

Центральноукраїнський національний технічний університет  
Центр заочної та дистанційної освіти  
Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”  
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ  
к.т.н., професор  
\_\_\_\_\_Петро ПЛЄШКОВ  
“\_\_” \_\_\_\_\_2024 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**за другим (магістерським) рівнем вищої освіти**  
на тему:

**«Аналіз шляхів підвищення надійності роботи  
трансформаторів напруги в мережах з ізольованою  
нейтраллю в умовах замикань на землю  
Analysis of ways to improve the reliability of voltage  
transformers in networks with isolated neutral under  
conditions of earth faults»**

Виконала здобувачка вищої освіти  
ІІ курсу магістратури, групи ЕНМ-22МЗ  
ОПП «Енергетичний менеджмент»  
спеціальності 141 «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка»  
\_\_\_\_\_Ірина ШТУНДЕР  
«\_\_» \_\_\_\_\_2023 р.

Керівник роботи  
к.т.н, доцент  
\_\_\_\_\_Олександр СІРІКОВ  
«\_\_» \_\_\_\_\_2023 р.

Рецензент \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

м. Кропивницький, 2023

## Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет центр заочної та дистанційної освіти

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна (освітньо-наукова) програма

Енергетичний менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Петро ПЛЕСКОВ

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 р.

### ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Штундер Ірини Костянтинівни

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Аналіз шляхів підвищення надійності роботи трансформаторів напруги в мережах з ізольованою нейтраллю в умовах замикань на землю  
Analysis of ways to improve the reliability of voltage transformers in networks with isolated neutral under conditions of earth faults

2. Керівник роботи Сіріков Олександр Іванович, к.т.н., доцент

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

3. Строк подання роботи до захисту 28.12.2023 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи Метою роботи є дослідження шляхів підвищення надійності експлуатації трансформаторів напруги в мережах з ізольованою нейтраллю в умовах однофазних замикань на землю.

Завдання роботи: аналіз умов роботи та захист трансформаторів напруги 6-35 кВ при однофазних замиканнях на землю; математичне моделювання роботи електричних мереж з ізольованою та компенсованою нейтраллю в умовах однофазних замикань на землю; розробка пристрою контролю цілісності ізоляції в мережах 6 – 35 кВ; охорона праці.

## 5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

| Розділ               | Консультант                        | Підпис, дата   |                  |
|----------------------|------------------------------------|----------------|------------------|
|                      |                                    | Завдання видав | Завдання прийняв |
| <i>Охорона праці</i> | <i>к.т.н., доц. Савеленко І.В.</i> |                |                  |
|                      |                                    |                |                  |
|                      |                                    |                |                  |

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи                                                                                                   | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1     | <i>Вступ</i>                                                                                                                          | <i>13.10.23</i>               |          |
| 2     | <i>Аналіз умов роботи та захист трансформаторів напруги 6-35 кВ при однофазних замиканнях на землю</i>                                | <i>27.10.23</i>               |          |
| 3     | <i>Математичне моделювання роботи електричних мереж з ізолюваною та компенсованою нейтраллю в умовах однофазних замикань на землю</i> | <i>17.11.23</i>               |          |
| 4     | <i>Розробка пристрою контролю цілісності ізоляції в мережах 6 – 35 кВ</i>                                                             | <i>01.12.23</i>               |          |
| 5     | <i>Охорона праці</i>                                                                                                                  | <i>15.12.23</i>               |          |
| 6     | <i>Висновки</i>                                                                                                                       | <i>22.12.23</i>               |          |
| 7     | <i>Оформлення кваліфікаційної роботи та презентації до неї</i>                                                                        | <i>28.12.23</i>               |          |

Дата видачі завдання

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

Підпис керівника

\_\_\_\_\_ Сіріков О.І.  
(прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

Підпис здобувача

\_\_\_\_\_ Штундер І.К.  
(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

**Штундер І.К. Аналіз шляхів підвищення надійності роботи трансформаторів напруги в мережах з ізольованою нейтраллю в умовах замикань на землю.**

Кваліфікаційна робота за другим рівнем вищої освіти зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Енергетичний менеджмент», Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, 2023.

Мета кваліфікаційної роботи полягає в дослідженні шляхів підвищення надійності експлуатації трансформаторів напруги в мережах з ізольованою нейтраллю в умовах однофазних замикань на землю.

Проведений аналіз різних способів роботи нейтралі електричних мереж: ізольований режим, заземлення через дугогасячий реактор, заземлення через високоомний та низькоомний опір. Наведені переваги та недоліки кожного режиму роботи нейтралі. В електричних мережах з ізольованою нейтраллю при замиканнях на землю можливе виникнення ферорезонансних явищ, що призводять до виходу з ладу трансформаторів напруги. Досвід експлуатації електричних мереж з ізольованою нейтраллю показує високу пошкоджуваність трансформаторів напруги від ферорезонансних явищ при замиканні на землю.

Проведено математичне моделювання режимів роботи електричної мережі з ізольованою і заземленою через дугогасячий реактор нейтраллю при однофазних замиканнях на землю. Визначено, що заземлення через дугогасячий реактор навіть при повній компенсації реактивної складової не виключає струму в місці замикання на землю. Розроблений пристрій контролю цілісності ізоляції для електричних мереж, що працюють з ізольованою і компенсованою нейтраллю. Він дозволяє працювати трансформаторам напруги з розземленням нейтралі і тим самим виключити виникнення ферорезонансних процесів, а отже, підвищити надійність їх роботи.

**Ключові слова:** трансформатор напруги, перенапруги, ферорезонанс, однофазне замикання на землю, контроль ізоляції.

## ABSTRACT

**Stunder I.K. Analysis of ways to improve the reliability of voltage transformers in networks with isolated neutral under conditions of earth faults.**

Qualification work for the second level of higher education in specialty 141 «Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics», EPP «Energy Management», Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2023.

The purpose of the qualification work is to investigate ways to increase the reliability of operation of voltage transformers in networks with an isolated neutral in conditions of single-phase earth faults.

The analysis of various methods of operation of the neutral of electrical networks was carried out: isolated mode, grounding through an arc extinguishing reactor, grounding through high-resistance and low-resistance resistance. The advantages and disadvantages of each mode of neutral operation are given. In electrical networks with an isolated neutral, ferroresonance phenomena may occur during earth faults, which lead to the failure of voltage transformers. The experience of operating electric networks with an isolated neutral shows the high damage of voltage transformers from ferroresonance phenomena when shorted to the ground.

Mathematical modeling of the modes operation of the electric network with isolated and grounded through the arc-quenching reactor neutral during single-phase earth faults was carried out. It was determined that grounding through an arc-quenching reactor, even with full compensation of the reactive component, does not exclude the current at the place of the earth fault. The insulation integrity control device for electrical networks operating with isolated and compensated neutral was developed. It allows voltage transformers to work with neutral grounding and thereby exclude the occurrence of ferroresonance processes, and therefore increase the reliability of their operation.

**Key words:** voltage transformer, surges, ferroresonance, single-phase earth fault, insulation control.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                                    |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| ВСТУП.....                                                                                                                                         | 9         |
| <b>РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ УМОВ РОБОТИ ТА ЗАХИСТ ТРАНСФОРМАТОРІВ<br/>НАПРУГИ 6-35 кВ ПРИ ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАННЯХ НА ЗЕМЛЮ .....</b>                         | <b>13</b> |
| 1.1 Переваги та недоліки різних способів роботи нейтралі електричних мереж<br>середнього класу напруг.....                                         | 13        |
| 1.2 Перенапруги в мережах 6-35 кВ.....                                                                                                             | 16        |
| 1.3 Аналіз надійності роботи трансформаторів напруги в умовах<br>ферорезонансних явищ.....                                                         | 18        |
| 1.4 Фізичні процеси, що відбуваються при ферорезонансі .....                                                                                       | 19        |
| 1.5 Ферорезонанс в мережах 6-35 кВ з електромагнітними ТН.....                                                                                     | 25        |
| 1.6 Схеми та основні принципи конструктивних рішень антирезонансних ТН 6-<br>35 кВ .....                                                           | 31        |
| 1.7 Висновки .....                                                                                                                                 | 34        |
| <b>РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З<br/>ІЗОЛЬОВАНОЮ ТА КОМПЕНСОВАНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ В УМОВАХ<br/>ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ .....</b> | <b>36</b> |
| 2.1 Замикання на землю в мережах з ізолюованою нейтраллю .....                                                                                     | 36        |
| 2.2 Виникнення перенапруг в електричних мережах, що працюють з<br>ізолюованою нейтраллю при дугових ОЗЗ.....                                       | 38        |
| 2.3 Процеси при ОЗЗ в мережах, що працюють з компенсованою нейтраллю ...                                                                           | 42        |
| 2.4 Умови роботи ТН в розподільчих мережах напругою 10 - 35 кВ.....                                                                                | 46        |
| 2.5 Вплив ТН на появу перенапруг в розподільчих мережах з ізолюованою<br>нейтраллю .....                                                           | 49        |
| <b>РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ КОНТРОЛЮ ЦІЛІСНОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ В<br/>МЕРЕЖАХ 6 – 35 кВ .....</b>                                                      | <b>56</b> |
| 3.1 Обґрунтування можливості використання альтернативних методів контролю<br>за станом ізоляції.....                                               | 56        |
| 3.2 Аналіз складових струму витоку через ізолятор .....                                                                                            | 57        |

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|                                                                                                   | 7  |
| 3.3 Розділення струмів витоку ізоляторів.....                                                     | 62 |
| 3.4 Пристрій контролю ізоляції ПКІ-1 .....                                                        | 64 |
| 3.5 Розробка пристрою контролю цілісності ізоляції в мережах з ізольованою<br>нейтраллю ПКЗЗ..... | 67 |
| 3.6 Висновки .....                                                                                | 70 |
| РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ .....                                                                     | 72 |
| 4.1 Загальні засади з охорони праці при роботі в електроустановках.....                           | 72 |
| 4.2 Основні організаційно-технічні заходи з техніки безпеки .....                                 | 77 |
| 4.3 Розрахунок контуру заземлення для трансформаторної підстанції .....                           | 79 |
| 4.4 Розрахунок блискавкозахисту .....                                                             | 82 |
| 4.5 Висновки .....                                                                                | 84 |
| ВИСНОВКИ.....                                                                                     | 86 |
| ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....                                                                            | 88 |

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

|      |                                                    |
|------|----------------------------------------------------|
| ДГР  | - дугогасячий реактор;                             |
| ЗНЗ  | - замикання на землю;                              |
| ЛЕП  | - лінія електропередачі;                           |
| ОЗЗ  | - однофазне замикання на землю;                    |
| ОТНП | - однофазний трансформатор нульової послідовності; |
| ОПН  | - обмежувач перенапруги;                           |
| ПКЗЗ | - пристрій контролю замикання на землю;            |
| ПЛ   | - повітряна лінія;                                 |
| РЗ   | - релейний захист;                                 |
| РЗА  | - релейний захист та автоматика;                   |
| РП   | - розподільчий пристрій;                           |
| ТН   | - трансформатор напруги;                           |
| ТНКІ | - трансформатор напруги контролю ізоляції;         |
| ФРП  | - ферорезонансні процеси.                          |

## ВСТУП

Підвищення надійності постачання електроенергії споживачам є основним пріоритетом у сфері електроенергетики. Надійна робота електричних мереж, здатних забезпечити безперервне постачання електроенергії необхідної якості, значно залежить від технічних рішень у сфері запобігання відмов елементів системи електропостачання. Це стосується ситуацій, коли система працює в умовах забруднення та зволоження ізоляції, термічних та динамічних перевантаженнях, впливу людського фактору та інших негативних чинників.

Стійка робота електропостачальних систем в багатьох випадках залежить від ефективної експлуатації електричних мереж напругою 6-35 кВ, які отримали широке поширення та, як правило, мають найбільшу протяжність. В сучасний час такі електричні мережі використовуються на промислових підприємствах, для власних потреб електростанцій, а також в міських та сільських електричних мережах, що значно впливає на надійність функціонування цих об'єктів.

В умовах сильної зношеності ізоляції електрообладнання розподільних мереж, середня тривалість експлуатації яких в переважній більшості випадків значно перевершує нормативні терміни експлуатації, а також високої відповідальності перед споживачами електричної енергії, питанням підвищення надійності роботи цих мереж постійно приділяється значна увага, як з боку науково-дослідницьких та експлуатуючих організацій, так і з боку заводів-виробників електроустаткування. Відбувається впровадження високоомного і низкоомного заземлення нейтралі мережі, сучасного мікропроцесорної захисту, обмежувачів перенапруг.

**Актуальність роботи.** Досвід експлуатації електричних мереж напругою 6-35 кВ з ізолюваною або компенсованою нейтраллю свідчить, що до 80% всіх випадків порушень електропостачання споживачам припадає саме на такі мережі. Основним фактором, що призводить до пошкоджень електрообладнання, є однофазні замикання на землю. У мережах з ізолюваною нейтраллю, однофазні замикання на землю не розглядаються як аварійний стан і трапляються досить часто. Законодавчі норми дозволяють продовжувати роботу лінії з ізолюваною

нейтраллю під час однофазних замикань на землю до восьми годин, але важливо відразу розпочати пошук та усунення місця замикання, оскільки існує значний ризик потрапляння людей під високу напругу. Однак недоліками таких мереж є часті пошкодження електрообладнання внаслідок перенапруг високого рівня при дугових замиканнях на землю, а також складнощі забезпечення селективної роботи релейного захисту, особливо при низьких рівнях струмів замикання фази на землю.

Завдяки сильній зношеності ізоляції, в переважній більшості випадків, однофазні замикання на землю призводять до появи міжфазних коротких замикань або пробойів ізоляції в багатьох місцях, що супроводжуються виходом з ладу електрообладнання та значними матеріальними збитками. Тому справедливо вважається, що основним напрямком підвищення надійності роботи таких електричних мереж є упередження однофазних замикань на землю.

В мережах напругою 6-35 кВ з ізолюваною нейтраллю, при виникненні однофазного замикання на землю, можливий ферорезонанс, обумовлений взаємодією індуктивності трансформатора напруги з ємністю мережі. Ферорезонансні явища виникають лише в умовах можливості протікання струмів нульової послідовності. У випадку ферорезонансу, міжфазні напруги залишаються майже незмінними. Ферорезонансний контур в мережі з ізолюваною нейтраллю може бути представлений, як контур нульової послідовності, що містить криву намагнічування магнітопроводу трансформатора напруги з нелінійною характеристикою. Трифазний трансформатор напруги з заземленою нейтраллю конструктивно може бути представлений як три окремих однофазних трансформатори, що мають з'єднання «зірка/зірка» з окремими магнітними системами. При появі перенапруги в електричній мережі індукція в магнітопроводі збільшиться, щонайменше в 1,73 рази. У таких умовах можливе насичення магнітопроводу трансформатора напруги і, відповідно, виникнення ферорезонансу в мережі. За даними енергетичних компаній, річна кількість пошкоджених трансформаторів напруги через ферорезонанс становить 7-9%.

Аналіз причин пошкоджень трансформаторів напруги підтверджує їх

високу надійність. Вони не пошкоджуються, крім випадків, їх використання в умовах, на які вони не розраховані. Один із таких режимів - тривале протікання по первинній обмотці трансформаторів напруги струмів, що значно перевищують допустиму теплову стійкість ізоляції обмотки. Ці струми виникають внаслідок ферорезонансних процесів в контурі, утвореному при певних режимах мережі, в якій працює трансформатор напруги.

Існує безліч методів для захисту трансформаторів напруги при появі резонансних явищ, що з'являються в електричній мережі. Застосовані заходи в різній мірі захищають трансформатор, але не розв'язують проблему у корені. Іншими словами, вони реагують на наслідки ферорезонансів або зменшують їх вплив, але не заважають їх виникненню.

Отже, вирішення питання підвищення надійності роботи трансформаторів напруги можливо за допомогою радикальних заходів - розземлення їх нейтралі. Такий підхід дозволяє повністю виключити можливість появи ферорезонансних явищ, в той же час унеможливорює контроль цілісності ізоляції мережі. Таким чином, важливим завданням є підвищення надійності роботи трансформаторів напруги при однофазних замиканнях на землю та удосконалення методів контролю цілісності ізоляції в електричній мережі, що працює з ізольованою нейтраллю.

**Мета роботи та задачі дослідження.** Метою роботи є підвищення надійності експлуатації трансформаторів напруги в мережах з ізольованою нейтраллю в умовах замикань на землю.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

1. Аналізування та характеристика різних способів заземлення нейтралі та захисту трансформаторів напруги при однофазних замиканнях на землю;
2. Оцінити на основі математичного моделювання роботи електричної мережі з ізольованою та компенсованою нейтраллю перенапруги, що виникають в умовах металічного та дугового замикання на землю;
3. Проаналізувати без трансформаторі способи контролю ізоляції електричної мережі з ізольованою та компенсованою нейтраллю, удосконалити

існуючи пристрої контролю ізоляції, перевести їх на сучасну елементну базу;

4. Оцінити економічну ефективність впровадження розробленого пристрою контролю ізоляції.

**Об'єкт дослідження** електромагнітні процеси в електричних мережах з ізолюованою нейтраллю в умовах замикання на землю.

**Предмет дослідження** шляхи захисту трансформаторів напруги від ферорезонансних явищ в умовах однофазних замикань на землю. Способи та пристрої контролю ізоляції в мережах з ізолюованою нейтраллю.

**Методи досліджень.** Поставлені у роботі завдання вирішуються шляхом застосування методів математичного моделювання роботи електричних мереж з ізолюованою та компенсованою нейтраллю при однофазному замиканні на землю, аналізуванні способів захисту трансформаторів напруги від ферорезонансних явищ та способів контролю ізоляції в мережах з ізолюованою нейтраллю.

**Практична цінність отриманих результатів** полягає в наступному: розроблено пристрій контролю цілісності ізоляції для електричних мереж, що працюють з ізолюованою і компенсованою нейтраллю напругою 6-35 кВ. Він дозволяє працювати трансформаторам напруги з розземленою нейтраллю, що виключає можливість виникнення ферорезонансних процесів в умовах однофазних замикань на землю, а отже, підвищити надійність роботи трансформаторів напруги.

## РОЗДІЛ 1.

### АНАЛІЗ УМОВ РОБОТИ ТА ЗАХИСТ ТРАНСФОРМАТОРІВ НАПРУГИ 6-35 кВ ПРИ ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАННЯХ НА ЗЕМЛЮ

#### 1.1 Переваги та недоліки різних способів роботи нейтралі електричних мереж середнього класу напруг

Розглянемо переваги і недоліки способів роботи нейтралі, які застосовуються в електричних мережах середнього класу напруг, а саме:

- ізольованої нейтралі (табл. 1.1);
- заземленої через ДГР (табл. 1.2);
- заземленої через низькоомний резистор (табл. 1.3);
- заземлений через високоомний резистор (табл. 1.4).

Таблиця 1.1 - Характеристика режиму ізольованої нейтралі [1]

| Переваги                                                                                        | Недоліки                                                                                                                                                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Робота мережі з ОЗЗ протягом деякого часу.                                                   | 1. Висока ймовірність виникнення найбільш небезпечних дугових ОЗЗ.                                                                                                    |
| 2. Не потрібні додаткові пристрої та витрати на заземлення нейтралі.                            | 2. Висока ймовірність вторинних пробойів ізоляції з переходом ОЗЗ в багатомісні замикання завдяки появі перенапруг з кратністю $3,5U_{ф.мах}$ при дугових замиканнях. |
| 3. Можливість самогасіння дуги і самоліквідації частини ОЗЗ.                                    | 3. Збільшення величини струму в місці появи ОЗЗ при дугових замиканнях з переміжною дугою за рахунок вільних складових в перехідному процесі.                         |
| 4. Безпечність тривалої дії перенапруг, які з'являються при перехідних режимах в ОЗЗ.           | 4. Ймовірність значних ушкоджень електричних машин струмом ОЗЗ в місці пошкодження, особливо для замикань, що супроводжуються переміжною дугою.                       |
| 5. Проста, для більшості випадків, реалізація захисту та сигналізації появи режиму стійких ОЗЗ. | 5. Ймовірність появи ферорезонансу в електричній мережі з пошкодженням ТН.                                                                                            |
|                                                                                                 | 6. Значна небезпека для людей та тварин, які знаходяться поблизу місця появи ОЗЗ.                                                                                     |
|                                                                                                 | 7. Розвиток мережі обмежується максимальним значенням загального струму замикання на землю.                                                                           |
|                                                                                                 | 8. Значний рівень електромагнітних перешкод в ЛЕП при появі дугових ОЗЗ.                                                                                              |

Таблиця 1.2 - Характеристика режиму резонансного заземлення нейтралі  
(компенсована нейтраль) [1]

| Переваги                                                                                                                                                                                               | Недоліки                                                                                                                                                                                                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Дозволяється робота електричної мережі в режимі ОЗЗ до моменту безаварійного відключення ушкодженого елемента.                                                                                      | 1. Додаткові витрати на заземлення нейтралі через ДГР і пристрою для автоматичного керування налаштуванням компенсації                                                                                          |
| 2. Зменшення струму у місці пошкодження (при резонансному налаштуванні ДГР, залишковий струм містить тільки активну складову, що не компенсується та вищі гармоніки).                                  | 2. Складності з реалізацією захисту та сигналізації виникнення режиму ОЗЗ.                                                                                                                                      |
| 3. Суттєве зменшення швидкості відновлення напруги на ушкодженій фазі після згасання дуги в місці ОЗЗ.                                                                                                 | 3. Ймовірність появи режиму переривчастих дугових ОЗЗ, які призводять до перенапруг на непошкоджених фазах з кратністю $2,5U_{\phi, \max}$ .                                                                    |
| 4. Значна ймовірність (з врахуванням пп. 2 і 3) самогасіння дуги і самоліквідації більшості ОЗЗ (при обмежених значеннях залишкового струму в місці пошкодження).                                      | 4. Висока вірогідність появи режиму ОЗЗ, що супроводжується переривчастою дугою та, як наслідок, появи перенапруг на неушкоджених фазах з кратністю $(2,6-3)U_{\phi, \max}$ за умови розстроювання компенсації. |
| 5. Практично виключається можливість виникнення дугових ОЗЗ, що перемежуються.                                                                                                                         | 5. Ймовірність (з врахуванням пп. 3 та 4) додаткових пробіїв ізоляції в місцях де є її ослаблення.                                                                                                              |
| 6. В порівнянні з ізольованою нейтраллю зменшення величини кратності перенапруг до значень $2,5U_{\text{ном}}$ на неушкоджених фазах в момент пробією ізоляції або в режимі дугових переривчастих ОЗЗ. | 6. Без застосування спеціальних пристроїв неможливість компенсації активної складової та вищі гармоніки в місці пошкодження ізоляції                                                                            |
| 7. Безпечність тривалої дії перенапруг в сталому та перехідному режимі появи ОЗЗ для елементів, що мають нормальну ізоляцію.                                                                           | 7. Зі збільшенням сумарного ємнісного струму електричної мережі збільшення (з врахуванням п. 6) залишкового струму в місці виникнення ОЗЗ                                                                       |
| 8. Виключається можливість виникнення ферорезонансних процесів в мережі.                                                                                                                               | 8. Обмеження (з врахуванням п. 7) на розвиток мережі.                                                                                                                                                           |
| 9. Зменшення впливу дугових ОЗЗ на лінії зв'язку.                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                 |

Таблиця 1.3 - Характеристика режиму низькоомного заземлення нейтралі через резистор [1]

| Переваги                                                                                                                                                                               | Недоліки                                                                                                                                                                                                               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Практично виключається можливість подальшого розвитку пошкодження, наприклад, перехід в подвійне ОЗЗ або поява міжфазних КЗ (у випадку швидкого відключення пошкодженого елемента). | 1. Додаткові капіталовитрати на заземлення нейтралі електричної мережі через резистор.                                                                                                                                 |
| 2. Просте рішення проблеми захисту від ОЗЗ.                                                                                                                                            | 2. Неможливість роботи мережі з ОЗЗ.                                                                                                                                                                                   |
| 3. Повністю виключається можливе виникнення дугових переривчастих ОЗЗ (при достатньому для їх придушення значення активного струму, що накладається).                                  | 3. Збільшення числа відключень обладнання та ліній через переходи короточасних пробойів ізоляції (при дугових режимах заземлення нейтралі), що самоусуваються в повні (завершені) пробойі.                             |
| 4. Менша тривалість дії перенапруг на ізоляцію елементів електричної мереж, що непошкоджені при перехідних режимах в момент виникнення ОЗЗ.                                            | 4. Ймовірність збільшення розміру пошкодження обладнання, за рахунок більшого струму ОЗЗ.                                                                                                                              |
| 5. Виключається можливість виникнення ферорезонансних процесів в мережі.                                                                                                               | 5. Можливе виникнення дугових переривчастих ОЗЗ при недостатньо високих значеннях активного струму, що накладається.                                                                                                   |
| 6. Збільшується безпека для людей і тварин в місці виникнення ОЗЗ.                                                                                                                     | 6. Збільшення ймовірності виникнення додаткових пробойів ізоляції непошкоджених фаз в місцях її ослаблення за рахунок перенапруг (в момент появи ОЗЗ до $2,5U_{ф.ном}$ ) до відключення захистом ушкодженого елемента. |
|                                                                                                                                                                                        | 7. Збільшення кількості відключень вимикачів елементів мережі.                                                                                                                                                         |

Таблиця 1.4 - Характеристика режиму високоомного заземлення нейтралі через резистор [1]

| Переваги                                                                                                                                                                                      | Недоліки                                                                                                                                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Дозволяється робота електричної мережі в режимі ОЗЗ до моменту безаварійного відключення ушкодженого елемента (при обмежених значеннях струму ОЗЗ в місці ушкодження).                     | 1. Додаткові капіталовитрати на заземлення нейтралі електричної мережі через резистор.                                                             |
| 2. Можливість самогасіння дуги і самоліквідації частини ОЗЗ (при обмежених значеннях струму ОЗЗ в місці пошкодження).                                                                         | 2. Збільшення струму в місці пошкодження.                                                                                                          |
| 3. Практично виключається можливість виникнення дугових ОЗЗ, що переміщуються.                                                                                                                | 3. Ймовірність виникнення дугових ОЗЗ, що перериваються, які супроводжуються появою перенапруг на неушкоджених фазах з кратністю до $2,5U_{ф.ном}$ |
| 4. В порівнянні з ізолюваною нейтраллю зменшення величини кратності перенапруг до значень $2,5U_{ном}$ на неушкоджених фазах в момент пробою ізоляції або в режимі дугових переривчастих ОЗЗ. | 4. Можливість (з урахуванням п. 3) вторинних пробіїв в точках мережі з ослабленою ізоляцією.                                                       |
| 5. Безпечність тривалої дії перенапруг в перехідному режимі появи ОЗЗ для елементів, що мають нормальну ізоляцію.                                                                             | 5. Обмеження на розвиток мережі по величині.                                                                                                       |
| 6. Практично виключається можливість виникнення ферорезонансних процесів в мережі.                                                                                                            | 6. Ускладнення умов гасіння дуги в місці пошкодження в порівнянні з мережами, які працюють з ізолюваною або резонансно заземленою нейтраллю.       |
| 7. Просте вирішення проблеми захисту і сигналізації стійких ОЗЗ.                                                                                                                              | 7. Велика потужність резистора, що заземлює (десятки кіловат) і проблеми із забезпеченням його термічної стійкості при стійких ОЗЗ.                |

## 1.2 Перенапруги в мережах 6-35 кВ

Існуючі способи заземлення нейтралі в мережах 6-35 кВ визначили ряд особливостей внутрішніх перенапруг в них.

