

МЕХАНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра автоматизованих систем електричного транспорту

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

з дисципліни

***"ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЦЬ ТА
МЕТРОПОЛІТЕНІВ"***

Харків – 2015

Лабораторний практикум розглянуто і рекомендовано

до друку на засіданні кафедри автоматизованих систем
електричного транспорту 8 грудня 2014 р. протокол № 5.

Рекомендується для студентів спеціальності
"Електричні системи та комплекси транспортних засобів" усіх
форм навчання.

Укладачі:

доц. О.Д. Супрун,
асист. Ю.О. Семененко

Рецензент

проф. А.П. Фалендиш

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

з дисципліни

*"ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЦЬ ТА
МЕТРОПОЛІТЕНІВ"*

Відповідальний за випуск Семененко Ю.О.

Редактор Ібрагімова Н.В.

Підписано до друку 27.04.15 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 5,0. Тираж 50. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Українська державна академія залізничного
транспорту,

61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха, 7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.

Зміст

| | |
|---|----|
| Вступ..... | 4 |
| Лабораторна робота 1 | |
| Дослідження режимів нейтралі електричних мереж..... | 7 |
| Лабораторна робота 2 | |
| Дослідження роботи багатотарифного, мікропроцесорного трифазного лічильника електроенергії..... | 24 |
| Лабораторна робота 3 | |
| Дослідження пристроїв контролю стану ізоляції..... | 39 |
| Лабораторна робота 4 | |
| Дослідження основних співвідношень між струмами і напругами при несиметричному короткому замиканні..... | 55 |
| Лабораторна робота 5 | |
| Паралельна робота трансформаторів..... | 74 |
| Лабораторна робота 6 | |
| Дослідження несиметричного навантаження трифазного трансформатора..... | 83 |
| Список літератури..... | 97 |

Вступ

Даний лабораторний практикум є керівництвом при виконанні лабораторних робіт з курсу “Електропостачання залізниць і метрополітенів” для студентів спеціальності 7.05070202 “Електричні системи та комплекси транспортних засобів”.

Лабораторні роботи мають на меті:

- закріпити та розширити знання студентів, отримані на лекціях з даної дисципліни;
- прищепити студентам практичні навички в проведенні різних випробувань електроустаткування систем електропостачання;
- експериментально підтвердити теоретичні положення курсу;
- надати допомогу студентам у вивченні фізичних процесів, що протікають у системах електропостачання і окремих її елементах у перехідних режимах.

Перед виконанням циклу лабораторних робіт студентам рекомендується ознайомитися з загальними методичними вказівками до виконання й оформлення лабораторних робіт.

Лабораторний практикум містить опис лабораторних робіт з дисципліни “Електропостачання залізниць і метрополітенів”, де надано матеріал основних теоретичних положень тем дисципліни і методики їх експериментальної перевірки.

Виконання роботи. Для виконання лабораторних робіт студенти на першому занятті розбиваються на бригади. До чергової лабораторної роботи допускаються тільки студенти, які захистили попередню лабораторну роботу. Кожен студент за час проходження лабораторного циклу повинен освоїти всі елементи техніки експерименту: складання схеми, проведення дослідів, зняття показань приладів і т. д. Тому виконувані обов'язки в бригаді на кожній лабораторній роботі варто змінювати.

Перед тим як приступити до експериментальної частини роботи, необхідно уважно вивчити ці методичні рекомендації, чітко уявити собі мету досліду, характер явищ, що вивчаються. Треба ознайомитись зі схемою і елементами лабораторного стенда, послідовністю виконання лабораторної роботи.

Після того як викладач перевірить готовність студентів до виконання роботи, вони починають складати схему. Перед тим як це зробити, треба переконатися, що всі автомати вимкнені. Починати складання схеми трифазної системи змінного струму необхідно з послідовного кола, що йде від одного виводу до другого. Потім до цього кола приєднують паралельні кола. При цьому слід мати на увазі, що ділянки схеми, обведені пунктиром, вже складено, а їх виводи розташовані на клеммах панелі стенда.

Для запобігання появи великих струмів необхідно всі дільники напруги встановити в положення, що відповідає мінімуму сигналу на виході.

Вмикати живлення і приступати до виконання експериментів можна тільки після того, як схеми перевірів викладач, і в його присутності.

При проведенні дослідів недопустимо перевищувати номінальні значення струмів і напруг. У випадку, якщо стрілка приладу виходить за межі виміру, треба негайно вимкнути схему і сповістити про це викладачу. Розрахунки, побудова графіків і формулювання висновків за результатами вимірювань виконують після закінчення вимірів і відключення обладнання від електричної мережі. Після закінчення кожного етапу дослідження результати необхідно показати викладачу для перевірки, тільки після цього дозволяється приступити до наступного етапу роботи. Звіт до всіх лабораторних робіт складає кожен студент. Він повинен мати номер і назву роботи, її мету, електричну схему, перелік приладів і апаратури, таблиці з результатами вимірів і обчислень, графіки і векторні діаграми, висновки по роботі.

