числа пошкоджень в мережах, що прямо пов'язане із витратами експлуатуючих організацій на відновний ремонт устаткування мережі. Зі складових цих витрат можна виділити дві: на відновлення устаткування, що пошкоджено безпосередньо в місці однофазного замикання, та на ремонт у випадку розвитку однофазного замикання у більш складні види пошкоджень, кількість яких залежить від перенапруг при перекидних однофазних замиканнях. Таким чином при врахуванні аналізу викладеного в розділі 1, можна зробити висновок що до показника. Показник  $\rho_{\pi}$  здатен побічно охарактеризувати ефективність режиму роботи нейтралі не лише за умов обмеження перенапруг, але і при зниженні кількості електричних пошкоджень ізоляції, та зумовлених ними витрат пов'язаних з ремонтом устаткування мережі.

### 3.3 Наслідки аварійних вимикань

Суттєва частина збитків від однофазних замикань серед споживачів обумовлена тривалістю аварійних відключень і витратами часу на відновлення мережі та переключення на резервне живлення.

Відповідно до умови зниження збитку  $\rho_y$  показники ефективності режиму роботи нейтралі можна визначити як відношення

$$\rho_{y1} = \frac{t_{y1}}{t_{y1}} = 1; \rho_{y2} = \frac{t_{y1}}{t_{y2}}; \rho_{y3} = \frac{t_{y1}}{t_{y3}} = 1,$$

де  $t_{y1}$  - середній (зважений) час, що відповідає відключенню споживачів з причин, залежних від режиму роботи нейтралі, для мереж з ізольованою нейтраллю;



$t_{y2}$  - аналогічно до попереднього з компенсацією ємнісних струмів однофазних замикань;

$t_{y3}$  - аналогічно до попереднього при заземленні нейтралі через резистор.

Оцінка  $t_y$  проведена на основі аналізу регламентованих експлуатаційних даних по розподільним мережам. До експлуатаційних даних відносять відомості що стосуються пошкодження в міських, сільських, промислових та кар'єрних мережах (позначимо повне число пошкоджень  $n_{\Sigma}$ , а число однофазних замикань як  $n_0$ , з яких  $n_{0k}$  вважаються такими, що перешли за час витрачений на визначення пошкодженої ділянки в короткі замикання та багатомісні пошкодження, число спрацьовувань пристроїв сигналізації і релейного захисту від однофазних замикань, тривалість одиночних відключень пов'язаних з аваріями споживачів при даних режимах роботи нейтралі).

За результатами аналізу [10] очевидно, що ефективність компенсації ємнісних струмів при однофазних замикань (за [5])

$$E_k = 1 - \frac{n_{0k}}{n_0} \quad (3.7)$$

як правило значно перевищує її реальне значення, таке явище є характерним для мереж в яких  $I_c > 100$  А, якщо під  $n_{0k}$  розуміють лише зафіксовані персоналом випадки коли відбувається перехід від однофазних замикань в короткі замикання. Для обчислення  $E_k$  необхідно враховувати всі короткі замикання, за винятком тих, що виникли в результаті механічних пошкоджень (в основному, поривів). Відповідно значення  $E_k$  на рівні 0,1...0,29 буде відображати дійсну ефективність власне компенсації в кабельних мережах при умові  $I_c > 100$  А і 0,3...0,69 - при умові  $I_c < 100$  А лише за показника зниження числа переходів однофазних замикань в короткі замикання, який здатен лише побічно відобразити вплив режиму роботи нейтралі і надійність мережі та

збиток при аварійних відключеннях споживачів.

Взагалі, критерії ефективності режиму нейтралі розглядаються у вигляді збитків

$$\rho_{y2} = \eta_{1-2} \left( \sum_{i=1}^{i=k} n_{0i1} \right)^{-1} \left( \sum_{i=1}^{i=m} t_{yi2} \cdot n_{0i2} \right)^{-1} \left( \sum_{i=1}^{i=k} t_{yi1} \cdot n_{0i1} \right) \sum_{i=1}^{i=m} n_{0i2};$$

$$\rho_{y3} = \rho_{y2} \eta_{1-3} \eta_{1-2}^{-1} (1 - a_{p2}) (1 - a_{p3})^{-1}, \quad (3.8)$$

де  $\eta_{1-2}$ ,  $\eta_{1-3}$  - при переході від ізольованої нейтралі до заземленої через реактор і резистор відбувається відносно зменшення кількості пошкоджень;

$t_{yi1}$ ,  $t_{yi2}$  - час одного аварійного відключення споживачів в мережі залежить від типу нейтралі - ізольованої чи заземленої через реактор;

$n_{0i1}$ ,  $n_{0i2}$  - кількість однофазних замикань в мережі при однакових режимах нейтралі;

$a_{p2}$ ,  $a_{p3}$  - індикатори селективності сигналізаційного реле в мережі з заземленою нейтраллю через реактор і резистор.

Показник селективності для реле сигналізації в міській мережі, який складається з  $k$  ділянок,

$$a_p = \left( \sum_{i=1}^{i=k} n_{pi} \right)^{-1} \sum_{i=1}^{i=k} (n_{ci}/n_{0i}) n_{pi} \quad (3.9)$$

де  $n_{ci}$  - кількість селективних спрацьовувань реле;

$n_{pi}$  - кількість встановлених на ділянці  $k$  мережі реле сигналізації.

Враховуючи цю інформацію, критерії ефективності режиму нейтралі при умові зменшення збитків від аварійних відключень споживачів  $\rho_{y2} = 1,2$ ;  $\rho_{y3} = 9,7$ .

Такі значущі переваги заземлення нейтралі мережі через резистор виявляються не лише в зменшенні кількості пошкоджень мережі та

поліпшенні умов роботи пристроїв селективної сигналізації при однофазних замиканнях. Це також визначається високим рівнем резервування живлення споживачів. Багато підстанцій 10/0,4 кВ у міських мережах підприємств Мінпаливенерго мають не менше двох живлячих ліній до 9056. В таких умовах головним завданням експлуатаційного персоналу є скорочення часу визначення пошкодженої ділянки лінії 10 кВ. Цього досягається за допомогою використання резисторів в нейтралі мережі, пристроїв релейного захисту та автоматики, які активуються при однофазних замиканнях, або застосування реакторів з паралельними резисторами, які включаються на короткий час для створення оптимальних умов для функціонування пристроїв селективної сигналізації, якщо такий комбінований режим нейтралі визнано техніко-економічно обґрунтованим для конкретної мережі.

#### 3.4 Напруга дотику та кроку при однофазних замиканнях на землю

Струм однофазного замикання, який визначає напругу дотику, прямо залежить від режиму нейтралі мережі, а тривалість такої аварійної ситуації залежить від функціональних характеристик використовуваних пристроїв автоматики. В ізольованих мережах (наприклад, сільські) припускається, що умови електробезпеки за напругою дотику забезпечуються в більшості випадків однофазних замикань, але це припущення не завжди вірне. У розподільних мережах багато однофазних замикань виникають при обривах та падіннях проводів повітряних ліній через залізобетонні опори з ґрунтом, іноді співпадаючи з порушеннями цілісності заземлюючого пристрою. Напруга дотику може бути небезпечною при тривалих перекидних однофазних замиканнях. Застосування заземлюючих реакторів у мережах може зменшити напругу дотику, але не завжди ефективно в усіх ситуаціях. Результати вимірювань напруги на заземлювачах опор вказують на можливість перевищення небезпечних значень, особливо в умовах, коли активна складова струму однофазного замикання перевищує ємнісну. У таких умовах навіть резонансно налаштовані реактори не завжди забезпечують ефективно

обмеження напруги дотику, що може становити ризик для людей.

Найбільш ризиковими ситуаціями є ті, коли через вказані причини опір заземлювача опори настільки збільшується, що напруга на ньому піднімається до значення, близького до фазної напруги. У таких випадках системи контролю ізоляції можуть не реагувати на такі замикання. У міських розподільних мережах деякі ділянки повітряних ліній досі мають ємнісні струми однофазних замикань на порядок вище, ніж у сільських мережах. Замикання через залізобетонні опори в цих умовах становлять велику загрозу, оскільки компенсація ємнісних струмів ускладнює протікання активних струмів та вищих гармонійних складових через місце пошкодження.

Таблиця 3.2 – Напруги дотику на заземлювачах опор

| Підстанція | Опори заземлювачів, Ом |     |     |     |
|------------|------------------------|-----|-----|-----|
|            | 10                     | 15  | 20  | 30  |
| 1          | -                      | -   | 267 | 403 |
| 2          | 187                    | -   | -   | -   |
| 3          | 148                    | 223 | 297 | 448 |
| 4          | 141                    | 212 | -   | -   |
| 5          | 101                    | 152 | 203 | -   |
| 6          | -                      | -   | 427 | 643 |
| 7          | 85                     | 128 | 173 | -   |

Неефективна компенсація ємнісних струмів при однофазному короткому замиканні в разі обриву або падіння повітряних проводів, випадків дотику до них людей як в сільських, так і в міських мережах. Його використання, навпаки, не виключає тривалої присутності в мережі однофазних ланцюгів, але збільшує ймовірність виникнення небезпечних контактних напруг.

Порівняння впливу режиму нейтральної мережі на ступінь небезпеки контакту людини з заземлюючою частиною електроустановки, в якій сталося пошкодження однофазної ізоляції, може бути проведено за показниками, що характеризують співвідношення тривалості і величини струму однофазного замикання.

Загалом оцінка  $\rho_{HI}$  ефективності режиму роботи нейтралі при обмеженні тривалості функціонування мережі в аварійному режимі однофазного замикання визначається виразом

$$\rho_{HI} = 1 - y_{HI}^{-1} \quad (3.10)$$

де  $y_{HI} = t_{\max}/t_p$ ;

$t_{\max}$  - середнє арифметичне часу існування однофазного замикання в мережі з режимом роботи нейтралі, при значенні данного часу максимальне;

$t_p$  - середнє арифметичне часу існування однофазного замикання в мережах при двох інших варіантах заземлення нейтралі.

З метою визначення  $t_{\max}$  і  $t_p$  варто скористатися статистичними даними для мереж різного призначення при різних режимах роботи нейтралі, для побудови емпіричних розподілів тривалості існування однофазних замикань за фіксований проміжок часу, наприклад за рік. Ці розрахунки, проведені за даними міських мереж 10 кВ одного з підприємств "Вінницяобленерго", показали, що для цієї категорії розподільних мереж  $t_{cp1} = 0,26$  год;  $t_{cp1} = 0,61$  год;  $t_{cp1} = 0,002$  год що відповідає гіршим за показником  $y_H$  при заземленні нейтралі через реактор, за умови  $\rho_{H2} = 0$  в такому випадку  $y_{H1} = 2,35$ ;  $y_{H3} = 3,05$ , і  $\rho_{H1} = 0,57$ ;  $\rho_{H3} \approx 1$ , Ці значення оцінок  $\rho_{H1}$  можна спостерігати і в інших мережах, причому значення  $\rho_{H3}$  практично завжди є близькими до одиниці.

За такими ж принципами визначаються оцінки ефективності режиму роботи нейтралі, який залежить від струму однофазного замикання. На підставі емпіричних розподілів струмів замикань для кожної категорії мереж 6-35 кВ визначаються середні арифметичні значення струмів  $I_{з.ср1}$ . Для описаних вище міських мереж (згаданих вище)  $I_{з.ср1} = 58$  А,  $I_{з.ср2} = 9,7$  А,  $I_{з.ср3} = 70$  А (достатньо високе значення  $I_{з.ср2}$  при налаштуванні реакторів, що

наближається до резонансної, пояснюється присутністю в струмі однофазного замикання вищих гармонійних складових). Відповідно

$$\rho_{\tau I} = 1 - y_{\tau I}^{-1} \quad (3.11)$$

де  $y_{\tau I} = I_{з\text{ ср.мах}} / I_{з\text{ ср.р}}$ ; тоді  $\rho_{\tau 1} = 0,17$ ;  $\rho_{\tau 2} = 0,86$  за  $\rho_{\tau 3} = 0$ .

Виходячи з співставлення оцінок  $\rho_{HI}$  і  $\rho_{\tau I}$ , режими роботи нейтралі спричиняють кординально протилежний вплив на умови при яких експлуатуються мережі за показниками небезпеки дії напруги дотику, цей фактор підтверджує правильність висновків що до доцільності використання на завершальному етапі розрахунку ефективності режиму роботи нейтралі комплексного показника.

### 3.5 Підвищення безпеки експлуатації розподільних мереж шляхом застосування захисного вимикання

В стаціонарних електроустановках з напругою 6-10 кВ використання захисного відключення при однофазних замиканнях (ОЗЗ) відсутнє. Час, необхідний для виявлення місця пошкодження та переключення споживачів на резервне живлення, може тривати кілька годин, що протягом цього часу може призвести до виникнення пожеж. Статистичні дані з експлуатації електроустановок підтверджують, що основними факторами для виникнення пожеж є дугові ОЗЗ в кабелях та замикання через невідповідні конструктивні елементи мережі, такі як дерев'яні траверси та опори ПЛ, мастика муфт і т.д.

Для кабелів пожежна безпека характеризується двома основними властивостями їх ізоляції: горючість кабелю та здатність до самостійного горіння після припинення дії зовнішнього джерела тепла. Прогорання зовнішньої броні кабелів при дугових ОЗЗ становить серйозну загрозу, оскільки це може спричинити займання предметів, що знаходяться поблизу кабелю, внаслідок іскор, що виникають від розжарених частинок металу та горячої ізоляції.

Допустиме значення теплової потужності захисного відключення за даними ІГД ім. А. А. Скочинського становить 70-80 Вт при тривалості горіння дуги  $t_d=0,3$  с та 3000-4000 Вт при  $t_d=0,1$  с. У випадку відсутності захисного вимкнення тривалість горіння дуги в кабелі може сягати 1-1,5 хвилин, а значення теплової потужності в цей час в декілька разів перевищує допустиме значення. Це робить практично всі кабелі загальнопромислового призначення горючими при дугових ОЗЗ що мають струмами замикання більше 3 А. Здатність до подовженого горіння після припинення дії дуги залежить від теплотворчої здатності матеріалів кабеля, конструкції та умов прокладки.

При дугових ОЗЗ через опір траверси стійки дерев'яної опори може відбутися загоряння дерев'яних елементів конструкції при струмах замикання порядку 50-100 мА, як показали дослідження Державного Макіївського науково-дослідного інституту присвячені безпеці робіт в гірничій промисловості. Пожежобезпека розжарених частинок металу при короткому замиканні в електричних проводах також була предметом численних досліджень, під час яких було встановлено, що займання горючих матеріалів може відбутися на відстані до 3-5 м від місця виникнення короткого замикання, де виникають іскри.

Дослідження у Вост НІІ вказують, в броньованих кабелях, що мають клас напруги 6 кВ час наскрізного прогорання алюмінієвої чи свинцевої оболонки і сталевій броні за умов дії струмів замикання від 3 до 20 А не перевищує 3-4 с. Також було показано, що застосування захисного шунтування місць ОЗЗ дозволяє погасити дугу в місці пробією за час, коли тепла потужність не перевищує безпечне значення. Таким чином, застосування шунтування дугових ОЗЗ в кабелях може знизити ризик пожежі та підвищити їхню пожежобезпеку.

3.6 Ефективність роботи засобів релейного захисту від однофазних замикань при різних режимах роботи нейтралі

Режим роботи нейтралі в мережах що мають малі струмами однофазних замикань мають значний вплив на наступні параметри релейного захисту (сигналізації) від замикань на землю, як число відмов, завадостійкість і селективність, що з рештою впливає на електробезпеку та надійність експлуатації розподільних мереж.

В нинішній час можливості елементної бази аж до рівня мікропроцесорної техніки дозволяють створювати пристрої релейного захисту, що залишаються працездатними в будь-якому режимі нейтралі. Проте при проектуванні таких пристроїв необхідно враховувати умови їх експлуатації, такі як температура, вологість, промислові забруднення навколишнього середовища, вплив таких процесів, що не пов'язані з однофазними замиканнями, та кваліфікацію обслуговування персоналу. Додатково, важливо враховувати умови нейтралізації, такі як ізольована нейтраль або компенсація ємнісних струмів однофазних замикань, оскільки це може впливати на надійність роботи пристроїв.

Заземлення нейтралі розподільної мережі через високоомний резистор може ефективно знизити перенапруги при однофазних замиканнях, уникнути подвійних замикань на землю і обмежити інші внутрішні перенапруги. Це також стабілізує горіння дуги в місці пошкодження та усуває ферорезонансні процеси. Зазначені позитивні аспекти можуть бути враховані при розробці пристроїв релейного захисту, що дозволяє застосовувати новий підхід до визначення їх головних параметрів.

Активний струм однофазного замикання дозволяє підвищити чутливість релейного захисту, не зменшуючи його надійність. Роботоздатність пристроїв захисту з таким заземленням нейтралі гарантується при уставці спрацьовування 0,5-1 А, а умови безпеки при однофазних пошкодженнях - в діапазоні струмів 0,1-1 А, можна забезпечити застосуванням селективного контролю ізоляції мережі.

Важливий параметр пристроїв релейного захисту - витримка часу спрацьовування під час однофазних замикань. Досвід отриманий при



експлуатації кар'єрних мереж, що мають заземлення нейтралі через резистор підтверджує вивід про виключення в таких мережах подвійних замикань на землю і доцільність використання простих захистів з метою забезпечення селективного вимкнення однофазних замикань вимикачами відпаєчних приєднань осередків з витримкою часу до 0,5 с. При цьому можна збільшити витримку часу спрацьовування неселективного ступеня захисту до 1 с.

Такий підхід може бути реалізований без погіршення умов безпеки, сприяє підвищенню чутливості релейного захисту та ефективно контролює однофазні замикання.

Тоді у гіршому випадку струм через людину, яка доторкнулася до заземленої частини пошкодженого устаткування, не перевищить 65 мВ [9],

$$I_h = R_h^{-1} I_s R_s = R_h^{-1} R_s (I_C^2 + I_A^2)^{0.5} \quad (3.12)$$

У випадку, коли  $I_C = 10$  А,  $I_A = 4$  А,  $R_s = 4$  Ом (опір заземлювача),  $R_h = 700 \div 1000$  Ом  $I_h < 65$  мА.

За реалізації заземлення нейтралі мережі за допомогою високоомного резистора останнє призводить до суттєвого обмеження кількості та тривалості аварійних ситуацій. У таких випадках не лише різко погіршуються умови безпеки, а й створюються передумови для неправильних дій експлуатаційного персоналу. Операції перемикання, тісно пов'язані з визначенням та відключенням пошкодженої ділянки лінії, вносять підвищену небезпеку через суб'єктивні фактори та особливості поведінки людини в складних ситуаціях (збільшується ймовірність виникнення вражень від електричного струму, опіків та інших травм через можливі помилкові дії персоналу).

Таким чином, зменшення кількості та тривалості аварійних режимів шляхом забезпечення коректної роботи пристроїв релейного захисту від однофазних замикань є важливим напрямком для поліпшення умов електробезпеки в розподільних мережах.

Показник ефективності режиму нейтралізації, оцінений впливом на параметри для пристроїв захисту від однофазних замикань, буде визначений як відношення кількості селективних спрацьовувань до загальної кількості випадків їхнього неправильного функціонування. Досвід експлуатації пристроїв релейної захисту в мережах 6 кВ Іршинського гірничо-збагачувального комбінату свідчить про те що для ізольованої нейтралі  $y_{3I} = 1,35$ , тоді як для нейтралі, що заземлена через резистор,  $y_{33} = 19,5$ . За виразом

$$\rho_{3I} = 1 - y_{3I}^{-1} \quad (3.13)$$

Будемо мати  $\rho_{3I} = 0,25$ ;  $\rho_{33} = 0,95$ .