*Резонансні перенапруги.*

Виникнення цього виду перенапруг можливо в мережах 6-35 кВ з нейтраллю, заземленою через дугогасячий реактор, при несиметрії в мережі, яка може бути викликана:

- природньою відмінністю по фазам параметрів повітряних, і кабельних ліній 6-35 кВ;
- неповнофазним включенням одного з приєднань, наприклад, в процесі комутації через неодночасність замикання контактів вимикача або відмови в дії однієї або двох його фаз;
- обривом дротів, перегоранням плавких вставок запобіжників.

Резонансні перенапруги принципово можуть розвиватися лише у випадку недокомпенсації індуктивністю ДГР ємності мережі та, у випадку свого виникнення, призводять до резонансного зміщення нейтралі, тобто охоплюють всю мережу.

#### *Ферорезонансні перенапруги.*

У мережах 6-35 кВ ферорезонансні перенапруги можуть бути викликані неповнофазним включеннями силових трансформаторів. При цьому в ряді випадків ферорезонансні перенапруги виникають і на нейтралі джерела, охоплюючи, таким чином, всю мережу.

Вимірювальні трансформатори напруги є практично на кожній секції 6-35 кВ. Для цілей вимірювання і контролю ізоляції первинні обмотки трансформаторів напруги приєднуються між фазою і землею, тому паралельно ємності мережі на землю виявляється включеною нелінійна індуктивність кожної фази ТН. Це створює схему, в якій потенційно можуть існувати ферорезонансні коливання, які визначаються параметрами схеми і числом трансформаторів напруги на фазу. У мережах з ізольованою нейтраллю такі ферорезонансні коливання є причиною перенапруг, які можуть виникати при симетрії схеми за рахунок зміщення нейтралі викликаного насиченням стали трансформаторів напруги в тому чи іншому перехідному процесі. Прикладами таких перехідних процесів можуть служити відключення сталого однофазного замикання на землю або переміжне нестійке замикання на землю.

### *Дугові перенапруги.*

Переважна більшість порушень нормальної роботи мереж з ізольованою нейтраллю пов'язано з пошкодженням ізоляції щодо землі, тобто пов'язане з однофазним замиканням на землю. При малих струмах замикання на землю однофазні замикання рідко переростають у стійкі пошкодження ізоляції. В цьому випадку дуговий процес, що супроводжує замикання, набуває нестійкого характеру, при якому мають місце багаторазові гасіння та запалювання заземлювальної дуги. Як наслідок, в мережі з'являються значні перенапруги, які або самі по собі, або ще в поєднанні з іншими перехідними процесами (наприклад, комутаційними перенапругами) можуть бути достатньо небезпечними.

Внаслідок виникнення дугові перенапруги є внутрішніми перенапругами, проте однозначно віднести їх до квазістаціонарних або комутаційних перенапруг не представляється можливим: за тривалістю існування ці перенапруги відносяться до квазістаціонарних, так як можуть існувати до декількох годин, а з причини виникнення - до комутаційних так як викликані зміною схеми мережі. Тому дугові перенапруги традиційно виділяються окремо.

### **1.3 Аналіз надійності роботи трансформаторів напруги в умовах ферорезонансних явищ**

Електромагнітні трансформатори напруги (ТН) використовуються в електричних мережах для живлення кіл напруги приладів обліку електроенергії, релейного захисту та автоматики, для контролю ізоляції та вимірювання напруги на шинах підстанцій. Вони є важливими та відповідальними елементами електричних мереж, до яких ставляться високі вимоги стосовно надійності. В той же час ТН досить часто пошкоджуються, особливо в мережах 6-35 кВ з ізольованою нейтраллю; згідно із статистичними даними – 5-12% на рік [2].

В роботах [3, 4] проаналізовано функціонування трансформаторів напруги в мережах 6-35 кВ енергокомпанії «Харківобленерго» і наведена статистика пошкоджуваності різних типів ТН. Деякі статистичні дані, отримані авторами

робіт [3, 4], наведено в табл. 1.5. Вважає масовість відмов ТН та підвищена інтенсивність відмов в окремі роки.

Таблиця 1.5 - Статистичні дані пошкоджуваності ТН в «Харківобленерго» [2]

| Рік  | Кількість пошкоджених ТН, шт. | Частка від кількості встановлених, % | Рік  | Кількість пошкоджених ТН, шт. | Частка від кількості встановлених, % |
|------|-------------------------------|--------------------------------------|------|-------------------------------|--------------------------------------|
| 1993 | 19                            | 5,2                                  | 2002 | 49                            | 13,5                                 |
| 1994 | 22                            | 6,1                                  | 2003 | 49                            | 13,5                                 |
| 1995 | 18                            | 5,0                                  | 2004 | 28                            | 7,7                                  |
| 1996 | 19                            | 5,2                                  | 2005 | 24                            | 6,6                                  |
| 1997 | 16                            | 4,4                                  | 2006 | 25                            | 6,8                                  |
| 1998 | 17                            | 4,7                                  | 2007 | 26                            | 7,1                                  |
| 1999 | 28                            | 7,7                                  | 2008 | 22                            | 6                                    |
| 2000 | 37                            | 10,2                                 | 2009 | 16                            | 4,4                                  |
| 2001 | 69                            | 19,1                                 |      |                               |                                      |

Причини масових відмов ТН в мережах 6-35 кВ з ізольованою нейтраллю відомі – це, в першу чергу, ферорезонансні процеси (ФРП). зумовлені ємністю мережі на землю та нелінійною індуктивністю гілки намагнічування ТН.

#### **1.4 Фізичні процеси, що відбуваються при ферорезонансі**

В ланцюгах, що містять ємність та нелінійну індуктивність, можуть виникати ферорезонансні явища. В залежності від способу з'єднання елементів розрізняють ферорезонанс в послідовних або паралельних ланцюгах. У випадку послідовного або паралельного з'єднання нелінійної індуктивності з електричною ємністю при поступовій зміні прикладеної до них напруги або струму, що протікає крізь них відбувається стрибкоподібна зміна або струму, або напруги на цих елементах. Таке явище пояснюється тим, що значення індуктивності котушки з феромагнітним осердям має нелінійну залежність від струму, що протікає крізь неї і, при певному його значенні відбувається компенсація індуктивної і ємнісної провідності, тобто резонанс.

В достатньо розгалужених ланцюгах з різним способом з'єднання нелінійних котушок та конденсаторів з'являються більш складніші процеси, які вже неможливо відокремити між собою, як ферорезонанс напруг або струмів. Всі

ферорезонансні явища мають спільну рису, що супроводжується стрибкоподібним переходом осердя феромагнітної котушки індуктивності з режиму сильного насичення в режим слабкого насичення або навпаки. При цьому явищі спостерігаються стрибки напруги та струму в обмотці котушки, що має нелінійну характеристику. У випадку якщо котушка не розрахована на тривалу роботу в режимі насичення, то стум, який перевищує гранично допустимий рівень, може призвести до перегріву котушки, руйнування ізоляції між вітками обмотки та, як наслідок, виходу котушки з ладу.

Термін «ферорезонанс» застосовується до коливальних процесів, що відбуваються в електричних ланцюгах. При цьому вони повинні обов'язково містити наступні елементи:

- нелінійна індуктивність;
- електрична ємність;
- джерело живлення змінної напруги.

Ще однією з умов виникнення коливальних процесів є низький опір контуру, щоб вільні коливання мали не аперіодичний характер.

Звичайні електричні мережі містять значну кількість нелінійних індуктивних елементів таких, як: силові та вимірювальні трансформатори, реактори, і ємнісні елементи такі, як: кабелі, повітряні лінії, батареї конденсаторів. Всі ці елементи можуть стати причиною появи ферорезонансних коливань.

Характерною особливістю ферорезонансного процесу є наявність кількох стабільних та стійких станів при одних і тих самих параметрах ланцюга та джерела живлення. Поява ферорезонансу в електричній мережі може бути спровокована перехідними процесами, які виникають в наслідок певних випадкових збурень, наприклад, грозових або внутрішніх перенапруг, комутацій навантажень або трансформаторів, появою короткого замикання і т.п.

Особливості протікання ферорезонансу можна простежити порівнюючи процеси, що проходять в лінійному та нелінійному (ферорезонансному) контурі. В лінійному RLC-контурі резонанс буде спостерігатися при будь-якому значенні

прикладеної напруги і резонансну частоту можна визначити однозначно з відомого співвідношення  $LC\omega_p^2 = 1$ . Для розуміння процесів, що відбуваються в нелінійному контурі розглянемо процес розряду конденсатора зарядженого до напруги  $U_0$  на відповідну нелінійну індуктивність (рис. 1.1 а).

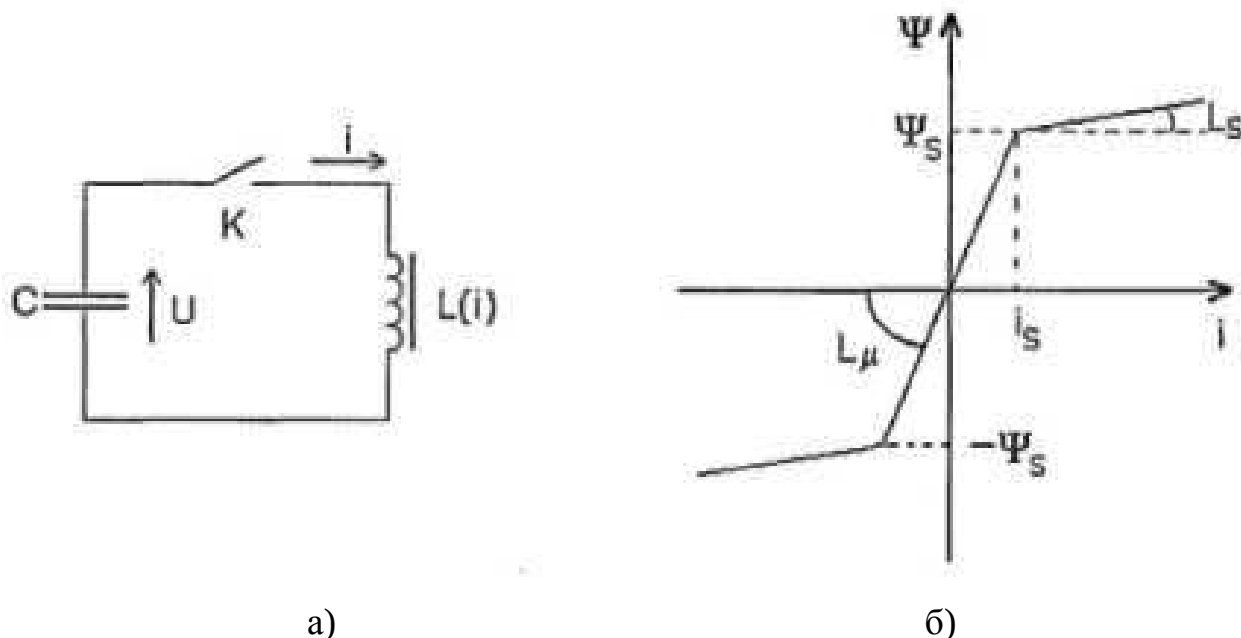


Рис. 1.1 - Елементарний ферорезонансний контур (а), спрощена крива намагнічування котушки з феромагнітним осердям (б)

В цьому випадку в LC-контурі повинні виникнути вільні коливання. Якщо знехтувати втратами та вважити, що даний контур є ідеальним, коливання, що виникнуть не будуть затухаючими. Криву намагнічування осердя феромагнітної котушки індуктивності представимо в спрощеному вигляді показаному на рис. 1.1 б.

Якщо замкнути ключ  $K$  (рис. 1.1 а) в контурі з'являться вільні коливання, що характеризуватимуться частотою  $\omega_0 = 1/\sqrt{L_\mu C}$ . Якщо в процесі вільних коливань миттєве значення струму  $i_{\max} = U_0 \omega$  не перевищить граничної величини  $i_s$ , то частота вільних коливань збереже своє значення. Якщо ж в деякий момент часу  $t_1$ , миттєве значення струму перевищить струм насичення  $i_s$ , то частота вільних коливань стрибкоподібно зміниться до значення  $\omega_s = 1/\sqrt{L_s C}$ , та зберігається до того часу  $t_2$ , коли миттєве значення струму стане менше за

величину  $i_s$ . Так як було прийнято, що втрати в контурі відсутні, то процес прийме періодичний характер, а період може бути знайдений за формулою

$$T = 2\pi / \sqrt{L_s C + 2(t_3 - t_2)}$$

де  $t_3 - t_2$  – проміжок часу, що відповідає ненасиченому стану осердя феромагнітної котушки.

Визначити цю різницю можна наступним чином. Збільшення магнітного потоку за час від  $t_2$  до  $t_3$  можна знайти з виразу:

$$\Delta\psi = 2\psi_s = \int_{t_2}^{t_3} u(t) dt.$$

Припустимо, що за час  $t_3 - t_2$  напруга на ємності залишиться постійною (її зміною знехтуємо) та рівною  $U_0$ , тоді відповідно отримаємо

$$t_3 - t_2 = 2\psi_s / U_0.$$

Отже, як видно з цього виразу, чим більша початкова напруга на ємності, тим буде менший проміжок часу  $t_3 - t_2$ . Який при  $U_0 \rightarrow \infty$   $t_3 - t_2 \rightarrow 0$ , а період вільних коливань прямує до величини  $T = 2\pi / \sqrt{L_s C}$  (рис. 1.2 в). Тобто, частота вільних коливань в нелінійному феромагнітному контурі залежить від початкової напруги на конденсаторі та лежить в межах:

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{L_\mu C}} < f < \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C}}.$$

Для реальних же коливальних контурів характерні активні втрати, які призводять до зменшення напруги на ємності при кожному її перезаряді.

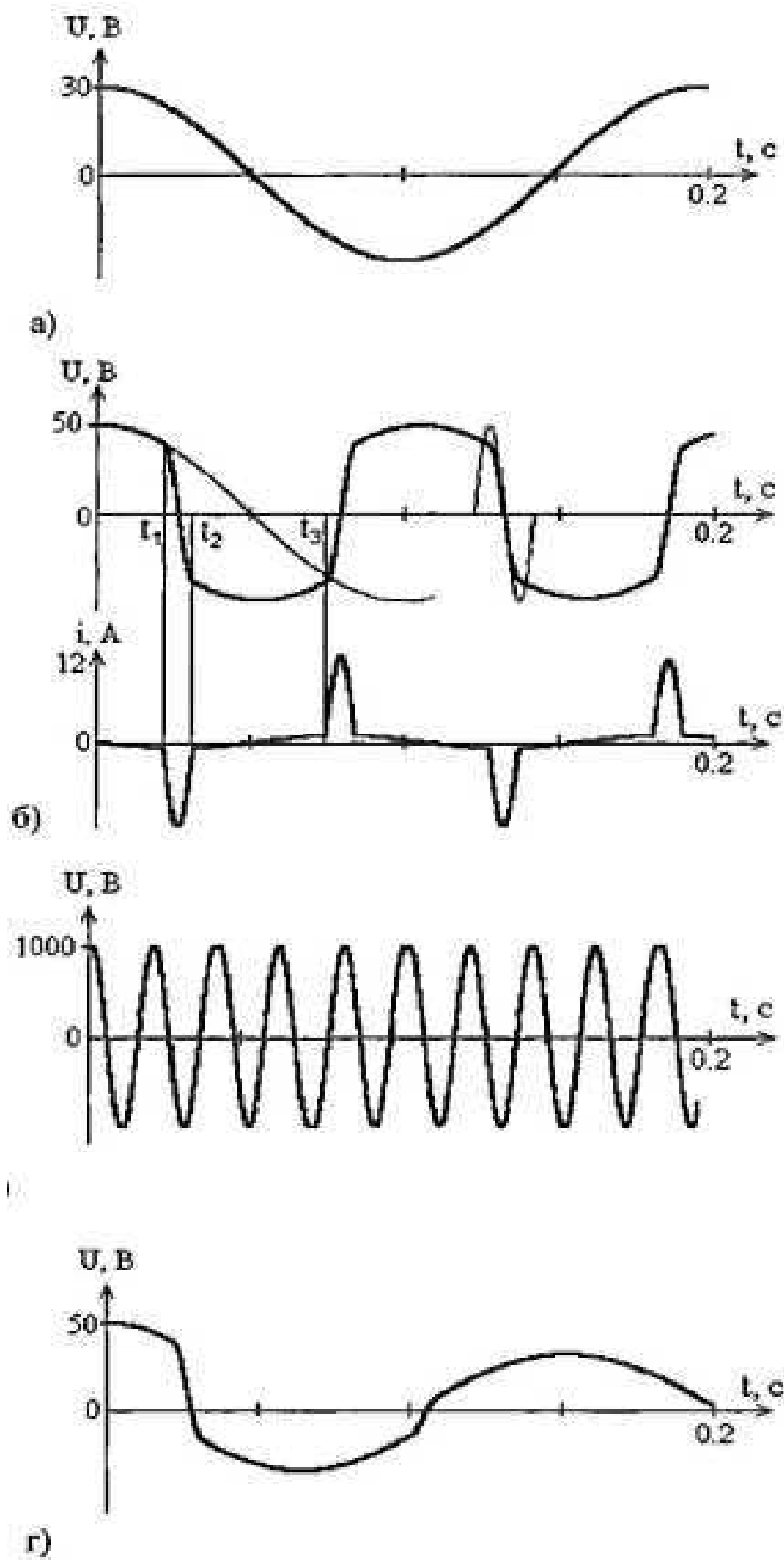
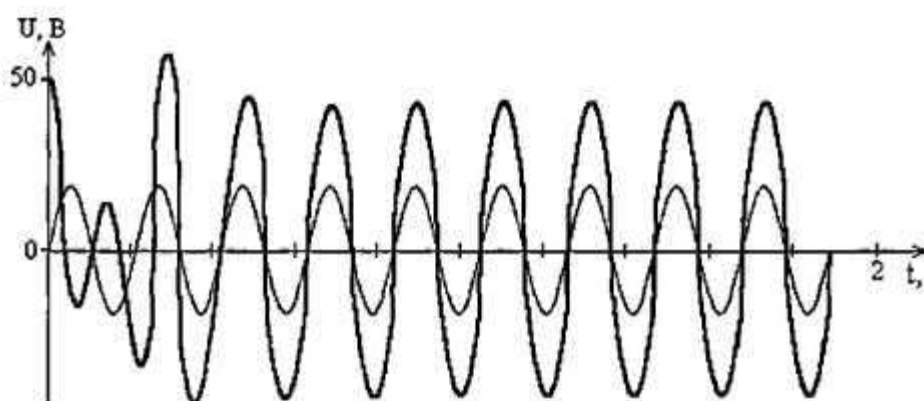


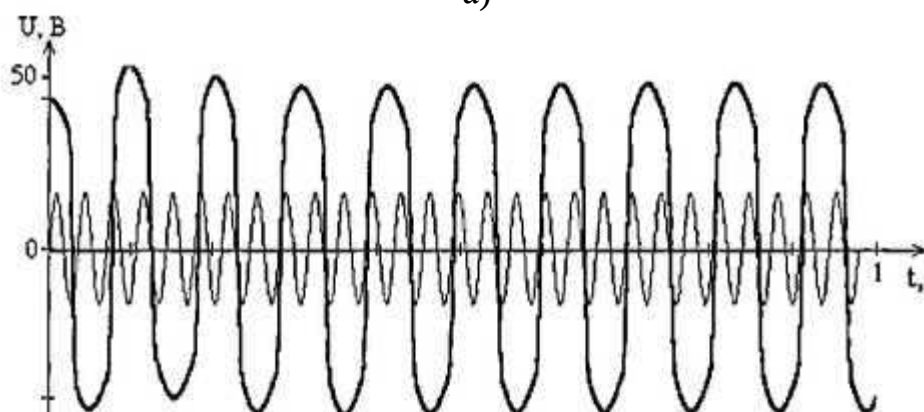
Рис. 1.2 - Вільні коливання в послідовному ферорезонансному контурі

Зменшення напруги на ємності призводить, в свою чергу, до відповідного збільшення періоду вільних коливань (зменшення частоти). Так на рис. 1.2, г наведений графік зміни напруги на ємності за тих же самих початкових умов, що і на рис 1.2 б, але при наявності в контурі активного опору (втрат).

Якщо ж в коливальному контурі є джерело синусоїдальної напруги, що буде компенсувати втрати, то можливо, за деяких умов, що частота вільних коливань стане рівною частоті джерела живлення. Графіки зміни напруги для різних видів коливань в послідовному феромагнітному контурі з синусоїдальним джерелом живлення наведено на рис. 1.3. Графік рис. 1.3 а відповідає гармонійному коливанню коли частота живлення збігається з частотою власних коливань феромагнітного контуру. Графік на рис. 1.3 б відповідає субгармонійному коливанню коли частота коливань в феромагнітному контурі менша за частоту живлення.



а)



б)

Рис. 1.3 – Різні види коливань в ферорезонансному контурі

а – гармонійні коливання; б – субгармонійні коливання.

Отже, відзначимо головні відмінності протікання резонансних процесів в феромагнітних (нелінійних) та лінійних контурах:

- виникнення резонансу в феромагнітному контурі на даній частоті можливо при різних значеннях ємності,
- частота коливань напруги та струму в елементах феромагнітного контуру може відрізнятися від частоти джерела живлення;
- в нелінійному коливальному контурі можливе існування багатьох стійких станів при однакових параметрах його елементів.

Враховуючи, що для ферорезонансних контурів можливо декілька стійких станів, то один стан може відповідати нормальному режиму роботи та експлуатації, а інші можуть бути позаштатними та не відповідати нормальному режиму роботи. На вибір стійкого стану роботи ферорезонансного контуру суттєво впливають початкові умови. Навіть відносно невеликі відмінності в початкових умовах можуть призвести до повністю різних стійких станів, в тому числі до появи ферорезонансу.

Для трифазних електричних кіл виділяють два типи завдань з ферорезонансними процесами. До першого типу відноситься завдання, що можуть бути зведені до однофазного представлення. Це процеси, що відбуваються в трифазних мережах з глухозаземленою нейтраллю.

До завдань другого типу відносять задачі, які неможливо згорнути в однофазний контур. Такі задачі містять не менше чотирьох нелінійних диференційних рівнянь. Використання для їх розв'язку традиційних аналітичних або графоаналітичних методів ускладнено та пов'язаними з занадто громіздкими обчисленнями, а тому подібні задачі вирішуються лише є чисельним моделюванням з використанням ЕОМ. Це процеси, що відбуваються в трифазних мережах з ізольованою нейтраллю.