Звіт складається за допомогою ПЕОМ або має бути написаний чорнилами, а електричні схеми, таблиці, графіки й векторні діаграми накреслені олівцем за допомогою лінійки, циркуля і лекал. Електричні схеми повинні бути накреслені з дотриманням стандарту на умовні позначення елементів електричних схем. При накресленні графіків треба мати на увазі, що будь-яке вимірювання має випадкові похибки. Тому не треба проводити криві через всі експериментальні точки. На графіку необхідно проводити плавні криві, які проходять між точками. При виконанні наступної роботи попередня повинна бути

оформлена і захищена. Студенти, які прийшли на заняття не підготовленими або не склали звіт з попередньої роботи, до виконання наступної лабораторної роботи не допускаються.

Техніка безпеки виконання лабораторних робіт

При виконанні лабораторних робіт студенти зобов'язані строго дотримуватися правил техніки безпеки. Щоб уникнути нещасних випадків під час роботи в електротехнічних лабораторіях, вони повинні виконувати такі основні вимоги:

1 Перед складанням схеми необхідно переконатися, що всі автомати й комутаційні апарати вимкнуті.

2 При складанні схеми звернути увагу на надійність закріплення всіх провідників у затискачах.

3 Вмикати схему можна тільки після перевірки її викладачем, з його дозволу й у його присутності. Те саме треба робити при будь-яких змінах у схемі.

4 Не можна торкатися оголених частин лабораторних стендів, що знаходяться під напругою (неізольований провід, затискачі реостатів і т. п.).

5 Не робити змін у монтажі схеми й не усувати її несправності при увімкненому електроживленні.

6 При зникненні напруги в мережі треба негайно виліснути всі автомати та комутаційні апарати.

7 Відключити схему негайно при виявленні будь-якої несправності й сповістити про це викладачу. Не усувати несправність без дозволу викладача.

8 У разі ураження струмом негайно вимкнути схему і надати першу допомогу потерпілому.

9 Не залишати увімкнену схему під час перерви. Після закінчення роботи схему вимкнути і після перевірки отриманих даних викладачем розібрати її.

Відповідальність за дотримання правил техніки безпеки покладається на студентів, які працюють у лабораторії, а контроль за їх виконанням — на викладача.

Лабораторна робота 1

Дослідження режимів нейтралі електричних мереж

1.1 Мета роботи

- вивчити процеси, що протікають у мережах з різними режимами нейтралі, як у нормальному режимі, так і при замиканні однієї фази на землю;
- дослідити електробезпечність мереж трифазного струму напругою до 1000 В;
- виявити залежність електробезпеки від режиму нейтралі мережі, опору ізоляції і ємності фаз відносно землі, а також від опору кола провід - людина - земля.

1.2 Загальні відомості

Трифазні трипровідні мережі 3–35 кВ належать до мереж з малими струмами замикання на землю та працюють із незаземленою (ізолюваною) нейтраллями.

1.2.1 Трифазні мережі 3–35 кВ із ізолюваними нейтраллями

У мережах з незаземленими нейтраллями струми при однофазному замиканні на землю протікають через розподілені ємності фаз, які для спрощення аналізу процесу умовно замінюють ємностями, зосередженими в середині ліній (рисунок 1.1). Міжфазні ємності при цьому не розглядаються, тому що при однофазних ушкодженнях їхній вплив на струми в землі не помітним.

У нормальному режимі роботи напруга фаз мережі відносно землі ($\bar{U}_{фа}$, $\bar{U}_{фВ}$, $\bar{U}_{фС}$) симетричні й дорівнюють фазній напрузі, а ємнісні струми фаз відносно землі ($\bar{I}_{сА}$, $\bar{I}_{сВ}$, $\bar{I}_{сС}$) також симетричні й рівні між собою (рисунок 1.1, а). Ємнісний струм фази

$$I_{сф} = U_{ф} \omega C, \quad (1.1)$$

де C – ємність фази відносно землі.

Геометрична сума ємнісних струмів трьох фаз дорівнює нулю.