Відповідні розрахунки для міських мереж напругою 10 кВ дали такі значення оцінок:  $\rho_{3I} = 0,67$ ;  $\rho_{33} = 0,96$ .

### 3.7 Ефективність роботи засобів заземлення нейтралі

Із усієї множини заходів, що використовують для захисту мереж від однофазних замикань, основною увагою слід приділяти пристроям, що призначені для заземлення нейтралі. Як показано у попередньому матеріалі, завдання значного підвищення техніко-економічних характеристик експлуатації розподільних мереж можна вирішити, заземлюючи нейтраль через високоомний резистор та застосовуючи відповідні пристрої автоматики.

Основні вимоги при виборі типу резистора та його схеми включення включають економічність, простоту підключення до нейтралі, зручність експлуатації, а також надійність у нормальному режимі при номінальному навантаженні та тривалому перевантаженні протягом не менше 10 секунд [24].

З урахуванням цих вимог найбільш вигідною є схема, де високоомний резистор прямо підключається до нульової точки силового трансформатора мережі. Проте це можливо лише в мережах напругою 35 кВ, де обмотки

живлячих трансформаторів, як правило, з'єднані в зірку з виведенням нейтральної точки. У мережах напругою 10 (6) кВ обмотки силових трансформаторів, як правило, сполучені в трикутник. Тому в мережах 10 (6) кВ можлива схема, в якій резистор (наприклад, бетелевий) підключається до нульової точки трансформатора для внутрішнього використання, що передбачається на кожній підстанції.

Схеми та конструкції пристроїв резисторів, що використовуються для заземлення нейтралі електричних мереж різного призначення, практично, однакові, за винятком типу та характеристик самих резисторів, а також параметрів інших елементів схеми. Науково-виробниче об'єднання "Енерготехпром" розробило конструкцію та виготовило прототипи високоомних резисторів різної напругової категорії (6-35 кВ), які, за їхніми енергетичними характеристиками, можуть витримувати вплив повної фазної напруги протягом тривалого часу що не перевищує 20 секунд.

В якості базового варіанту схеми пристрою що здійснює заземлення нейтралі розподільної мережі представлено на рис. 3.3. Резистор  $R_n$  приєднаний до нейтральної точки обмотки високої напруги трансформатора власних потреб власне підстанції через запобіжник РЦ, через зустрічно-паралельні діоди  $VD_1$ ,  $VD_2$  здійснене з'єднання запобіжника із заземлюючим пристроєм. З діодів знімається напруга прямого падіння і використовується для контролю цілісності самого запобіжника FU. Здійснення контролю (візуального при огляді устаткування експлуатаційним персоналом підстанції) реалізує пристрій, що має діод  $VD_3$ , прилад (мікроамперметр) РА та конденсатор С і резистор R. З метою ефективного функціонування схеми необхідно здійснити узгодження прямих падінь напруги  $\Delta U_{пр}$  для усіх діодів, це досягається використанням в якості діода  $VD_1$ , і  $VD_2$  діодів з кремнію ( $\Delta U_{пр} = 0,5 \div 0,7$  В), а  $VD_3$  - діода з германію ( $\Delta U_{пр} = 0,2 \div 0,3$  В). Резистор  $R_n$  реагує на напругу природної несиметрії мережі, що можливо тільки при справному запобіжнику FU.

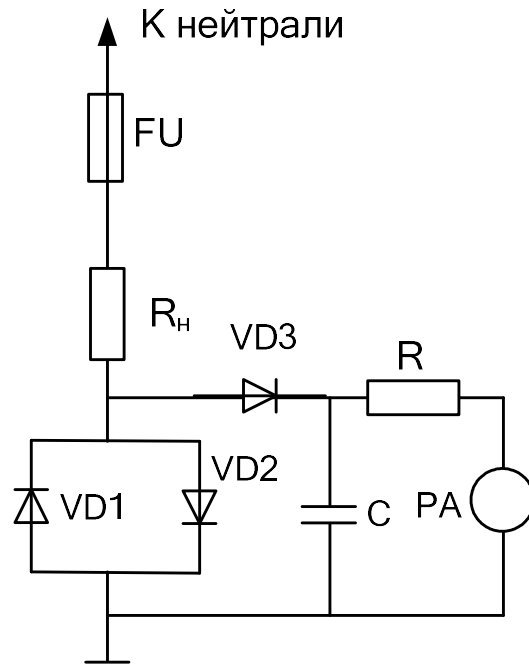


Рисунок 3.3 – Основна конфігурація схеми для влаштування заземлення нейтралі в електричних мережах

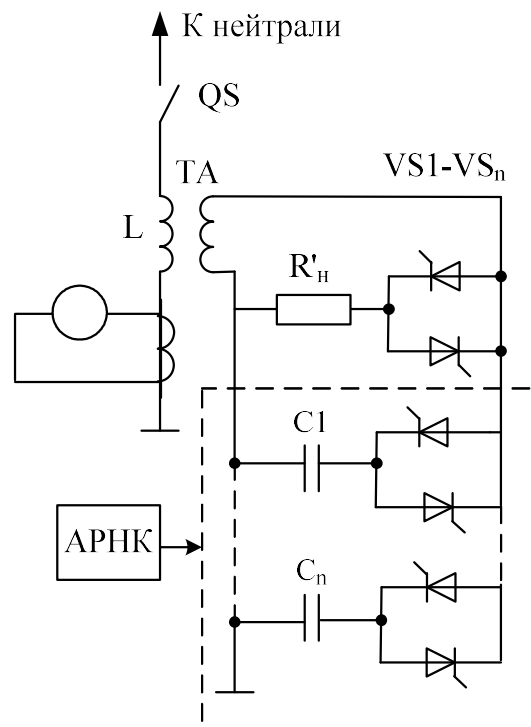


Рисунок 3.4 – Схема пристрою для заземлення нейтралі, включаючи ємнісний регулятор струму компенсації та низьковольтний резистор

У мережах напругою 10 (6) кВ, особливо в сільських районах, де

можливе тривале існування періодичних однофазних замикань, розглядається використання пристроїв [15], що генерують додатковий активний струм лише у випадку виникнення замикання. Це досягається за допомогою блоку управління, який може визначати режими однофазних замикань як в перехідних, так і в сталих процесах.

При розгляді принципів побудови пристроїв для компенсації ємнісних струмів важливо враховувати їхню техніко-економічну доцільність застосування та особливості пошкоджень в розподільних мережах. Кабельні лінії, як вже було зазначено, мають значно меншу ймовірність відновлення електричної міцності твердої ізоляції порівняно з повітряними лініями. Тривала дія короткочасних замикань може негативно впливати на ізоляцію мережі, підкреслюючи важливість виводу про вигоду в істотному скороченні часу переходу імпульсних замикань в сталий режим і виявленні пошкодженої ділянки мережі. Таким чином, нові комбіновані пристрої для компенсації ємнісних струмів повинні сприяти зменшенню часу впливу на ізоляцію імпульсних однофазних замикань, а також створенню умов для надійного функціонування простих реле селективної сигналізації. Ці реле встановлюються не лише в розподільних пристроях живлячої підстанції, вони встановлюються і в розподільних пунктах підстанцій, наприклад, для живлячої мережі 10/0,4 кВ.

Згідно з положеннями Правил технічної експлуатації електричних станцій і мереж, визначаються умови експлуатації компенсуючих пристроїв. Зокрема, вказується на nereкомендований режим недокомпенсації ємнісного струму однофазних замикань через можливість виникнення значної напруги несиметрії, що може виникнути у зв'язку, наприклад, з неповнофазним режимом. Це може призвести до збільшення напруги зсуву до значень, перевищуючи допустимі тривалі стандартні значення. Цей факт підтверджується на підставі досвіду експлуатації реакторів типу ЗРОМ. Також слід зазначити, що аналогічне збільшення напруги зсуву нейтралі може відбутися при використанні реакторів, які регулюють індуктивність у

плавному режимі.

Дійсно, з'являється внаслідок підтікання струму  $I$  з'являється напруга  $U_{\text{см}}$ , що відповідає значенню напруги на індуктивному опорі реактора  $X_L$  (який підключений послідовно з ємнісним опором мережі, що дорівнює  $X_c$  до джерела напруги  $U_{\text{нс}}$ ), визначається за виразом послідовному колі що розглядається з урахуванням того, що  $X_L \gg R_L$

$$U_{\text{см}} = \frac{U_{\text{нс}} X_L}{\sqrt{R^2 + [X_L - X_c^{-1}]^2}}; \quad I = \frac{U_{\text{см}}}{X_L} = \frac{U_{\text{нс}}}{\sqrt{R^2 + [X_L - (X_c)^{-1}]^2}} \quad (3.14)$$

де  $X_L = \omega L$ ;  $X_c = \omega C$

Активний опір є показником активних втрат у реакторі та залежить, зокрема, від активної провідності ізоляції усіх трьох фаз мережі. Перша складова активного опору зазнає змін при перемиканні відгалужень обмотки реактора в коротких межах, тоді як друга компонента істотно змінюється лише в повітряних мережах, а в кабельних мережах залишається стабільною і, як правило, не призводить до значного збільшення опору  $R$ .

Тому може спостерігатися підвищення  $U_{\text{см}}$  до  $20 U_{\text{нс}}$  і навіть більше, оскільки при резонансному налаштуванню  $U_{\text{см}} = U_{\text{нс}} X_L / R$ .

Один із можливих способів підвищення ефективності використання реакторів типу ЗРОМ представлений на рис. 3.4. Для втілення цієї схеми необхідно доповнити реактор низьковольтною обмоткою, до якої, за допомогою відповідних перемикачів тиристорів, підключається п конденсаторів (наприклад, три конденсатори зі співвідношенням їх ємностей 1:2:4). Якщо прийняти первинний струм компенсації рівним меншому ступеню...  $I_{\text{с1}}/k_{\text{тр}} = 3 \text{ А}$  ( $k_{\text{тр}}$  - коефіцієнт трансформації модернізованого реактора), тоді в залежності від стану тиристорних перемикачів стає можливим дискретно регулювати струм компенсації в межах 50 - 29 А зі ступенем 3 А.

Також до вторинної обмотки реактора через власний перемикач тиристора підключено резистор  $R_n'$ .

У випадку включення в нейтраль мережі цього пристрою струм компенсації визначається за виразом

$$I_k = I_L - k_{тр}^{-1} I_c', \quad (3.15)$$

де  $I_L, I_c'$  - відповідно індуктивний струм реактора та ємнісний струм вторинної обмотки, що залежить від з'єднання включених конденсаторів С1, С2, С3.

Струм компенсуючого пристрою в режимі включення  $R_n'$

$$I_k = \sqrt{\left(k_{тр}^{-1} I_A'\right)^2 + \left(I_L - k_{тр}^{-1} I_c'\right)^2}. \quad (3.16)$$

Струм при повному однофазному замиканні

$$I_3 = \sqrt{\left(k_{тр}^{-1} I_A'\right)^2 + \left(I_L - k_{тр}^{-1} I_c' - I_c\right)^2}. \quad (3.17)$$

В свою чергу струм нульової послідовності для лінії з пошкодженням

$$3I_{оп} = \sqrt{\left(k_{тр}^{-1} I_A'\right)^2 + \left(I_L - k_{тр}^{-1} I_c' - I_c - I_{с.п}\right)^2}; \quad (3.18)$$

де  $I_{с.п}$  - власний ємнісний струм пошкодженої лінії;  $I_c$  - ємнісний струм повного однофазного замикання;  $I_A'$  - струм через резистор  $R_n'$ .

При значенні  $I_A'$  якому відповідає умова  $3I_{оп} \geq 2 \cdot 3I_{о. неп. макс.}$  ( $I_{о. неп. макс.}$  - струм нульової послідовності для непошкодженої лінії що має найбільшу власну ємність), забезпечує гарантовану роботоздатність простих пристроїв

сигналізації.

На рисунку 3.5 наведено схему підключення реактора ЗРОМ-300/10, який оснащений приводом перемикача (наприклад, рухомим за пропозицією Інституту електродинаміки Академії наук України) і автоматичним регулятором налаштування компенсації (АРНК). Паралельно з реактором підключений резистор  $R_n$ , який комутується високовольтним контактором QF (наприклад, вакуумним). Цю схему можна ефективно використовувати в мережах, в яких вже застосовується компенсація ємнісних струмів, і можна розглядати як перехідний варіант до високоомного заземлення нейтралі з установкою реле захисту від однофазних замикань.

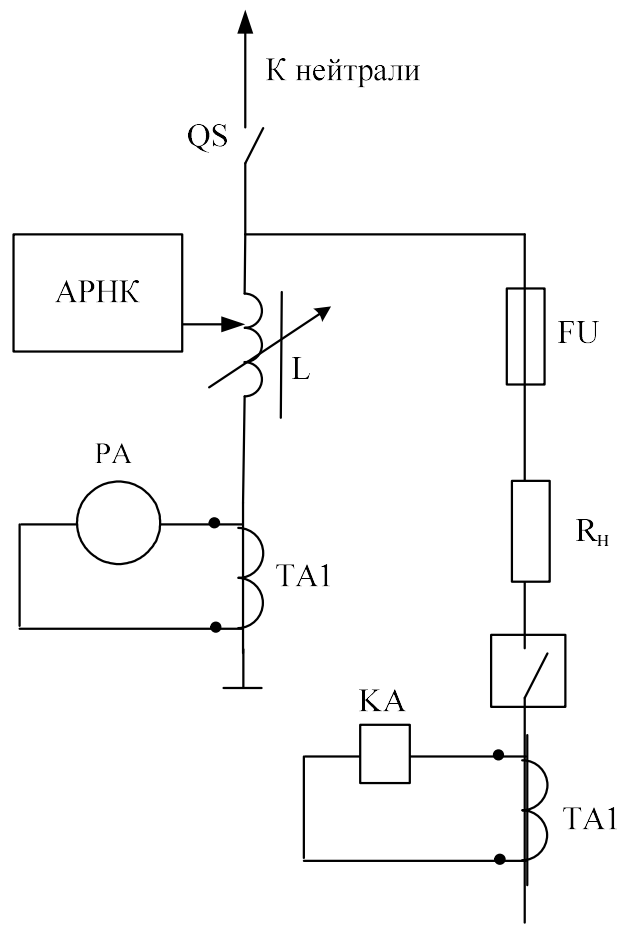


Рисунок 3.5 – Система заземлення нейтралі, що базується на використанні реактора ЗРОМ 300/10 та високовольтного резистора



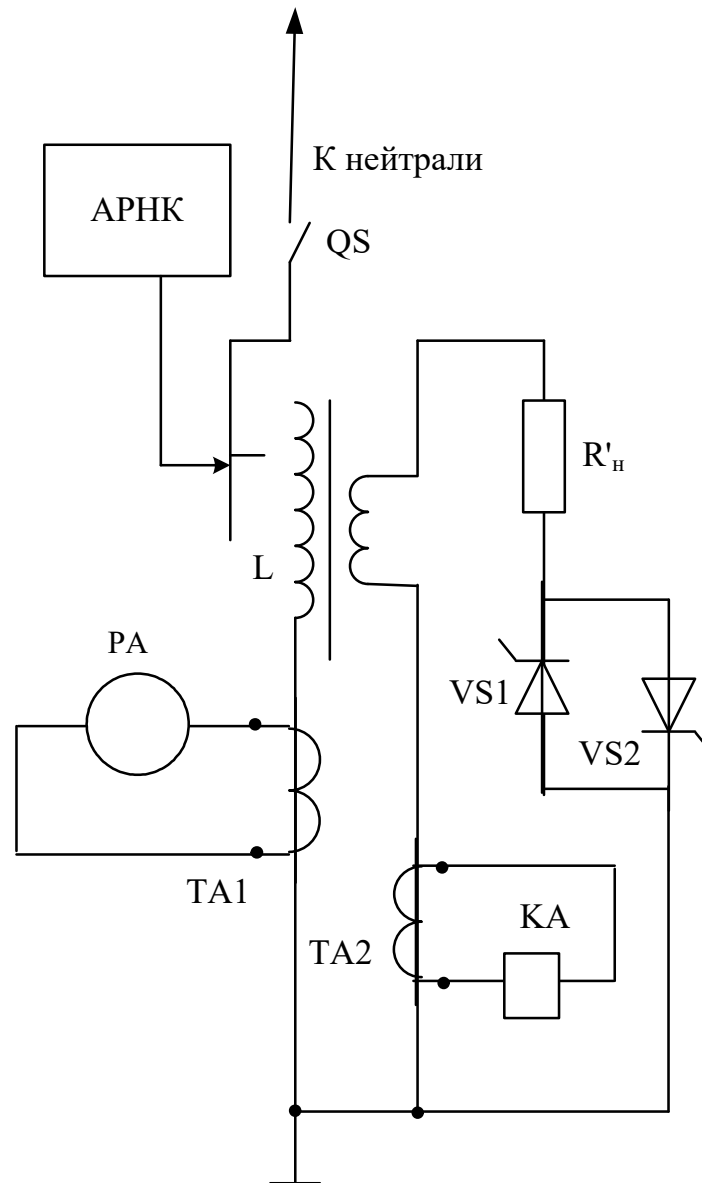


Рисунок 3.6 – Конфігурація пристрою для ефективного заземлення нейтралі з поетапним регулюванням струму компенсації та використанням низьковольтного резистора

Використання пристроїв компенсації для мереж де їх використання буде економічно обґрунтованим у майбутньому, рекомендується розпочати виробництво удосконалених реакторів, як показано на рис. 16. У цих реакторах зміна індуктивного опору виконується шляхом перемикання відгалужень високовольтної обмотки перед однофазним замиканням. Завдяки короткочасному включенню резистора  $R'_n$  вторинна обмотка реактора може бути виконана провідником з тим же перетином, що і первинна. У цьому

випадку можна використовувати частину високовольтної обмотки реактора замість окремої вторинної обмотки для генерації додаткового активного струму.

Порядок включення та відключення тиристорного комутатора в ланцюзі резистора  $R_n'$  (див. рис. 3.4) або вакуумного контактора Q1 (див. рис. 3.5) повинен відповідати вимозі максимальної ефективності використання пристрою для компенсації ємнісних струмів при однофазних замиканнях. Це передбачає забезпечення працездатності автоматичного регулятора настройки компенсації (АРНК), запобігання небезпечній напрузі зсуву нейтралі, сприяння прискоренню переходу імпульсних однофазних замикань в сталі, а також необмежене гасіння відкритої дуги на поверхні ізолятора або в аналогічних умовах. Послідовність комутації резистора може бути такою: в режимі до виникнення однофазного замикання контактор постійно увімкнений, з періодичним його вимиканням для роботи АРНК; при однофазному замиканні контактор вимикається протягом не більше 10 мс, і через 5 с знову вмикається на 3-5 с.

Це забезпечує виконання таких вимог до пристроїв для компенсації ємнісних струмів при однофазних замиканнях:

1. Реактори повинні бути здатні автоматично регулювати струм компенсації перед виникненням однофазного замикання.

2. Необхідно приймати заходи для запобігання виникненню небезпечної напруги зсуву нейтралі та скороченню тривалості існування імпульсних однофазних замикань в аварійних несиметричних режимах.

3. Функціонування реле сигналізації пошкодженої ділянки мережі повинно бути забезпечено при однофазних замиканнях, і ці реле можна успішно використовувати разом із засобами відключення пошкоджених повітряних ліній при обривах їх проводів.