### **1.5 Ферорезонанс в мережах 6-35 кВ з електромагнітними ТН**

Виникнення ферорезонансу між ТН та ємністю мережі можливий для схем, які працюють з ізольованою нейтраллю в таких випадках:

1) при появі самовільного зсуву нейтралі для схем, що мають малі ємнісні струми замикання на землю;

2) при появі субгармонійного ферорезонансу в схемах з невеликими ємностями ліній;

3) при замиканнях на землю, що супроводжуються переміжною дугою.

#### *Явище самовільного зміщення нейтралі*

Ферорезонанс ТН з ємністю ненавантажених шин на частоті 50 Гц, носить назву «самовільного зміщення нейтралі». Такий резонанс виникає в результаті різночасності включення фаз вимикача при комутаціях елементів мережі.

При різночасності включення фаз вимикача на ємностях мережі з'являються так звані «не скомпенсовані» заряди, які створюють постійну складову напруги  $U_0$  на фазах мережі, однакову для всіх трьох фаз. Постійна складова напруги на ємності мережі та індуктивності ТН призводить до зростання магнітного потоку в магнітопроводах фаз ТН. Через якийсь час, залежно від величини  $U_0$  і миттєвих значень магнітних потоків в фазах ТН в момент утворення  $U_0$ , відбудеться насичення магнітопроводу однієї з фаз ТН, через яку будуть заряджатися ємності трьох фаз мережі.

Різночасність в дії фаз вимикачів при комутаціях в мережі з ізолюваною нейтраллю призводить до несиметрії напруг на фазах, яка проявляється в підвищенні напруги на одній фазі і зниження його на двох інших та до появи напруги на нейтралі мережі. З'являється напруга нульової послідовності, яка зазвичай становить 20-60% від номінальної напруги. Можливі три варіанти розвитку процесу:

- затухання нелінійних коливань і повернення мережі в нормальний режим роботи з синусоїдальними струмами і напругами;

- нескінченне (теоретично) продовження нелінійних коливань у вигляді періодичних процесів на частоті 50 Гц;

- нескінченне продовження нелінійних коливань в хаотично неперіодичній формі.

Зазначений ферорезонанс не супроводжується великими перенапругами на

фазах мережі і не призводить до пошкоджень ТН. На практиці дане явище називають «помилковою землею», оскільки вона може при кожному відключенні-включенні секції шин переходити з однієї фази на іншу або, взагалі, не з'являтися. Ферорезонанс «помилкова земля» не виникає при застосуванні, наприклад, антирезонансного ТН типу НАМИ.

Для запобігання самовільних зміщень нейтралі і пошкоджень ТН в електроустановках напругою 6-35 кВ можлива установка резисторів потужністю 400 Вт опором 25 Ом в розімкнутий трикутник додаткових обмоток кожного ТН 6-35 кВ з заземленою нейтраллю обмотки ВН [3]. У більшості випадків, цієї потужності буває досить для зриву ферорезонансу цього типу.

*Субгармонійний ферорезонанс ТН з відносно невеликими ємностями коротких ліній 6-35 кВ*

У мережах 6-35 кВ з ізолюваною нейтраллю можливий ферорезонанс на субгармоніках  $1/2$ ;  $1/3$ ;  $1/5$  і т.д. Зазначеним видам ферорезонансу зазвичай схильні трансформатори напруги для контролю ізоляції з заземленою обмоткою ВН. У цих випадках ТН резонують з відносно невеликими ємностями коротких ліній. Потокочеплення окремих фаз ТН зростає при цьому більш ніж в 2 рази, сталь магнітопроводу насичується, і струм намагнічування перевищує гранично допустиме значення, що призводить до перегріву обмоток і руйнування ТН.

Широко поширені пошкодження однофазних ТН - 35 кВ вітчизняного та імпортного виробництва, якщо на кожен трифазну групу ТН доводиться 5-10 км повітряної лінії 35 кВ. Ферорезонанс відбувається на субгармоніці  $1/2$  або на близькій до неї частоті.

Субгармонічна напруга з'являється в нульовій послідовності і спотворює тільки фазні напруги. Напруга на фазах мережі не перевищує найбільшої робочої напруги і тому не представляє небезпеки для електроустаткування крім ТН.

Установка антирезонансних ТН дозволяє уникнути пошкодження ТН, якщо вони або самі не викликають субгармонічного ферорезонансу, або здатні довго витримувати субгармонічний ферорезонанс, викликаний іншими ТН.

*Ферорезонансні коливання в мережах 6-35 кВ з електромагнітними ТН*

*при ОЗЗ через переміжну дугу*

Мережі з ізольованою нейтраллю допускають тривалу роботу з ОЗЗ. Ємнісна дуга при ОЗЗ може мати переміжний характер, тобто, супроводжується численними гасіннями і запалюваннями. Переміжна дуга створює постійну складову в напрузі на фазах мережі і ТН, що призводить до насичення магнітопроводу ТН. Процес заряду ємностей мережі з їх подальшим розрядом через обмотки насиченого ТН повторюється в кожному циклі запалювання-гасіння дуги. Чим частіше запалюється і переривається дуга, тим більше діюче значення струму через ТН і тим швидше відбудеться його теплове руйнування.

Найбільш ефективним заходом щодо підвищення надійності роботи ТН і ліквідації їх пошкоджень є застосування антирезонансних ТН. Включення резистора потужністю 400 Вт опором близько 25 Ом в розімкнутий трикутник ТН слабо впливає на хід процесу дугового замикання в мережі.

Напруга на здорових фазах не перевищує лінійної напруги, яка відповідно до ГОСТ 721 для мереж 6-35 кВ є найбільшою робочою напругою і тому не представляє небезпеки для ізоляції електрообладнання.

Слід враховувати, що при ОЗЗ у ТН порушується нормований клас точності, який визначається в нормальному симетричному режимі роботи.

#### *Ферорезонанс в несиметричній схемі мережі*

Ферорезонансні перенапруги можливі в мережах 6-35 кВ при неповнофазних комутаціях вимикачів, перегорання плавких вставок запобіжників або обриви проводів ПЛ. Ферорезонансний контур утворює індуктивність намагнічування споживчого трансформатора з ємнісним опором елементів мережі. Ферорезонансні перенапруги можуть виникнути як у всієї мережі, так і на окремих її елементах. Величина перенапруг залежить від параметрів споживчого трансформатора (потужності, струму холостого ходу і індуктивності намагнічування), ємності мережі та може досягати високих величин, що перевищують рівень ізоляції електрообладнання.

Неповнофазні режими можуть призводити до так званого перекидання фаз, тобто, зміни порядку чергування фаз у споживчого трансформатора. Якщо

споживчий трансформатор має невелике рухоме навантаження, то може спостерігатися зміна напрямку обертання двигунів.

Більшість споживчих трансформаторів 10/0,4 кВ мають трьохстрижневий магнітопровід і підключаються до ПЛ через запобіжники з плавкими вставками. При замиканні на землю одного з трьох високовольтних ввідів трансформатора плавка вставка запобіжника цієї фази зазвичай перегорає. Створюється неповнофазна схема. Плавкі вставки запобіжників двох інших фаз залишаються цілими, зберігаючи зв'язок точки заземлення з іншою мережею через слабо навантажений трансформатор. Така схема схильна до ферорезонансу ємності мережі з фазними індуктивностями первинної обмотки споживчого трансформатора. Завдяки ферорезонансу утворюється нова трифазна система міжфазних напруг, здатна мати або пряме, або зворотне чергування фаз.

При зворотному чергуванні фаз напруга на обірваній фазі мережі підвищується до  $2,5-3,0U_{н.раб}$ , напруга  $3U_0$  на додатковій обмотці ТН перевищує 200 В, а обертання двигунів на стороні 0,4 кВ цього трансформатора змінюється на протилежне. Зазначений процес може існувати довго.

При прямому чергуванні фаз, у новоствореній трифазній системі, фазні напруги в мережі на не обірваних фазах підвищуються до  $1,8-2,0 U_{н.раб}$  і ТН, як правило, може витримувати цей режим протягом декількох годин. Напруга обірваної фази мережі відносно землі знижується приблизно до  $0,2 U_{н.раб}$ , а напруга  $3U_0$  на додатковій обмотці ТН підвищується до 120 В.

При неповнофазних режимах можливі пошкодження трансформаторів напруги та ОПН. Пошкодження ТН призводить до виходу з роботи пристроїв релейного захисту.

Для зниження пошкоджуваності ТН слід застосовувати антирезонансні конструкції трансформаторів напруги, які при будь-якому вигляді ферорезонансу витримують тривалі підвищення напруги на одній з фаз до  $3,0 U_{н.раб}$ , наприклад, НАМИ 6-35 кВ.

Для виключення виникнення неповнофазної схеми забороняються пофазні включення і відключення ПЛ і КЛ, які можуть призводити до зсуву нейтралі. Слід

також уникати підключення трансформаторів через плавкі запобіжники.

*Заходи щодо захисту від ферорезонансних пошкоджень ТН в мережах 6-35 кВ, що працюють з ізольованою нейтраллю*

Для виключення пошкоджень ТН 6-35 кВ, що працюють в мережах з ізольованою нейтраллю рекомендується застосування антирезонансних ТН. До антирезонансних ТН ставляться такі вимоги:

- не викликати самим сталого ферорезонансу;
- не пошкоджуватися при тривалих однофазних замиканнях мережі на землю через переміжну дугу;
- не пошкоджуватися при стійкому ферорезонансу ємності мережі з нелінійною індуктивністю інших трансформаторів (силових або вимірювальних).

Антирезонансні властивості у ТН 6-10-35 кВ забезпечуються наступними способами:

- додаванням в схему активних гасячих опорів;
- підвищенням потокозчеплення насичення шляхом зниження номінальної індукції;
- зміною схеми з'єднання обмоток трифазних ТН і т.д.

Ферорезонанс неможливий при заземленні нейтралі мережі через ДГР. Ліквідацію ферорезонансу можна досягти заземленням нейтралі мережі через високоомний резистор. Величина резистора повинна бути не менше ємнісного опору мережі, щоб не порушувалося вимога роботи з ізольованою нейтраллю. Застосування низькоомного опору (50-200 Ом) для запобігання ферорезонансним процесам ємності мережі з ТН не рекомендується. Низькоомний резистор збільшує струм ОЗЗ і при цьому порушується вимога роботи мережі з ізольованою нейтраллю і відключення ОЗЗ релейним захистом. Параметри постійно включеного високоомного резистора в нейтралі мережі повинні відповідати параметрам мережі при тривалому режимі включення. При недостатній тепловій потужності резистора максимально допустимий час роботи мережі з однофазним замиканням на землю слід обмежувати. Застосування високоомного резистора вимагає техніко-економічного обґрунтування.

## 1.6 Схеми та основні принципи конструктивних рішень антирезонансних ТН 6-35 кВ

### НАМИ 10-35

Трансформатор напруги типу НАМИ фактично складається з двох трансформаторів (трифазного і однофазного), розташованого в одному корпусі. Трифазний трансформатор передає напругу прямої і зворотної послідовностей, а однофазний - тільки нульової.

Однофазний трансформатор за рахунок великої кількості витків має високу характеристику намагнічування і великий індуктивний опір. Антирезонансні властивості НАМИ забезпечуються перенесенням нелінійності ТН в нульову послідовність, де відсутнє ЕРС джерела. Електрична схема з'єднання обмоток представлена на рис. 1.4.

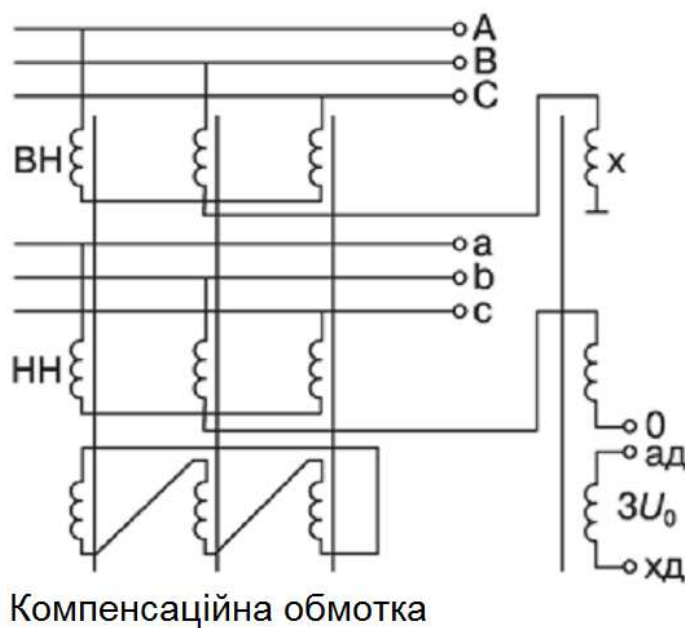


Рис. 1.4 - Електрична схема ТН НАМИ 10-35

ТН НАМИ характеризується:

- відсутністю гармонійного ферорезонансу на частоті 50 Гц («помилкової землі») при роботі на ненавантажених шинах;
- відсутністю субгармонійного ферорезонансу з ємностями коротких ліній на частоті 25; 16,6 і 10 Гц;
- відсутністю пошкоджень при роботі в мережі з ОЗЗ через переміжну

дугу;

– відсутністю пошкоджень при неповнофазних режимах роботи мережі з підвищенням напруги однієї з фаз до  $3U_{н.раб.}$

### $3 \times \text{ЗНОЛП-10}$

Електрична схема трифазної антирезонансної групи  $3 \times \text{ЗНОЛП-10}$  наведена на рис. 1.5.

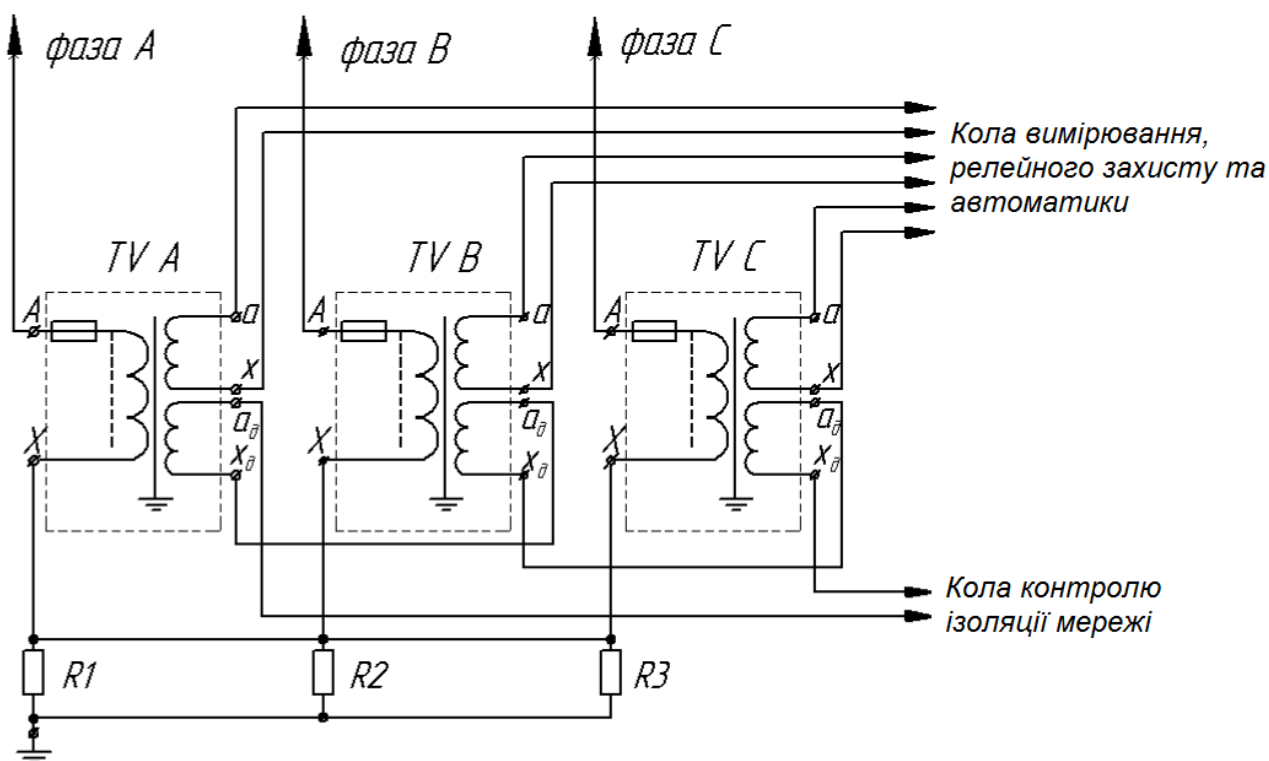


Рис. 1.5 - Електрична схема  $3 \times \text{ЗНОЛП-10}$

У нейтраль обмотки ВН ТН включені резистори опором 2,4 кОм потужністю 100 Вт. У нормальному режимі через резистори протікає струм намагнічування, який становить кілька мА. При насиченні магнітопроводу збільшується струм через обмотку ТН, напруга на опорі та демпфуюча дія цього опору. У додаткові обмотки, з'єднані в трикутник, включається резистор опором 25 Ом з метою підвищити стійкість трансформатора до ферорезонансу і впливу переміжної дуги.

Трифазна антирезонансна група  $3 \times \text{ЗНОЛП-10}$  призначена для установки в КРУ або ЗРУ. Вона стійка до ферорезонансу і впливу переміжної дуги в разі замикання однієї з фаз мережі на землю.

### НАМИТ-10-2

Трансформатор являє собою з'єднані конструктивно в єдине ціле два трансформатора напруги:

1. ТНКИ – трансформатор напруги контролю ізоляції, виконаний трьохобмотковим, первинні обмотки з'єднані за схемою «зірка». Призначений для живлення кіл вимірювальних приладів обліку, ланцюгів захисту та контролю цілісності ізоляції.

2. ТНП – трансформатор нульової послідовності, виконаний двохомотковим, первинна обмотка підключена в нейтраль ТНКИ та заземлена, вторинна обмотка замкнута. При появі ферорезонансу обмотка, що замкнута в трикутник, розмикається автоматично.

На рис. 1.6 представлена електрична схема з'єднань ТН НАМИТ-10-2. Антирезонансні властивості досягаються введенням в первинний ланцюг, пов'язаний з землею, індуктивного опору у вигляді трансформатора нульової послідовності (ТНП) (рис. 1.6).

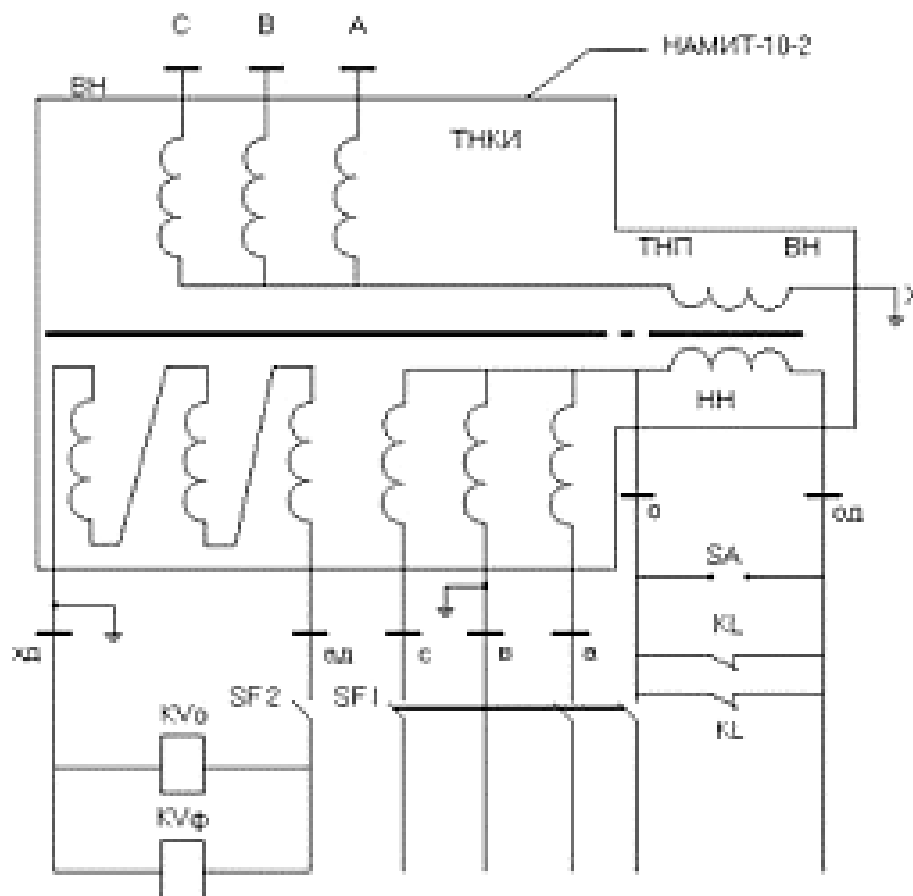


Рис. 1.6 - Схема з'єднань обмоток ТН НАМИТ-10-2

Введення опору виконується шляхом дешунтування його вторинної обмотки з допомогою схеми РЗ (рис. 1.7). Недолік цієї схеми ТН є ненадійність роботи РЗ. Другий недолік – це «швидке» насичення сталевих стрижнів окремих фаз, що призводить до появи «помилкової землі».

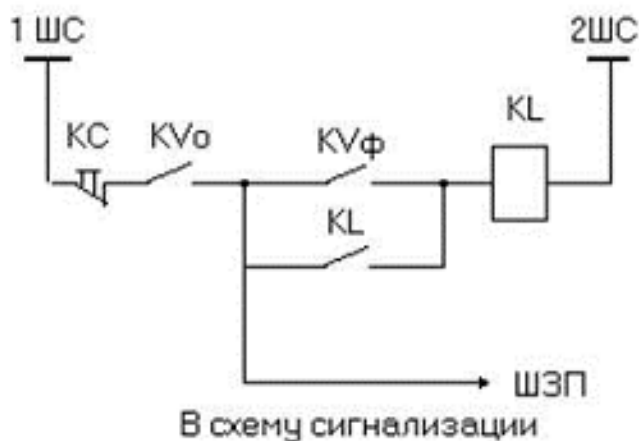


Рис. 1.7 - Схема оперативних ланцюгів захисту від ферорезонансних процесів:  
 KVo-PH-53/60Д,  $U_{\text{сп}} = 20-30 \text{ В}$ ; KVФ-PH-53/200,  $U_{\text{сп}} = 135-140 \text{ В}$ ; KL - проміжне реле РП-25 або РП-23; КС - кнопка знімання сигналу; ШС - шини сигналізації; ШЗП - шина попереджувальної сигналізації; SA - перемикач режиму роботи ТНП

## 1.7 Висновки

1. Огляд переваг та недоліків різного способу заземлення нейтралі і ізолюваного режиму її роботи показує, що повністю виключити ймовірність виникнення перенапруг в електричній мережі не можливо. Заземленням через реактор або резистор зменшується ймовірність та потужність перенапруг при ОЗЗ, але потребує додаткових капіталовкладень, і в деяких випадках, унеможливорює тривалу роботу при ОЗЗ.

2. Огляд існуючих перенапруг в мережах 6-35 кВ показав, що найбільш небезпечними є ферорезонансні та дугові перенапруги. Причиною їх виникнення та стійкого існування можуть слугувати однофазні замикання на землю.

3. Огляд надійності роботи ТН, на прикладі «Харківобленерго», показує, що ТН досить часто пошкоджуються, особливо в мережах 6-35 кВ з ізолюваною нейтраллю – згідно із статистичними даними 5-12% на рік. Основною причиною їх пошкодження є виникнення ферорезонансного процесу, який призводить до

збільшення первинного струму та термічному виходу з ладу обмотки ТН через 3-5 хв. від початку ферорезонансу.

4. Ферорезонанс виникає в коливальних контурах, що містять індуктивності з осердям здатним до насичення. Аналітичний розрахунок подібних схем є складною задачею, особливо для трифазних систем. Тому такі розрахунки проводяться чисельними методами з залученням ЕОМ. На характер процесу суттєво впливають початкові умови. В ферорезонансних контурах можливий резонанс на гармонічних та субгармонійних частотах.

5. Ферорезонанс трансформаторів напруги, що працюють з ізолюваною нейтраллю можливий в наступних випадках: при самовільному зсуві нейтралі для схем з малими ємнісними струмами замикання на землю; при виникненні субгармонійного ферорезонансу для схем з невеликими ємностями коротких ліній; при однофазних замиканнях на землю через переміжну дугу. Для запобігання виникненню ферорезонансу або виходу з ладу ТН при його появі, рекомендовано застосування спеціальних антирезонансних ТН та заземлення нейтралі через ДГР або високоомний резистор.

6. Аналіз схемних та конструктивних рішень антирезонансних ТН показав, що антирезонансні властивості забезпечуються введенням активних опорів або додаткового трансформатору нульової послідовності. Дані рішення ускладнюють та підвищують вартість ТН.