У випадку металевого замикання на землю в одній точці напруга неушкоджених фаз відносно землі зростає у $\sqrt{3}$ раз і стає рівною міжфазній напрузі. Наприклад, при замиканні на землю фази С (рисунок 1.1) поверхня землі в точці ушкодження здобуває потенціал цієї фази (напруга відносно землі цієї фази буде дорівнювати нулю), а напруга фаз А і В відносно землі стає відповідно рівною міжфазним напругам $\bar{U}'_{\text{фа}} = \bar{U}_{\text{AC}}$ і $\bar{U}'_{\text{фВ}} = \bar{U}_{\text{ВР}}$ і кут зсуву між векторами цих напруг буде 60° . Ємнісні струми неушкоджених фаз А і В також збільшуються відповідно до збільшення напруги в $\sqrt{3}$ раз. Струм на землю фази С, обумовлений її власною ємністю, буде дорівнює нулю, тому що ця ємність виявляється закороченою.

Для струму в місці ушкодження можна записати:

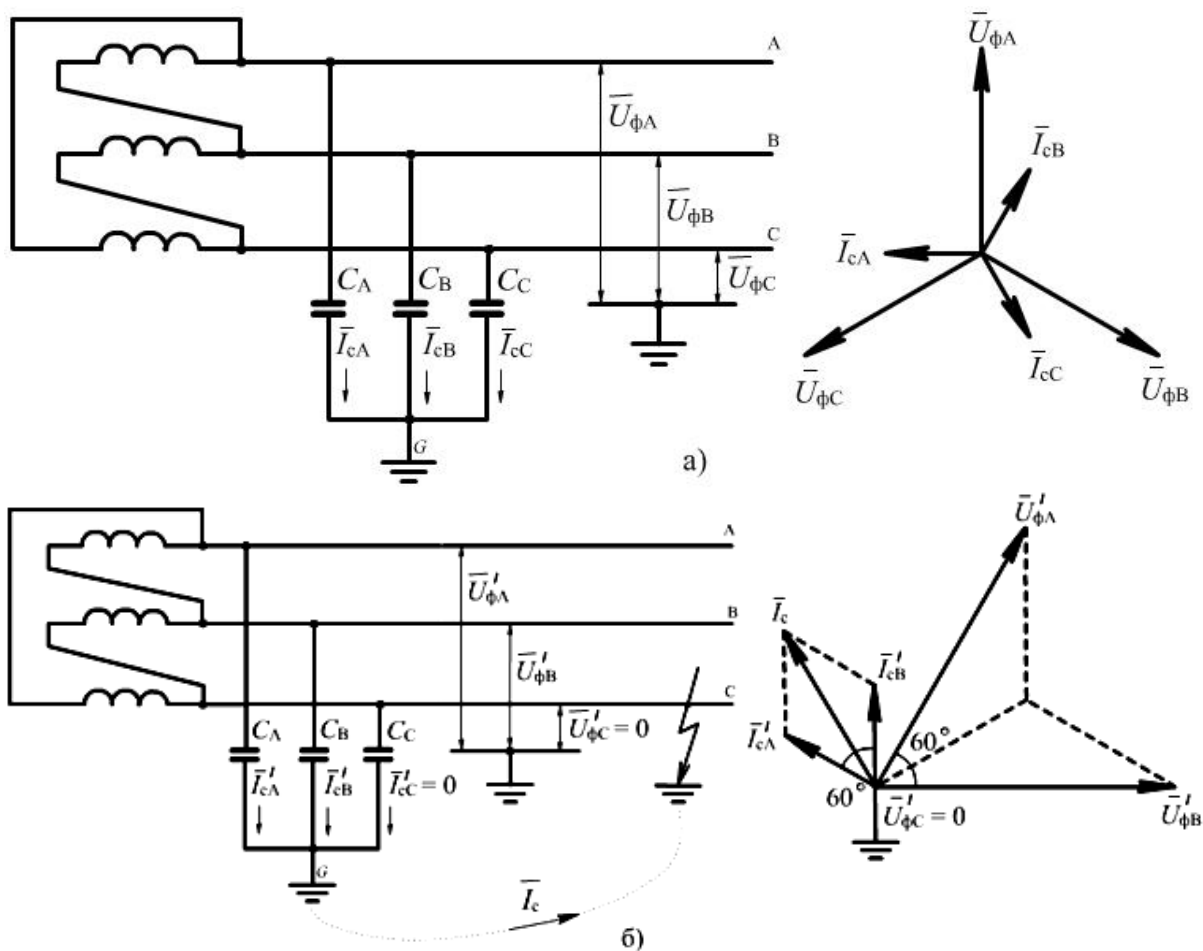
$$\bar{I}_c = (\bar{I}'_{cA} + \bar{I}'_{cB}), \quad (1.2)$$

тобто геометрична сума векторів ємнісних струмів неушкоджених фаз визначає вектор струму через місце ушкодження. Струм \bar{I}_c виявляється в 3 рази більше, ніж ємнісний струм фази в нормальному режимі:

$$\bar{I}_c = 3\bar{I}_{c\Phi} = 3U_\Phi \omega C. \quad (1.3)$$

За виразом (1.3) струм I_c залежить від напруги мережі, частоти і ємності фаз відносно землі, що залежить в основному від конструкції ліній мережі і їхніх довжин.