Застосування компенсації ємнісних струмів однофазних замикань має сенс, якщо залишковий струм замикання, включаючи активні та вищі гармонійні складові, не перевищує значення 10 А в мережах із повітряними

лініями та залізобетонними опорами, і 20 А для кабельних мережах напругою 6 і 10 кВ, при ускладненій автоматизації процесу виявлення пошкоджених ділянок.

Використання активно-індуктивних пристроїв для заземлення нейтралі є доцільним у мережах, де емісія ємнісних струмів однофазних замикань може перевищити 10 А, з урахуванням підвищеної небезпеки експлуатації електроустановок.

Для аналізу процесу замикання у випадку контакту людини з струмоведучою частиною електроустановки будемо використовувати вираз для повного струму в місці замикання при аперіодичній зміні вільного струму

$$I_3 = ne^{p_1 t} + (k - n)e^{p_2 t} + I_{3.п}; \quad (3.19)$$

де  $I_{3.п}$  - миттєве значення сталого струму, причому  $I_{3.п} = 2^{0.5} I_3 \sin(\omega t + \psi_1)$ ,

$$\text{де } I_3 = U_\phi / (R_\pi^2 + X_\pi^2)^{0.5}, \text{ а } R_\pi = R_3 + R X_c^2 (R_\Sigma^2 + (X_k - X_c)^2)^{-1},$$

$$X_\pi = -X_c (X_k^2 - X_k X_c + R_\Sigma^2) (R_\Sigma^2 + (X_k - X_c)^2)^{-1},$$

$$\psi_1 = \psi - \varphi, \quad \varphi = \arctg(X_\pi R_\pi^{-1}), \quad p_{1,2} = -0,5a \pm \sqrt{0,25a^2 - b},$$

$$a = (R_3 R_\Sigma C)^{-1} (L + R_3 R_\Sigma C), \quad b = (R_3 R_\Sigma C)^{-1} (R_3 + R_\Sigma),$$

$$k = 2^{0.5} I_3 (R_3^{-1} (R' \sin \psi_1 + X' \cos \psi_1) - \sin \psi_1), \quad (3.20)$$

$$d = 2^{0.5} I_3 \omega (R_3^{-1} (R' \sin \psi_1 - X' \cos \psi_1) - (R_3^2 \omega C)^{-1} (R' \sin \psi_1 - X' \cos \psi_1) - \cos \psi_1), \quad (3.21)$$

$$n = (p_1 - p_2)^{-1} (d - p_2 k), \quad (3.22)$$

Для повного струму діюче значення визначається за виразом

$$I_{3.п} = \sqrt{t_1^{-1} \int_0^{t_1} I_3^2 dt},$$

де

$$\begin{aligned}
t_1^{-1} \int_0^{t_1} I_3^2 dt &= 2I_3^2 \left[ 0,5t_1 - (4\omega)^{-1} \sin 2(\omega t_1 + \psi_1) + n^2 (2p_1)^{-1} e^{2p_1 t_1} + (k-n)^2 (2p_2)^{-1} e^{2p_2 t_1} \right] + \\
&+ 2\sqrt{2} I_3 n (p_1^2 + \omega^2)^{-1} e^{p_1 t_1} \left[ p_1 \sin(\omega t_1 + \psi_1) - \omega \cos(\omega t_1 + \psi_1) \right] + \\
&+ 2 \cdot 2^{0,5} I_3 (k-n) (p_2^2 + \omega^2)^{-1} e^{p_2 t_1} \left[ p_2 \sin(\omega t_1 + \psi_1) - \omega \cos(\omega t_1 + \psi_1) \right] + \\
&+ 2n(k-n)(p_1 + p_2) e^{(p_1+p_2)t_1} + 2I_3^2 (4\omega)^{-1} \sin 2\psi_1 - (2p_1)^{-1} n^2 - (2p_2)^{-1} (k-n)^2 - \\
&- 2 \cdot 2^{0,5} I_3 n (p_1^2 + \omega^2)^{-1} (p_1 \sin \psi_1 - \omega \cos \psi_1) - \\
&- 2 \cdot 2^{0,5} I_3 (k-n) (p_2^2 + \omega^2)^{-1} [p_2 \sin \psi_1 - \omega \cos \psi_1] - 2n(k-n)(p_1 + p_2)^{-1}.
\end{aligned}$$

Визначимо діючі значення для повного струму замикання на землю за умови коливальної зміни вільного струму:

$$I_{3, \text{св}} = Ae^{-\delta t} \sin(\omega' t + m),$$

$$\text{де } F = k(\sin \nu)^{-1}; m = \text{arcctg} \left( (d + \delta k)(k\omega')^{-1} \right); \quad (3.23)$$

$$\delta = (L + R_3 RC)(2R_3 LC)^{-1}; \omega' = \sqrt{\left( (R_3 + R)(R_3 LC)^{-1} \right) - \delta^2}; \quad (3.24)$$

Тоді

$$\begin{aligned}
t_1^{-1} \int_0^{t_1} I_3^2 dt &= 2I_3^2 \left[ 2^{-1} t_1 - (4\omega)^{-1} \sin 2(\omega t_1 + \psi_1) \right] + \\
&+ 2^{0,5} I_3 F e^{-\delta t_1} \left( \delta^2 + (\omega - \omega')^2 \right)^{-1} \times \left[ -\delta \cos((\omega - \omega')t_1 + \psi_1 - m) \right] + \\
&+ (\omega - \omega') \sin((\omega - \omega')t_1 + \psi_1 - m) - 2^{0,5} I_3 F e^{-\delta t_1} \left( \delta^2 + (\omega + \omega')^2 \right)^{-1} \times \\
&\times \left[ -\delta \cos((\omega + \omega')t_1 + \psi_1 + m) \right] + (\omega + \omega') \sin((\omega + \omega')t_1 + \psi_1 + m) - \\
&- (4\delta)^{-1} F^2 e^{-2\delta t_1} - 0,25 F^2 e^{-2\delta t_1} \left( \delta^2 + \omega'^2 \right)^{-1} \left[ -\delta \cos(2\omega' t_1 + 2m) + \omega' \cos(2\omega' t_1 + 2m) \right] + \\
&+ 2I_3^2 (4\omega)^{-1} \sin 2\psi_1 - 2^{0,5} I_3 F \left( \delta^2 + (\omega - \omega')^2 \right)^{-1} \left[ -\delta \cos(\psi_1 - m) + (\omega - \omega') \sin(\psi_1 - m) \right] + \\
&+ 2^{0,5} I_3 F \left( \delta^2 + (\omega - \omega')^2 \right)^{-1} \left[ -\delta \cos(\psi_1 + m) + (\omega + \omega') \sin(\psi_1 + m) \right] + (4\delta)^{-1} F^2 + \\
&+ 0,25 F^2 \left( \delta^2 + \omega'^2 \right)^{-1} \left[ -\delta \cos 2m + \omega' \sin 2m \right].
\end{aligned}$$

За використання отриманих виразів обчислені на ЕОМ значення для

діючих струмів  $I_{з.п.}$ , у випадку аперіодичної і коливальної змінах вільного струму при різних значеннях параметрів  $U_{\phi}, R_3, C_{\phi}, R, L, \varphi$ . Розрахунок показує, що при зменшенні часу  $t_1$  різниця для струмів  $I_{з.п.}$  зменшується і при  $t_1 = 0,006$  с та не перевищує  $0,2I_{з.п. \max}$ , тоді як при  $t = 0,003$  с ці значення практично наближається до нуля незважаючи на  $R$  і  $L$  при рівних  $C_{\phi}$ . Підвищення  $t_1$  веде до зменшення струмів  $I_{з.п.}$  в 1,5-2 рази, при  $R < 0,1X_L$  (а саме в режимі, що близький до резонансної настройки без накладання додаткового активного струму однофазного замикання, порівняно з режимом, при чкому  $R \approx 0,5X_L$ . Проте, збільшення часу дії струму через підняття уставки спрацьовування пристрою заземлення фази (ПЗФ) не суттєво знижує ймовірність ураження людини електричним струмом. Це пов'язано із відповідним зростанням тривалості перехідного процесу встановлення фазних напруг, а також врахуванням помітного зниження чутливості самого ПЗФ,  $C_{\phi} > 6 \text{ мкФ}$  сумісне використання ПЗФ, реактора і резистора може бути обгрунтовано використано в мережах з ємнісним струмом до 30А повного однофазного замикання.

## Висновки

При виборі критерію для оцінки ефективності заземлення нейтралі важливо враховувати параметри та процеси, що виникають під час експлуатації розподільної мережі. Серед них: кратність перенапруг при однофазних замиканнях, тривалість існування однофазного замикання на землю, напруга дотику та розтікання струму при однофазних замиканнях, характеристики релейного захисту від однофазних замикань та технічні параметри пристроїв для заземлення нейтралі.

Для вивчення впливу режиму нейтралі на рівень перенапруг слід враховувати внутрішні перенапруги, такі як комутаційні, ферорезонансні та ті, що виникають при однофазних замиканнях із перекидною дугою. Використання відношення площин густин розподілу коефіцієнта, що

характеризує кратність перенапруг пошкоджених фаз до максимально можливої перенапруги може служити критерієм для оцінки перенапруг в залежності від режиму нейтралі.

Дослідження впливу режиму роботи нейтралі на кількість та час пошуку пошкоджень можна провести, використовуючи відношення середнього часу відключення споживачів залежно від причин, пов'язаних з режимом нейтралі. Також можна порівняти вплив режиму нейтралі на ступінь небезпеки за дотику людини до заземленої частини електроустановки при однофазному пошкодженні ізоляції, використовуючи показники тривалості і величини струмів однофазних замикань.

Використання захисного шунтування місць однофазних замикань дозволяє ефективно гасити дугу в місці пробією ізоляції за допустимий час, що забезпечує безпеку експлуатації.

Режим нейтралі суттєво впливає на властивості релейного захисту від однофазних замикань, такі як селективність, чутливість та надійність роботи. Заземлення нейтралі через високоомний резистор підвищує чутливість релейного захисту, зміщуючи характеристику намагнічування трансформатора струму напівпровідника, тим самим підвищуючи рівень сигналу для захисту від однофазних замикань.

Основний варіант підключення високоомного резистора включає безпосереднє його підключення до нейтралі силового трансформатора через запобіжник із засобами контролю його справності.

## РОЗДІЛ 4

### ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕЖИМУ РОБОТИ НЕЙТРАЛІ

На завершальному етапі виконаних досліджень запропонована методика визначення комплексного показника ефективності режиму нейтралі в мережах 6-10 кВ.

Таблиця 4.1 – Вагові коефіцієнти показників ефективності режиму роботи нейтралі [24, 25]

| Ваговий коефіцієнт | Електричні мережі |          |
|--------------------|-------------------|----------|
|                    | Міські            | Сільські |
| $V_{\Pi}$          | 0,36              | 0,22     |
| $V_{H}$            | 0,14              | 0,29     |
| $V_{T}$            | 0,23              | 0,18     |
| $V_{z}$            | 0,27              | 0,21     |
| $V_{\Pi z \Phi}$   | -                 | 0,10     |

За даними експертних оцінок обчислені вагові коефіцієнти незалежних показників ефективності режиму нейтралі (табл.4.1).

З урахуванням відповідних значень незалежних показників підсумкова таблиця комплексних показників ефективності режиму нейтралі має наступний вигляд (табл.4.2):

Таблиця 4.2 – Узагальнені показники ефективності режиму нейтралі

| Мережі   | Нейтраль   |                 |          |
|----------|------------|-----------------|----------|
|          | Ізольована | Заземлена через |          |
|          |            | Реактор         | Резистор |
| Міські   | 0,300      | 0,435           | 0,714    |
| Сільські | 0,392      | 0,392           | 0,706    |

Отримані результати підтверджують висновок про ефективність (по розглянутих критеріях) високоомного заземлення нейтралі в мережах 6-35 кВ в порівнянні з ізольованою, заземленою через реактор нейтраллю.

Економічна ефективність режиму нейтралі і пристроїв автоматики, що діють при однофазних замиканнях, може бути визначена по величині

приведених витрат  $Z$  на будівництво (або реконструкцію) і експлуатацію мереж 6-35 кВ при різних режимах нейтралі:

$$Z = P \sum_{i=1}^{m_1} K_i + \sum_{i=1}^{m_2} U_i + \sum_{i=1}^{m_3} Y_i, \quad (4.1)$$

де  $P$  - нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень;

$\sum_{i=1}^{m_1} K_i$  - сумарні капітальні вкладення для пристроїв заземлення нейтралі -

$K_1$ , монтаж додаткових комутаційних апаратів (вимикачів) і резервних ділянок ліній електропередач -  $K_2$ , для пристроїв автоматики і релейного захисту від однофазних замикань -  $K_3$ ;

$\sum_{i=1}^{m_2} U_i$  - сумарні витрати на експлуатацію мережі, включаючи

відрахування на амортизацію, поточний ремонт і обслуговування устаткування відповідно до капітальних вкладень  $K_1, K_2$  і  $K_3$ , а також вартість втрат електричної енергії в післяаварійному режимі;

$\sum_{i=1}^{m_3} Y_i$  - збиток від аварій в розподільних мережах, викликаний

однофазними замиканнями і їх наслідками ( $Y_1$  - збиток електропостачальної організації, пов'язаний з витратами на ліквідацію пошкоджень;  $Y_2$  - збиток споживачів від аварійних відключень;  $Y_3$  - економічні втрати від електротравм людей з важким наслідком). При цьому

$$Y_1 = \sum_{i=1}^{m_{3,1}} Z_i + Z_{y.n.} \sum_{i=1}^{m_{3,2}} n_i t_i \quad (4.2)$$

де  $\sum_{i=1}^{m_{3,1}} Z_i$  - сума витрат на відновлення ліній електропередач і іншого

устаткування після однофазних замикань, переходу однофазних в подвійні



замикання на землю і в короткі замикання;

$$Z_{y.n.} \sum_{i=1}^{m_{3,2}} n_i t_i - \text{витрати на утримування експлуатаційного персоналу за час } t_i$$

пошуку ушкодженої ділянки мережі, в яких враховується число стійких однофазних замикань –  $n_1$ , подвійних замикань на землю –  $n_2$ , однофазних замикань, що перейшли в короткі замикання, -  $n_3$ . у тому числі і на секціях шин розподільних пристроїв;  $Z_{y.n.}$  - питомі витрати на утримування експлуатаційного персоналу за 1 годину його роботи.

Збиток споживачів від аварійних відключень визначається за формулою

$$Y_2 = \sum_{i=1}^{m_{3,3,1}} t_{1i} P_{1i} y_{0i} + \sum_{i=1}^{m_{3,3,2}} t_{2i} P_{2i} y_{0i} + \sum_{i=1}^{m_{3,3,3}} t_{3i} P_{3i} y_{0i} + (1 - a_1) \sum_{i=1}^{m_{3,3,4}} \frac{n_{pi}}{2} t_{4i} P_{4i} y_{0i} + \sum_{i=1}^{m_{3,3,5}} t_{5i} P_{5i} y_{0i} + a_2 \sum_{i=1}^{m_{3,3,6}} t_{6i} P_{6i} y_{0i} + Z_{\text{неп}} \quad (4.3)$$

де  $t_{1i}$ ,  $t_{2i}$ ,  $t_{3i}$  тривалості відключеного стану споживачів із-за стійких однофазних замикань, подвійних замикань на землі і коротких замикань, що розвинулися з однофазних;

$t_{4i}$  - час, що витрачається на відновлення виробничих процесів після короткочасних перерв електропостачання із-за відключень непошкоджених ліній при визначенні лінії із стійким однофазним замиканням;

$t_{5i}$  - тривалість відключення споживачів при встановленні пошкодженої ділянки лінії;

$t_{6i}$  - тривалість можливої перерви електропостачання споживачів в післяаварійному режимі;

$P_i$  - потужність споживачів, що аварійно відключаються, при однофазних замиканнях ( $P_{1i}$ ), подвійних замиканнях на землі ( $P_{2i}$ ) і коротких замиканнях, що розвинулися з однофазних, у тому числі і в осередках розподільних пристроїв ( $P_{3i}$ ), а також при визначенні лінії з однофазним замиканням ( $P_{4i}$ ),

пошкодженої ділянки цієї лінії ( $P_{5i}$ ) і при можливих пошкодженнях в післяаварійному режимі, коли частина споживачів втрачає резервні джерела живлення ( $P_{6i}$ );

$n_{ли}$  - число ліній, що відходять від шин живлячих підстанцій;  $a_1$  - вірогідність безвідмовного функціонування пристроїв сигналізації і релейного захисту від однофазних замикань;

$a_2$  - вірогідність пошкоджень (будь-яких видів) в післяаварійних режимах, коли одна з резервних ділянок лінії знаходиться в стані відновлення;

$Y_{0i}$  - питомий збиток від аварійних перерв електропостачання;

$Z_{неп}$  - втрати від обривів проводів і неповнофазних режимів.

Економічні втрати від електротравм людей з важким наслідком обчислюються за формулою

$$Y_3 = \left[ a_{3.1} \left( \sum_{i=1}^{m_{3.3.1}} t_{1i} + \sum_{i=1}^{m_{3.3.2}} t_{2i} + \sum_{i=1}^{m_{3.3.3}} t_{3i} \right) + a_{3.2} \sum_{i=1}^{m_{3.3.7}} t_{7i} \right] y_{з.т.} \quad (4.4)$$

де  $t_{7i}$  - тривалість включеного стану лінії з обірваним дротом;

$a_{3.1}$ ,  $a_{3.2}$ ,  $a_{3.3}$  - імовірності ураження персоналу (за одиницю часу) із-за помилкових дій в аварійних ситуаціях (при локалізації пошкодженої ділянки мережі, обривах проводів, дії напруги дотику при стійких однофазних замиканнях);

$y_{з.т.}$  - середні втрати від електротравми людини з важким наслідком (в межах 50 - 100 тис.грн.).

При порівнянні якості режимів нейтралі в розподільних мережах слід враховувати ту обставину, що до найважливіших техніко-економічних результатів використання високоомного заземлення нейтралі відноситься можливість обґрунтованої зміни рівнів ізоляції і норм випробувань підвищеною напругою електроустаткування 6-35 кВ і, як наслідок, зниження

його матеріаломісткості і вартості.

У кабельних мережах, де практично виключена дія ізоляції електроустаткування, атмосферних перенапруг, випробувальна напруга визначається значенням можливих дугових, ферорезонансних і комутаційних перенапруг. Для оцінки живильної напруги кабельних ліній може бути використано вираз

$$U_{\text{вик. к. л.}} = \sqrt{2} \frac{U_{\text{л. макс}}}{\sqrt{3}} k_{\text{п}} k_{\text{у}} k_{\text{з}}$$

де  $U_{\text{л. макс}}$  - найбільша допустима робоча напруга мережі;

$k_{\text{п}}$  - кратність дугових перенапруг, вірогідність перевищення якої не більше 0,05;

$k_{\text{у}}$  - коефіцієнт зміцнення ізоляції при випробуваннях кабелю напругою постійного струму ( $k_{\text{у}} \approx 1,4 \div 1,5$ );

$k_{\text{з}}$  - коефіцієнт запасу ( $k_{\text{з}} = 1,1$ ).

Для мережі 10 кВ з ізольованою нейтраллю (при  $k_{\text{п}} = 3,2$ )  $U_{\text{вик. к. л.}} = 49,5 \approx 50$  кВ, а у випадку високоомного заземлення нейтралі ( $k_{\text{п}} = 2,4$ )  $U_{\text{вик. к. л.}} = 37,5$  кВ, тобто менше 40 кВ.