## РОЗДІЛ 2.

### МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З ІЗОЛЬОВАНОЮ ТА КОМПЕНСОВАНОЮ НЕЙТРАЛЮ В УМОВАХ ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ

#### 2.1 Замикання на землю в мережах з ізолюованою нейтраллю

Розподільчі мережі 6-35 кВ є самою ненадійною ланкою в системі електропостачання. Аналіз їх роботи, як об'єкта керування показує, що в більшості випадків відмови виникають у зв'язку з втратою працездатності фаз відносно землі [5].

На рис. 2.1 наведена схема заміщення трьохфазної електричної мережі з ізолюованою нейтраллю. Де  $\bar{U}_{\phi A}$ ,  $\bar{U}_{\phi B}$ ,  $\bar{U}_{\phi C}$  – комплексні фазні напруги, рівні по модулю;  $\bar{U}_A$ ,  $\bar{U}_B$ ,  $\bar{U}_C$  – комплексні напруги окремих фаз відносно землі;  $\bar{U}_N$  – комплексна напруга зміщення нейтралі;  $\bar{I}_{yA}$ ,  $\bar{I}_{yB}$ ,  $\bar{I}_{yC}$  – комплексні повні струми витоку на землю;  $r_a$ ,  $r_b$ ,  $r_c$  – активні опори між окремими фазами мережі та землею;  $C_a$ ,  $C_b$ ,  $C_c$  – ємності проводів відносно землі.

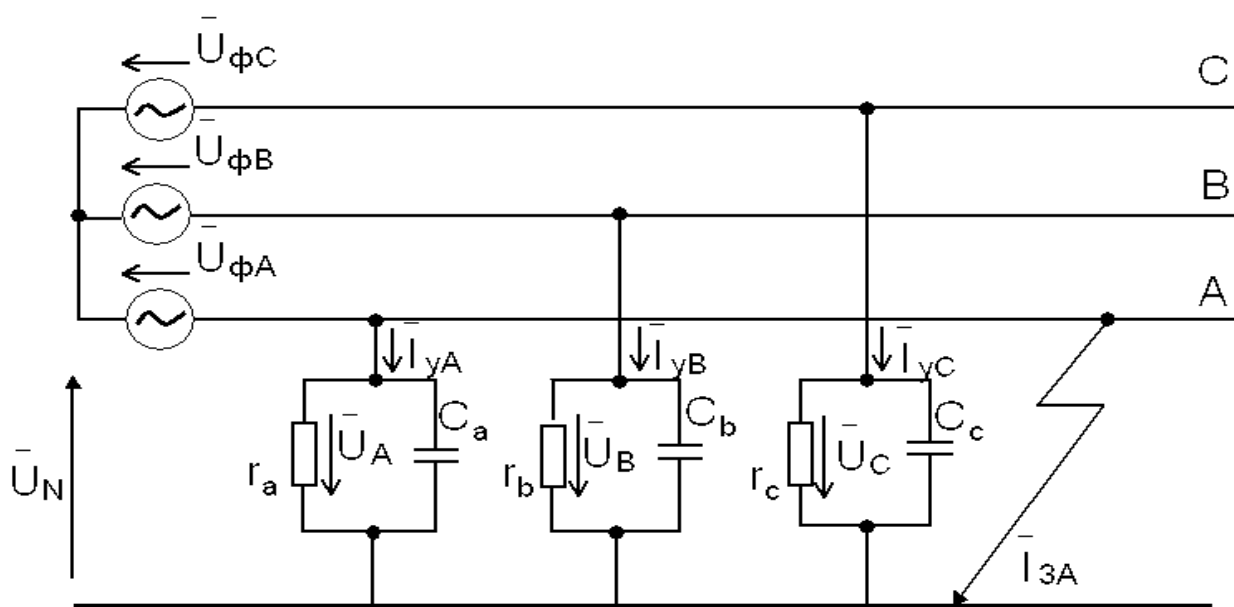


Рис. 2.1 - Схема заміщення трьохфазної мережі з ізолюованою нейтраллю

Для показаної на рис. 2.1 мережі справедливі наступні співвідношення. Повні комплексні провідності фаз відносно землі:

$$\bar{Y}_a = \frac{1}{r_a} + j\omega C_a, \bar{Y}_b = \frac{1}{r_b} + j\omega C_b, \bar{Y}_c = \frac{1}{r_c} + j\omega C_c. \quad (2.1)$$

Напруга зміщення нейтралі:

$$\bar{U}_N = U_\phi \frac{\bar{Y}_s}{\bar{Y}_\Sigma}, \quad (2.2)$$

де  $\bar{Y}_\Sigma = \bar{Y}_a + \bar{Y}_b + \bar{Y}_c$  – сумарна комплексна провідність мережі відносно землі;

$U_\phi$  – модуль фазної напруги мережі;

$\bar{Y}_s = \bar{Y}_a + a^2 \bar{Y}_b + a \bar{Y}_c$  – фазна комплексна провідність мережі по відношенню до землі, яка дорівнює нулю у випадку рівності відповідних провідностей фаз  $\bar{Y}_a = \bar{Y}_b = \bar{Y}_c$ ;

$$a = \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j\frac{2\pi}{3}} \text{ – фазний множник.}$$

Враховуючи, що струм витоку в фазі А дорівнює  $\bar{I}_{ya} = (\bar{U}_{\phi a} - \bar{U}_N) \bar{Y}_a$ , то враховуючи (2.2) отримуємо:

$$\bar{I}_{ya} = U_\phi \frac{\bar{Y}_\Sigma - \bar{Y}_s}{\bar{Y}_\Sigma} \bar{Y}_a, \quad (2.3)$$

аналогічно для інших фаз:

$$\bar{I}_{yb} = U_\phi \frac{a^2 \bar{Y}_\Sigma - \bar{Y}_s}{\bar{Y}_\Sigma} \bar{Y}_b, \quad (2.4)$$

$$\bar{I}_{yc} = U_\phi \frac{a \bar{Y}_\Sigma - \bar{Y}_s}{\bar{Y}_\Sigma} \bar{Y}_c. \quad (2.5)$$

Рівняння (2.3)-(2.5) дозволяють обчислити струми витоку в будь-який фазі мережі при відомих опорах  $r_a, r_b, r_c$  та ємностях  $C_a, C_b, C_c$  відносно землі.

З цих співвідношень отримаємо вираз для обчислення струму глухого

замикання на землю різних фаз електромережі. Так, наприклад, для струму замикання в фазі А ( $\bar{Y}_a = \infty$ ):

$$\bar{I}_{\text{за}} = U_{\phi} [\bar{Y}_b (1 - a^2) + \bar{Y}_c (1 - a)], \quad (2.6)$$

та аналогічно для інших фаз можна записати наступні вирази:

$$\bar{I}_{\text{зб}} = U_{\phi} [\bar{Y}_a (a^2 - 1) + \bar{Y}_c (a^2 - a)], \quad (2.7)$$

$$\bar{I}_{\text{зс}} = U_{\phi} [\bar{Y}_a (a - 1) + \bar{Y}_b (a - a^2)]. \quad (2.8)$$

Отже, для обчислення значення струму замикання на землю необхідно обчислити параметри ізоляції мережі по відношенню до землі.

Порушення електричної ізоляції ПЛ призводить, як до однофазних замикань на землю, так і міжфазних коротких замикань. Останні швидко ліквідуються відключенням ушкодженої ділянки, натомість замикання на землю може існувати достатньо тривалий час.

## **2.2 Виникнення перенапруг в електричних мережах, що працюють з ізолюваною нейтраллю при дугових ОЗЗ**

Розглянемо процеси, що відбуваються в трьохфазній симетричній мережі рис. 2.2 при замиканні на землю.

Припустимо, що замикання сталося в момент часу  $t = 0$ , напруга відносно землі фази А при цьому має максимальне значення. Фазні напруги в цьому випадку описуються наступними рівняннями:

$$u_{\phi A} = U_{\text{мф}} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right); u_{\phi B} = U_{\text{мф}} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3}\right); u_{\phi C} = U_{\text{мф}} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} - \frac{4\pi}{3}\right). \quad (2.9)$$

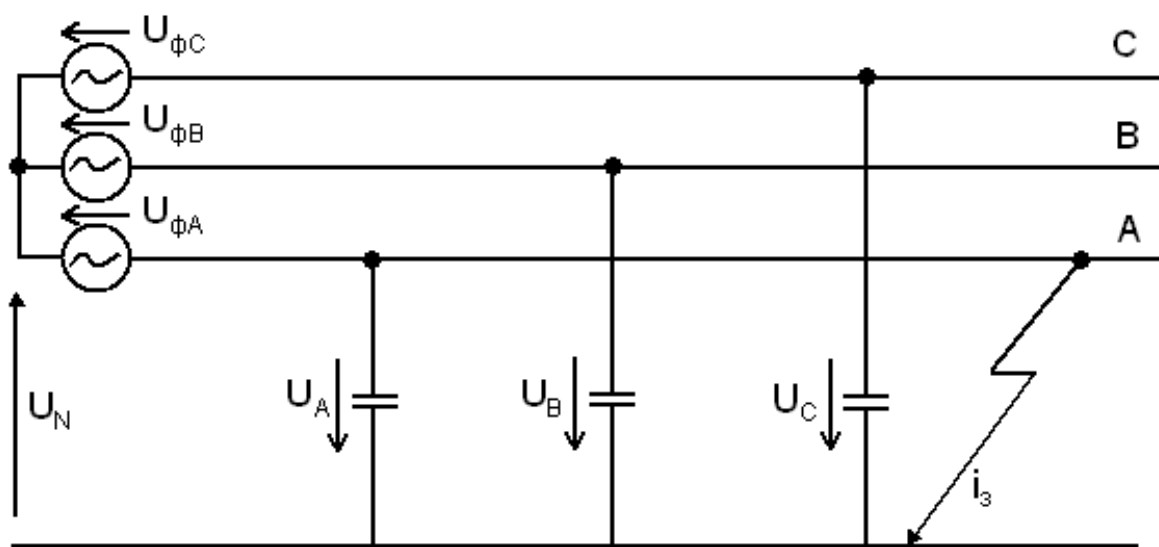


Рис. 2.2 - Розрахункова схема електричної мережі при однофазному замиканні фази А на землю

Перед замиканням фази А на землю при  $t = (-0)$ , напруга фаз А, В, С по відношенню до землі мала значення (рис. 2.3)

$$u_A(-0) = U_{\text{мф}}; u_B(-0) = u_C(-0) = 0,5U_{\text{мф}}.$$

В інтервалі часу від  $\omega t = 0$  до  $\omega t = \pi$  струм замикання на землю змінювався за законом:

$$i_3 = 3U_{\text{мф}}\omega C \sin(\omega t + \pi), \quad (2.10)$$

а напруга зміщення нейтралі  $U_N$  дорівнює напрузі фази А.

Електрична дуга згасне при першому ж проходженні струму через нуль, що відбудеться при  $\omega t = \pi$  (рис. 2.3). Електрична ємність пошкодженої фази відносно землі більше не буде закорочена дугою. Це призведе до швидкого перерозподілу напруг на ємностях електромережі по відношенню до землі.

В наступному інтервалі часу при  $\pi \leq \omega t \leq 3\pi/2$  напруга зміщення нейтралі прийме значення  $U_N = -U_{\text{мф}}$ . Отже, після згасання дуги нульова точка трьохфазного джерела живлення приймає потенціал відносно землі, який з часом змінюється та дорівнює по значенню амплітуді фазної напруги в мережі.

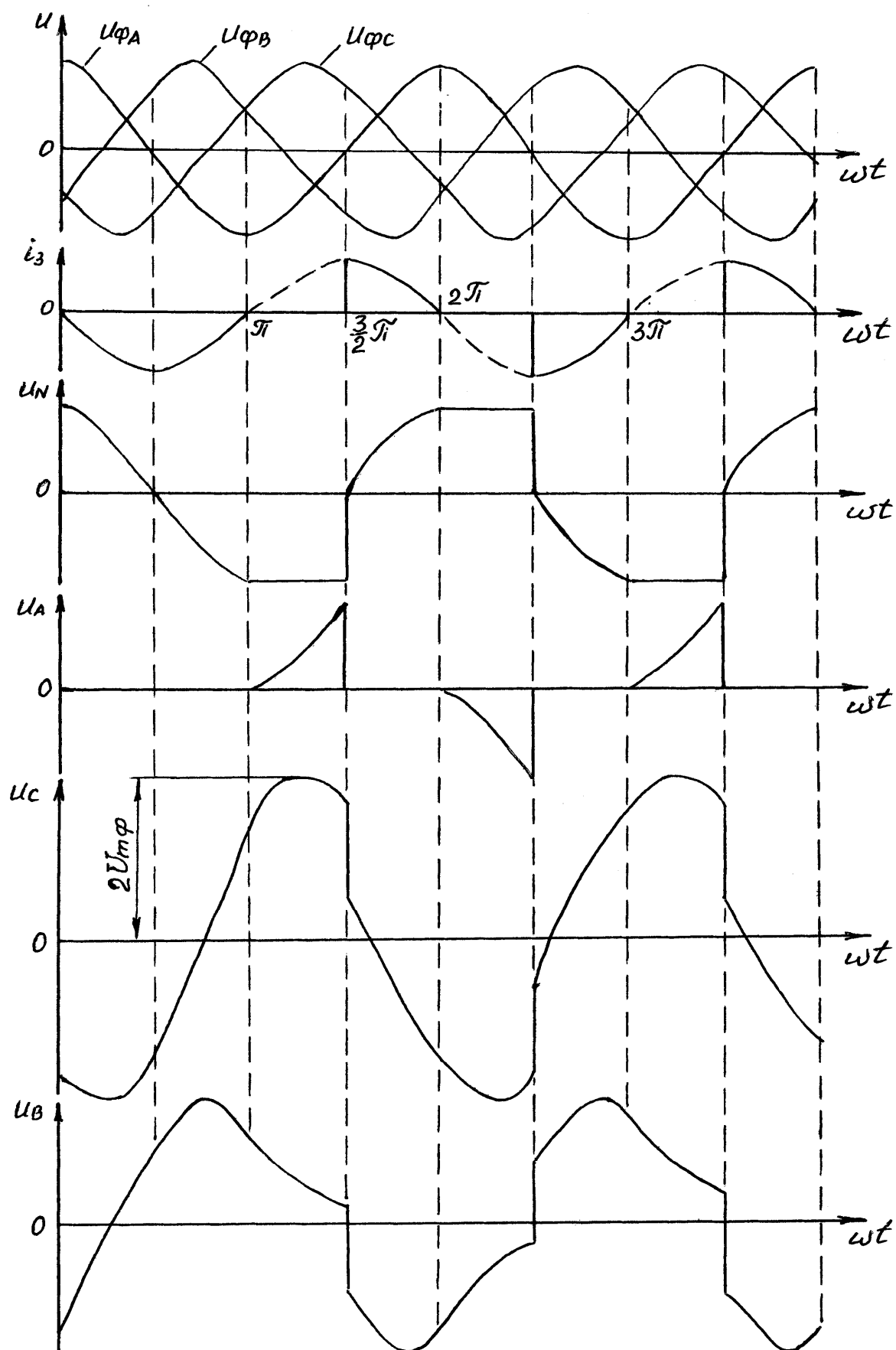


Рис. 2.3 – Графіки залежностей зміни електричних параметрів при дуговому замиканні на землю, що характеризують перехідний процес

В інтервалі згасання дуги напругу в мережі можна визначити за формулами:

$$\begin{aligned} u_A &= U_{\text{мф}} \left[ \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) + 1 \right], \\ u_B &= U_{\text{мф}} \left[ \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3}\right) + 1 \right], \\ u_C &= U_{\text{мф}} \left[ \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} - \frac{4\pi}{3}\right) + 1 \right]. \end{aligned} \quad (2.11)$$

В початкову фазу  $\psi$  напруг живлення:

$$\begin{aligned} u_{\phi A} &= U_{\text{мф}} \sin(\omega t + \psi), \\ u_{\phi B} &= U_{\text{мф}} \sin\left(\omega t + \psi - \frac{2\pi}{3}\right), \\ u_{\phi C} &= U_{\text{мф}} \sin\left(\omega t + \psi - \frac{4\pi}{3}\right). \end{aligned}$$

Напругу фази А до моменту замикання на землю можна визначити з рівняння:

$$u_A = \frac{U_{\text{мф}}}{\sqrt{r^2 \omega^2 C^2 + (1 - \omega^2 LC)}} \sin(\omega t + \psi - \varphi), \quad (2.12)$$

$$\text{де } \varphi = \arctg \frac{r\omega C}{1 - \omega^2 LC}.$$

Отже, застосувавши подібний підхід розгляду інтервалів згасання і запалювання дуги можна побудувати графіки перехідних процесів з яких задаючись конкретними значеннями  $r$ ,  $L$ ,  $C$  електричної мережі обчислити кратність перенапруг.

### 2.3 Процеси при ОЗЗ в мережах, що працюють з компенсованою нейтраллю

Розглянемо ідеальну симетричну мережу рис. 2.4.

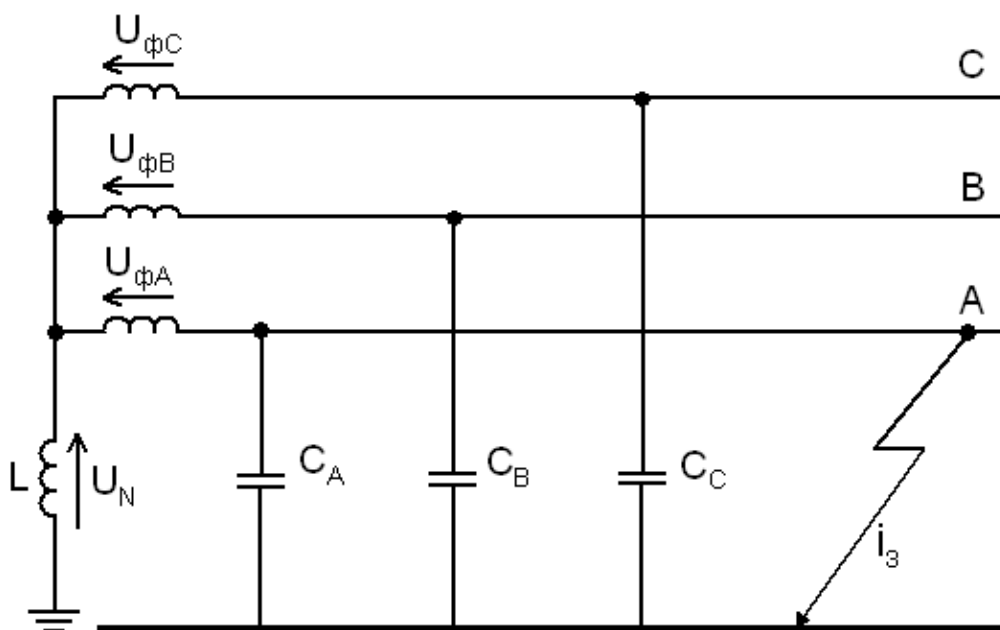


Рис. 2.4 - Компенсація ємнісних струмів замикання на землю (заземлення через дугогасячий реактор)

В електричній мережі при  $C_A = C_B = C_C = C$ , струм замикання на землю буде дорівнювати:

$$I_3 = U_\phi \left( 3\omega C - \frac{1}{\omega L} \right). \quad (2.13)$$

За умови виконання резонансу  $3\omega C - 1/\omega L = 0$ .

Отже, при ідеальних умовах резонансу перенапруг відносно землі не виникає, а при  $C_A = C_B = C_C$  напруга зміщення нейтралі  $U_N$  дорівнює нулю.

Але в реальності ізоляція електричних мереж та резонансна котушка мають ще й активний опір, до того ж електричні ємності мережі відносно землі можуть бути неоднаковими, тобто  $C_A \neq C_B \neq C_C$ . Принциповою є різниця між металевим (бездуговим) замиканням та замиканням з переміжною дугою. При врахуванні активних опорів схема рис. 2.4 набуде вигляду рис. 2.5.

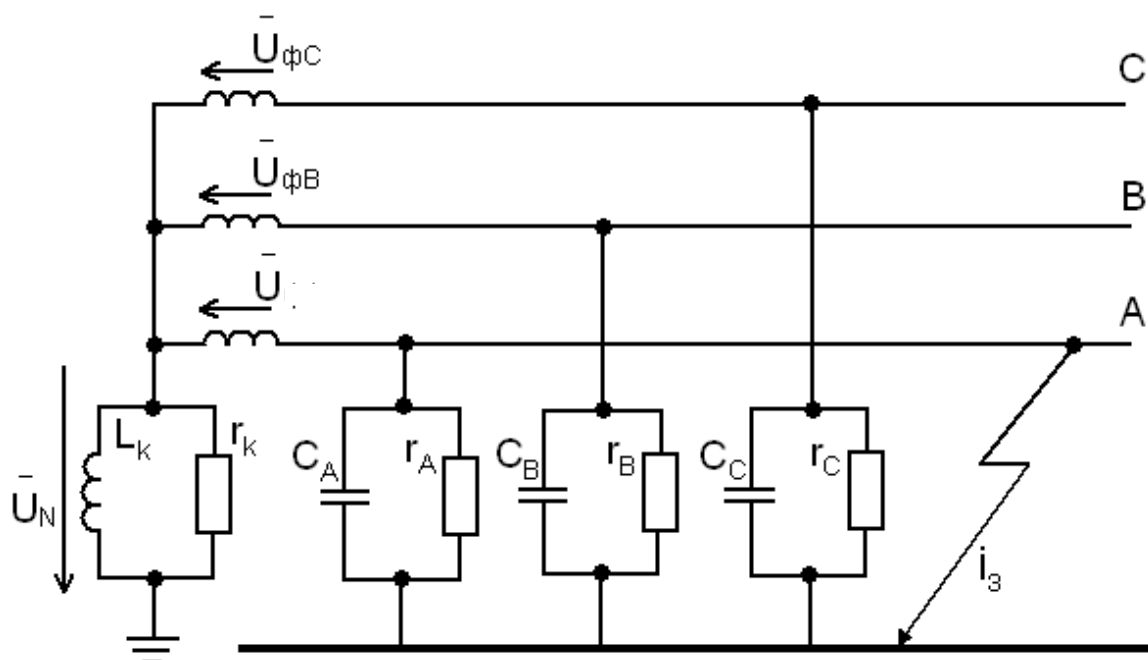


Рис. 2.5 - Схема заміщення електричної мережі з компенсованою нейтраллю в якій враховані активні опори ізоляції та реактору.

Припустивши схему наведену на рис. 2.5 симетричною ( $C_A = C_B = C_C = C$ ), ( $r_A = r_B = r_C = r$ ) приведемо її до розрахункової рис.2.6.

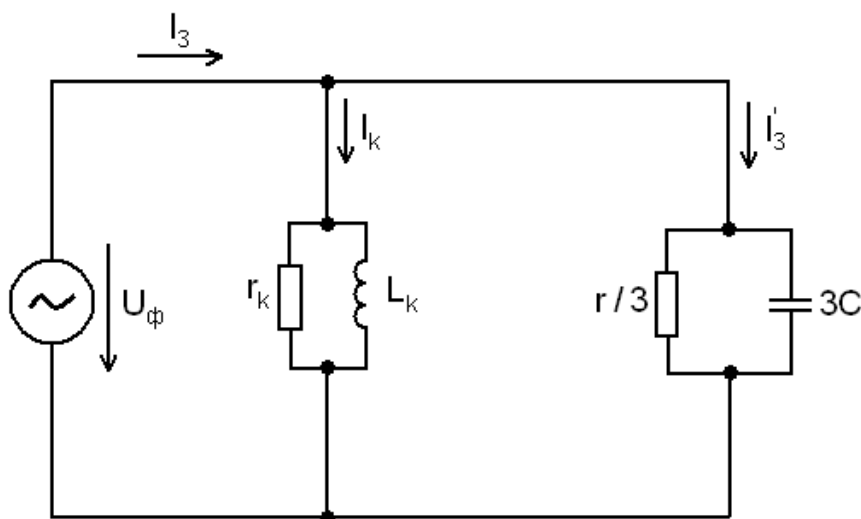


Рис. 2.6 – Еквівалентна схема електричної мережі з компенсованою нейтраллю в якій враховані активні опори ізоляції та реактору.

Умовою появи резонансу є рівність індуктивного  $I_L$  та ємнісного  $I_C$  струмів. При резонансі струм замикання на землю з врахуванням активних опорів визначиться за виразом:

$$I_3 = U_\phi \left( \frac{1}{r_k} + \frac{3}{r} \right) \quad (2.14)$$

Отже, як видно з формули (2.14) навіть у випадку точної резонансної настройки котушки індуктивності струм замикання на землю не буде дорівнювати нулю та визначатиметься опорами ізоляції мережі та котушки.

Ємнісна складова в струмі замикання на землю не може бути виміряна прямим способом. В цьому випадку налаштування в резонанс, що відповідає умові  $I_C = I_L$ , не може бути здійснений безпосередньо, а тому налаштування в резонанс проводять за значенням розрахункового струму, що визначається за формулою:

$$I_C = 3U_\phi \omega C.$$

З урахуванням цього резонансне налаштування котушки для компенсації ємнісних струмів здійснюється лише наближено, а тому струм замикання на землю завжди не буде дорівнювати нулю.

У випадку дугового замикання на землю в мережі з компенсованою нейтраллю (рис. 2.5) за резонансного налаштування котушки представивши фазні напруги наступними виразами:

$$u_{\phi A} = U_{m\phi} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right), u_{\phi B} = U_{m\phi} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3}\right), u_{\phi C} = U_{m\phi} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} - \frac{4\pi}{3}\right),$$

в перший інтервал часу струм замикання на землю дорівнюватиме:

$$i_{3A} = \frac{U_m}{r_e} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right), \text{ де } r_e = \frac{3r_k}{3r_k + r}.$$

В момент проходження струму  $i_{3A}$  через нуль, тобто при  $\omega t = \pi/2$ , дуга згасне. Перед моментом згасання дуги напруги на непошкоджених фаз будуть дорівнювати:

$$u_B\left(\frac{\pi}{2}-\right)=\frac{\sqrt{3}}{2}U_m; u_C\left(\frac{\pi}{2}-\right)=-\frac{\sqrt{3}}{2}U_m.$$

Струм в котушці  $L_k$  в момент згасання дуги ( $i_{3A} = 0$ ) дорівнює амплітудному значенню:

$$i_L = \frac{U_m}{\omega L_k} \sin \frac{\pi}{2} = \frac{U_m}{\omega L_k}.$$

В наступні інтервали запалювання та згасання електричної дуги замикання на землю напруга вільної складової між нульовим виводом трансформатора та землею матиме затухаючий коливальний характер з кутовою частотою, що може бути знайдена за формулою [6]:

$$\omega' = \sqrt{\frac{1}{L_k C} - \frac{1}{4C^2} \left( \frac{1}{r} + \frac{1}{3r_k} \right)^2} \quad (2.15)$$

Для ідеалізованої мережі й котушки, коли  $1/r = 1/3r_k = 0$ , кутова частота незатухаючих коливань  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_k C}}$ .

Отже, навіть за умови цілковитої симетричності електричної мережі в момент часу після згасання дуги напруга на котушці не дорівнюватиме нулю. Вона почне змінюватися з певною частотою вільних коливань та за певних співвідношень параметрів електричної мережі та котушки може призвести до появи перенапруг. Їх значення обумовлюється різницею фазних напруг і напруги зміщення в нейтралі:

$$u_A = u_{\phi A} - u_N; u_B = u_{\phi B} - u_N; u_C = u_{\phi C} - u_N.$$

За певної напруги електрична дуга знову запалюється, а далі процес повністю повторюється. Але в наступні інтервали часу, при подальших розрахунках струмів та напруг перехідного процесу, необхідно врахувати вже інші початкові значення струму в котушці індуктивності в моменти замикання на землю та в моменти згасання дуги.

## **2.4 Умови роботи ТН в розподільчих мережах напругою 10 - 35 кВ**

Досвід експлуатації електричних мереж 10-35 кВ показав, що цим мережам властива значна імовірність ушкоджень. Основною причиною такої низької надійності є саме режим роботи нейтралі цих мереж. А причини аварійних відключень є такими:

- 1) поява внутрішніх перенапруг зі значною кратністю при ОЗЗ;
- 2) неможливість забезпечення високої ефективності компенсації ємнісних складових струму ОЗЗ;
- 3) низький рівень безпечності експлуатації, що пов'язаний з високою небезпекою для людей і тварин при режимі ОЗЗ;
- 4) можливість помилкових оперативних переключень, що виконуються експлуатаційним персоналом при визначення ділянки лінії з ОЗЗ;
- 5) неможливість забезпечення ефективної роботи релейного захисту при ОЗЗ (недостатня чутливість, незадовільна селективність та стійкість до перешкод);
- 6) збільшення витрат в пристрої компенсації ємнісної складової струму ОЗЗ та збитків від аварійних відключень споживачів.

Загальноприйнятим способом підвищення надійності роботи електричних мереж з ізольованою нейтраллю вважається компенсація ємнісної складової струму ОЗЗ. Але, останнім часом, все більше звертають увагу на суттєві недоліки такого заходу [6, 7]. Слід також відмітити, що обмеження струму ОЗЗ до

безпечного значення можливо лише при умові відсутності активної та вищих гармонічних складових в ньому, в той же час як в реальності їх рівень достатньо значний [7]. Крім того наявність індуктивності, що використовується для компенсації ємнісної складової струму ОЗЗ, може слугувати причиною появи резонансних явищ та пов'язаних з цим перенапруг. Поява таких перенапруг, в свою чергу, є частою причиною ушкодження трансформаторів напруги.

Висока ймовірність пошкодження ТН типу НТМИ-10 і ЗНОМ-35 характерна для всіх енергосистем колишнього СРСР. Так, згідно даних наведених в [3] ймовірність пошкодження ТН в мережах напругою 6-35 кВ складає від 5 до 12%. Яскравим прикладом є випадок, що стався на підстанції «Фундуклеєвка» Кіровоградобленерго коли за один рік з ладу вийшло п'ять ТН типу ЗНОМ-35, а на підстанціях «Сільмаш» та «Янтарна» пошкодились такі ж самі ТН на обох секціях шин [8].

Причиною пошкодження ТН в електричних мережах напругою 10-35 кВ при тривалому дуговому ОЗЗ є протікання струмів в обмотках високої напруги більших за їх теплову стійкість [8, 9]. Ще однією причиною є виникнення субгармонійних ферорезонансних коливань в мережах з ізолюваною нейтраллю, які супроводжуються збільшенням струму в первинній обмотці ТН вище за допустимий та, як наслідок, тепловому ушкодженню ТН [8].

Відсоток пошкоджень ТН в електричних мережах виконаних кабельними лініями не значний [10]. Це пояснюється тим, що в електричних мережах виконаних кабельними лініями, на відміну від повітряних, струм замикання на землю сягає відносно високих значень (десятки, а то і сотні ампер) це призводить до того, що замикання на землю в таких мережах швидко (протягом декількох хвилин) або переходить в металеве замикання на землю, або в міжфазне коротке замкнення. При невеликому струмі ОЗЗ дуга не розплавляє метал струмопровідних частин та може горіти протягом багатьох годин не завдаючи значної шкоди.

Розряд зарядженої ємності мережі через обмотку ВН ТН призводить до появи коливального процесу, так як активний опір цієї обмотки занадто малий для

того щоб процес став аперіодичним. Потокозчеплення обмоток ТН через 0,015-0,02 с після згасання дуги може досягти значення  $3...4\psi_n$ , а кидки струму намагнічування 5-6 А [8], при цьому відомо, що допустиме значення струму в обмотках ВН ТН типу ЗНОМ-35, НТМИ-10, НАМИ-10 складає всього 0,5...0,13 А [11].

Слід відзначити, що поява переміжної дуги не обов'язково призводить до перезбудження ТН. Якщо її запалювання та згасання відбувається більше одного разу на період, то перехідні процеси не встигають набути свого розвитку і, як наслідок, ТН не пошкоджується. Якщо ж дуга запалюється та гасне рідше ніж один раз на період, то перехідний процес розвивається повністю та здатний, наприклад, пошкодити ТН типу НТМИ-10 швидше ніж за 5 хвилин [2].

На рис. 2.7 показано утворення контуру при якому можливий ферорезонанс.

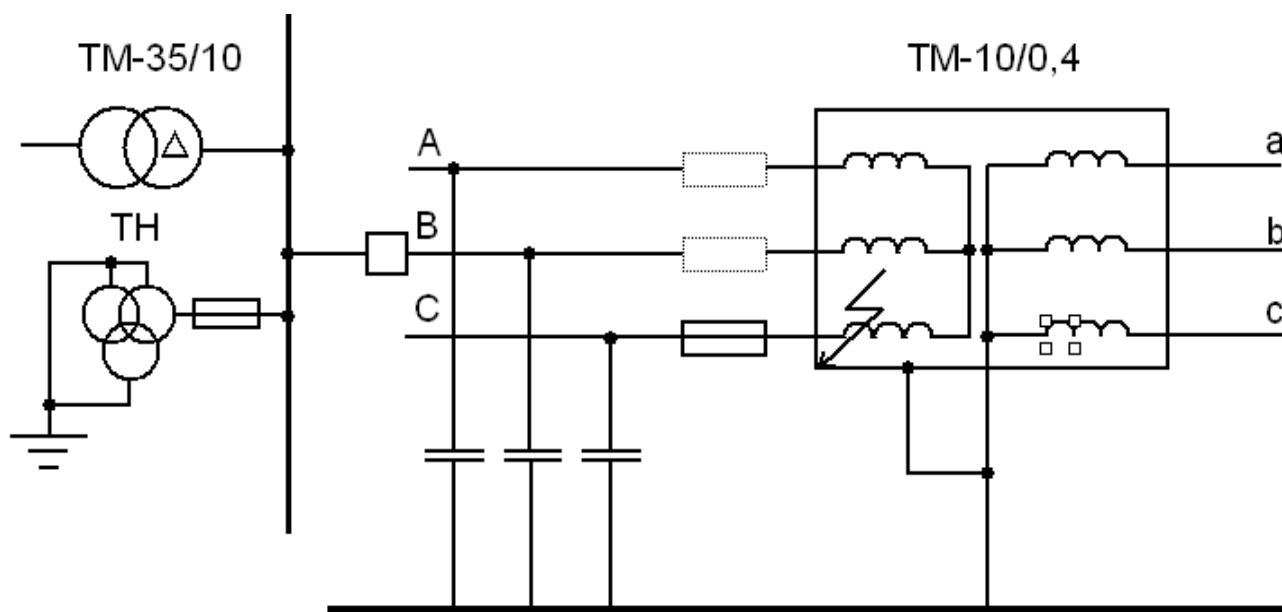


Рис. 2.7 - Схема утворення контуру сприятливого для появи ферорезонансу

У випадку замикання однієї з фаз на землю при одночасному обриві двох інших (наприклад, перегорання запобіжників в фазах А і В при виникненні к.з.), в мережі, що працює з ізолюваною нейтраллю можливе виникнення режиму ферорезонансного перетворення однофазної напруги в трьохфазну. В цьому випадку напрямок чергування фаз може бути як зворотнім так і прямим. При

зворотному чергуванні фаз відбувається підвищення однієї з фазних напруг до  $4U_\phi$  [3]. Таке значне підвищення напруги призводить до швидкого виходу з ладу трансформатору напруги (рис. 2.7).

Отже, найбільш небезпечними явищами для роботи ТН в електричних мережах з ізолюваною нейтраллю є дугові ОЗЗ, що призводять до появи перенапруг та виникнення ферорезонансних коливань, що з'являються за певних співвідношень параметрів електричної мережі.

## 2.5 Вплив ТН на появу перенапруг в розподільчих мережах з ізолюваною нейтраллю

Трансформатори напруги, що використовуються для контролю ізоляції підключаються між фазами електромережі та землею. Таке підключення вносять додатковий опір в коло протікання струму відносно землі. Враховуючи, що опір обмоток ТН носить індуктивний характер, а електрична мережа відносно землі має ємнісний, то це може суттєво впливати на значення струму ОЗЗ. Електрична схема заміщення підключення ТН до електричної мережі з ізолюваною нейтраллю наведена на рис. 2.8. При цьому паралельно обмотці ТН підключена фазна ємність мережі.

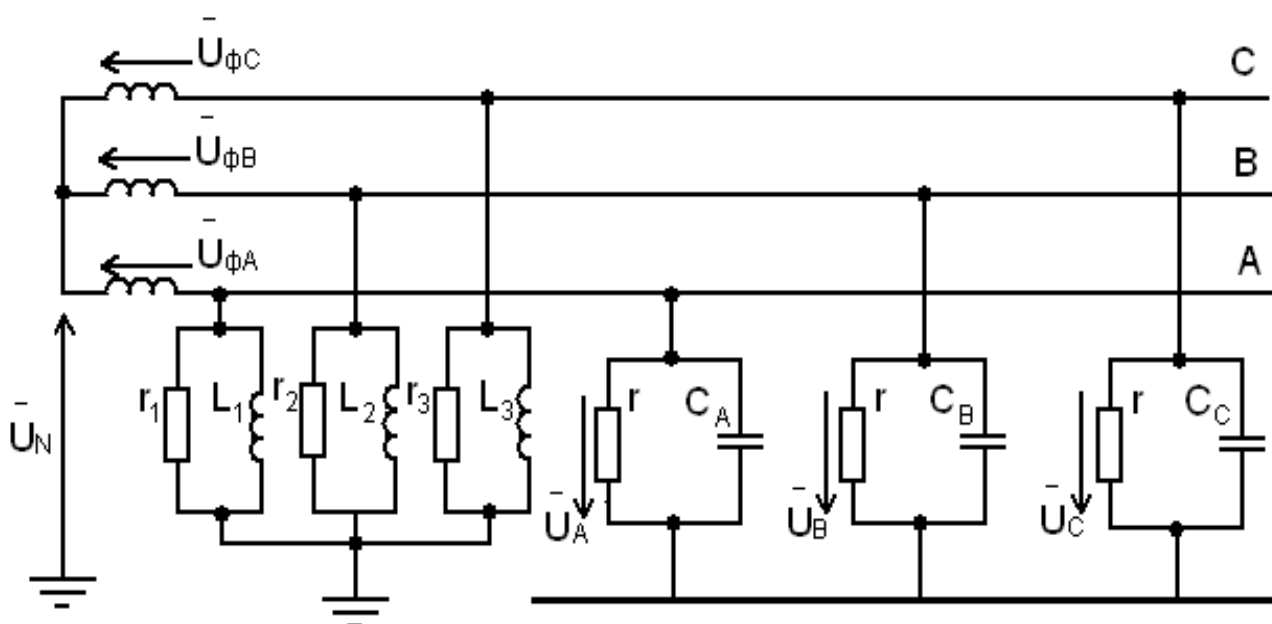


Рис. 2.8 - Схема заміщення електричної мережі з врахуванням опору трансформатора напруги

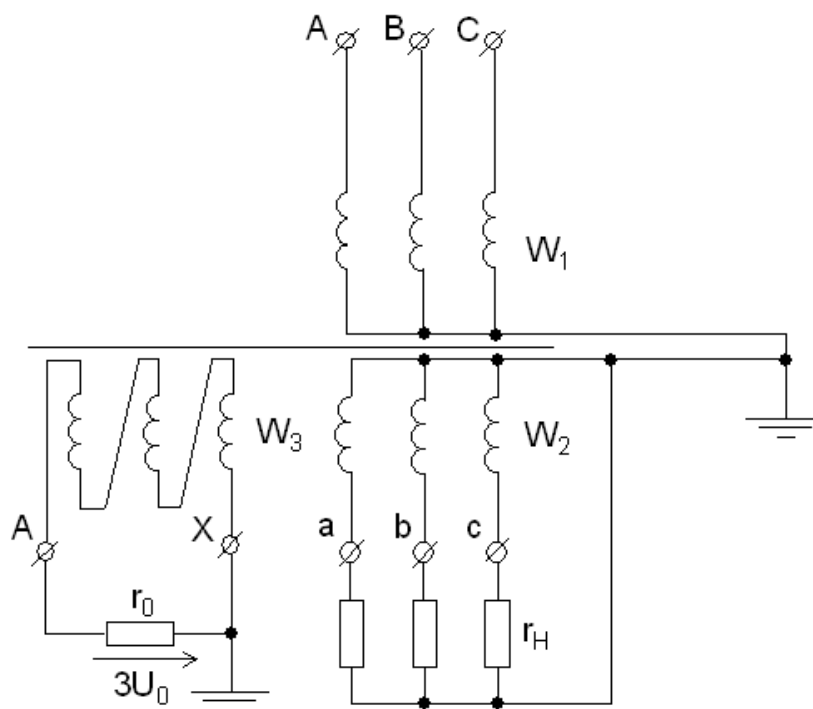


Рис. 2.9 - Схема з'єднання обмоток ТН типу НТМИ-10 і ЗНОМ-35

На основі законів Кірхгофа для схеми з'єднання обмоток ТН (рис. 2.9) запишемо рівняння струмів в первинних обмотках в функції напруг на окремих фазах мережі  $\bar{U}_A$ ,  $\bar{U}_B$ ,  $\bar{U}_C$ , по відношенню до землі (рис. 2.8):

$$\begin{aligned}\bar{I}_A &= \bar{U}_A \left( \frac{1}{k_1^2 r_H} + \frac{1}{j\omega L_1} \right) + \frac{1}{k_2^2 r_0} (\bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C), \\ \bar{I}_B &= \bar{U}_B \left( \frac{1}{k_1^2 r_H} + \frac{1}{j\omega L_1} \right) + \frac{1}{k_2^2 r_0} (\bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C), \\ \bar{I}_C &= \bar{U}_C \left( \frac{1}{k_1^2 r_H} + \frac{1}{j\omega L_1} \right) + \frac{1}{k_2^2 r_0} (\bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C).\end{aligned}\tag{2.16}$$

де  $k_1 = W_1/W_2 \approx U_1/U_2$ ;  $k_2 = W_1/W_3 \approx U_1/U_3$  – коефіцієнти трансформації ТН;

$r_0$  та  $r_H$  – додаткові опори, що вводяться в колі вторинних обмоток, з'єднаних в розімкнутий трикутник та зірку.

Оскільки струм  $\bar{I}_0$  та напругу  $\bar{U}_0$  нульової послідовності можливо визначити із рівнянь (2.16):

$$\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = 3\bar{I}_0, \bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C = 3\bar{U}_0,$$

то повна провідність однієї фази ТН відносно землі буде дорівнювати:

$$\frac{I_0}{U_0} = \frac{1}{k_1^2 r_H} + \frac{3}{k_2^2 r_0} + \frac{1}{j\omega L_1}, \quad (2.17)$$

отже, активний опір, який вноситься в схему ТН буде визначатися за формулою:

$$r_1 = \left( \frac{1}{k_1^2 r_H} + \frac{3}{k_2^2 r_0} \right)^{-1}, \quad (2.18)$$

а індуктивний опір –  $\omega L_1$ .

Перенапруги відносно землі зручно характеризувати напругою зміщення нейтралі  $\bar{U}_N$ , тому що вона визначає значення напруг фаз відносно землі:

$$\bar{U}_A = \bar{U}_{\phi A} - \bar{U}_N; \bar{U}_B = \bar{U}_{\phi B} - \bar{U}_N; \bar{U}_C = \bar{U}_{\phi C} - \bar{U}_N.$$

Для схеми зображеної на рис. 2.8 напруга зміщення нейтралі визначається:

$$\bar{U}_N = U_\phi \frac{j\omega(C_A + a^2 C_B + a C_C)}{\frac{3}{r_1} + \frac{3}{r} + j\left(\omega C_A + \omega C_B + \omega C_C - \frac{3}{\omega L_1}\right)}, \quad (2.19)$$

де  $C_A, C_B, C_C$  – ємності окремих фаз мережі відносно землі;

Кратність перенапруги згідно [6] дорівнює:

$$K = \frac{U_N}{U_\phi} = \frac{\omega C r_1 r}{3(r_1 + r)} = \omega C r_e, \quad (2.20)$$

де  $C$  – «несиметрична» ємність в електричній мережі при ОЗЗ;

$r_e$  – еквівалентний активний опір схеми (рис. 2.8).

Формула (2.20) дозволяє при відомих ємностях, що створює несиметрію та параметрах ізоляції мережі і ТН визначити кратність перенапруги.

## **2.6 Заходи підвищення надійності роботи розподільчих мереж та трансформаторів напруги**

При експлуатації електричних мереж з ізольованою та компенсованою нейтраллю питання надійної роботи трансформаторів напруги НТМИ-10(6) та ЗНОМ-35 залишається відкритим. Не зважаючи на свою низьку надійність вони залишаються основним та традиційним пристроєм контролю цілісності ізоляції в розподільних мереж між фазами та землею. Такий контроль здійснюється завдяки обмотці ТН, що з'єднана в розімкнутий трикутник (рис. 2.9).

Захист ТН, що здійснюють контроль ізоляції можливо здійснити завдяки наступним заходам:

- включенням додаткового опору в коло вторинної обмотки, що з'єднана в розімкнутий трикутник;
- заземленням через високоомний резистор нейтралі мережі;
- встановленням додаткового опору між землею та нейтраллю первинної обмотки ТН;
- експлуатацією спеціальних антирезонансних ТН.

Включення додаткового опору в коло вторинної обмотки ТН, що з'єднана в розімкнутий трикутник дійсно підвищує ефективність його роботи завдяки зниженню рівня перенапруг. Як видно з формули (2.18) навіть невелике значення  $r_0$  суттєво зменшує  $r_1$  та, як наслідок, призводить до зменшення  $r_e$  (2.20). При цьому кратність перенапруг при виникненні ферорезонансу також суттєво зменшується. Але подібний захід не сприяє нормальній роботі ТН внаслідок його перевантаження.

Встановлення додаткового опору між землею та нейтраллю первинної обмотки ТН також підвищує показник ефективності режиму нейтралі орієнтовно в 2 рази [7]. Але при струмах ОЗЗ 5А і більше використання високоомного резистору опором 10...30 кОм вимагає додаткових витрат, що пов'язані з

придбанням та встановленням резистора значної потужності.

Встановлення додаткового опору між землею та нейтраллю первинної обмотки ТН має такі ж самі недоліки як і попередній захід.

Застосування антирезонансних ТН ускладнено тим, що їх вартість в 1,5-2 рази вища за звичайні. До того ж застосування таких трансформаторів зменшує але не виключає повністю появу ферорезонансу і, як наслідок, виходу з ладу ТН.

Отже, розглянуті заходи підвищення надійності роботи ТН в розподільчих мережах, що працюють з ізольованою нейтраллю не є універсальними та не дають 100% результат.

Якщо розземлити нейтраль первинної обмотки ТН, то в цьому випадку розривається шлях протікання струму нульової послідовності. Це повністю виключає можливість пошкодження ТН при дугових ОЗЗ та появі ферорезонансних явищ. Але також вторинна обмотка ТН, що з'єднана за схемою розімкнутого трикутника перестає працювати як фільтр напруги нульової послідовності та не може бути використана для контролю цілісності ізоляції мережі відносно землі.

Отримати напругу нульової послідовності можливо і без використання ТН за допомогою спеціальної антени, що розташована під проводами лінії електропередачі [5]. Напруга між такою антеною і землею в нормальному режимі дорівнює:

$$U_a = \frac{C_0 U_\phi}{2\pi\epsilon_0} \left( \ln \frac{L'_A}{L_A} + a^2 \ln \frac{L'_B}{L_B} + a \ln \frac{L'_C}{L_C} \right) \quad (2.21)$$

де  $C_0$  – ємність одиниці довжини лінії між фазним проводом і землею;

$\epsilon_0$  – діелектрична проникність повітря;

$L'_A, L'_B, L'_C$  – відстань між точкою вимірювання та дзеркальним відображенням фазних проводів відносно землі;

$L_A, L_B, L_C$  – відстань між фазними проводами й точкою вимірювання;

$U_\phi$  – фазна напруга електричної мережі;

$a$  – фазний коефіцієнт.

При ОЗЗ напруга між антеною та землею виразиться рівнянням:

$$U'_a = U_a + \frac{C_0 U_0}{3\pi\epsilon_0} \ln \frac{L'_A L'_B L'_C}{L_A L_B L_C}, \quad (2.22)$$

де  $U_0$  – напруга нульової послідовності.

Суттєвим недоліком такого методу контролю є низька чутливість при ОЗЗ через значний перехідний опір. Подібна ситуація часто трапляється, наприклад, при пробі ізоляторів, пошкодженні розрядників, обриві проводів.

Найбільш перспективним, на нашу думку, є метод контролю цілісності ізоляції з використанням струмів витоку опорних ізоляторів [12, 13]. Підключення ізоляторів трьох фаз верхніми фланцями до шин високої напруги, а з'єднання нижніх за схемою рис. 2.10, призведе до утворення штучної нульової точки зірки опорів ізоляторів. Між цією точкою та землею можна увімкнути пристрій контролю ізоляції.

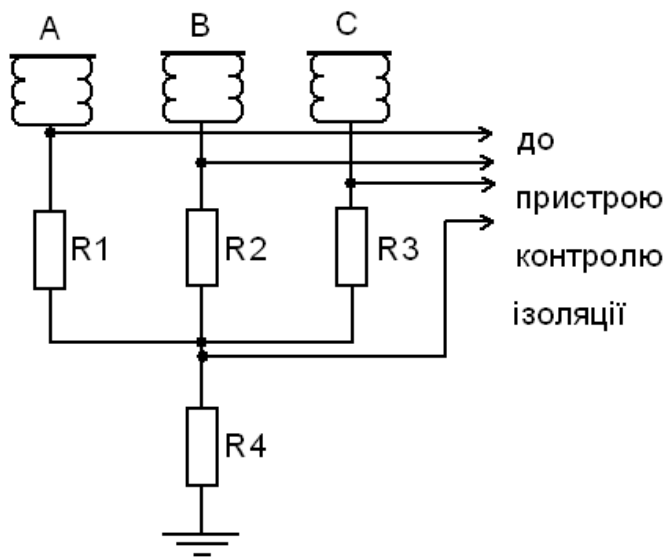


Рис. 2.10 - Схема первинних кіл пристрою контролю ізоляції

Такий спосіб буде працездатним тільки в тому випадку, якщо утворена зірка з опорів ізоляторів достатньо симетрична, тобто опори трьох ізоляторів однакові. Результати вимірювань [12] показали, що відхилення опору ідентичних ізоляторів не перевищують 4-5 %. Отже, такі малі відхилення підтверджують можливість практичної реалізації цього способу контролю ізоляції.