Для мережі 17 кВ при  $k_{\text{п}} = 2,4$  отримуємо  $U_{\text{вик. к. л.}} = 60$  кВ, що відповідає прийнятому зараз значенню випробувальної напруги для кабельних ліній 10 кВ.

Випробувальні напруги змінного струму промислової частоти для устаткування розподільних пристроїв і трансформаторних підстанцій - включаючи силові і вимірювальні трансформатори, в кабельних мережах не повинні перевищувати  $U_{\text{вик. к. л.}} / \sqrt{2}$  незалежно від виду ізоляційної конструкції і матеріалу, використаного для її виготовлення.

Режим нейтралі впливає на рівень небезпечних ферорезонансних і

комутаційних перенапруг в мережі. Високоомне заземлення нейтралі дозволяє запобігти пошкодженням самих трансформаторів напруги при перекидних однофазних замиканнях, особливо в мережах з ємнісними струмами до 20 А (наприклад, сільських).

Кількісне визначення кратностей інших видів ферорезонансних і комутаційних перенапруг в мережі з високоомним заземленням нейтралі - це предмет подальших досліджень. Проте вже зараз можна оцінити непрямий вплив цього режиму нейтралі на небезпеку дії вказаних перенапруг на ізоляцію мережі. По-перше, включення резисторів в нейтраль і застосування пов'язаних з цим пристроїв автоматики і релейного захисту від однофазних замикань знижує кількість операцій включення і відключення в процесі локалізації пошкоджених ділянок мережі, які можуть супроводжуватися найбільшими комутаційними і ферорезонансними перенапругами [15]. По-друге, тривалість існування в такій мережі однофазних пошкоджень, включаючи перекидні замикання, і неповнофазні режими, не перевищує 5 с, що сприяє зниженню небезпеки дії перенапруг і дозволяє вирішити задачу ефективного обмеження не тільки внутрішніх, але і атмосферних перенапруг за допомогою широкого застосування в мережах 6-35 кВ нелінійних обмежувачів перенапруг.

Цей найважливіший захід в об'ємі робіт по координації ізоляції, обґрунтування її оптимальних рівнів і випробувальної напруги в мережі з високоомним заземленням нейтралі доповнюється застосуванням пристроїв автоматичного повторного включення, ефективність якого зростає при їх спрацьовуваннях після однофазних перекриттів ізоляції.

Розглядаючи питання оптимізації рівнів ізоляції і випробувальної напруги, слід враховувати ще одну обставину. Не дивлячись на досить високі запаси по рівнях ізоляції в мережах 6-35 кВ, число перекриттів ізоляційних конструкцій із-за дії внутрішніх і грозових перенапруг тут залишається значним. Тому техніко-економічно виправдані розробка і застосування ефективних, надійних засобів і схем захисту, до яких можна віднести комплекс

пристроїв, що складається з високоомних резисторів для заземлення нейтралі, реле автоматики, що діють при однофазних пошкодженнях нелінійних обмежувачів перенапруг.

Цей висновок підтверджується і тим, що не менше ніж за вказаними причинами, а часто істотно більше пошкоджень ізоляції виникає внаслідок низького рівня технічної експлуатації розподільних мереж, коли має місце не тільки механічні пошкодження (обриви проводів, падіння опор повітряних ліній), але і перекриття ізоляції під впливом робочої напруги. У цих умовах, якими б високими не були рівні ізоляції і випробувальна напруга, необхідної надійності систем електропостачання принципово досягти неможливо. У сучасних розподільних мережах підвищена випробувальна напруга (наприклад, 60 кВ для кабельних ліній 10 кВ) приводить більшою мірою до збільшення витрат на їх ремонт, чим до підвищення надійності.

Характеристики ефективності розглянутих варіантів режиму нейтралі розподільних мереж зведені в табл.4.3, де дані, що відносяться до режимів заземленою через реактор або резистор нейтралі нормовані по даним, що стосувалися режиму ізолюваної нейтралі.

Таблиця 4.3 – Наближені результати розрахунку ефективності розглянутих в роботі варіантів режиму роботи нейтралі розподільних мереж

| Характеристика   | Нейтраль мережі |               |                |
|--|-----------------|---------------|----------------|
|  | Ізолювана       | Заземлена     |                |
|  |                 | Через реактор | Через резистор |
| Кількість пошкоджень ізоляції, затрати на відновлювальний ремонт обладнання мережі   | $n_{\text{п}}$  | <0,65         | <0,12          |
| Збиток від аварійних відключень споживачів (число відключень в процесі визначення пошкодженої ділянки, неселективні спрацювання пристроїв релейного захисту, втрата резерву в після аварійному режимі) | $y^*=1$         | 0,6-0,8       | <0,1           |
| Продуктивність праці персоналу при виділенні пошкодженої ділянки мережі  | Низька          | Низька        | Висока         |

Продовження таблиці 4.3.

|   |                                |                    |                      |
|---|--------------------------------|--------------------|----------------------|
| Напруга кроку і дотику при однофазних замиканнях:<br>стійких<br>перекидних        | $U_{п.у}^*=1$<br>$U_{п.у}^*=1$ | 0,1-0,3<br>0,5-0,8 | 1,2-1,4<br>0,6-0,8   |
| Імовірність дотику людини до заземлених частин обладнання з однофазним замиканням | $p_n=1$                        | 1                  | <0,01                |
| Струми ураження у випадку дотику людини до струмоведучих частин обладнання:       |                                |                    |                      |
| у стійкому режимі   | $I_3^*=1$                      | 0,1-0,3            | ≈0,9                 |
| з урахуванням перехідного процесу при часі дії до 0,01с                           | Приблизно однакові             |                    |                      |
| Параметри автоматичного ПЗФ:  |                                |                    |                      |
| Чутливість  | $R_3^*=1$ кОм                  | -                  | $R_3^*=3$ кОм        |
| Швидкодія   | $t_{cp}>10$ мс                 | -                  | $t_{cp}\approx 6$ мс |
| Параметри пристроїв релейного захисту від однофазних замикань:                    |                                |                    |                      |
| чутливість і швидкодія  | примусово високі               | -                  | обґрунтовано знижені |
| селективність і завадостійкість   | низькі                         | -                  | дуже високі          |
| імовірність відмов  | $P_o\approx 0,1\div 0,3$       | -                  | $P_o<0,05$           |
| Матеріалоемність електрообладнання  | 1                              | 1                  | 0,85-0,88            |
| Вартість електрообладнання  | 1                              | 1                  | 0,9-0,93             |
| Імовірність хибних дій персоналу в аварійних ситуаціях                            | висока                         | висока             | істотно нижче        |

Дані, приведені в табл. 4.3, до певної міри наближені. Проте вони підтверджують правильність висновку про ефективність застосування в електричних мережах 6-35 кВ високовольтних резисторів для оптимізації режиму нейтралі, а також пристроїв автоматики і релейного захисту що діють при однофазних замиканнях. При цьому необхідно мати на увазі, що в кабельних мережах, де залишкові некомпенсовані струми не перевищують 10 - 30 А і ще низка ступінь резервування електропостачання споживачів, може бути виправдане використання пристроїв для компенсації ємнісних струмів з можливістю створення умов, що забезпечували функціонування сигналізації на лініях і їх ділянках при однофазних пошкодженнях в мережі.



## **РОЗДІЛ 5**

### **ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

Розділ з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях магістерської дипломної роботи присвячений розробці заходів з оптимізації режиму роботи нейтралі в розподільній мережі напругою 6-35 кВ. Згідно Гігієнічної класифікації, під час обслуговування діючих електроустановок (вимірювальних приладів, пристроїв релейного захисту, автоматики, телемеханіки та зв'язку, пристроїв обліку електричної енергії та інших) на працівників впливають такі шкідливі та небезпечні виробничі фактори [26, 27]:

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

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

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

#### 5.1 Технічні рішення з безпечної організації робіт

##### 5.1.1 Електробезпека

Живлення силового обладнання енергооб'єкту та систем освітлення здійснюється від чотирьохпровідної трифазної мережі 380 х 220В (фазна напруга (фаза – "0") – 220В, а міжфазна лінійна (фаза – фаза) – 380В), з'єднаної з силовим трансформатором. Категорія умов за безпекою



електротравматизму – підвищеної небезпеки, у зв'язку з наявністю на об'єктах, що будуються та реконструюються, струмопровідної підлоги.

Технічні рішення щодо запобігання електротравмам [29, 30]: для запобігання електротравм від контакту з нормально-струмопровідними елементами електроустаткування, необхідно: розміщувати неізольовані струмопровідні елементи в окремих приміщеннях з обмеженим доступом, у металевих шафах; використовувати засоби орієнтації в електроустаткуванні – написи, таблички, попереджувальні знаки; підвід кабелів до споживачів здійснювати у закритих конструкціях підлоги;

- при живленні однофазних споживачів струму від трипровідної мережі при напрузі до 1000 В використовується нульовий захисний провідник. При його використанні пробій на корпус призводить до КЗ. Спрацьовує захист від КЗ і пошкоджений споживач відключається від мережі. Згідно з вимогами нормативів, повинна бути забезпечена необхідна кратність струму К.З. залежно від типу запобіжного пристрою, повинна бути забезпечена цілісність нульового захисного провідника.

- електрозахисні засоби захисту. Електротехнічний персонал повинен бути забезпечений випробуваними засобами захисту. Перед застосуванням засобів захисту персонал зобов'язаний перевірити їх справність, відсутність зовнішніх пошкоджень, очистити і протерти від пилу, перевірити за штампом дату наступної перевірки. Забороняється користуватися засобами захисту, термін придатності яких вийшов.

Використовуються основні та допоміжні електрозахисні засоби. Основними електрозахисними засобами називаються засоби, ізоляція яких тривалий час витримує робочу напругу, що дозволяє дотикатися до струмопровідних частин, які знаходяться під напругою. До них відносяться (до 1000В): ізолювальні штанги; ізолювальні та струмовимірювальні кліщі; покажчики напруги; діелектричні рукавиці; слюсарно-монтажний інструмент з ізольованими ручками.

Додатковими електрозахисними засобами називаються засоби, які

захищають персонал від напруги дотику, напруги кроку та попереджають персонал про можливість помилкових дій. До них відносяться (до 1000 В): діелектричні калоші; діелектричні килимки; переносні заземлення; ізолювальні накладки і підставки; захисні пристрої; плакати і знаки безпеки.

5.1.2 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць під час виконання робіт з вимірювальними приладами, пристроями релейного захисту, автоматики, телемеханіки і зв'язку, з електролічильниками

Для забезпечення робіт, що їх провадять в колах вимірювальних приладів і пристроїв релейного захисту, всі вторинні обмотки вимірювальних трансформаторів струму і напруги слід постійно заземлювати. За необхідності розриву кола струму вимірювальних приладів і реле кола вторинної обмотки трансформатора струму попередньо закорочується на спеціально призначених для цього затискачах.

Розривати кола, підключені до вторинної обмотки трансформатора струму, забороняється. За необхідності розриву цих кіл вони мають бути попередньо замкнуті перемичкою, встановленою до передбачуваного місця розриву (рахуючи від трансформатора струму). Під час встановлення перемички слід застосовувати інструмент з ізолювальними рукоятками.

Під час роботи на трансформаторах струму або в колах, підключених до їх вторинних обмоток, слід виконувати такі заходи безпеки: зажими вторинних обмоток до закінчення монтажу кіл, що до них підключаються, мають бути замкнені накоротко. Після приєднання змонтованих кіл до трансформатора струму закоротку слід переносити на найближчу збірку затискачів і знімати тільки після повного закінчення монтажу та перевірки правильності приєднання змонтованих кіл; під час перевірки полярності до подавання імпульсів струму в первинну обмотку прилади слід приєднувати до затискачів вторинної обмотки. Забороняється використовувати шини первинних обмоток як струмопровідні під час монтажних та зварювальних робіт.

Робота в колах пристроїв релейного захисту, електроавтоматики і телемеханіки (РЗАіТ) проводиться за виконавчими схемами. Під час робіт в

пристроях РЗАіТ слід користуватися слюсарно-монтажним інструментом з ізолювальними рукоятками.

Під час перевірки кіл вимірювання, сигналізації, керування і захисту за необхідності в приміщенні електроустановок напругою понад 1000 В дозволяється залишатися одному члену бригади за умовами роботи (наприклад, регулювання вимикачів, перевірка ізоляції); працівник, який перебуває окремо від керівника робіт, повинен мати групу III. Під час робіт в колах трансформаторів напруги з подачею напруги від стороннього джерела знімаються запобіжники з боку вищої і нижчої напруги, а також відключаються автомати від вторинних обмоток.

За необхідності проведення будь-яких робіт в колах чи на апаратурі РЗАіТ за умови ввімкненого основного обладнання слід вжити додаткових заходів щодо запобігання його випадковому відключенню. Забороняється на панелях або поблизу місця розміщення релейної апаратури провадити роботи, які викликають сильний струс релейної апаратури, що може спричинити до помилкових дій реле.

Перемикання, вмикання і вимикання вимикачів, роз'єднувачів та іншої комутаційної апаратури, пускання і зупинення агрегатів, регулювання режиму їх роботи, необхідні під час налагодження або перевірки пристроїв РЗАіТ, провадять тільки оперативні працівники.

Записувати покази електролічильників та інших вимірювальних приладів, встановлених на щитах керування і в РУ, дозволяється:

- одноособово працівникам з групою II за наявності місцевих оперативних працівників (з чергуванням двох осіб) і з групою III — без місцевих оперативних працівників;

- працівникам інших організацій з групою III у супроводі місцевого оперативного працівника.

Встановлення і зняття електролічильників та інших вимірювальних приладів, підключених до вимірювальних трансформаторів, повинні провадити за нарядом зі зняттям напруги два працівники, один з яких повинен

мати групу IV, а другий — групу III. За наявності в колах електролічильників контактів (блоків), що дозволяють працювати без розмикання кіл, підключених до вторинних обмоток трансформатора струму, ці роботи можна виконувати за розпорядженням, не знімаючи напруги зі схеми електролічильника. За відсутності вказаних контактів напругу і струм в колах електролічильника слід відключити.

Приєднання вимірювальних приладів, встановлення і зняття електролічильників, підключених до вимірювальних трансформаторів, за наявності випробувальних блоків або спеціальних затискачів, що дають змогу безпечно закорочувати кола струму, виконуються без зняття навантаження і напруги. Встановлення і зняття електролічильників безпосереднього ввімкнення допускається провадити за розпорядженням одному працівнику з групою III. Встановлення і зняття електролічильників, а також приєднання вимірювальних приладів виконуються зі зняттям напруги.

Роботи з електролічильниками на різних приєднаннях, розміщених в одному приміщенні, можна виконувати за одним нарядом (розпорядженням). Оформлення в наряді переходу з одного робочого місця на інше не вимагається.

## 5.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

### 5.2.1 Мікроклімат

Нормуються параметри мікроклімату в виробничих приміщеннях та гранично допустимі концентрації шкідливих речовин в повітрі робочої зони. Тяжкість роботи розділяється на категорії залежно від загальних енерговитрат організму, ккал/с (Вт) [31]. Параметри мікроклімату в приміщенні наведено в таблиці 5.1.

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату на робочому місці оператора крану передбачається [32]:

- в холодну пору року – використання калорифера;
- в літню пору – застосування кондиціонерів та вентиляторів обдуву,

- провітрювання приміщень.

Таблиця 5.1 – Нормування параметрів мікроклімату на непостійних робочих місцях

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

### 5.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується концентраціями (ГДК) в мг/м. В умовах роботи на граничнодопустимих концентраціях можливими забруднювачами повітря робочої зони можуть бути пил та шкідливі гази, їх ГДК [31] наведено в таблиці 5.2.

Для забезпечення складу повітря робочої зони передбачено [32]: провітрювання приміщень; встановлення пиловловлюючих засобів.

Таблиця 5.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони

| Назва речовини     | ГДК, мг/м <sup>3</sup> |                 | Клас небезпечності |
|--------------------|------------------------|-----------------|--------------------|
|                    | Максимально            | Середньо добова |                    |
| Вуглецю оксид (СО) | 3                      | 1               | 4                  |
| Пил нетоксичний    | 0,5                    | 0,15            | 4                  |

### 5.2.3 Виробниче освітлення

Для забезпечення найбільш сприятливих умов зорової праці нормуємо освітлення на робочому місці працівника. Характеристика зорових робіт – середньої точності. Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [33] розряд зорової роботи IV, підрозряд «в». Норми при штучному, природньому та суміщеному освітленні наведено в таблиці 5.3.

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують загальне штучне освітлення, що створюється за допомогою світлодіодних ламп E27 LED 15W NW A60 "SG". Висота підвісу світильників над робочою поверхнею 2,5 метра.

Таблиця 5.3 – Вимоги до освітлення виробничих приміщень

| Харак-ка зорової роботи | Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм | Розряд зорової роботи | Під-розряд зорової роботи | Контраст об'єкта з фоном | Характеристика фону     | Штучне при системі комбінованого освітлення |                        | Природне Ен пр | Сумісне Е сум |
|-------------------------|--|-----------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|---|------------------------|----------------|---------------|
|                         |  |                       |                           |                          |                         | всього                                      | у т. ч. від загального |                |               |
| Середньої точності      | Від 0,5 до 1,0 включно                                     | IV                    | в                         | малий середній великий   | світлий середній темний | 400   | 200                    | 4              | 2,4           |

При експлуатації здійснюється контроль за рівнем напруги освітлювальної мережі, своєчасна заміна перегорілих ламп, забезпечується чистота повітря у приміщенні.

Для забезпечення нормативних значень освітлення передбачено:

- використання додаткового штучного освітлення, а саме світлодіодних ламп;
- необхідна кількість природного світла (великі вікна);
- для підтримки постійної освітленості повинно бути організовано систематичне, не рідше двох разів на місяць, очищення арматури світильників і ламп від пилу та бруду, а в приміщеннях із значним виділенням пилу, диму та кіптяви - не рідше чотирьох разів на місяць згідно з графіком.

#### 5.2.4 Виробничий шум

Для відносної логарифмічної шкали в якості нульових рівнів обрані показники, що характеризують мінімальний поріг сприйняття звуку людським вухом на частоті 1000 Гц. Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є «ССБТ.

Шум Загальні вимоги безпеки» [35].

Норми звукового тиску на постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях наведено в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Рівень звукового тиску

| Характер робіт                                  | Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц |    |     |     |     |      |      |      |      |
|---|--|----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
|   | 31,5   | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
| Постійні робочі місця в промислових приміщеннях | 107  | 95 | 87  | 82  | 78  | 75   | 73   | 71   | 69   |

Для забезпечення допустимих параметрів шуму в приміщенні, проектом передбачено засоби колективного захисту: акустичні, архітектурно-планувальні й організаційно-технічні. Засоби боротьби із шумом в залежності від числа осіб, для яких вони призначені, поділяються на засоби індивідуального захисту і на засоби колективного захисту – «ССБТ. Засоби індивідуального захисту органів слуху. Загальні технічні умови і методи випробувань» і «Засоби і методи захисту від шуму. Класифікація».

Для зниження шуму в приміщенні, необхідно: безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін, застосовувати підвісні звукопоглиначі (ширми, екрани тощо); для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало шумові вентилятори.

#### 5.2.5 Психофізіологічні фактори

Психофізіологічні фактори визначаються відповідно до Гігієнічної класифікації праці [25]. Робота електротехнічного персоналу під час обслуговування діючих електроустановок не потребує великих фізичних зусиль за важкістю та напруженістю праці.

Клас умов праці за показниками важкості праці – допустимий (середньої важкості): загальні енергозатрати організму (кґ/м) – до 290; стереотипні робочі рухи: при локальному навантаженні (участь м'язів кистей та пальців рук) – до

40000; при регіональному навантаженні(участь рук та плечового суглоба) – до 20000; статичне навантаження (кг/с): двома руками (чоловіки) – до 70000; за участю м'язів тулуба та ніг – до 100 000; робоча поза: періодичне перебування в незручній позі (робота з поворотом тулуба, незручним розташуванням кінцівок) та/або фіксованій позі (неможливість зміни взаємного розташування різних частин тіла відносно одна одної) до 25% часу зміни; перебування у вимушеній позі до 10%, нахил тулуба: вимушені нахили протягом зміни – 51-100 разів.

## 2. Класи умов праці за показниками напруженості праці:

Інтелектуальні навантаження: зміст роботи – рішення складних завдань з вибором за алгоритмом; сприймання інформації та їх оцінка – сприймання інформації з наступною корекцією дій та операцій; розподіл функцій за ступенем складності завдання – обробка, контроль, перевірка завдання; характер виконуваної роботи – робота за встановленим графіком з можливим його коригуванням під час діяльності. Сенсорні навантаження: зосередження (% за зміну) – більше 75; щільність сигналів (звукові за 1 год) – більше 300; навантаження на голосовий апарат (протягом тижня) – від 20 до 25. Емоційне навантаження: ступінь відповідальності за результат своєї діяльності – є відповідальним за функціональну якість основної роботи; ступінь ризику для власного життя – вірогідний; ступінь відповідальності за безпеку інших осіб – є відповідальним за безпеку інших. Режим праці: тривалість робочого дня – 8 год; змінність роботи – однозмінна (без нічної зміни).



5.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи розподільної мережі в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій.

Сучасні суспільства надійності та безпеки електроенергетичних систем приділяють надзвичайно важливу увагу, особливо в умовах зростаючого ризику загрозливих чинників та надзвичайних ситуацій. Розподільні мережі, як ключова складова інфраструктури, забезпечують електропостачання для підтримання нормального функціонування життя та виробництва.

Забезпечення стійкості роботи розподільної мережі в умовах надзвичайних ситуацій вимагає глибокого розуміння можливих загроз та розробки ефективних стратегій управління, які забезпечать оптимальну реакцію системи на різні впливи. Дослідження в цьому напрямку охоплює широкий спектр важливих аспектів, включаючи аналіз впливу природних катастроф, техногенних аварій, кібератак, а також розробку технічних та організаційних заходів для оптимізації функціонування розподільних мереж у непередбачуваних умовах.

Ця область досліджень спрямована на вирішення викликів, пов'язаних із забезпеченням стабільності та надійності електроенергетичних систем, щоб вони могли витримувати тиск негативних факторів та забезпечувати постійне електропостачання у найважливіших секторах господарства та життя суспільства. В даному контексті, дослідження стійкості роботи розподільних мереж є необхідним етапом для забезпечення високого рівня безпеки та функціональності електроенергетичної інфраструктури.

5.3.1 Дослідження стійкості роботи розподільної мережі в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій.

За критерій стійкості роботи системи електроприводу, що розробляється, приймається допустима доза  $D_{don}(P)$  або граничне значення рівня радіації  $P_{ep}(P/god)$ , при яких система буде нормально працювати.

Визначаємо граничні значення дози опромінення  $D_{ep i}$  для елементної бази системи, при яких виникають незворотні зміни. Отримані данні заносимо в таблицю 5.5

Таблиця 5.5 – Граничні значення експозиційних доз електроприводу насосної станції

| Елементи системи електроприводу |                      | Д <sub>грі</sub> , Р | Д <sub>гр</sub> , Р |
|---------------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| Блок живлення                   | Мікросхема К90УД2    | 10 <sup>4</sup>      |                     |
|                                 | Конденсатор К45-17   | 10 <sup>5</sup>      |                     |
|                                 | Діод КД523Б          | 10 <sup>5</sup>      |                     |
|                                 | Резистори СПЗ        | 10 <sup>5</sup>      |                     |
| Блок управління                 | Мікро перемикач      | 10 <sup>7</sup>      | 10 <sup>4</sup>     |
|                                 | Мікросхема КР1533ЛА5 | 10 <sup>4</sup>      |                     |
|                                 | Транзистор МЛТ       | 10 <sup>7</sup>      |                     |
| Операційна панель               | Мікросхема К195КТП2П | 10 <sup>3</sup>      | 10 <sup>4</sup>     |
|                                 | Кварц                | 10 <sup>5</sup>      | 10 <sup>3</sup>     |
|                                 | Контактна клавіатура | 10 <sup>4</sup>      |                     |

По мінімальному значенню допустимої дози, при якій в елементній базі виникають необоротні зміни, визначаємо границю стійкості роботи системи регульованого електроприводу в цілому. Проаналізувавши дані таблиці 9.2, робимо висновок, що самим уразливим елементом системи з мінімальною дозою  $D_{gp}=10^3 P$  є операційна панель.

Визначаємо можливу дозу опромінення  $D_m$  за формулою :

$$D_m = \frac{2 \cdot P_{1max} \cdot (\sqrt{t_k} - \sqrt{t_n})}{k_{осл}}, \quad (5.6)$$

де  $P_{1max}$  – максимальне значення рівня радіації ( $P_{1max} = 5,07 \text{ P/год}$ );

$t_k$  – час наробки на відказ ( $t_k = 26280 \text{ год}$ );

$t_n$  – час початку опромінення ( $t_n = 1 \text{ год}$ );

$k_{осл}$  – коефіцієнт послаблення радіації будинком ( $k_{осл} = 1$ ).

$$D_m = \frac{2 \cdot 5,07 \cdot (\sqrt{26280} - \sqrt{1})}{1} = 1633,6(P).$$

Порівнюючи граничне значення дози опромінення з можливою, ми бачимо, що

$$D_{zp} > D_m (10^4 > 1633,6).$$

Отже, можна зробити висновок, що електропривід насосної станції є нестійким в умовах дії іонізуючого випромінювання.

Визначимо допустимий час роботи блоку живлення  $t_{\partial 1}$  в заданих умовах за формулою :

$$t_{\partial} = \left( \frac{D_{гр} \cdot k_{осл} + 2 \cdot P_{1max} \cdot \sqrt{t_n}}{2 \cdot P_{1max}} \right)^2, [\text{год}]$$

$$t_{\partial 1} = \left( \frac{10^5 \cdot 1 + 2 \cdot 5,07 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot 5,07} \right)^2 = 972 \cdot 10^7, (\text{год})$$

Визначимо допустимий час роботи блоку управління  $t_{\partial 2}$  в заданих умовах за формулою:

$$t_{\partial 2} = \left( \frac{10^7 \cdot 1 + 2 \cdot 5,07 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot 5,07} \right)^2 = 972 \cdot 10^{11}$$

Визначимо допустимий час роботи операційної плати  $t_{\partial 3}$  в заданих умовах за формулою:

$$t_{\partial 3} = \left( \frac{10^8 \cdot 1 + 2 \cdot 5,07 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot 5,07} \right)^2 = 972 \cdot 10^{13}$$

Отже можлива доза опромінення елементної бази  $D_m = 1633,6 P$ , а  $D_{cp} = 10^5 P$ . Отже, система регульованого електроприводу насосної станції є нестійкою в умовах дії іонізуючого випромінювання. Допустимий час роботи системи в заданих умовах становить для блока живлення  $972 \cdot 10^7$  год, для блока управління  $972 \cdot 10^{11}$  год, і для операційної панель  $972 \cdot 10^{13}$  год.

5.3.2 Дослідження стійкості роботи розподільної мережі в умовах дії електромагнітного імпульсу

При оцінці впливу електромагнітного імпульсу (ЕМІ) на струмопровідні елементи необхідно врахувати, що ЕМІ має горизонтальну та вертикальну складові напруженостей електричного поля і тому повинні визначитися значення напруг на вертикальних та горизонтальних ділянках ліній. Так як для живлення силового обладнання використовується мережа живлення змінної напруги 380В, а кола управління – постійної 24В, то проведемо розрахунок стійкості роботи для обох мереж живлення. Напруга наводки в горизонтальній і вертикальній струмопровідній частині [23]:

$$U_{\Gamma} = E_{\text{в}} \cdot L_{\Gamma}, \text{ [В]}, \quad (5.7)$$

де  $E_{\text{в}} = 11,06$  – величина електромагнітного імпульсу (кВ/м);

$L_{\Gamma}$  – довжина горизонтальної струмопровідної частини системи (м)

$$U_{\Gamma} = 11,06 \cdot 1,15 = 12,72 \text{ (кВ/м)}.$$

$$U_{\text{в}} = E_{\text{г}} \cdot L_{\text{в}}, \text{ [В]}, \quad (5.7)$$

де  $E_{\text{г}}$  – величина електромагнітного імпульсу (кВ/м);

$L_{\text{в}}$  – довжина вертикальної струмопровідної частини системи (м).

$$U_B = 11,06 \cdot 1,9 = 21,014 \text{ (В/м)}.$$

Допустиме коливання напруги живлення:

$$U_{\text{доп}} = U_{\text{жс}} + \frac{U_{\text{жс}}}{100} \cdot N, \quad (5.8)$$

де  $N$  - відсоток допуску.

Для силового кола ( $U_{\text{жс}} = 380\text{В}$ )

$$U_{\text{доп}} = 380 + \frac{380}{100} \cdot (\pm 5) = 399 \text{ (В)}.$$

Для кола управління ( $U_{\text{жс}} = 24\text{В}$ )

$$U_{\text{доп}} = 24 + \frac{24}{100} \cdot (\pm 5) = 25,2 \text{ (В)}.$$

Визначаємо коефіцієнти безпеки для силового кола ( $U_{\text{жс}} = 380\text{В}$ ):  
вертикальної

$$K_{\text{БВ}} = 20 \cdot \lg \left( \frac{399}{12700} \right) = 5,9 \text{ (дБ)},$$

горизонтальної

$$K_{\text{БГ}} = 20 \cdot \lg \left( \frac{399}{21000} \right) = 6,2 \text{ (дБ)}.$$

Визначаємо коефіцієнти безпеки для кола управління ( $U_{\text{жс}} = 24\text{В}$ ):  
вертикальної

$$K_{\text{БВ}} = 20 \cdot \lg \left( \frac{25,2}{12700} \right) = 3,2 \text{ (дБ)},$$

горизонтальної

$$K_{БГ} = 20 \cdot \lg \left( \frac{25,2}{21000} \right) = 3,6 \text{ (дБ)}.$$

Так як для обох мереж живлення  $K_{БВ} < 40$  дБ,  $K_{БГ} < 40$  дБ, то периферійне обладнання не буде працювати стійко. Зведемо отримані результати в таблицю 5.6.

Таблиця 5.6 – Результати обчислення стійкості роботи управління електроприводу насосної станції в умовах дії ЕМІ

| Напруга живлення      | $L_в$ , м | $L_г$ , м | $K_{БВ}$ | $K_{БГ}$ | Стійкість |
|-----------------------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|
| Силове коло 380, В    | 1,9       | 1,15      | 5,8      | 6,2      | нестійка  |
| Коло управління 24, В | 1,85      | 1,1       | 3,2      | 3,6      | нестійка  |

Для підвищення стійкості роботи об'єкта слід застосувати екранування.

5.4 Розробка заходів по підвищенню стійкості роботи електроприводу насосної станції третього підйому в умовах надзвичайних ситуацій

Робота системи регульованого електроприводу насосної станції під дією іонізуючих випромінювань досить стійка, але для підвищення стійкості роботи електроприводу можна застосувати вибіркове екранування систем управління і електроніки регульованого електроприводу до значення  $K_{осл}=4$ .

Для захисту від ЕМІ розрахуємо необхідний екран. Щоб визначити якої товщини необхідно застосувати екран, знайдемо перехідне затухання екрану:

$$A = K_{Бном} + K_{Б\min}, \quad (5.9)$$

де  $K_{Бном}$  – номінальний коефіцієнт безпеки ( $K_{Бном} = 40$  дБ);

$K_{Б\min}$  – мінімальний коефіцієнт безпеки отриманий під час розрахунків.

Для силового кола ( $U_{ж} = 380$  В)

$$A_{380В} = 40 - 5,8 = 34,2 \quad \text{(дБ)}.$$

Для кола управління ( $U_{ж} = 24$  В)

$$A_{24B} = 40 - 6,2 = 33,8 \quad (\text{дБ}).$$

Товщину захисного екрану знайдемо за формулою

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

де  $A$  – перехідне затування екрану;

$f$  – найбільш характерна частота (15 кГц).

Отже, для обладнання силового кола товщина екрану:

$$t_{380B} = \frac{34,2}{5,2 \cdot \sqrt{15000}} = 0,053 \text{ (см)}.$$

Для обладнання кола управління товщина екрану:

$$t_{24B} = \frac{33,8}{5,2 \cdot \sqrt{15000}} = 0,053 \text{ (см)}.$$

Висновок дослідження стійкості розподільної мережі у надзвичайних ситуаціях та в умовах загрозливих чинників вказує на критичну важливість розробки та впровадження безпекових заходів для забезпечення ефективної функціональності розподільної мережі. Аналіз потенційних небезпек та розробка сценаріїв тестування дозволили визначити слабкі місця, які потребують уваги та вдосконалення.

Дослідження також підкреслило, що ефективна безпека в надзвичайних ситуаціях вимагає постійного вдосконалення та адаптації до змін у загрозах та технологічному середовищі. Запропоновані підходи та рекомендації можуть послужити основою для подальших розвідок у цій області та вдосконалення систем управління розподільної мережі з метою підвищення її стійкості до загрозливих чинників надзвичайних ситуацій.

Отже, після проведених розрахунків визначено, що робота розподільної мережі буде стійка при заданому рівні радіації 5,07 Р/год. До дії ЕМІ розподільної мережі виявилась нестійкою. Застосування екранування РЕА суттєво підвищує її стійкість в умовах дії електромагнітного імпульсу.

В результаті застосування екранів система буде працювати стійко аж

до значення напруженості вертикальної складової 11,06 кВ/м. Ще одним варіантом підвищення стійкості апаратури до дії випромінювання є зменшення струмопровідних провідників (їх довжини) шляхом вдосконалення схемоустаткування РЕА. Крім цього необхідно екранувати кабелі живлення, а також застосувати прилади, які б вимикали радіотехнічні схеми на період впливу ЕМІ.

Отже, при екрануванні системи екраном товщиною не менше ніж 1,2 мм зі сталі, розподільна мережа буде стійкою в умовах дії електромагнітного імпульсу.



## ПІДСУМОК

В роботі вирішена науково-прикладна задача вибору оптимального режиму роботи нейтралі і дослідження її впливу на ефективність роботи засобів автоматики і рівень безпеки експлуатації розподільної мережі. В результаті проведених досліджень встановлено.

1. Режим роботи нейтралі відноситься до важливих чинників які визначають надійність і безпеку експлуатації розподільних мереж.

2. Критерії ефективності режиму нейтралі визначені на основі аналізу сучасних засобів захисту для мереж напругою від 6 до 35 кВ від однофазних замикань. Комплексний показник ефективності режиму нейтралі розглядається як міра наближення мережі, яка використовує певний метод заземлення нейтралі, до еталону. Еталонна мережа характеризується рівністю цільової функції до відносного максимального значення.

3. Встановлено, що заземлення нейтралі розподільної мережі за допомогою резистора обмежує рівень внутрішніх перенапруг не лише при перекидних однофазних замиканнях, але й в інших ситуаціях, таких як виникнення ферорезонансних явищ. Це призводить до зменшення кількості однофазних замикань та загальної кількості пошкоджень мережі, що безпосередньо впливає на витрати експлуатуючих організацій на відновлення. Заземлення нейтралі через резистор також убезпечує від виникнення подвійних замикань на землю.

4. Збиток від аварійних відключень споживачів, число відключень в процесі пошуку пошкодженої ділянки, неселективні спрацювання пристроїв РЗ і А і втрат резерву в післяаварійному режимі при заземленні нейтралі через резистор в порівнянні при ізолюваній нейтралі зменшується в 6-8 раз.

5. Напруга кроку і дотику при однофазних замиканнях в разі застосування заземлення нейтралі через резистор зменшується в порівнянні з ізолюваною нейтраллю в 3-5 разів.

6. Недоліком заземлення через резистор є акумулювання пошкоджень як не виявляються на ранній стадії їх розвитку, що вимагає застосування спеціальної системи ТО, що забезпечує накопичення невеликої кількості пошкоджень.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Романовський В. І. Аналіз замикань на землю в мережах 10 кВ для вибору оптимального способу заземлення нейтралі / В. І. Романовський, С. М. Лебедка // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2012. № 1. С. 101-104.
2. 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.
3. Василега П. О. Електропостачання: Навчальний посібник / П. О. Василега. Суми: ВТД «Університетська книга», 2008. 415 с.
4. Кутін В. М., Кутіна М. В., Завальнюк О.В. Оптимізація режиму роботи нейтралі в розподільній мережі напругою 6-35 кВ. Матеріали ЛІІІ науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ–2024). Збірник наукових праць [Електронний ресурс], Вінниця: ВНТУ, 2023-2024. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2024/paper/view/19520/16210>
5. ГКД 34.20.172-95 «Типова інструкція з компенсації ємнісного струму замикання на землю в електричних мережах 6 - 35 кВ»
6. Правила улаштування електроустановок. Затверджено наказом Міненерговугілля України від 21.07.2017 № 476
7. Сегеда М. С. Електричні мережі та системи: Підручник / М. С. Сегеда // 2-ге вид. Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2009. 488 с.
8. Півняк Г.Г. Розрахунки електричних мереж систем електропостачання: Навч. посібник / Г.Г. Півняк, Н.С. Волотковська, Г. А. Кігель, А. В. Коротун. За ред. Г. Г. Півняка. К.: ІЗМН, 1998. 136 с.
9. Правила улаштування електроустановок, вид. 3-тє, перероб. і доп. Київ: Мінпалівенерго України, 2010. 736 с.
10. Романовський В. І. Аналіз замикань на землю в мережах 10 кВ для

вибору оптимального способу заземлення нейтралі / В. І. Романовський, С. М. Лебедка // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2012. № 1. С. 101-104.

11. McIlhagger D.S., Insulator surface conduction // Science and General Record. 1965. V 112. №7. P.27-38

12. Журахівський А.В., Яцейко А.Я., Масляк Р.Я. Режими роботи трансформаторів напруги в електромережах з ізольованою нейтраллю // Електроінформ. 2009. № 1. С. 8–11.

13. Siirto O. Neutral Point Treatment and Earth Fault Suppression / O. Siirto, M. Loukkalahti, M. Huuvinen, P. Heine, M. Lehtonen // Proceedings of Electric Power Quality and Supply Reliability Conference, 2012.

14. Кутін В. М. Визначення технічного стану ізоляції розподільчих мереж напругою 6-10 кВ з урахуванням несиметрії параметрів ізоляції відносно землі / В. М. Кутін, С. В. Матвієнко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2005. №6 С 142-145.

15. Кутін В. М. Визначення умов роботоздатності розподільчих мереж; монографія /В.М. Кутін, С.В. Матвієнко: Вінниц. нац. у.-нт.-Вінниця: ВНТУ, 2015. 148с.