## 2.7 Висновки

1. На основі математичної моделі роботи електричної мережі з ізольованою нейтраллю в умовах однофазного «металевого» замикання на землю отримана формула для обчислення струму замикання на землю.

2. Розглянута математична модель роботи електричної мережі, що працює з ізольованою нейтраллю при виникненні ОЗЗ через переміжну дугу, дозволяє оцінити перехідний процес та визначити кратність перенапруг, що виникають при певних параметрах електричної мережі.

3. Досліджено вплив заземлення через дугогасячий реактор на струм замикання на землю. Відзначено, що навіть при повній компенсації ємнісного струму струм замикання на землю не дорівнює нулю, а має певне значення, яке обумовлене активним опором ізоляції мережі та нерівномірністю ємності відносно землі по фазах.

4. Найбільш небезпечними явищами для роботи ТН в електричних мережах з ізольованою нейтраллю є дугові ОЗЗ, що призводять до появи перенапруг та виникнення ферорезонансних коливань, що з'являються за певних співвідношень параметрів електричної мережі.

5. Розглянуті заходи підвищення надійності роботи розподільчих мереж та ТН. Відзначено, що ні один із запропонованих заходів не є універсальним і 100% методом для підвищення надійності роботи розподільчих мереж та захисту ТН. Якщо розземлити нейтраль первинної обмотки ТН, то їх пошкодження при дугових замиканнях на землю та від ферорезонансних коливань можливо виключити. В цьому випадку розривається шлях протікання струму нульової послідовності через обмотку ВН ТН. Запропонований альтернативний безтрансформаторний спосіб контролю ізоляції мережі.

### РОЗДІЛ 3.

## РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ КОНТРОЛЮ ЦІЛІСНОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ В МЕРЕЖАХ 6 – 35 кВ

### 3.1 Обґрунтування можливості використання альтернативних методів контролю за станом ізоляції

У 2.6 відзначено, що контроль стану ізоляції в мережах, що працюють з ізолюваною нейтраллю може бути здійснений не тільки за допомогою трансформаторів напруги. Різноманітні дослідження, як експериментальні, так і теоретичні [12, 13], показали, що цей процес можна ефективно контролювати без застосування трансформаторів. Зокрема, використання струмів витоку опорних ізоляторів є зручним і простим методом, особливо з використанням ізоляторів, що вже знаходяться в експлуатації. Єдина вимога до цих ізоляторів - їх повна ідентичність.

У однакових опорних ізоляторів струми витоку, встановлених в різних фазах, будуть практично однакові, з відхиленням менше 5%. Забруднення поверхні таких ізоляторів за однаковий період експлуатації практично ідентичне через їх близьке розташування. Як результат, сумарний струм витоку в нейтральній точці опорів буде нульовим незалежно від тривалості експлуатації трьох ізоляторів.

При пошкоджені ізоляції в електричній мережі відносно землі порушується симетричність зірки опорів, відповідно і сумарний струм витоку трьох опорних ізоляторів різних фаз буде відмінним від нуля, що і можна контролювати. Величина струму витоку також свідчить про ступінь забруднення і може вказувати на можливу необхідність їхнього обслуговування, а також на ненормальний режим роботи мережі.

Отже, використання ізоляторів як «універсальних датчиків» дозволяє реалізувати контроль ізоляції в мережі та визначати ступінь забруднення підстанційної ізоляції без потреби вартісних трансформаторів напруги, які часто виходять з ладу.

Надійна робота пристроїв контролю цілісності ізоляції електромережі, забезпечується виконанням наступних вимог:

- надійною роботою при змінах напруги в мережі;
- захист вторинних ланцюгів від попадання високої напруги;
- можливість ідентифікації не металевих (дугових) замикань на землю;
- невеликі габарити.

### 3.2 Аналіз складових струму витоку через ізолятор

Розглянемо схему заміщення забрудненого ізолятора та утворення струму витоку в ньому рис. 3.1.

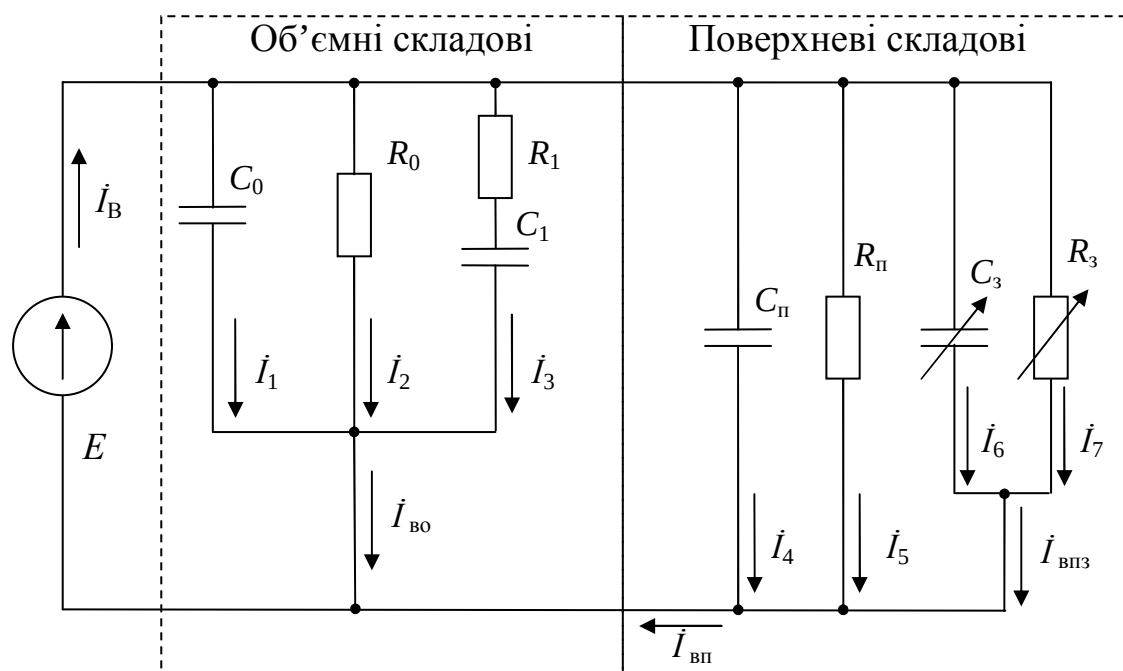


Рис. 3.1 - Схема заміщення електричних процесів утворення струму витоку забрудненого ізолятора.

При складанні схеми заміщення зробимо припущення, що іонізаційних процесів на забрудненій поверхні ізолятора немає. В цьому випадку шар забруднення можна змодельовати лінійним активним опором.

Прикладання напруги  $E$  до ізолятора призведе до протікання струму витоку  $I_{\text{в}}$ , через нього, який зумовлений, як об'ємними так і поверхневими

явищами, що умовно можна розкласти на сім складових (рис. 3.1) [14]:

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{\text{во}} + \dot{I}_{\text{вп}} = \dot{I}_{\text{во}} + (\dot{I}_4 + \dot{I}_5 + \dot{I}_{\text{впз}}) = (\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3) + (\dot{I}_4 + \dot{I}_5 + \dot{I}_6 + \dot{I}_7), \quad (3.1)$$

де  $\dot{I}_{\text{во}}$  – об’ємний струм витоку ізолятора;

$\dot{I}_{\text{вп}}$  – поверхневий струм витоку ізолятора;

$\dot{I}_{\text{впз}}$  – поверхневий струм витоку ізолятора обумовлений забрудненням;

$\dot{I}_1$  – струм, викликаний електричною ємністю між фланцями через тіло ізолятора;

$\dot{I}_2$  – струм, обумовлений активною провідністю твердого діелектрика між фланцями ізолятора;

$\dot{I}_3$  – струм, обумовлений абсорбцією в твердому діелектрику;

$\dot{I}_4$  – струм, викликаний електричною ємністю між фланцем ізолятора і шиною та струмознімальним кільцем через повітря;

$\dot{I}_5$  – струм, обумовлений активною провідністю по поверхні чистого твердого діелектрика;

$\dot{I}_6$  – ємнісний струм, що утворюється шаром забруднення і зволоженням поверхні ізолятора;

$\dot{I}_7$  – струм, обумовлений активною провідністю шару забруднення на поверхні.

Ємнісна складова об’ємного струму витоку  $\dot{I}_1$  залежить від діелектричної проникності твердого діелектрику і геометричних розмірів фланців, які залишаються відносно сталими в процесі експлуатації ізолятора [15].

$$\dot{I}_1 = j\omega C_0 E,$$

де  $\omega$  – кутова частота напруги живлення,

$C_0$  – електрична ємність між фланцями опорного ізолятора.

Струм  $\dot{I}_2$  виникає через “не ідеальності” діелектричного матеріалу твердого діелектрика [15]

$$\dot{I}_2 = \frac{E}{R_0}.$$

Струм абсорбції  $\dot{I}_3$  виникає завдяки процесу заряду шарів діелектрика через опір ізоляції попереднього шару [15]:

$$\dot{I}_3 = \frac{E}{R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}}.$$

Стала ємнісна складова  $\dot{I}_4$  в поверхневому струму витоку  $\dot{I}_{\text{вп}}$ , залежить від геометричних розмірів фланцю, струмопровідної шини ізолятора та струмознімального кільця:

$$\dot{I}_4 = j\omega C_{\text{п}} E,$$

де  $C_{\text{п}}$  – геометрична ємність між фланцем ізолятора, струмопровідною шиною і струмознімальним кільцем через повітря та тіло ізолятора.

Поверхневий струм  $\dot{I}_5$  виникає за рахунок поверхневої провідності діелектричного матеріалу твердого діелектрика [15]:

$$\dot{I}_5 = \frac{E}{R_{\text{п}}},$$

де  $R_{\text{п}}$  – активний поверхневий опір незабрудненої поверхні ізолятора.

Поява ємнісної складової  $\dot{I}_6$  в струмі витоку при забрудненні і зволоженні поверхні ізолятора пояснюється утворенням електричної ємності між провідним шаром на поверхні ізолятора та струмопровідною шиною, а також заземленими частинами в розподільчому пристрої. Струм  $\dot{I}_6$  залежить від площі струмопровідного забруднення на поверхні ізолятора.

Наявність забруднення на поверхні призводить до появи активного струму  $\dot{I}_7$ , що обумовлений поверхневим опором  $R_3$  та залежить від товщини шару забруднення, його хімічного складу, вмісту вологи в ньому і т. д.

$$R_3 = \frac{\rho L_y}{S} = \frac{\rho L_y}{\pi(dT + T^2)}, \quad (3.2)$$

де  $\rho$  – питомий об'ємний опір матеріалу забруднення;

$L_y$  – довжина шляху струму витоку;

$S$  – площа поперечного перерізу шару забруднення;

$T$  – товщина шару забруднення;

$d$  – діаметр ізолятора.

Враховуючи, що діаметр ізолятора змінюється від поточної координати  $l$ , а товщина і питомий об'ємний опір забруднення залежить від  $l$ . Якщо врахувати, що  $d \gg T$ , з (3.2) опір елементу забруднення на поверхні ізолятора  $dR_3$  можна визначити за формулою:

$$dR_3 = \frac{\rho(l)dl}{\pi T(l)d(l)}. \quad (3.3)$$

Повний поверхневий опір забруднення на поверхні ізолятора:

$$R_3 = \frac{1}{\pi} \int_0^{L_y} \frac{\rho(l)dl}{T(l)d(l)}.$$

Отже, загальний струм витоку (3.1) через ізолятор визначиться за формулою:

$$\dot{I}_B = \left( j\omega C_0 E + \frac{E}{R_0} + \frac{E}{R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}} \right) + \left( j\omega C_{\Pi} E + \frac{E}{R_{\Pi}} + \dot{I}_{\text{впз}} \right).$$

Поверхневий струм витоку  $\dot{I}_{\text{вп}}$  буде залежати від характеру та ступеня забруднення поверхні ізолятора, його конструктивних особливостей, прикладеної до ізолятора напруги. Поверхневий струм витоку може бути використаний в якості параметру контролю ступеня забруднення поверхні ізолятора:

$$\dot{I}_{\text{вп}} = E \left( j\omega C_{\Pi} + \frac{1}{R_{\Pi}} \right) + \dot{I}_{\text{впз}} = E Y_{\text{вп}} e^{j\varphi_{\text{вп}}}. \quad (3.4)$$

Об'ємні складові струму витоку  $\dot{I}_{\text{во}}$  не залежать від характеру забруднення, тому можуть бути використані для контролю цілісності ізоляції відносно землі. Тобто контролю однофазних замикань на землю.

Струм спричинений активною провідністю твердого діелектрика між фланцями  $\dot{I}_2$ , а також струм абсорбції  $\dot{I}_3$  набагато менше ємнісного струму між фланцями через ізолятора  $\dot{I}_1$ , тому об'ємний струм витоку ізолятора можна вважати, з певним припущенням, лише ємнісним.

Наприклад, ємність між фланцями ізолятора ИОР-10-750-1 складає  $C_0 \approx 14$  пФ, а опір  $R_0 \approx 5000$  МОм. Оцінімо складові об'ємного струму витоку:

– ємнісна складова

$$|\dot{I}_1| = \omega C_0 E = 314 \cdot 14 \cdot 10^{-12} \cdot 6000 = 0,000026 \text{ А} = 26 \text{ мкА},$$

– активна складова

$$|\dot{I}_2| = \frac{E}{R_0} = \frac{6000}{5000 \cdot 10^6} = 0,0000012 \text{ А} = 1,2 \text{ мкА}.$$

Отже, з розрахунку видно, що ємнісна складова об'ємного струму витоку на порядок більша ніж активна. Тому з достатньою точністю можна вважати об'ємний струм витоку обумовлений лише ємністю між фланцями.

### 3.3 Розділення струмів витоку ізоляторів

Аналіз складових струму витоку через ізолятор, який проведений в 3.2 показав, що загальний струм витоку складається з двох компонентів поверхневого та об'ємного. Об'ємний струм витоку через ізолятор має ємнісний характер та визначається ємністю між фланцями. Поверхневий струм витоку залежить від ступеня і характеру забруднення його поверхні. Для роботи приладу контролю ізоляції необхідно виокремити з повного струму витоку лише об'ємний, що можливо здійснити за допомогою струмознімального кільця, яке розташовується в кінці ізолятора біля нижнього фланцю, як показано на рис. 3.2 [15].

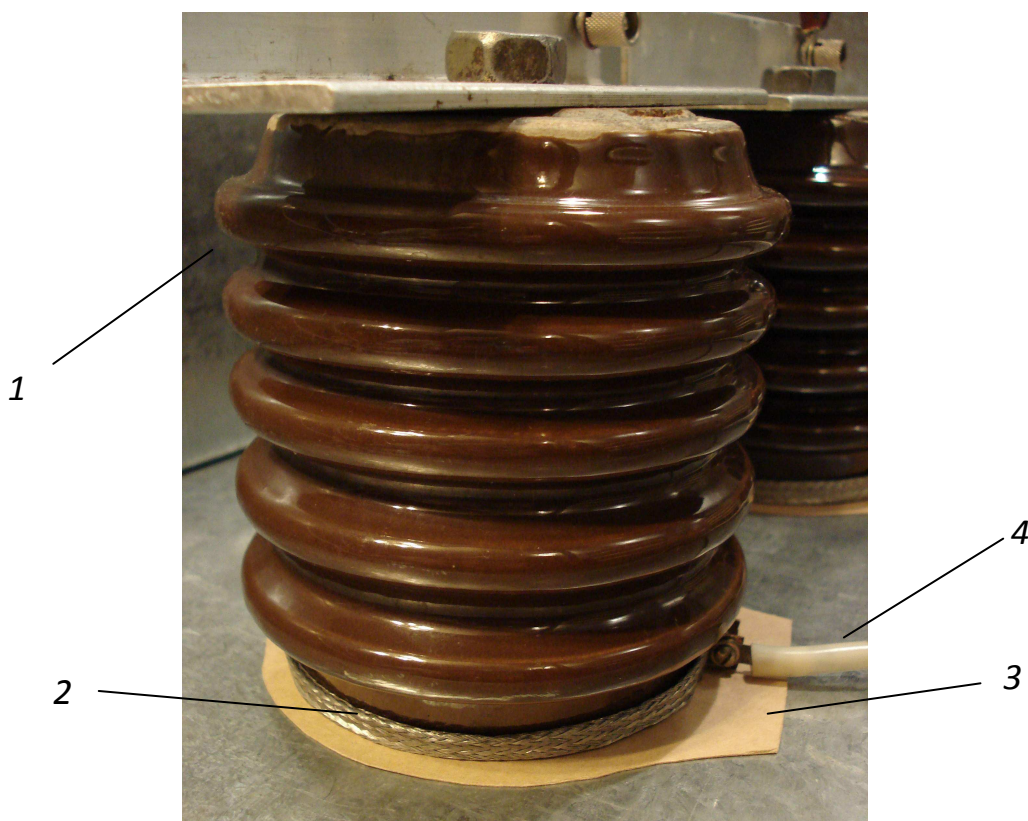


Рис. 3.2 - Розміщення струмознімального кільця на поверхні опорного ізолятора ИОР-10-750-III

1 – опорний ізолятор ИОР-10-750-III; 2 – струмознімне кільце; 3 – ізолююча прокладка; 4 – контрольний кабель.

Поверхневий струм витоку, що протікає по поверхні ізолятора 1 потрапляє на струмознімне кільце 2, а потім, через контрольний кабель 4, або до вимірювального пристрою або до заземлення. Ізолююча прокладка 3 у випадку відсутності необхідності вимірювання поверхневого струму витоку може не встановлюватися.

Вимірювання параметрів об'ємного струму витоку здійснюється непрямим методом за падінням напруги на вимірювальному шунті. Підключення контрольного кабелю до вимірювального шунта може призвести до появи похибки. Оцінимо вплив, який вносить контрольний кабель у процес вимірювання, та які вимоги повинні бути пред'явлені до вимірювального пристрою. Для цього розглянемо електричну схему, яка зображена на рис 3.3. Враховуючи, що вимірювальний пристрій встановлюється у релейному відсіку комірки КРПЗ довжина контрольного кабелю не буде перевищувати 5 м.

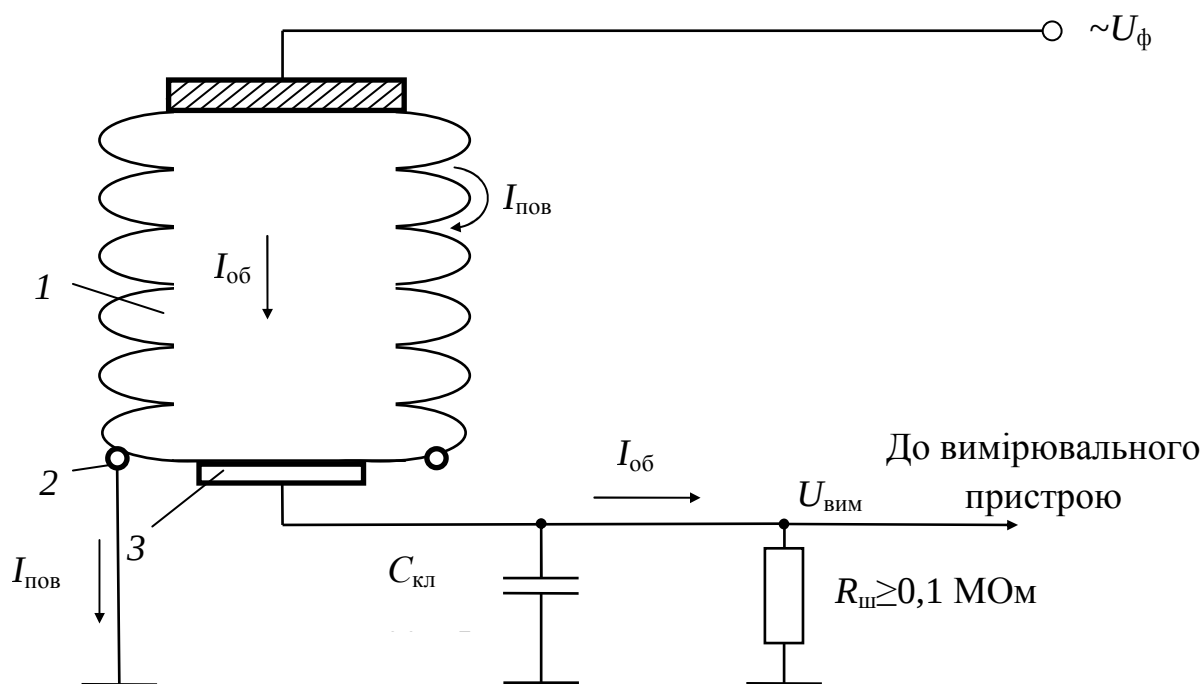


Рис. 3.3 - Електрична схема для виокремлення та вимірювання об'ємного струму витоку

1 – опорний ізолятор; 2 – струмознімне кільце; 3 – заземлений фланець ізолятора.

Активним опором контрольного кабелю за рахунок невеликої довжини та опору вимірювального шунта 500 кОм можна знехтувати. Індуктивний опір за рахунок малої частоти силової мережі і довжини контрольного кабелю буде дуже малим, тому їм також можна знехтувати. Отже, в схему заміщення контрольний кабель увійде лише ємністю  $C_{кл}$ . Враховуючи, що погонна ємність контрольного кабелю біля 100 пФ/м, тоді загальна ємність становитиме 500 пФ. Наявність ємності  $C_{кл}$  призведе до замикання частини об'ємного струму витоку через неї.

Ємнісний опір  $C_{кл}$  при частоті мережі 50 Гц буде складати  $>6$  МОм, тобто струм, який буде замикатися через ємність контрольного кабелю при  $R_{ш} = 100$  кОм буде понад 60 раз менше, а отже ємністю контрольного кабелю можна знехтувати.

Вимірювальний пристрій, який буде підключатися до вимірювального шунта для того, щоб не впливати на струм, що вимірюється повинен мати вхідний опір на декілька порядків більший ніж опір шунта, тобто  $\geq 1000$  кОм.

Отже, розглянувши процес відокремлення та вимірювання об'ємного струму витоку слід зазначити, що за рахунок вимірювання сигналу з малою частотою впливом контрольного кабелю на вимірювання можливо повністю знехтувати. Вхідний опір вимірювального пристрою повинен бути  $\geq 1$  МОм при опорі вимірювального шунта 100 кОм.

### **3.4 Пристрій контролю ізоляції ПКІ-1**

На рис. 3.4 наведена функціональна схема пристрою контролю ізоляції (ПКІ-1). В якості давачів в пристрої використані три опорні ізолятори 1-3, які встановлені в одній з комірок КРЗ на фазах А, В і С. Нижній фланець кожного ізолятора від'єднується (ізолюється) від корпусу КРЗ та підключається до шунтів R1-R3 відповідних фаз А, В та С. Верхній фланець цих ізоляторів залишається підключеним до шин високої напруги (6-10 кВ) відповідних фаз. Нейтральна точка шунтів R1-R3 заземлена через шунт R4. Падіння напруги з шунтів R1-R4 подається на входи операційних підсилювачів DA1-DA4, які виконують функцію аналогового компаратора. Виходи з граничних елементів DA1-DA3 підключені до перших входів логічних елементів «І» DD1-DD3. Вихід з граничного елементу DA4 підключений до других входів логічних елементів «І» DD1-DD3 та до обох входів логічного елемента «І» DD4. Виходи з логічних елементів DD1-DD4 підключені до виконавчих органів 4-7. Також з шунтів R1 та R2 напруга подається на операційні підсилювачі DA5 та DA6, виходи з яких підключені до логічного елемента «або» DD5, який в свою чергу, підключений до виконавчого органу 8.