16. Протокол наради з питань підвищення енергоефективності роботи електромереж та зменшення втрат в розподільчих мережах 6(10) кВ шляхом переходу на 20 кВ яка відбулась 18.07.2016 [Електронний ресурс]: [http://www.nerc.gov.ua/data/filearch//Pr\\_narada\\_pidvysc\\_hen\\_energoefektyvnostiboty\\_energo\\_merezh\\_18.07.2016.pdf](http://www.nerc.gov.ua/data/filearch//Pr_narada_pidvysc_hen_energoefektyvnostiboty_energo_merezh_18.07.2016.pdf)

17. Кутін В.М. Проблеми діагностування ізоляції повітряних ліній напругою 6-10 кВ / В. М. Кутін, М. П. Свиридов, С. В. Матвієнко // Вісник ВПІ. – 2003. - №6. С.238-240.

18. Кутін В.М. Визначення умов роботоздатності розподільчих мереж; монографія /В.М. Кутін, С.В. Матвієнко: Вінниц. нац. у.-нт.-Вінниця: ВНТУ, 2015 -148с.

19. IEEE Std 142-2007 (Revision of IEEE Std 142-1991) IEEE

Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems.

20. H.Muller, T.Connor, M.Muller, Optimal network concept for an existing distribution network,|| Int'l Congress on Electricity Distribution, Buenos Aires, paper No 242, 2010.

21. Кутін В. М. Визначення технічного стану ізоляції розподільчих мереж напругою 6-10 кВ з урахуванням несиметрії параметрів ізоляції відносно землі / В.М. Кутін ,С. В. Матвієнко//Вісник Вінницького політехнічного інституту.2005.№6. С 142-145.

22. Кутін В.М. 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 (186). С. 226-230.

23. Техніко-економічне обґрунтування ТЕО «Реконструкція електричних мереж Південного РЕМ ПАТ «Одесаобленерго» з переведенням класу напруги 6 (10) кВ на клас напруги 20 кВ у м. Одеса» 2017р.

24. ГКД 340.000.001-95 «Визначення економічної ефективності капітальних вкладень в енергетику. Методика. Загальні методичні положення»

25. ГКД 340.000.002-97 «Визначення економічної ефективності капітальних вкладень в енергетику. Методика. Енергосистеми і електричні мережі»

26. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014. [Чинний від 2014-05-30]. URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=58073](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=58073).

27. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007. Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. [Чинний від 2007-12-01]. URL:

<https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->.

28. ДБН А.3.2-2-2009. ССБП. Охорона праці і промислова безпека у будівництві. Основні положення. [Чинний від 2009-01-27]. Вид. офіц. К. : Мінрегіонбуд України, 2009. 116 с.

29. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. [Чинний від 2017-04-01]. Вид. офіц. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.

30. НПАОП 40.1-1.32-01. (ДНАОП 0.00-1.32-01). Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. [Чинний від 2002-01-01]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.

31. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. Постанова МОЗ № 42 від 01.12.1999. [Чинний від 1999-12-01]. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>.

32. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. [Чинний від 2014-01-01]. Вид. офіц. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с.

33. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. [Чинний від 2019-03-01]. Вид. офіц. К. : Мінрегіонбуд України, 2018. 133 с.

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

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

36. Кодекс цивільного захисту України. К.: ВР України, 2012. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/5403-17>.

Додаток А (обов'язковий)

**ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ**

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ РОБОТИ НЕЙТРАЛІ В  
РОЗПОДІЛЬНІЙ МЕРЕЖІ НАПРУГОЮ 6-35 КВ



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

Робота виконується на підставі наказу ВНТУ від 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* цього дослідження полягає в підвищенні рівня надійності, безпеки та ефективності експлуатації розподільних мереж напругою 6-10 кВ;

б) призначення розробки – виконання магістерської кваліфікаційної роботи;

в) вихідні дані для виконання МКР:

Відомості щодо системи електропостачання промисловості і сільського господарства напругою 6-10 кВ. Основні характеристики. Конструктивне виконання. Режими роботи. Система технічного обслуговування. Засоби автоматики.

## 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 Кутін В.М. Визначення умов роботоздатності розподільчих мереж; монографія /В.М. Кутін, С.В. Матвієнко: Вінниц. нац.. тех. у.-нт.-Вінниця: ВНТУ, 2015. 148с.

3.4. Яндутьський 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

3.6 Романовський В. І. Аналіз замикань на землю в мережах 10 кВ для вибору оптимального способу заземлення нейтралі / В. І. Романовський, С. М. Лебедка // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2012. № 1. С. 101-104.

#### 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**

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ РОБОТИ НЕЙТРАЛІ В  
РОЗПОДІЛЬНІЙ МЕРЕЖІ НАПРУГОЮ 6-35 КВ

Рисунок Б.1 – Графічне зображення мережі з ізолюваною нейтраллю

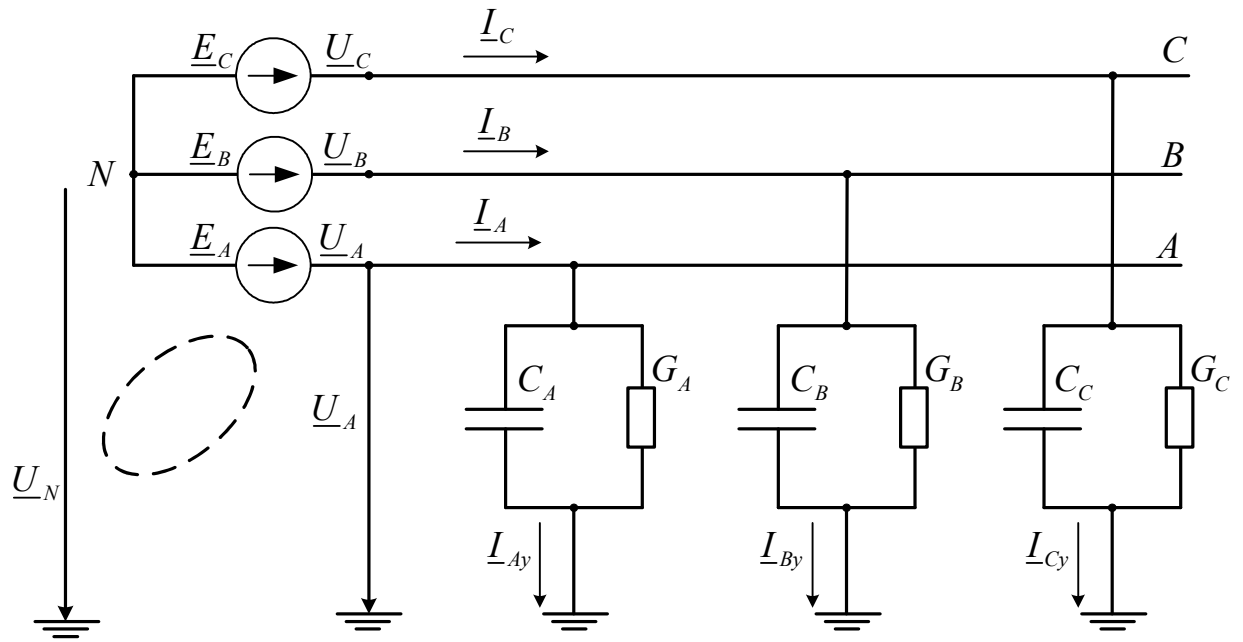


Рисунок Б.3 – Замикання однієї фази на землю в мережі з ізолюваною нейтраллю

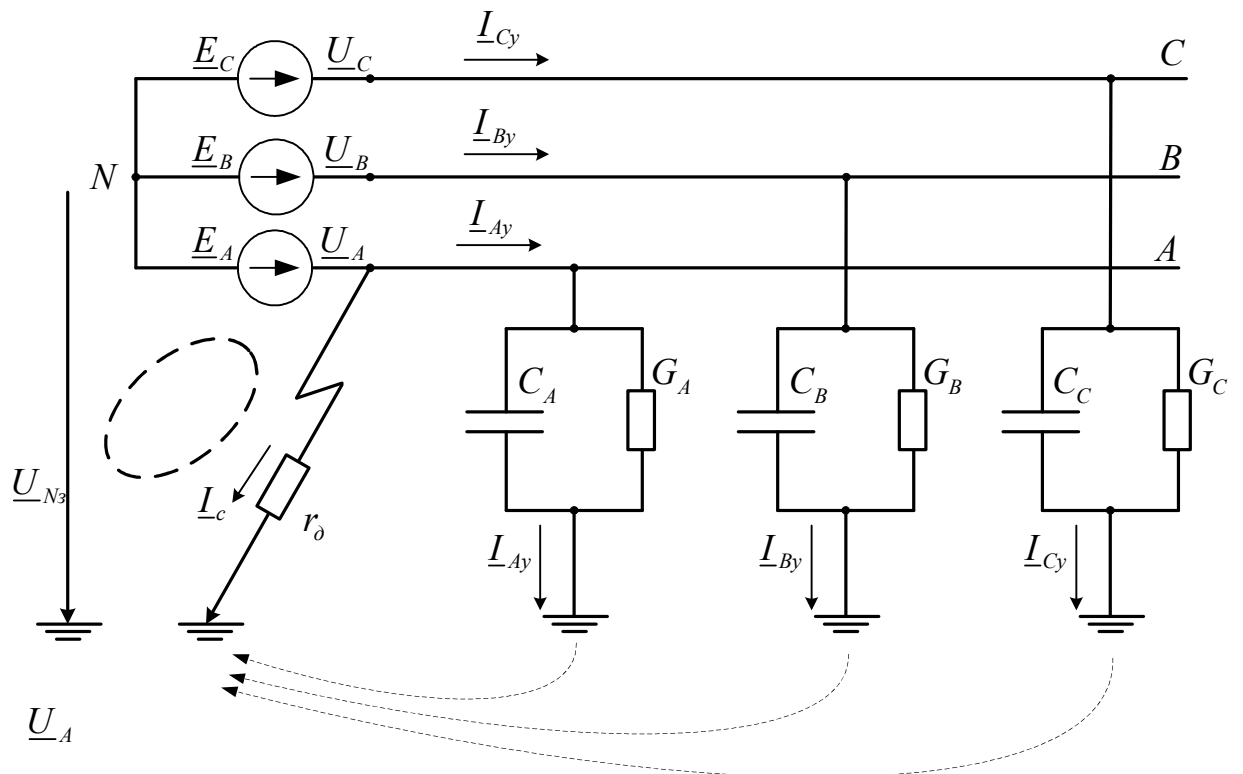


Рисунок Б.4 – Діаграма векторів напруг і струмів при однофазному замиканні на землю в мережі з ізольованою нейтраллю при опорі дуги, що дорівнює нулю

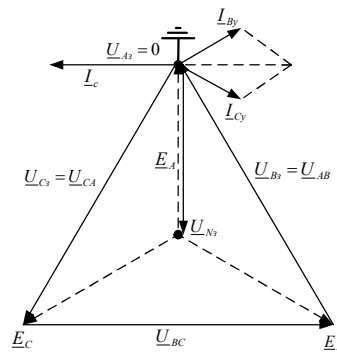


Рисунок Б.5 – Динаміка змін векторів напруг в мережі з ізольованою нейтраллю в залежності від  $r_0$  при замиканні на землю фази А

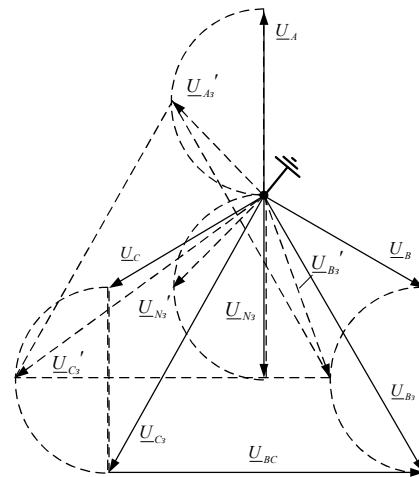


Рисунок Б.6 – Варіації модулів напруги несиметрії та фазової напруги в мережі з ізольованою нейтраллю, враховуючи опір в місці замикання, змінюються відповідно до їхньої залежності від опору в точці утворення короткого замикання ( $i = A, B, C, N$ )

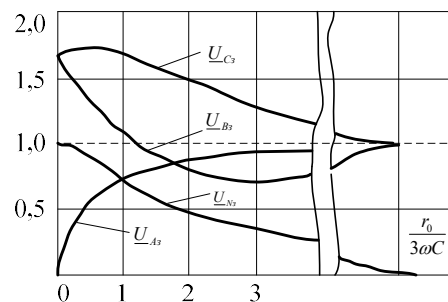
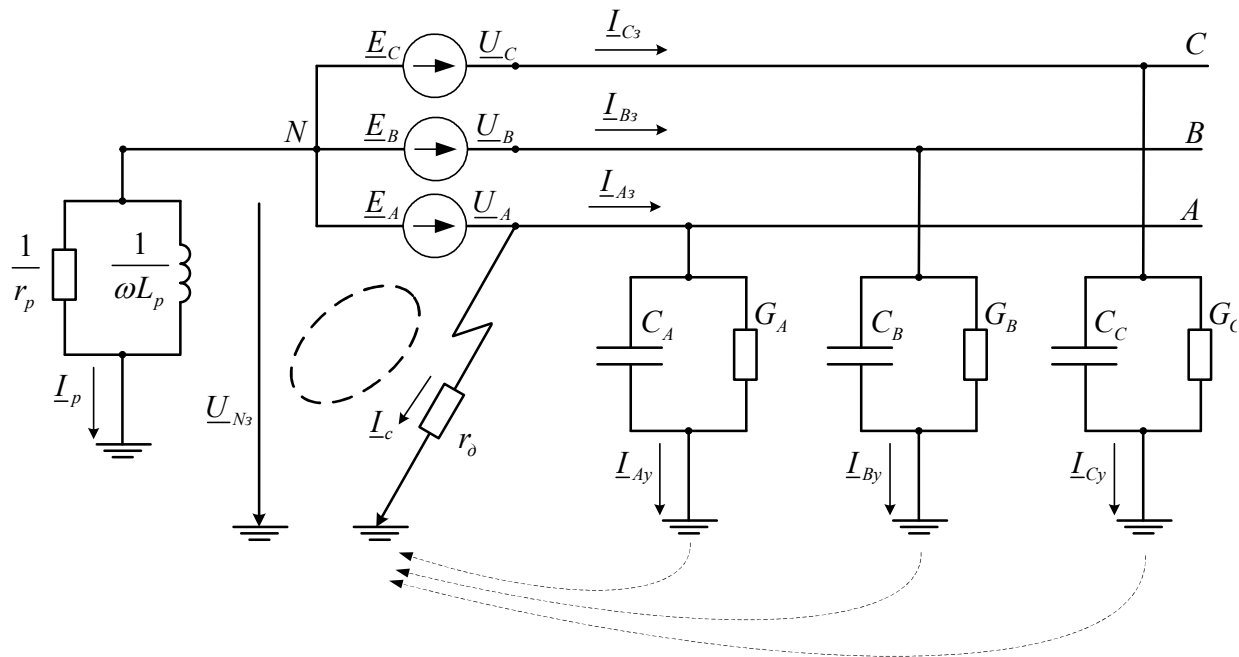
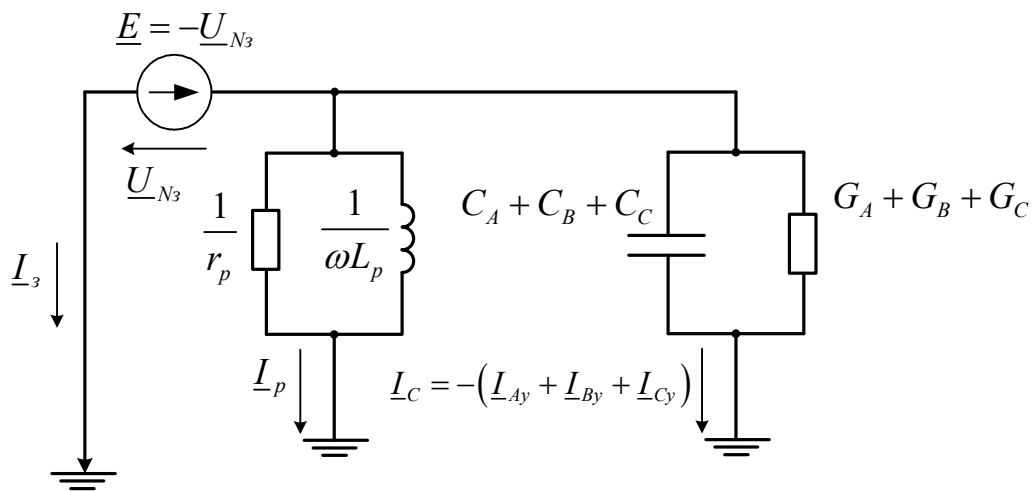


Рисунок Б.7 – Замикання на землю в мережі з резонансно заземленою нейтраллю: а) схема мережі; б) еквівалентна схема для визначення умов резонансу струмів



а)



б)

Рисунок Б.8 – Графічне зображення напруг і струмів у вигляді векторної діаграми під час однофазного замикання на землю в мережі з резонансно заземленою нейтраллю ( $r_{\partial} = 0$ )

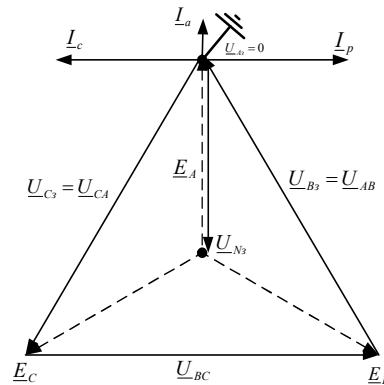
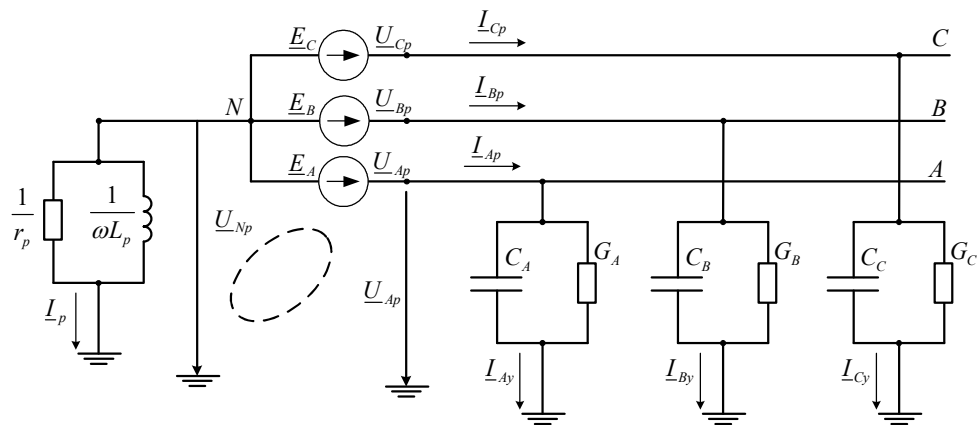
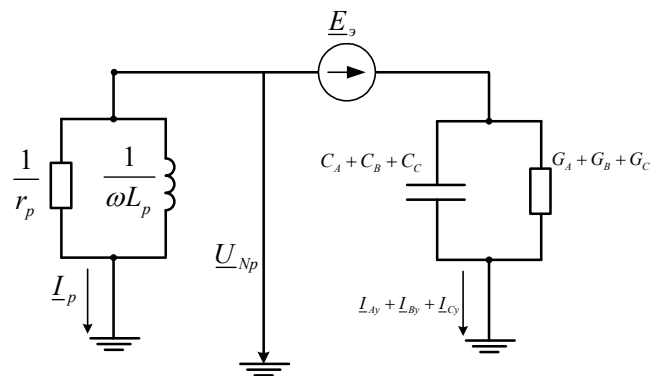


Рисунок Б.9 – Графічне зображення мережі з резонансно заземленою нейтраллю: а) трифазна схема мережі; б) еквівалентна схема заміщення мережі



а)



б)



Рисунок Б.12 – Вирішення завдань комплексного захисту мереж  
напругою 6 - 35 кВ від однофазних замикань

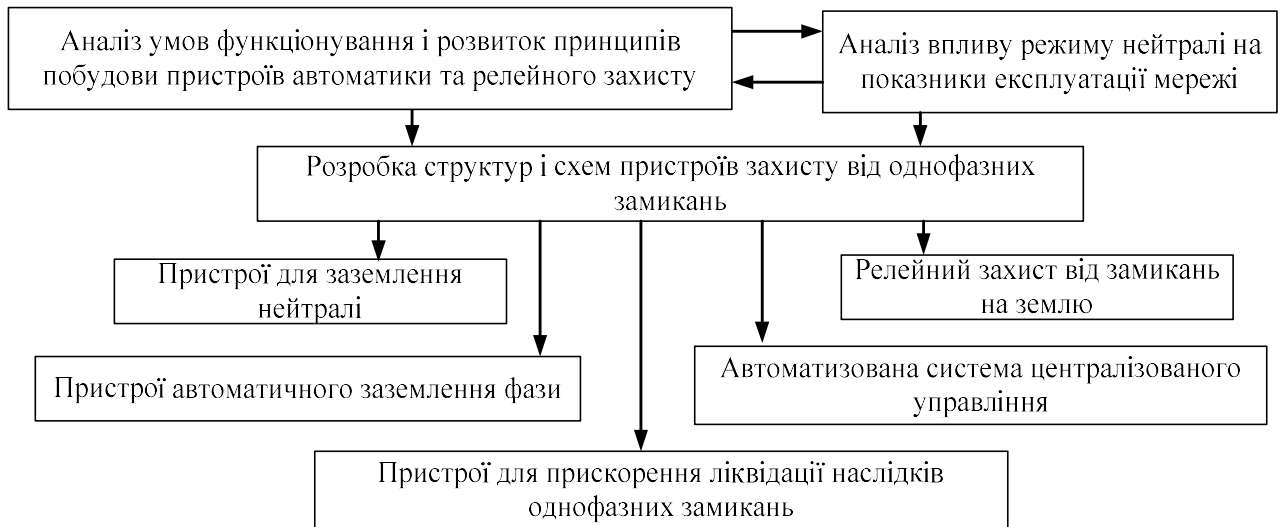


Рисунок Б.13 – Показники ефективності режиму нейтралі

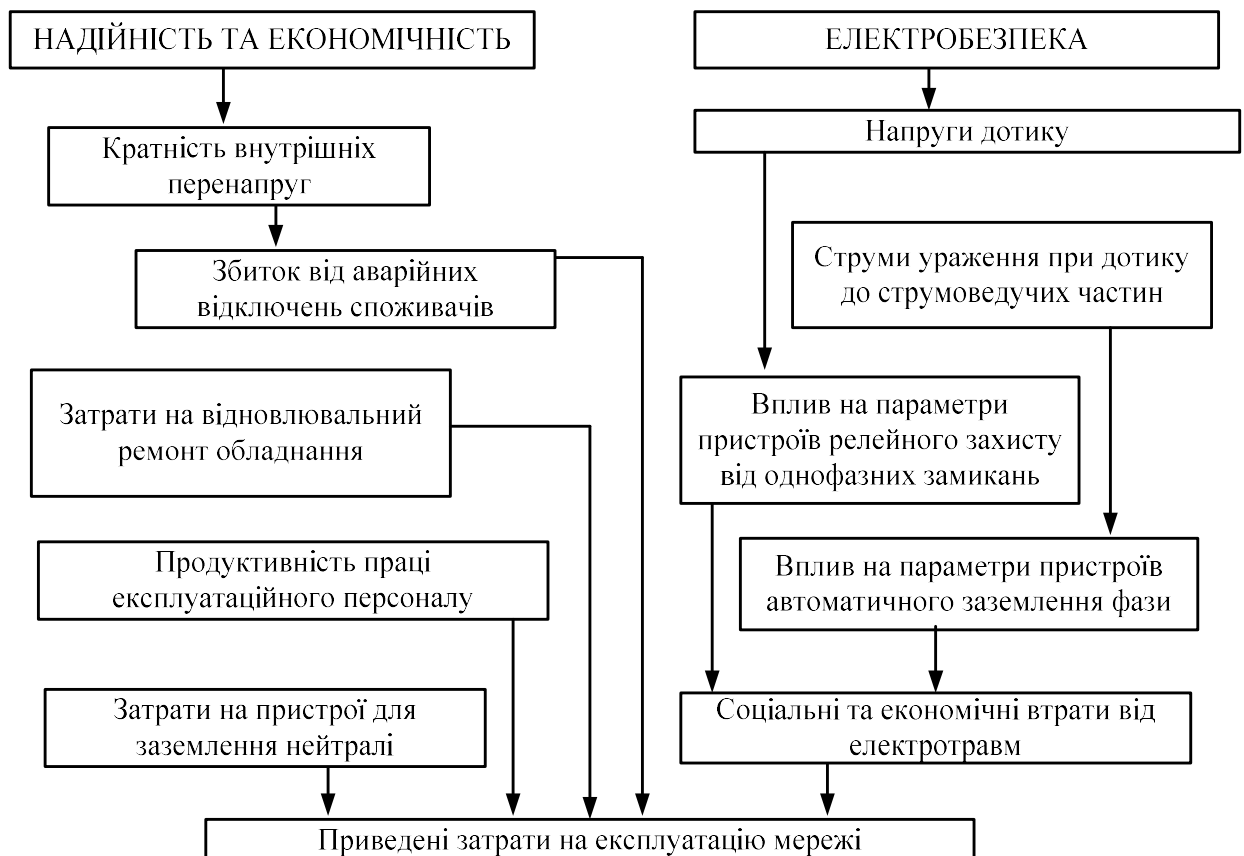




Рисунок Б.14 – Криві розподілу кратностей перенапруг при однофазних замиканнях

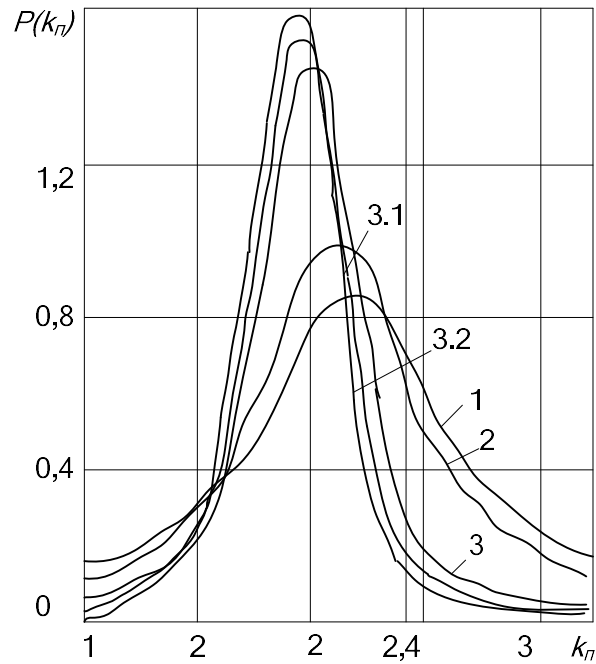


Рисунок Б.15 – Основна конфігурація схеми для влаштування заземлення нейтралі в електричних мережах

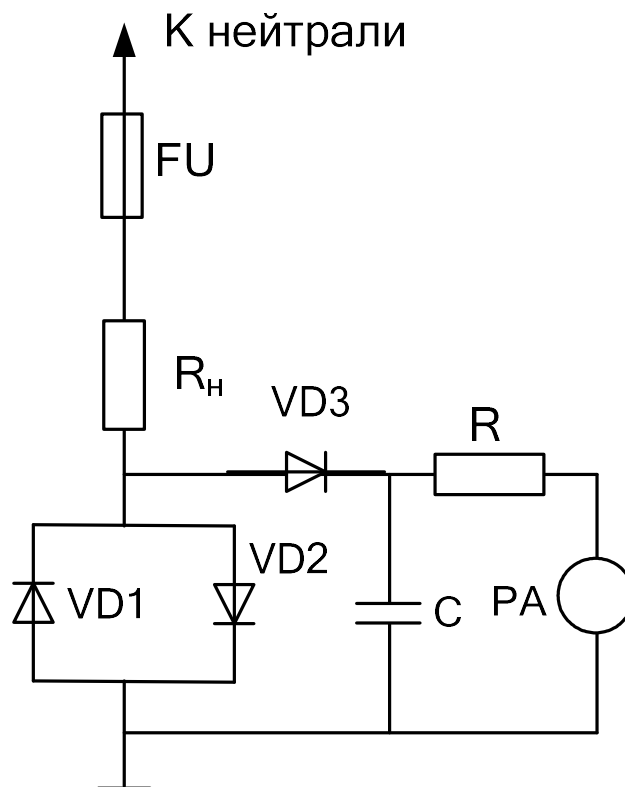


Рисунок Б.16 – Схема пристрою для заземлення нейтралі, включаючи ємнісний регулятор струму компенсації та низьковольтний резистор

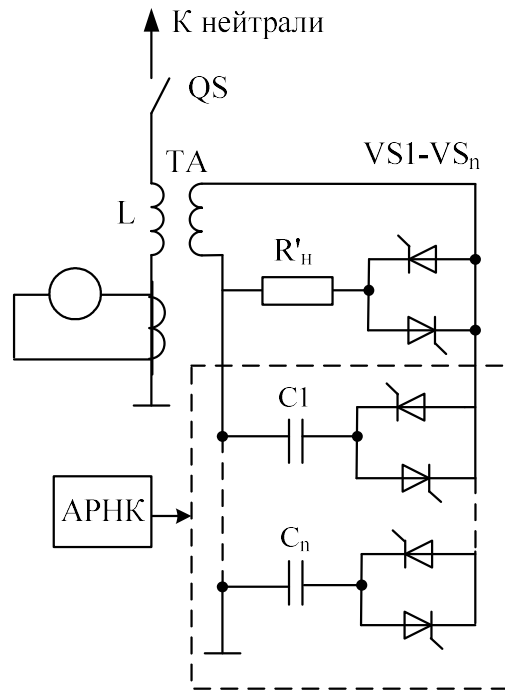


Рисунок Б.17 – Система заземлення нейтралі, що базується на використанні реактора ЗРОМ 300/10 та високовольтного резистора

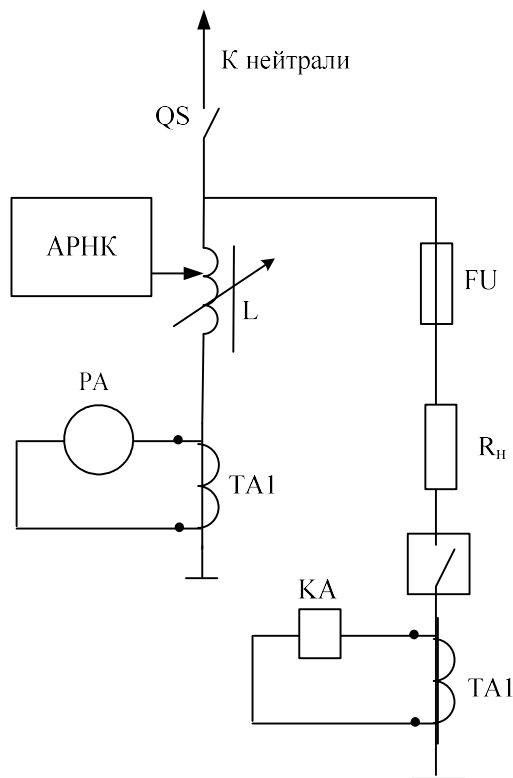
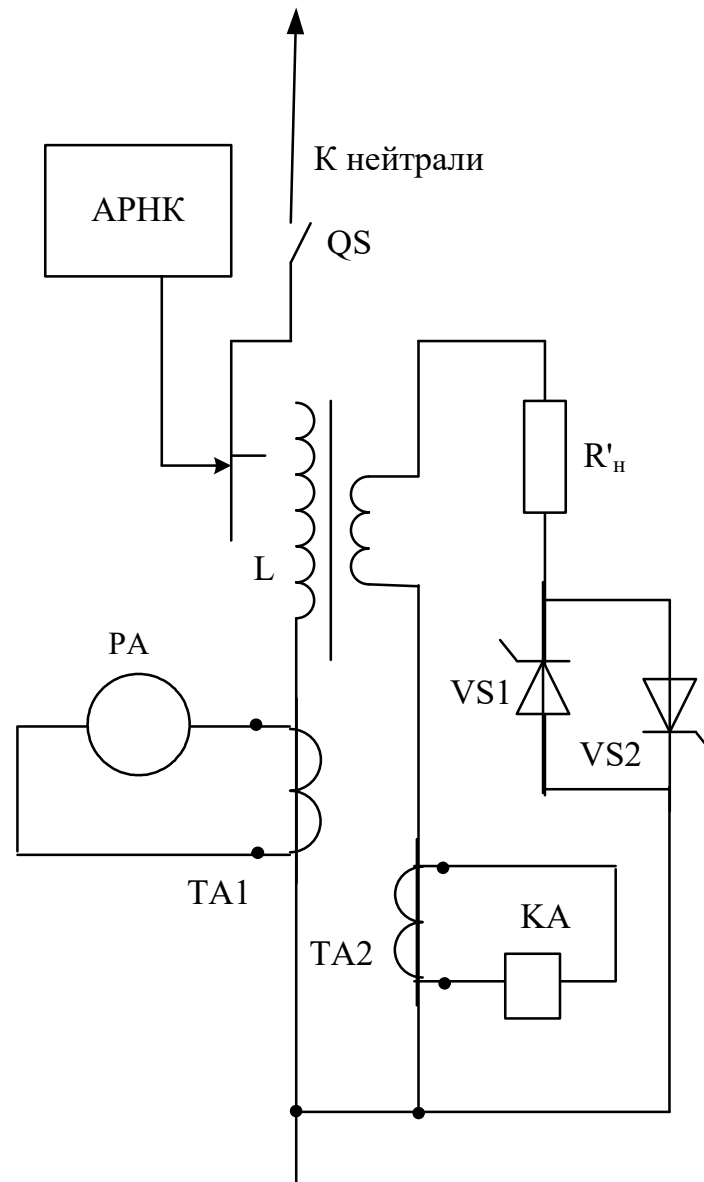


Рисунок Б.18 – Конфігурація пристрою для ефективного заземлення нейтралі з поетапним регулюванням струму компенсації та використанням низьковольтного резистора



Додаток В  
(обов'язковий)

**ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ)  
РОБОТИ**

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ РОБОТИ НЕЙТРАЛІ В  
РОЗПОДІЛЬНІЙ МЕРЕЖІ НАПРУГОЮ 6-35 КВ

ПРОТОКОЛ  
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Оптимізація режиму роботи нейтралі в розподільній мережі напругою 6-35 кВ.

Тип роботи: магістерська дипломна робота  
(БДР, МКР)

Підрозділ: кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту

факультет електроенергетики, електротехніки та електромеханіки  
(кафедра, факультет)

**Показники звіту подібності Unicheck**

Оригінальність 81,8% Схожість 18,2%

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 Unicheck щодо роботи.

Автор роботи \_\_\_\_\_ Завальнюк О. В.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

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

Додаток Г (обов'язковий)

## **ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ**

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ РОБОТИ НЕЙТРАЛІ В  
РОЗПОДІЛЬНІЙ МЕРЕЖІ НАПРУГОЮ 6-35 КВ

Факультет електроенергетики та електромеханіки  
Кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту

### МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Оптимізація режиму роботи нейтралі в розподільній мережі напругою 6-35 кВ»

Виконав: студент 2-го курсу, групи ЕСЕ-23м  
спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
Завальнюк О.В.

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

Вінниця – 2023

#### ВСТУП

Мережа розподілу напруги в діапазоні 6-35 кВ представляє собою складну, просторово розподілену електротехнічну систему з неоднорідною структурою. Вона складається з різноманітних конструктивних елементів, що відрізняються за принципом дії, функціональним призначенням та фізичними характеристиками.

Протягом тривалого періоду проводяться заходи з метою забезпечення високого рівня надійності, безпеки та ефективності використання розподільчих мереж. Це досягається за допомогою створення додаткових центрів живлення, скорочення довжини радіальних ліній, використання комутаційних апаратів, впровадження засобів релейного захисту та автоматики протиаварійного захисту.

Незважаючи на ці заходи, в електроустановках з ізольованою нейтраллю залишається проблема значної кількості однофазних замикань на землю (ОЗЗ). Кабельні мережі відзначаються переважанням однофазних замикань на землю, тоді як у повітряних мережах спостерігається обрив проводів з наступним замиканням на землю і ОЗЗ викликані пробоями ізоляції та перекриттям ізоляторів.

Однофазні замикання на землю негативно впливають на показники надійності, безпеки та ефективності використання систем електропостачання. Вони призводять до значних внутрішніх перенапруг, характерних для мереж з ізольованою нейтраллю, і компенсації ємнісних струмів ОЗЗ. Також існує ризик виникнення як подвійних замикань на землю так і пошкодження засобів контролю ізоляції і трансформаторів напруги, що призводить до зниження ефективності компенсації струмів ОЗЗ, зростання числа коротких замикань, довготривалої наявності небезпечної напруги дотику і кроку, підвищення ймовірності помилкових дій обслуговуючого персоналу та погіршення селективності, швидкодії, чутливості та надійності релейного захисту.

Режим нейтралі у системі електропостачання ускладнює умови безпечної експлуатації мережі. Небезпечна напруга дотику може тривати продовжений час, однофазні замикання можуть виникнути через залізобетонні опори із спіканням ґрунту в їхній основі, а також через обрив і падіння провідника повітряної лінії. Збільшується ризик помилкових дій експлуатаційного персоналу, а також можливість перекриття ізоляції комутаційних апаратів при здійсненні оперативних перемикань, що виконують з метою визначення пошкодженої ділянки мережі.

Правила облаштування електроустановок та Правила технічної експлуатації станцій і мереж передбачають для розподільчих мережах 6, 10, 20 і 35 кВ два варіанти стану нейтралі. Для ємнісних струмів ОЗЗ до 30, 20, 15 і 10 А приєднання нейтралі силового трансформатора до заземлюючого пристрою не передбачено. За умови більших струмів між нейтраллю і землею використовують реактор для компенсації ємнісних струмів ОЗЗ, а також допускається заземлення через резистори.

Зменшення кількості однофазних замикань на землю і його вплив на надійність, безпеку та ефективність експлуатації систем електропостачання значно залежить від режиму роботи нейтралі. Тому виникає завдання пошуку ефективних методів роботи нейтралі систем електропостачання, і саме цьому присвячена дана робота.

**Мета і завдання дослідження.** Мета цього дослідження полягає в підвищенні рівня надійності, безпеки та ефективності експлуатації розподільних мереж напругою 6-10 кВ. Це досягається шляхом оптимізації режиму роботи нейтралі з використанням комплексного діагностичного показника.

**Об'єкт дослідження** – процеси, що відбуваються під час експлуатації розподільної мережі і пов'язані із зміною її технічного стану.

**Предмет дослідження** – вплив режиму роботи нейтралі на технічний стан ізоляції у розподільних мережах напругою 6-10 кВ.