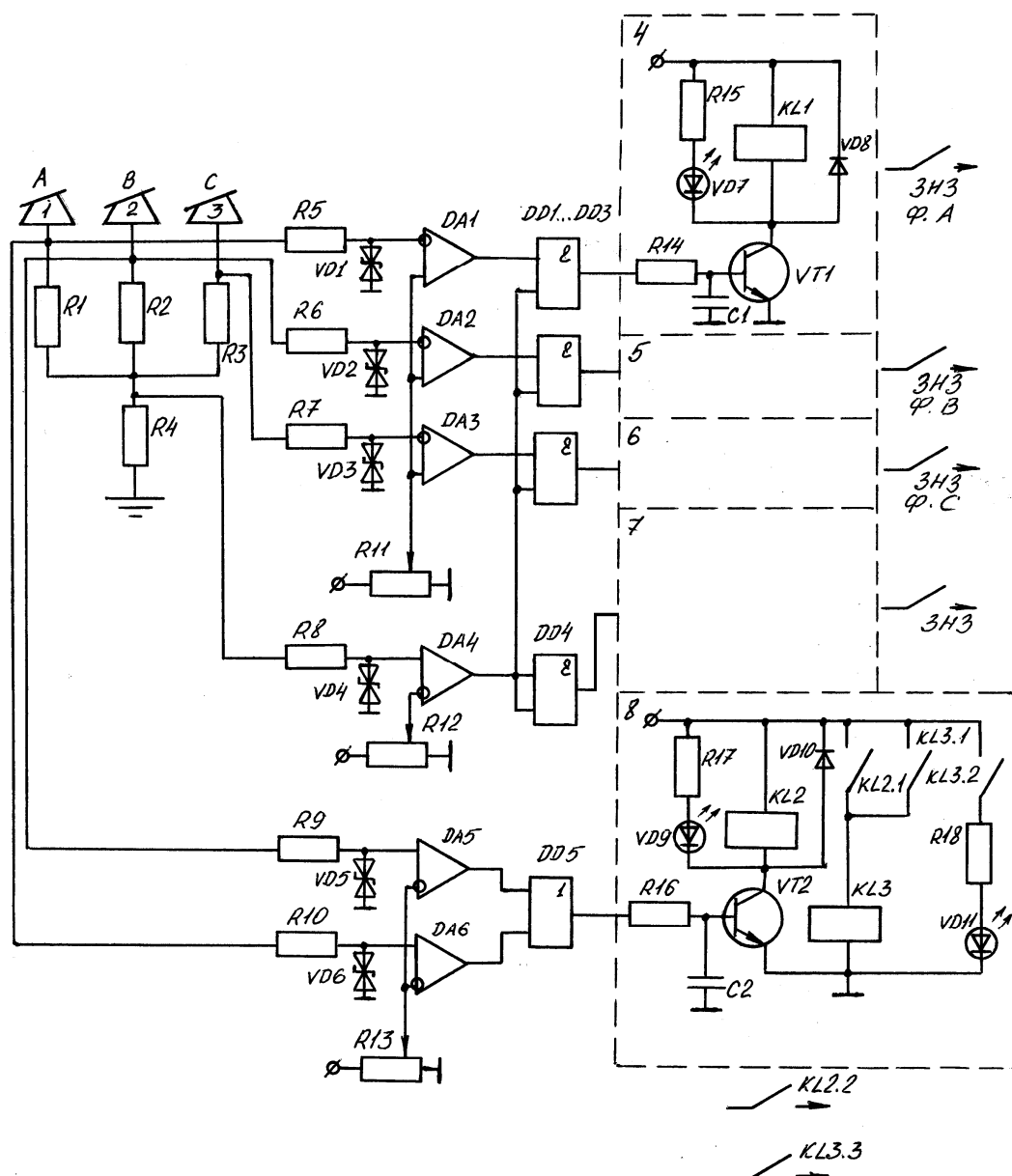


Рис. 3.4 - Функціональна схема пристрою для контролю цілісності ізоляції ПКІ-1

Змінні опори R11-R13 призначені для регулювання уставки спрацювання пристрою. На опорах R5-R10 і стабілітронах VD1-VD6 виконаний захист входів операційних підсилювачів від можливого попадання високої напруги. Операційні підсилювачі DA1-DA3 призначені для реагування на зниження напруги, а DA4-DA6 – на її підвищення.

Розглянемо роботу пристрою ПКІ-1.

1. У випадку нормального режиму роботи мережі без ОЗЗ та за відсутності небезпечного забруднення поверхні ізоляторів на входи граничних органів DA1-DA6 подаються нульові сигнали, з їх виходів також подаються нульові сигнали, що призводить до того, що пристрій не спрацює.

2. При появі ОЗЗ напруга пошкодженої фази відносно землі зменшиться, від нуля до деякої залишкової напруги, що залежить від повноти ОЗЗ. Натомість в двох інших фазах напруга збільшиться та пропорційно їй струм витоку опорних ізоляторів. Це в свою чергу, призведе до збільшення падіння напруги на шунтах та до спрацювання граничного елементу DA1 (при замиканні на землю фази А) і появі на його виході логічної одиниці. Також в наслідок порушення симетрії струмів в нейтральній точці з'єднання шунтів R1-R3 з'явиться струм та відповідна напруга на шунті R4. Вона призведе до спрацювання граничного елементу DA4 та до появі на його виході логічної одиниці. В результаті на логічний елемент «І» DD1 та DD4 прийдуть дві логічні одиниці вони спрацюють видадуть на своїх виходах логічну одиницю, що призведе до спрацювання виконавчих органів 4 та 7. А вони, в свою чергу, замиканням контактів реле подадуть сигнал про появу ОЗЗ та фазу в якій це сталося.

3. При відсутності ОЗЗ та критичному забрудненні ізоляторів збільшується їх загальний струм витоку. Це в свою чергу, призводить до збільшення напруги на шунтах R1 та R2, і при досягненні граничного рівня відповідному спрацюванні граничних елементів DA5 і DA6. Поява на їх виході одиниці призведе до спрацювання логічного елемента «АБО» та виконавчого органу 8. Виконавчий орган 8 працює наступним чином. Логічна одиниця відкриває транзистор VT2 він подає струм на реле KL2, воно спрацьовує включає обігрів комірки КРЗ (контакт KL2.2) та реле KL3 (контакт KL2.1). Спрацювання реле KL3 призводить до замикання контактів самоутримання KL3.1, світлової індикації KL3.2 та сигналізації KL3.3, яке подає сигнал про критичне забруднення ізоляторів в КРЗ. Сигнал про критичне забруднення буде утримуватися до того часу поки воно не буде відключене черговим або обслуговуючим персоналом. Наявність контактів самоутримання дозволяє пристрою залишати сигнал про критичний рівень забруднення навіть після включення системи обігріву, підсушування забрудненої поверхні та відповідного зменшення струму витоку. Виконавчі органи 4-7 працюють аналогічним чином. Єдиною відмінністю є відсутність додаткового реле KL3.

4. В режимі замикаання фази на землю та критичному забруднені поверхні ізоляторів спрацює виконавчий орган 8 (аналогічно як для випадку 3). Його спрацювання призведе до подачі сигналу про критичний рівень забруднення поверхні, а також контакт KL2.2 підключить обігрів комірки. Це в свою чергу призведе до підсихання поверхні ізолятора та зменшені струму витоку. Наявність ОЗЗ обумовить різні струми витоку завдяки різній прикладеній напрузі до ізоляторів 1-3, що в свою чергу призведе до різних напруг на вимірювальних шунтах та спрацюванні виконавчих органів 4 (при замикаання на землю фази А) та 7 аналогічно як для випадку 2.

5. У випадку відключення розподільного пристрою від живлення на виходах операційних підсилювачів DA1-DA3 з'являться логічні одиниці, а на виході операційного підсилювача DA4 логічний нуль. Відповідно на виходах елементів «І» DD1-DD4 також сформується логічні нулі, що унеможливить спрацювання виконавчих органів 4-7 та помилкове спрацювання пристрою.

Завдяки контролю ступеню забруднення, що здійснюється по двох ізоляторах підвищується надійність контролю. При ОЗЗ (наприклад, фази А) напруга відносно землі на ізоляторі 1 зменшиться, що призведе до зменшення його струму витоку та появи логічного нуля на виході граничного елементу DA5. В той же час напруга відносно землі на ізоляторі 2 збільшиться, що призведе до відповідного збільшення струму витоку та спрацювання граничного елементу DA6, логічного елементу «АБО» DD5 та виконавчого органу 8.

### **3.5 Розробка пристрою контролю цілісності ізоляції в мережах з ізолюваною нейтраллю ПКЗЗ**

Принципова схема розробленого пристрою контролю цілісності ізоляції відносно землі в мережах з ізолюваною нейтраллю напругою 6-35 кВ – пристрій контролю замикаання на землю (ПКЗЗ) наведена на рис. 3.5.

Пристрій використовує в якості датчиків високої напруги відносно землі струми витоку трьох опорних ізоляторів позначених на схемі (рис. 3.5) емностями С1-С3.

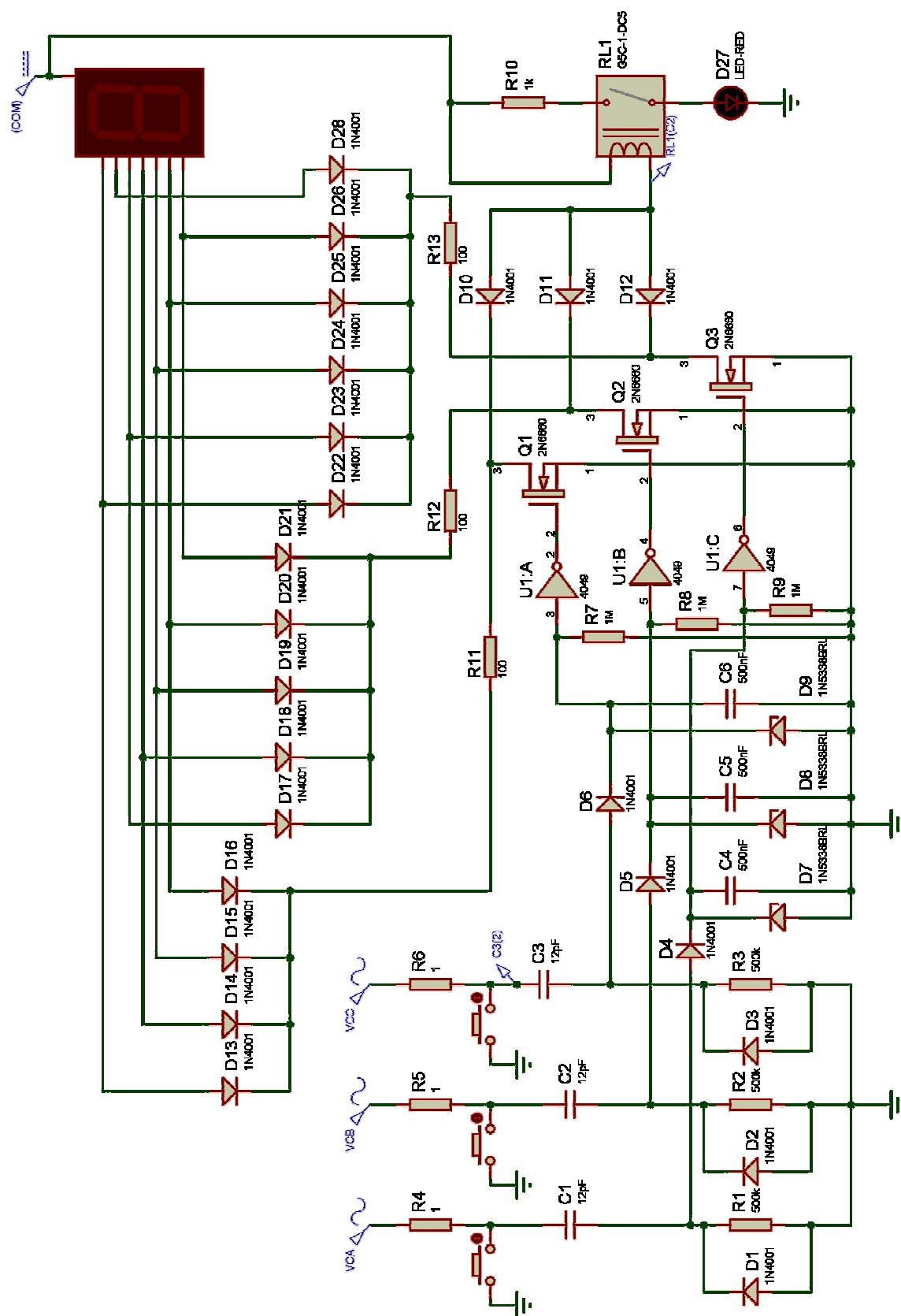


Рис. 3.5 - Принципова схема пристрою контролю замикання на землю (ПКЗЗ)

Об'ємний струм витоку опорного ізолятора 10 кВ за номінальної фазної напруги складає  $\approx 30$  мкА (див. п.п. 3.2). Цього значення недостатньо для нормальної роботи релейних схем, які потребують щонайменше струму в 1-2 мА. Тому для під'єднання пристроїв сигналізації замикання на землю потрібно використання буферних схем, що посилюють значення струму витоку ізолятора.

В розробленому пристрої вимірювання струму витоку проводиться за падінням напруги на шунтах утворених опорами R1-R3. Опір шунтів складає 500 кОм, що задовольняє умовам висунутим в п.п. 3.3. Напруга на вимірювальних шунтах R1-R3 випрямляється з допомогою трьох однофазних випрямлячів (окремих випрямлячів для кожної фази) утворених з діодів D1-D6 та згладжується на конденсаторах C4-C6. Стабілітрони D7-D9 обмежують випрямлену і згладжену напругу на рівні 5 В, що є рівнем логічної «1». Також при збільшенні струму витоку ізолятора внаслідок підвищення напруги з фазної до лінійної при ОЗЗ, а також при перенапругах внаслідок ферорезонансних явищ, стабілітрони D7-D9 не дають підвищитися випрямленій та згладженій напрузі вище 5 В. Навантаженням випрямлячів є опори R7-R9. Далі напруга з випрямлячів інвертується з допомогою мікросхеми логіки «НІ» U1 та подається до транзисторних ключів Q1-Q3. В свою чергу транзисторні ключі Q1-Q3 керують роботою реле RL1 сигналізації замикання на землю та індикацією букви пошкодженої фази. Індикація здійснюється з допомогою 7-сигментного індикатора. З допомогою діодів D13-D28 на 7-сигментному індикаторі формується відповідна буква пошкодженої фази.

Пристрій працює наступним чином. У випадку нормальної роботи електричної мережі за відсутності ОЗЗ присутній струм витоку усіх трьох ізоляторів кожної фази, а відповідно і випрямлена та згладжена напруга на трьох однофазних випрямлячах. Тобто на вході логічних елементів «НІ» присутня логічна «1», а на виході відповідно «0». Напруги логічного «0» не достатньо для відкриття транзисторних ключів Q1-Q3, вони закриті. Індикація букви пошкодженої фази відсутня, реле сигналізації ОЗЗ знеструмлене.

При ОЗЗ напруга відносно землі пошкодженої фази або відсутня у випадку «металевого» замикання, або знижена у випадку «дугового» замикання. А отже,

відсутній або знижений об'ємний струм витоку ізолятора, і в свою чергу, випрямлена та згладжена напруга випрямляча для цієї пошкодженої фази. На вході логічного елемента «НІ» з'являється «0», або знижена напруга, яка також відповідає рівню логічного «0». На виході елемента «НІ» з'являється логічна «1», що призводить до відкривання транзисторного ключа, що відповідає пошкодженій фазі. Це в свою чергу призводить до подачі напруги на реле сигналізації замикання на землю та на індикацію відповідної букви пошкодженої фази на 7-сигментному індикаторі.

У випадку знеструмлення електричної мережі і зникненні напруги на усіх трьох фазах, зникає напруга на шунтах та відповідно на виході випрямлячів. Отже, з'являються логічні «0» на входах усіх трьох елементів «НІ», що призводить до появи логічних «1» на їх виходах та спрацюванні усіх трьох транзисторних ключів. Як наслідок, це призводить до спрацювання реле сигналізації ОЗЗ але на індикаторі пошкодженої фази з'являється цифра «8» замість букви пошкодженої фази. Цим можна відрізнити режим ОЗЗ та випадок повного знеструмлення електричної мережі.

### **3.6 Висновки**

1. Контроль цілісності ізоляції в мережах, що працюють з ізольованою нейтраллю можливо реалізувати не лише за допомогою трансформаторів напруги. Для цього можна використати, наприклад, струми витоку опорних ізоляторів. При цьому для контролю можна задіяти вже встановлені опорні ізолятори, що експлуатуються.

2. Складові об'ємного струму витоку опорного ізолятора не залежать від параметрів забруднення, а отже з часом не змінюються та можуть бути використані для контролю цілісності ізоляції відносно землі. Тобто контролю однофазних замикань на землю.

3. Ємнісна складова об'ємного струму витоку на порядок більша ніж активна. Тому з достатньою точністю можна вважати об'ємний струм витоку обумовлений лише ємністю між фланцями.

4. За рахунок вимірювання сигналу (об'ємного струму витоку) з малою частотою впливом контрольного кабелю на вимірювання можливо повністю знехтувати. Вхідний опір вимірювального пристрою повинен бути  $\geq 1$  МОм при опорі вимірювального шунта 100 кОм.

5. Розглянуто пристрій контролю ізоляції ПКІ-1, який дозволяє контролювати стан ізоляції в мережі 10 кВ. Окрім того, контролювати міру забруднення ізоляторів та керувати роботою нагрівальних елементів КРЗ. Недоліком розглянутого пристрою є стара елементна база та широкі функціональні можливості.

6. Розроблено принципову схему пристрою ПКЗЗ, який дозволяє контролювати цілісність ізоляції в електричній мережі з ізолюованою нейтраллю відносно землі. Прилад створено на сучасній елементній базі та позбавлений зайвих функціональних можливостей.

## **РОЗДІЛ 4.**

### **ОХОРОНА ПРАЦІ**

#### **4.1 Загальні засади з охорони праці при роботі в електроустановках**

Згідно з електробезпекою, електроустановки поділяються на дві категорії: ті, що працюють при напрузі до 1000 В, і ті, що працюють при напрузі вище 1000 В. Важливо враховувати фактичне значення напруги. Вимоги до безпеки та технічні вимоги до конструкції, устрою, розташування і експлуатації електроустановок вище 1000 В набагато жорсткіші, ніж вимоги до електроустановок до 1000 В.

На практиці виявлено, що для забезпечення надійної, безпечної і високопродуктивної роботи електроустановок необхідно не лише дотримуватись високих стандартів в їх виконанні і оснащенні засобами захисту, але й організовувати їх експлуатацію так, щоб усунута будь-яка можливість помилок з боку обслуговуючого персоналу.

Методика такої організації експлуатації виникла внаслідок багаторічного досвіду роботи різноманітних електроустановок і викладена в документах "Правила техніки безпеки при експлуатації електроустановок" (ПТБ) і "Правила технічної експлуатації електричних станцій та мереж" (ПТЕ).

Ключовими складовими безпечної експлуатації електроустановок є висока технічна освіченість та свідомо дисципліна обслуговуючого персоналу, який повинен суворо дотримуватися специфічних організаційних і технічних заходів, а також дотримуватися вказівок Правил.

Особи, що чергують в діючих електроустановках та приймають участь у здійсненні оперативних переключень, а також виконують монтажні, ремонтні, налагоджувальні та інші типи робіт в діючих електроустановках, повинні проходити обов'язків медичний догляд при прийомі на роботу та періодично, не менше одного разу на два роки. Робітники, які працюють на висоті, робота яких пов'язана з підйомом на висоту, обслуговуванням підйомного обладнання, підлягають щорічному медичному огляду.

Всі прийняті на роботу працівники повинні пройти ввідний інструктаж, а після отримання дозволу на відвідування робочого місця - первинний інструктаж. Особи з числа чергового і оперативно-ремонтного персоналу, перш ніж приступити до самостійної роботи, повинні пройти також необхідну теоретичну підготовку, навчання на робочому місці, перевірку знань Правил техніки безпеки (ПТБ) і Правил технічної експлуатації (ПТЕ), а також виконувати обов'язки чергового по місцю роботи.

Інженер-інспектор по техніці безпеки підприємства відповідає за проведення ввідного інструктажу. Основна мета цього інструктажу - надати новому працівникові загальне уявлення про правила техніки безпеки, виробничої санітарії та протипожежної безпеки. Під час нього пояснюються внутрішні правила трудового розпорядку, норми поведінки на території підприємства та в його приміщеннях, а також основні види небезпек. Також надається інформація про значення запобіжних надписів, плакатів, звукової та світлової сигналізації, і вказуються номери телефонів для екстрених випадків (пожежа, нещасливий випадок, аварійний стан обладнання тощо).

Роботи з ремонту, монтажу, налаштування та будівництва в діючих електроустановках, включаючи повітряні та кабельні лінії, розподілені на три категорії: роботи без напруги, роботи без відключення напруги та роботи під напругою. Роботи із відключенням напруги виконуються при повному або частковому відключенні електроустановки.

#### Умови виконання робіт.

Усі роботи в електроустановках повинні виконуватися за певних умов:

1. Роботу можна виконувати лише за наявності дозволу від уповноваженої офіційної особи, яка видала завдання у формі наряду або розпорядження.
2. Роботу, як правило, повинні проводити не менше ніж дві особи.
3. Обов'язково повинні бути вжиті організаційні та технічні заходи, спрямовані на забезпечення персоналу безпечних умов для виконання робіт.

Організаційні заходи спрямовані на забезпечення безпечної організації виконання робіт в електроустановках для уникнення нещасних випадків при

високій продуктивності праці та високій якості виконання робіт. Серед цих заходів:

- а) видача нарядів і розпоряджень на хід робіт;
- б) допуск бригади до роботи;
- в) нагляд за бригадою під час роботи;
- г) оформлення перерв в роботі і завершення робіт.

Технічні заходи спрямовані на забезпечення безпеки персоналу під час виконання робіт з повним або частковим відключенням напруги з електроустановки. До них входять:

- а) проведення необхідних відключень та заходів для запобігання помилкового або ненавмисного вмикання комутаційної апаратури (блокування, механічні зачіпки приводів, зняття запобіжників тощо);
- б) вивішування переносних плакатів з правилами техніки безпеки та встановлення тимчасових огорожень, якщо необхідно;
- в) перевірка відсутності напруги на струмоведучих установках, призначених для роботи;
- г) встановлення тимчасових заземлювачів.

В організації та виконанні високопродуктивних і безпечних робіт в діючих електроустановках визначено ряд відповідальних осіб:

1. Особа, яка видає наряд або розпорядження на хід робіт в діючих електроустановках: Ця особа має відповідальність за видачу необхідних документів, що дозволяють виконання робіт в електроустановках.
2. Керівник робіт, які виконуються по наряді: Особа, яка відповідає за керування виконанням робіт, визначених у наряді, та за дотримання вимог техніки безпеки.
3. Особа, яка видає дозвіл на підготовку робочого місця і допуск бригади до роботи: Ця особа відповідає за дозвіл та підготовку робочого місця перед початком робіт і за допуск бригади до роботи.
4. Особа, яка готує робоче місце: Відповідає за підготовку робочого місця, включаючи відключення струмоведучих частин.

5. Особа, яка допускає бригаду до роботи: Має відповідальність за формальне допущення бригади до робіт після виконання всіх необхідних процедур та перевірок.

6. Наглядач: Особа, яка відповідає за нагляд за процесом робіт та дотриманням вимог техніки безпеки.

В електроустановках з напругою вище 1000 В, при роботах із зняттям напруги на місці проведення робіт, необхідно відключити:

- Струмоведучі частини, на яких відбуватимуться роботи.
- Неогорожені струмоведучі частини, до яких потрібно наближатися людям на відстанях менших за допустимі, або механізмам на відстанях менших за приведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 - Найменші допустимі відстані від механізмів, вантажопідійомних машин, стропів, вантажозахватних пристроїв та вантажів до струмоведучих частин електроустановок, що знаходяться під напругою

| Напруга, кВ           | Найменша допустима відстань, м |
|-----------------------|--------------------------------|
| До 1                  | 1                              |
| 1-35                  | 1                              |
| 60-110                | 1,5                            |
| 150                   | 2                              |
| 220                   | 2,5                            |
| 330                   | 3,5                            |
| 400-500               | 4,5                            |
| 750                   | 6                              |
| 800 постійного струму | 4,5                            |

Вимоги до відключення електроустановок перед роботою визначаються таким чином, щоб відключені для роботи частини електроустановки або електрообладнання були ізольовані від струмоведучих частин, що перебувають під напругою. Кожна сторона, з якої може бути подана напруга на робоче місце через комутаційні апарати, повинна мати видимий розрив. Цей розрив формується відключенням роз'єднувачів, зняттям запобіжників, відокремленням або зняттям шин і проводів.

Для запобігання ненавмисного або помилкового включення ручних приводів роз'єднувачів, відокремлювачів і вимикачів навантаження, які можуть подавати напругу на робоче місце, слід заперати на замок у відключеному положенні. Якщо апарати обладнані дистанційним керуванням, силові та оперативні ланцюги слід відключити, а в пневматичних приводах, крім того, вентиль подавального трубопроводу стислого повітря повинен бути закритий і запертий на замок.

Для уникнення можливого виникнення напруги на відключеній ділянці через зворотну трансформацію трансформаторів напруги та силових трансформаторів, пов'язаних з цією ділянкою, їх слід відключити із сторони напруги до 1000 В. Також слід вивісити плакат "Не вмикати - працюють люди" на відключених пристроях, таких як рубильники, автомати, запобіжники тощо. При цьому приводи апаратів, які відключаються, слід механічно запирати або встановлювати накладки між контактами.