Задачі дослідження

1. Загальна характеристика об'єкта дослідження.
2. Визначення критеріїв ефективності для оцінки роботи нейтралі у розподільних мережах.
3. Аналіз перенапруги при випадках однофазних замикань на землю у розподільних мережах.
4. Вивчення захисного вимикання як ефективного засобу підвищення безпеки експлуатації розподільних мереж напругою 6-10 кВ.
5. Оцінка впливу режиму нейтралі на роботу релейного захисту в умовах однофазного замикання на землю та аналіз засобів заземлення нейтралі в розподільних мережах.
6. Аналіз економічної ефективності роботи нейтралі в розподільних мережах напругою 6-10 кВ.

Основні теоретичні положення й найважливіші практичні результати виконаного дослідження було обговорено на ЛІІ науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ. За результатами опубліковані тези доповідей.

#### **Новизна одержаних результатів.**

1. Метод вибору критерію ефективності заземлення нейтралі отримав подальший розвиток. Доведено, що при визначенні оптимального варіанту необхідно враховувати різноманітні параметри та процеси, такі як: кратність перенапруг при однофазних замиканнях; час існування однофазного замикання на землю; значення напруги дотику та розподіл струму, що виникає при однофазних замиканнях на землю; величина і характеристика струму однофазних замикань на землю; характеристики та властивості релейного захисту від однофазних замикань; технічні параметри пристроїв шунтування пошкодженої фази. Отже, у виборі критерію ефективності заземлення нейтралі важливо враховувати комплекс параметрів та взаємодію різних факторів для забезпечення оптимального функціонування системи.

2. Було підтверджено, що при дослідженні впливу режиму нейтралі на рівень перенапруг розумно враховувати лише внутрішні перенапруги, такі як комутаційні, ферорезонансні і ті, що виникають при однофазних замиканнях, супроводжених перекидною дугою. Як критерій для оцінки перенапруг в залежності від режиму нейтралі доцільно використовувати відношення площин густин розподілу коефіцієнта кратності перенапруг на пошкоджених фазах до максимально можливої перенапруги.

3. Для аналізу впливу режиму нейтралі на кількість та тривалість пошуку пошкоджень рекомендовано використовувати відношення середнього часу відключеного стану споживачів, обумовленого причинами, що залежать від режиму нейтралі. Це включає період від ізоляції нейтралі до моменту, коли вона стає заземленою за допомогою пристроїв компенсації ємнісного струму або резистора.



## Загальна характеристика об'єкта дослідження

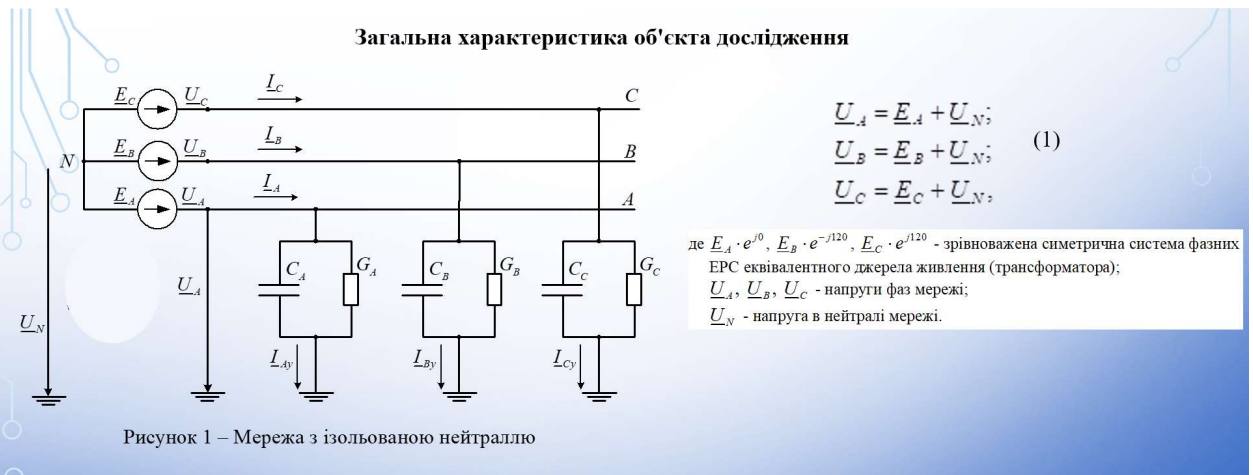


Рисунок 1 – Мережа з ізольованою нейтраллю

де  $\underline{E}_A \cdot e^{j0}, \underline{E}_B \cdot e^{-j120}, \underline{E}_C \cdot e^{j120}$  - зрівноважена симетрична система фазних ЕРС еквівалентного джерела живлення (трансформатора);  
 $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$  - напруги фаз мережі;  
 $\underline{U}_N$  - напруга в нейтралі мережі.

## За першим законом Кірхгофа

$$\underline{U}_A \underline{Y}_A + \underline{U}_B \underline{Y}_B + \underline{U}_C \underline{Y}_C = 0, \quad (2)$$

де  $\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C$  - провідності фаз мережі на землю, які мають, в загальному випадку, як активну ( $G_A, G_B, G_C$ ), так і ємнісну ( $C_A, C_B, C_C$ ) складові:  $\underline{Y}_A = G_A + jC_A; \underline{Y}_B = G_B + jC_B; \underline{Y}_C = G_C + jC_C$ .

Розв'язуючи сумісно (1) і (2),  $\underline{U}_N$  визначимо в наступному вигляді:

$$\underline{U}_N = -\frac{\underline{E}_A \underline{Y}_A + \underline{E}_B \underline{Y}_B + \underline{E}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} \quad (3)$$

### Висновки за результатами аналізу об'єкта дослідження

1. Існуючі системи електропостачання напругою 6-35 кВ є складною системою. Вони функціонально різноманітні, конструктивно складні, мають високу ціну відмов, автономні, працюють в режимі з ізольованою або заземленою через значний опір.

2. Основним видом пошкодження (до 80 %) є однофазні замикання на землю. Цей вид пошкодження супроводжується виникненням небезпечних умов експлуатації: підвищення рівня напруги на корпусі обладнання, струму розтікання, спікання ґрунту біля заземлюючого пристрою, виникнення пожежі, вибуху.

3. Для підвищення рівня безпеки застосовують різні методи попередження виникнення ОЗЗ: неперервний контроль ізоляції, компенсація ємнісних струмів, релейний захист, шунтування пошкодженої фази відносно землі. Ефективність роботи всіх цих пристроїв залежить від режиму роботи нейтралі. Тому існує необхідність провести дослідження впливу режиму нейтралі на роботу засобів підвищення рівня безпеки та оптимізувати їх взаємодію між собою.

### Критерії ефективності режиму нейтралі



Рисунок 1 – Критерії ефективності режиму нейтралі

### Комплексний показник ефективності

З метою визначення  $E_k$  застосована найбільше розповсюджене оцінювання - середня арифметична лінійна форма цільової функції

$$E_k = \sum_{i=1}^n V_i \rho_{ik} \quad (1)$$

Вагові коефіцієнти показників ефективності режиму нейтралі отримані із групових експертних оцінок спеціалістів, по експертним даним шляхом усереднювання відповідних оцінок були обчислені вагові коефіцієнти які використані в розрахунках цільової функції .

Вибір оптимального варіанту заземлення нейтралі здійснюється шляхом порівняння сукупності показників, а також приведених затрат на експлуатацію мережі Завдання вирішується однозначно, якщо по одному з варіантів  $E_k$  виявляється вищим, а  $Z_k$  - менше, ніж по інших варіантах.

$$V_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^n W_{j,i}$$

де  $k$  - номер даного варіанту режиму нейтралі;  $n$  - число критеріальних властивостей, що враховувалися ( незалежних показників ефективності режиму нейтралі);  $V_i$  - вагові коефіцієнти показників;  $\rho_{ik} = f_{ik}(y)$  - залежності оцінок ефективності режиму нейтралі від відповідних параметрів і експлуатаційних характеристик мережі.

### Причини виникнення перенапруг та їх характер

При обробці результатів вимірювань виявлено, що кратності перенапруг характеризуються нормальним законом розподілу

$$P = \frac{k}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} e^{-\frac{(k_n - a)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

Таблиця 1 – Параметри нормального закону розподілу при різних режимах нейтралі

| № | Нейтраль мережі          | $\sigma$ | $A$  | $k$  |
|---|--------------------------|----------|------|------|
| 1 | Ізольована               | 0,46     | 2,27 | 1,01 |
| 2 | Заземлена через реактор  | 0,39     | 2,07 | 1    |
| 3 | Заземлена через резистор | 0,26     | 1,92 | 1    |

Загальний вигляд показника ефективності режиму нейтралі за умовою обмеження перенапруг можна визначити за виразом

$$y_{\text{п2(3)}} = \int_{2,4}^{3,6} f_1(k_{\text{п}}) dk_{\text{п}} \left[ \int_{2,4}^{3,6} f_{2(3)}(k_{\text{п}}) dk_{\text{п}} \right]^{-1} \quad (3)$$

Обчислення з використанням цього виразу дали наступні результати:

$$y_{\text{п2}} = 1,54 \quad y_{\text{п3}} = 8,1$$

Визначення оцінок

$$\rho_{\text{п1}} = 1 - \frac{1}{y_{\text{п1}}} \quad (4)$$

### Аналіз впливу режиму роботи нейтралі на аварійні відключення

Тривалість аварійних простоїв визначається кількістю відключень, а також витратами часу на віділення пошкодженої ділянки мережі і перемикання споживачів на резервне джерело живлення. Показники ефективності режиму нейтралі по умові зниження збитку можна визначити як відношення

$$\rho_{y1} = \frac{t_{y1}}{t_{y1}} = 1; \quad \rho_{y2} = \frac{t_{y1}}{t_{y2}}; \quad \rho_{y3} = \frac{t_{y1}}{t_{y3}} = 1,$$

де  $t_{y1}$  - середній (зважений) час відключеного стану споживачів по причинах, залежних від режиму нейтралі, в мережі з ізолюваною нейтраллю;  $t_{y2}$  - середній (зважений) час відключеного стану споживачів по причинах, залежних від режиму нейтралі з компенсацією ємнісних струмів однофазних замикань;  $t_{y3}$  - середній (зважений) час відключеного стану споживачів по причинах, залежних від режиму нейтралі при заземленні нейтралі через резистор.

У загальному вигляді показники ефективності режиму нейтралі за умовою збитку

$$\rho_{y2} = \frac{\eta_{1-2} \left( \sum_{i=1}^{i=k} t_{yi1} \cdot n_{0i1} \right) \sum_{i=1}^{i=m} n_{0i2}}{\left( \sum_{i=1}^{i=k} n_{0i1} \right) \left( \sum_{i=1}^{i=m} t_{yi2} \cdot n_{0i2} \right)} \quad \rho_{y3} = \frac{\rho_{y2} \eta_{1-3}}{\eta_{1-2} \frac{1 - a_{p3}}{1 - a_{p2}}} \quad (1)$$

де  $\eta_{1-2}$ ,  $\eta_{1-3}$  - відносне зниження числа пошкоджень при переході від ізолюваної нейтралі до заземленої відповідно через реактор і резистор;  $t_{y1}$ ,  $t_{y2}$  - час одного аварійного відключення споживачів в мережі відповідно з ізолюваною і заземленою через реактор нейтраллю;  $n_{0i1}$ ,  $n_{0i2}$  - число однофазних замикань в мережі при тих же режимах нейтралі;  $a_{p2}$ ,  $a_{p3}$  - показники селективності реле сигналізації в мережі із заземленням нейтралі відповідно через реактор і резистор.



### Величина впливу режиму роботи нейтралі на напругу дотику та кроку при однофазних замиканнях на землю

У таблиці 1 приведені розраховані за результатами виконаних в мережах "Вінницяобленерго" вимірювань максимального значення напруги, у вольтах на заземлювачах опор відносно електроду, винесеного за межі поля розтікання.

Таблиця 1 – Напруги дотику на заземлювачах опор

| Підстанція | Опори заземлювачів, Ом |     |     |     |
|------------|------------------------|-----|-----|-----|
|            | 10                     | 15  | 20  | 30  |
| 1          | -                      | -   | 267 | 403 |
| 2          | 187                    | -   | -   | -   |
| 3          | 148                    | 223 | 297 | 448 |
| 4          | 141                    | 212 | -   | -   |
| 5          | 101                    | 152 | 203 | -   |
| 6          | -                      | -   | 427 | 643 |
| 7          | 85                     | 128 | 173 | -   |

Малоефективною є компенсація емнісних струмів однофазних замикань при обривах і падіннях проводів повітряних ліній, у випадках дотиків до них людей як в сільських, так і в міських мережах. Навпаки, її застосування не виключає тривалого існування в мережі однофазного замикання, збільшуючи вірогідність дії небезпечної напруги дотику.

### Вплив режиму нейтралі на релейний захист від однофазного замикання на землю

Показники ефективності по впливу на параметри пристроїв релейного захисту від однофазних замикань може бути визначений як відношення числа селективних спрацьовувань до кількості випадків їх хибного функціонування. Досвід експлуатації пристроїв релейною запиті на прикладі мереж 6 кВ Іршинського гірничо-збагачувального комбінату показав, що для ізольованої нейтралі  $y_{3I}=1,35$ , а для нейтралі, заземленої через резистор,  $y_{33}=19,5$ . За виразом

$$\rho_{3I} = 1 - \frac{1}{y_{3I}} \quad (1) \quad \rho_{3I}=0,25; \quad \rho_{33}=0,95$$

Аналогічні розрахунки стосовно міських мереж 10 кВ дали наступні значення оцінок:

$$\rho_{3I}=0,67; \quad \rho_{33}=0,96$$

### Засоби заземлення нейтралі

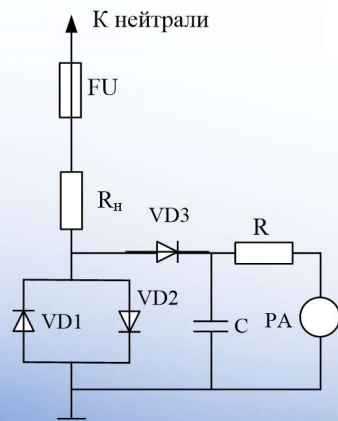


Рисунок 1 – Основний варіант схеми пристрою для заземлення нейтралі мережі

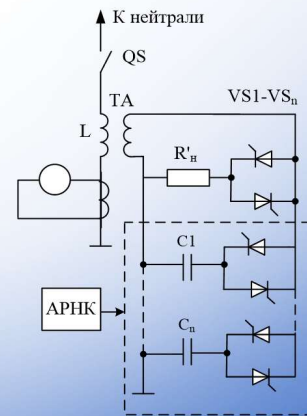


Рисунок 2 – Схема пристрою для заземлення нейтралі з ємнісним регулятором струму компенсації і низьковольтним резистором

### Оцінка економічної ефективності обраного режиму роботи нейтралі

$$Z = P \sum_{i=1}^{m_1} K_i + \sum_{i=1}^{m_2} U_i + \sum_{i=1}^{m_3} V_i \quad (1)$$

де  $P$  - нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень;  $\sum_{i=1}^{m_1} K_i$  - сумарні капітальні вкладення для пристроїв заземлення нейтралі -  $K_1$ , монтаж додаткових комутаційних апаратів (вимикачів) і резервних ділянок ліній електропередач -  $K_2$ , для пристроїв автоматики і релейного захисту від однофазних замикання;  $\sum_{i=1}^{m_2} U_i$  - сумарні витрати на експлуатацію мережі, поточний ремонт і обслуговування устаткування відповідно до капітальних вкладень  $K_1, K_2$  і  $K_3$ , а також вартість втрат електричної енергії в післяаварійному режимі;  $\sum_{i=1}^{m_3} V_i$  - збиток від аварій в розподільних мережах, викликаний однофазними замиканнями і їх наслідками.

Таблиця 1 - Характеристики ефективності розглянутих варіантів режиму нейтралі розподільних мереж

| Характеристика   | Нейтраль мережі    |                   |                      |
|--|--------------------|-------------------|----------------------|
|  | ізолювана          | заземлена через   |                      |
|  |                    | реактор           | резистор             |
| Кількість пошкоджень ізоляції, затрати на відновлювальний ремонт обладнання мережі   | $n_n$              | <0,65             | <0,12                |
| Продуктивність праці персоналу при виділенні пошкодженої ділянки мережі  | $y^*=1$<br>низька  | 0,6-0,8<br>низька | <0,1<br>висока       |
| Імовірність дотику людини до заземлених частин обладнання з однофазним замиканням<br>Струми ураження у випадку дотику людини до струмоведучих частин обладнання: | $p_n=1$            | 1                 | <0,01                |
| у стійкому режимі з урахуванням перехідного процесу при часі дії до 0,01с  | $I_{3*}=1$         | 0,1-0,3           | ≈0,9                 |
| Параметри автоматичного ПЗФ:   | Приблизно однакові |                   |                      |
| Чутливість   | $R_{3*}=1$ кОм     | -                 | $R_{3*}=3$ кОм       |
| Швидкодія  | $t_{сп}>10$ мс     | -                 | $t_{сп}≈6$ мс        |
| Параметри пристроїв релейного захисту від однофазних замикань: чутливість і швидкодія  | примусово високі   | -                 | обґрунтовано знижені |
| селективність і завадостійкість  | низькі             | -                 | дуже високі          |
| імовірність відмов   | $P_o≈0,1÷0,3$      | -                 | $P_o<0,05$           |
| Матеріалоемність електрообладнання   | 1                  | 1                 | 0,85-0,88            |
| Вартість електрообладнання   | 1                  | 1                 | 0,9-0,93             |
| Імовірність хибних дій персоналу в аварійних ситуаціях   | висока             | висока            | істотно нижче        |

#### ВИСНОВОК

В роботі вирішена науково-прикладна задача вибору оптимального режиму роботи нейтралі і дослідження її впливу на ефективність роботи засобів автоматики і рівень безпеки експлуатації розподільної мережі. В результаті проведених досліджень встановлено.

1. Режим роботи нейтралі відноситься до важливих чинників які визначають надійність і безпеку експлуатації розподільних мереж.

2. Критерії ефективності режиму нейтралі визначені на основі аналізу сучасних засобів захисту для мереж напругою від 6 до 35 кВ від однофазних замикань. Комплексний показник ефективності режиму нейтралі розглядається як міра наближення мережі, яка використовує певний метод заземлення нейтралі, до еталону. Еталонна мережа характеризується рівністю цільової функції до відносного максимального значення.

3. Встановлено, що заземлення нейтралі розподільної мережі за допомогою резистора обмежує рівень внутрішніх перенапруг не лише при перекидних однофазних замиканнях, але й в інших ситуаціях, таких як виникнення ферорезонансних явищ. Це призводить до зменшення кількості однофазних замикань та загальної кількості пошкоджень мережі, що безпосередньо впливає на витрати експлуатуючих організацій на відновлення. Заземлення нейтралі через резистор також забезпечує від виникнення подвійних замикань на землю.

4. Збиток від аварійних відключень споживачів, число відключень в процесі пошуку пошкодженої ділянки, неселективні спрацювання пристроїв РЗ і А і втрат резерву в післяаварійному режимі при заземленні нейтралі через резистор в порівнянні при ізолюваній нейтралі зменшується в 6-8 раз.

5. Напруга кроку і дотику при однофазних замиканнях в разі застосування заземлення нейтралі через резистор зменшується в порівнянні з ізолюваною нейтраллю в 3-5 разів.

6. Недоліком заземлення через резистор є акумулювання пошкоджень як не виявляються на ранній стадії їх розвитку, що вимагає застосування спеціальної системи ТО, що забезпечує накопичення невеликої кількості пошкоджень.