У електроустановках з напругою до 1000 В із струмоведучих частин, на яких планується проводити роботи, напругу повинно бути відключено за допомогою комутаційних апаратів і відсутність напруги повинна бути перевірена зняттям запобіжників, якщо вони є в схемі. Якщо в схемі немає запобіжників, помилкове включення комутаційних апаратів повинно бути попереджено за допомогою механічних блокувань, закривання кнопок, встановлення ізолюючих накладок тощо. Якщо комутаційні апарати обладнані дистанційним управлінням, кінці проводів від котушок включення повинні бути відключені. Якщо конструктивні особливості апаратури дозволяють, описані заходи можуть бути замінені заземленням або відокремленням кінців кабелю від апаратури, на якій виконується робота.

Персонал, який виконує відключення, негайно після відключення відповідного апарату та під час підготовки робочого місця, розміщує плакати з технікою безпеки. Тимчасові огороження встановлюються в околицях місць робіт в комірках розподільних пристроїв, які не мають вже наявних огорожень, в проходах до сусідніх приміщень електроустановки, які не повинні бути доступні

персоналу, а також в зоні близької розташованості до місць робіт та не відключених частин, до яких можливо наближення на небезпечну відстань.

Для тимчасового огороження струмоведаучих частин, які залишаються під напругою, можна використовувати щити, ширми, екрани та інші конструкції, виготовлені із дерева або інших ізоляційних матеріалів.

Плакати та огороження, встановлені під час підготовки робочих місць, заборонено знімати або переставляти до повного завершення робіт.

Відключені для роботи струмоведаучі частини мають бути тимчасово заземлені з усіх сторін, з яких може бути подана напруга. Дроти повітряних ліній електропередачі, додатково до цього, також повинні бути заземлені на місці виконання робіт. Якщо можливе виникнення наведеного потенціалу на відключених частинах від впливу сусідніх частин, які залишилися під напругою, то заземлення також необхідно здійснювати на робочому місці та в інших електроустановках.

#### **4.2 Основні організаційно-технічні заходи з техніки безпеки**

Оформлення робіт передбачає виконання планових експлуатаційних робіт за допомогою наряду або, у виняткових випадках, за усним розпорядженням. Наряд представляє собою письмове розпорядження, яке визначає характер і категорію робіт, місце, час та умови їх виконання. У наряді вказуються також кваліфікаційний склад бригади та осіб, які відповідають за дотримання правил техніки безпеки. Заборонено змінювати категорію та кордони робіт без виписки нового наряду або використовувати вантажопідйомні механізми, не зазначені у наряді.

У випадку аварій дозволяється виконувати роботи без наряду, але керівник повинен мати кваліфікацію, яка відповідає категорії виконуваної роботи (група не нижче V на контактній мережі).

Прості роботи, що не потребують комплексу організаційно-технічних заходів, можна виконувати без наряду.

Допуск до робіт проводиться після підготовки місця роботи, перевірки

відповідальним керівником і виконавцем разом із допускаючим. При допуску до контактної мережі, керівник робіт отримує наказ від енергодиспетчера та перевіряє виконання всіх технічних заходів. Допускаючий перевіряє склад бригади, зачитує основні пункти наряду, проводить інструктаж на місці робіт, демонструє приєднання, які залишаються під напругою, та інші необхідні процедури.

Нагляд під час робіт здійснюється виконавцем (керівником) робіт або спостерігачем, які повинні перебувати на місці роботи протягом усього часу їх виконання. У випадку відлучення виконавців або спостерігача з місця роботи, бригада повинна вийти з цього місця. Кваліфікація спостерігача залежить від категорії робіт і напруги електроустановки.

Перерви в роботі, переходи на інше робоче місце і завершення робіт вимагають підвищеної уваги та контролю з боку виконавця (керівника). Перед подачею напруги необхідно вивести всю бригаду з місця роботи, перевірити завершення робіт і стан обладнання, а також зняти заземлення і плакати.

У випадку аварії або електротравми під час виконання робіт за нарядом, наряд слід зберігати в архіві підприємства.

Відключення виконуються роз'єднувачами, віддільниками або вимикачами навантаження, які не мають автоматичного приводу на включення. З метою забезпечення безпеки приводи замикають в відключеному положенні висячим або блокувальним замком. При виведенні на робоче місце необхідно забезпечити видимий розрив з обох сторін.

Вивішування попереджувальних плакатів та встановлення огорож проводиться з метою уникнення подачі напруги на місце робіт. Плакати «Не включати - робота на лінії», «Не включати - працюють люди», а також інші вивішують на ключах керування, рукоятках та кнопках приводів, а також на підставах запобіжників.

Відсутність напруги в електроустановках напругою до 110 кВ здійснюється попередньо перевіреною показником напруги. В електроустановках напругою 35-220 кВ дозволяється перевірка відсутності напруги тестом «на іскру

та потріскування» спеціальною ізолюючою штангою лише в суху погоду. Для контактної мережі постійного струму напругою 3,3 кВ та змінного струму напругою 27,5 кВ дозволяється перевірка відсутності напруги спеціальним вістрям заземлюючої штанги.

В електроустановках напругою понад 1000 В накладання та зняття контуру заземлення повинні здійснювати дві особи. Натомість, в електроустановках напругою до 1000 В накладання та зняття контуру заземлення, а також включення заземлюючих ножів може здійснювати одна особа. Накладання заземлення є основним засобом захисту від попадання робочої та наведеної напруги. Також заземлення дозволяє зняти залишковий заряд з струмоведучих частин. Штанги контактної мережі повинні мати блокування для дотримання послідовності дій з накладання контуру заземлення.

#### **4.3 Розрахунок контуру заземлення для трансформаторної підстанції**

Трансформаторні підстанції 10/0,4 кВ з боку 0,4 кВ повинні мати заземлену нейтраль. З'єднання обмоток ТП -  $\Delta/Y$  з нулем. Струм замикання на землю складає 27 А.

Грунт – супсь.

Кліматичний район – другий.

Метою розрахунку є визначення кількості вертикальних заземлювачів та довжини з'єднувальної смуги.

Так як заземлюючий пристрій використовується одночасно для електроустановок до 1000 В і вище:

$$R_3 \leq \frac{125}{I_3} = \frac{125}{27} = 4,63 \text{ Ом};$$

Згідно ПУЕ для мережі 0,4 кВ опір заземлення  $R_3$  повинен бути не більше за 4 Ом. Отже, остаточно приймаємо  $R_3 = 4 \text{ Ом}$ .

Розрахунковий питомий опір ґрунту для нашого випадку визначиться за

формулою:

$$\rho_p = \rho_{\text{табл}} \cdot \psi = 250 \cdot 1,4 = 350 \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

де  $\rho_{\text{табл}} = 250 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  табличне значення для супіску (табл. 3.8 [16]);

$\psi$  – підвищувальний коефіцієнт, для стержньових заземлювачів  $\psi = 1,4$ . (табл. 3.10 [16]).

Опір одного вертикального заземлювача:

$$\begin{aligned} R_o &= 0,366 \frac{\rho_{\text{розр}}}{l} \left( \lg \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4t+l}{4t-l} \right) = \\ &= 0,366 \frac{350}{5} \left( \lg \frac{2 \cdot 5}{2,5} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot 3 + 5}{4 \cdot 3 - 5} \right) = 20,361 \text{ Ом}, \end{aligned}$$

де  $l$  – довжина вертикального заземлювача, прийmemo рівною 5 м;

$d$  – діаметр вертикального заземлювача (приймемо, що застосовуються стрижні діаметром 2,5 см).

$$t = h + \frac{l}{2} = 0,5 + \frac{5}{2} = 3 \text{ м},$$

де  $h$  – глибина закладання смуг (0,5...0,8 м).

Визначимо орієнтовну кількість заземлювачів, що будуть прокладені згідно плану по замкненому контуру:

$$n_o = \frac{R_o}{R_3 \cdot \eta_t} = \frac{20,361}{4 \cdot 0,59} = 8,628 \approx 9 \text{ шт},$$

де  $\eta_o$  – коефіцієнт використання заземлювачів розташованих в ряд, для  $a/l = 4/5 = 0,8$ ,  $\eta_o = 0,59$  за рис. 7.5 [16].

Довжина горизонтальної з'єднувальної смуги:

$$l_n = 1,05a \cdot n = 1,05 \cdot 4 \cdot 9 = 37,8 \text{ м.}$$

де  $a = 4 \text{ м}$  – відстань між вертикальними електродами.

Опір вертикальної смуги з урахуванням екранування:

$$R_n = 0,366 \frac{\rho_{\text{розр}}}{l_n \cdot \eta_n} \lg \frac{2l_n}{b \cdot n} = 0,366 \frac{350}{37,8 \cdot 0,59} \lg \frac{2 \cdot 37,8^2}{0,01 \cdot 0,5} = 24 \text{ Ом,}$$

де  $\eta_n$  – коефіцієнт використання з'єднувальної горизонтальної смуги прийнятою шириною  $b = 10 \text{ мм}$  і товщиною  $5 \text{ мм}$ .

Вертикальні заземлювачі повинні мати такий опір (з урахуванням опору з'єднувальної смуги):

$$R_{\text{тр}} = \frac{R_n \cdot R_3^H}{R_n \cdot R_3^H + 4} = \frac{24 \cdot 4}{24 + 4} = 4,8 \text{ Ом.}$$

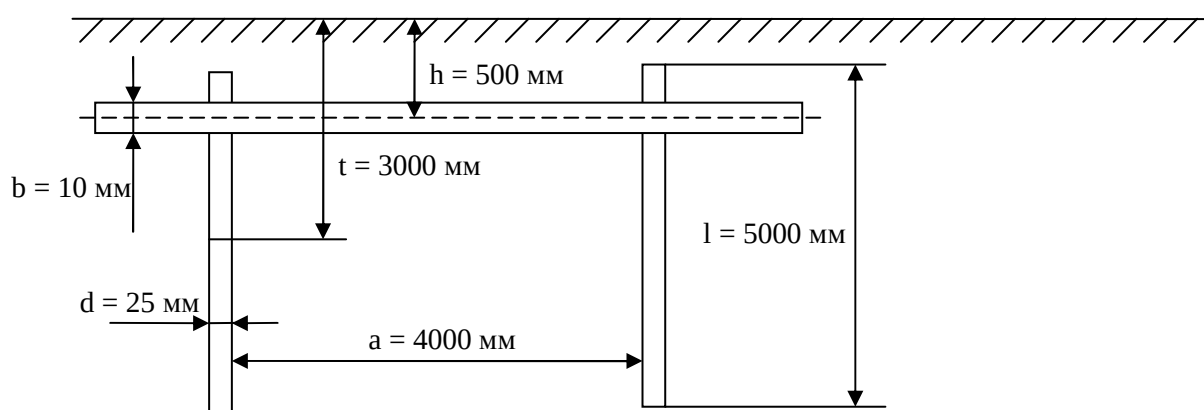


Рис. 4.1 - Схема прокладки горизонтальних та вертикальних електродів контуру заземлення

Отже, остаточна кількість заземлювачів:

$$n = \frac{R_o}{R_{тр} \cdot \eta_o} = \frac{20,361}{4,8 \cdot 0,59} = 7,49 \approx 8 \text{ шт.}$$

Проведемо перевірку опору заземлювача та порівняємо отримане значення з нормою:

$$R_3 = \frac{1}{\frac{1}{R_{тр}} + \frac{1}{R_n}} = \frac{1}{\frac{1}{4,8} + \frac{1}{24}} = 4 \text{ Ом.}$$

Отже, отриманий опір заземлюючого пристрою з 8-ма заземлювачами відповідає вимогам.

#### 4.4 Розрахунок блискавкозахисту

Найбільш небезпечним з точки зору ураження будівель є прямий удар блискавки [17]. Кількість уражень блискавкою, що очкується на рік будівель і споруд висотою < 60 м, що не обладнані грозозахистом та мають незмінну висоту, можна визначити за формулою:

$$N = (B + 6h_x)(L + 6h_x)n \cdot 10^{-6},$$

де  $B$  – ширина об'єкту, який захищається, м;

$L$  – довжина об'єкту, який захищається, м;

$h_x$  – висота об'єкту, м;

$n$  – середня кількість уражень блискавкою 1 км<sup>2</sup> земної поверхні на рік, згідно з табл. 12.2 [16] в залежності від інтенсивної грозової діяльності.

З табл. 12.3 [16] приймемо, що захисна зона типу Б категорія грозозахисту – III. Зону захисту грозовідводу визначають як область, в межах якої споруда або будівля має певний рівень надійного захисту від прямих ударів блискавки.

Розрізняють захисну зону А, де ступінь захисту складає 99,5% та вище, і зону захисту Б зі ступінню надійності 95% та вище.

За інтенсивності грозової діяльності 60-80 год на рік приймається, що  $n = 9$  (табл. 12.2 [16]) та  $B = 36,0$  м;  $L = 90,0$  м;  $h_x = 11,0$  м:

$$N = (36 + 6 \times 11)(90 + 6 \times 11)9 \times 10^{-6} = 0,143.$$

Застосуємо захист двома окремими металевими грозовідводами у вигляді стрижнів з висотою  $h = 50,0$  м, що розташовані на відстані  $l = 110$  м один від одного.

Для зони Б за  $l > 1,5h$  ( $110\text{м} > 75\text{м}$ ) розміри зони захисту визначаються за наступними формулами (див. рис. 4.2.):

$$\begin{aligned} r_0 &= 1,5h = 1,5 \times 50 = 75 \text{ м}, \\ r_x &= 1,5 \times \left( h - \frac{h_x}{0,92} \right) = 1,5 \times \left( 50 - \frac{11}{0,92} \right) = 57,065 \text{ м}, \\ h_0 &= 0,92h = 0,92 \times 50 = 46 \text{ м}, \\ h_c &= h_0 - 0,14(l - 1,5h) = 46 - 0,14(110 - 1,5 \times 50) = 41,1 \text{ м}, \\ r_{cx} &= r_0 \frac{h_c - h_x}{h_c} = 75 \frac{41,1 - 11}{41,1} = 64,051 \text{ м}, \quad r_c = r_0 = 75 \text{ м}. \end{aligned}$$

Грозовідвід складається із наступних компонентів:

- блискавкоприймач, який приймає прямий удар блискавки;
- несуча конструкція, що призначена для установки блискавкоприймача;
- струмовідвід, який забезпечує відведення струму блискавки в землю;
- заземлення, що відводить струм блискавки в землю блискавкоприймача і струмопроводу.

На основі проведених вимірювань будуються зони захисту даного об'єкту на різних рівнях (рис. 4.2).

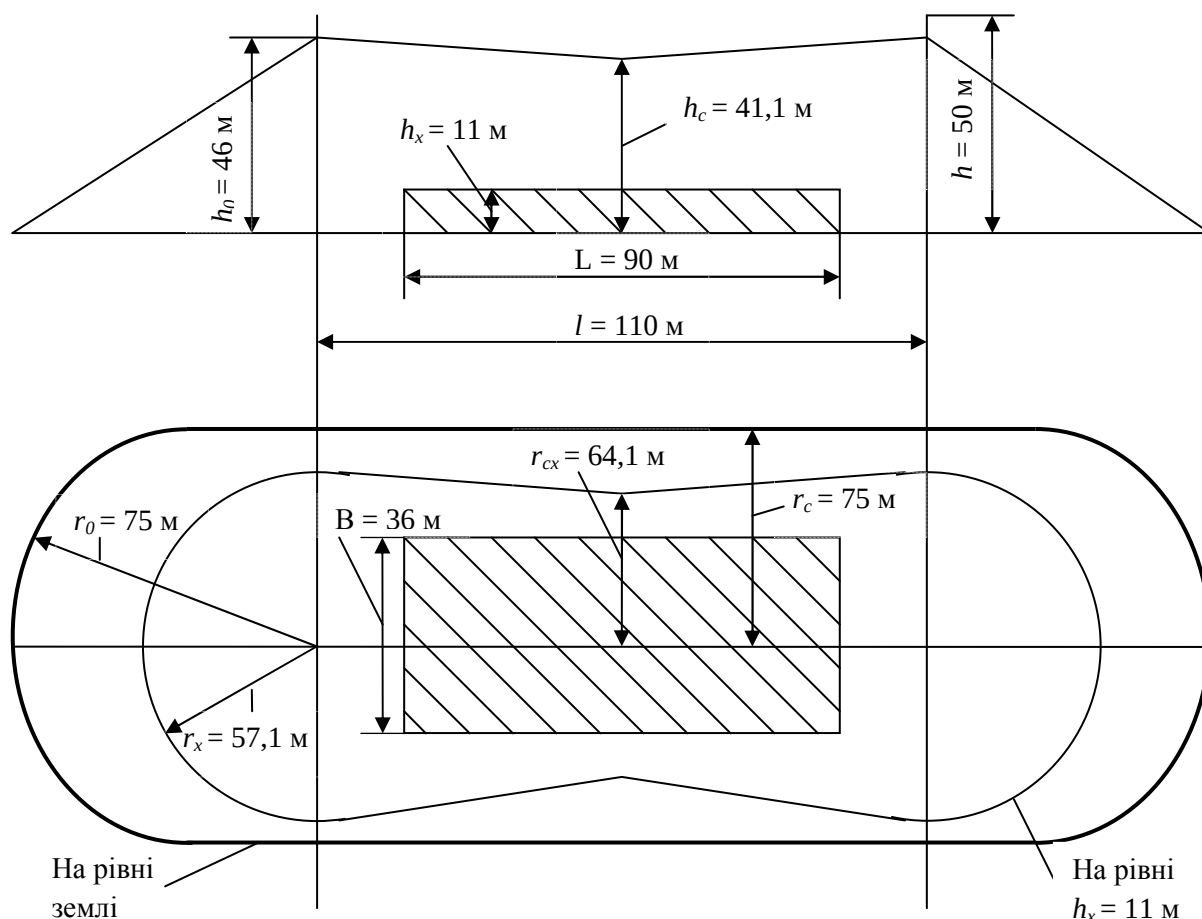


Рис. 4.2 - Зони дії грозозахисту.

#### 4.5 Висновки

1. Основою для організації та безпечної експлуатації електроустановок є свідомо дисципліна поєднана з високою технічною грамотністю та компетентністю експлуатуючого персоналу, який повинен суворо виконувати особливі організаційні та технічні заходи, прийоми та черговість дій з виконання експлуатаційних операцій.

2. Основні організаційно-технічні заходи з техніки безпеки складаються з оформлення робіт; допуск до робіт; нагляд під час робіт. Також обов'язковим під час проведення робіт є організація перерви робіт, перехід на інше робоче місце і закінчення робіт, проведення відключень, вивішування попереджувальних плакатів, установка огорож і видача попереджень, перевірка відсутності напруги і накладення заземлення.

3. Проведений розрахунок контуру заземлення трансформаторної підстанції напругою 10/0,4 кВ визначена кількість та розміри вертикальних заземлювачів, а також довжини з'єднувальної смуги.

4. Проведений розрахунок блискавкозахисту будівлі, обрані кількість та висота грозовідводів, побудовані їхні захисні зони.

## ВИСНОВКИ

В роботі розглянуто розв'язання актуальної науково-прикладної задачі аналіз шляхів підвищення надійності роботи трансформаторів напруги в мережах з ізольованою нейтраллю в умовах замикань на землю.

Основні результати дослідження:

1. Огляд переваг та недоліків різного способу заземлення нейтралі і ізольованого режиму її роботи показує, що повністю виключити ймовірність виникнення перенапруг в електричній мережі не можливо. Заземленням через реактор або резистор зменшується ймовірність та потужність перенапруг при ОЗЗ, але потребує додаткових капіталовкладень, і в деяких випадках, унеможливорює тривалу роботу при ОЗЗ.

2. Огляд існуючих перенапруг в мережах 6-35 кВ показав, що найбільш небезпечними є ферорезонансні та дугові перенапруги. Причиною їх виникнення та стійкого існування можуть слугувати однофазні замикання на землю.

3. Огляд надійності роботи ТН, на прикладі «Харківобленерго», показує, що ТН досить часто пошкоджуються, особливо в мережах 6-35 кВ з ізольованою нейтраллю – згідно із статистичними даними 5-12% на рік. Основною причиною їх пошкодження є виникнення ферорезонансного процесу, який призводить до збільшення первинного струму та термічному виходу з ладу обмотки ТН через 3-5 хв. від початку ферорезонансу.

4. Для запобігання виникненню ферорезонансу або виходу з ладу ТН при його появі, рекомендовано застосування спеціальних антирезонансних ТН та заземлення нейтралі через ДГР або високоомний резистор.

5. Досліджено вплив заземлення через дугогасячий реактор на струм замикання на землю. Відзначено, що навіть при повній компенсації ємнісного струму струм замикання на землю не дорівнює нулю, а має певне значення, яке обумовлене активним опором ізоляції мережі та нерівномірністю ємності відносно землі по фазах.

6. Проведена аналітична оцінка можливості виникнення ферорезонансу різних трансформаторів напруги з ємністю приєднаної мережі. Отримані

параметри електричної мережі при яких можливий розвиток ферорезонансу різних трансформаторів напруги на частоті 50 Гц.

7. Пошкодження ТН при дугових замиканнях на землю і при ферорезонансних явищах можливо виключити, якщо розземлити нейтраль первинної обмотки. В цьому випадку розривається шлях протікання струму нульової послідовності через обмотку ВН ТН.

8. Контроль цілісності ізоляції в мережах, що працюють з ізольованою нейтраллю можливо реалізувати не лише за допомогою трансформаторів напруги. Для цього можна використати, наприклад, струми витоку опорних ізоляторів. При цьому для контролю можна задіяти вже встановлені опорні ізолятори, що експлуатуються.

9. Розроблено принципову схему пристрою ПКЗЗ, який дозволяє контролювати цілісність ізоляції в електричній мережі з ізольованою нейтраллю відносно землі. Прилад створено на сучасній елементній базі та позбавлений зайвих функціональних можливостей.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Журахівський А.В., Кінаш, Б.М., Яценко А.Я., Масляк Р.Я. Аналіз надійності функціонування трансформаторів напруги в умовах ферорезонансних діянь [Електронний ресурс] // Технічна електродинаміка. – 2010. – №5. – С. 47-51.
2. Паперный Л.Е., Алейникова М.В. Режимы работы нейтрали электроустановок напряжением 0,4-750 кВ [Електронний ресурс]. Минск: Изд-во БНТУ, 2016.
3. Ганус А.И., Старкова К.А. Повреждаемость трансформаторов в областных электрических сетях АК «Харьковоблэнерго» и мероприятия по ее снижению // Светотехника и энергетика. – 2003. – №1. – С. 75-81.
4. Ганус А.И., Старкова К.А. Влияние условий переходных процессов в электрических сетях 6-10 кВ на характер повреждений трансформаторов напряжения // Энергетика и электрификация. – 2006. – №2. – С. 5-11.
5. Кутин В.М., Кульматицкий О.И. Диагностирование электрических распределительных сетей. - К.: Техніка, 1993. - 160 с.
6. Цапенко Е.Ф. Замыкания на землю в сетях 6-35 кВ. М.: Энергоатомиздат, 1986. - 128 с.
7. Назаров В.В. О режимах нейтрали сетей 6-35 кВ // Промышленная энергетика. - 1993. - №6. - С. 33-36.
8. Котиш, А. І. Визначення умов розвитку ферорезонансу в повітряних мережах з трансформаторами напруги типу НАМИ / А. І. Котиш, П. Г. Плешков // Електротехніка і Електромеханіка. - Харків: НТУ ХПІ, 2003. - № 4. - С. 46 - 47
9. Шкрабець, Ф. П. Основи електропостачання : навч. посіб. / Ф. П. Шкрабець, П. Г. Плешков. - Кіровоград : РВЛ КНТУ, 2010. - 408 с.
10. Алексеев В.Г., Дунайцев С.Г., Зихерман М.Х., Ильин В.П. Исследование режимов работы трансформаторов напряжения контроля изоляции в сетях 6-10 кВ // Электрические станции. - 1980. - №1. - С. 56-59.
11. Голдобин Д.А., Заболотников А.П., Тихонов А.А. Феррорезонансные колебания в воздушных сетях 35 кВ и условия работы трансформаторов

напряжения. – Промышленная энергетика, 1991, №10, С. 24-27.

12. Шульц Е.Е., Котиш А.І. Контроль ізоляції в розподільних мережах 10 кВ // Збірник наукових праць Кіровоградського інституту сільськогосподарського машинобудування / Кіровоград, - КІСМ, - 1997. - вип. 1. - С. 35-37.

13. Котиш А.І. Нетрадиційні методи контролю ізоляції в розподільчих мережах 10-35 кВ // Проблеми автоматизації та енергозабезпечення в сільському господарстві і машинобудуванні: Зб. наук. стат. - Кіровоград, КІСМ, - 1996. - вип. 2. - с. 26-27

14. Сіріков О.І. Діагностика стану забруднення високовольтних ізоляторів під напругою по струму витоку / О. І. Сіріков // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. Зб. наук. праць. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2007. – № 12. – С. 273-279.

15. Серебренніков С.В. Вибір інформативних параметрів для контролю забрудненості високовольтних ізоляторів / С. В. Серебренніков, О. І. Сіріков // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. Зб. наук. праць. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2006. – № 11. – С. 224-229.

16. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках. Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1984.

17. ДСТУ Б В.2.5-38:2012 Блискавкозахист Вид. офіц. Київ: Держстандарт України