При однофазних замиканнях на землю в мережах з незаземленою нейтраллю трикутник лінійних напруг не спотворюється, тому споживачі, включені на міжфазні напруги, продовжують працювати.



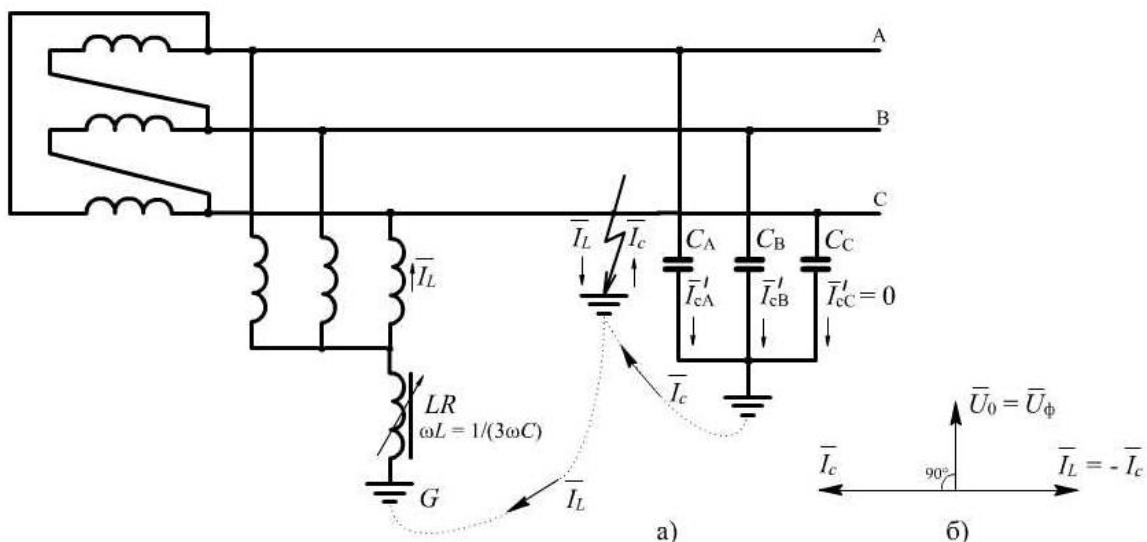
а - нормальний режим; б - замикання фази С на землю

Рисунок 1.1 - Електрична мережа 3 - 35 кВ із ізольованою нейтраллю

1.2.2 Трифазні мережі 3–35 кВ із компенсованими нейтраллями

У мережах 3-35 кВ для зменшення струму замикання на землю з метою задоволення зазначених вище норм застосовується заземлення нейтралі через дугогасильні реактори (ДР). Практично майже всі кабельні мережі 6-35 кВ із сумарною довжиною електрично зв'язаних ліній понад 100 км повинні працювати з компенсованою нейтраллю. Компенсація здійснюється включенням у нейтральну точку трифазної мережі індуктивного опору ДР із регульованим повітряним зазором магнітопроводу або східчастим регулюванням кількості витків його обмотки.

На рисунку 1.2 наведена схема найпростішої компенсованої мережі. Нейтраль первинної обмотки одного з мережних трансформаторів (трансформатора власних потреб або спеціально встановленого заземлюючого трансформатора) зі схемою з'єднання обмоток «зірка-трикутник» заземлюються через ДР. У нормальному режимі роботи струм через реактор практично дорівнює нулю. При повному замиканні на землю однієї фази в такій мережі напруги двох неушкоджених фаз відносно землі, як і в мережі з ізольованою нейтраллю, збільшаться в $\sqrt{3}$ раз, а напруга нейтралі буде дорівнює фазній напрузі (рисунок 1.2, а). Під дією цієї напруги через ДР піде струм. Опір котушки підбирають так, щоб індуктивний струм I_L , що проходить через неї, за значенням дорівнював сумарному ємнісному струму I_c , що проходить через ємності фаз мережі. Оскільки індуктивний і ємнісний струми відрізняються по фазі на кут 180° , струм у місці замикання фаз на землю, що являє собою геометричну суму цих струмів, буде дорівнює нулю (рисунок 1.2, б), дуга в місці ушкодження не виникає й усуваються пов'язані з нею небезпечні наслідки. Таке настроювання котушки з повною компенсацією ємнісного струму називається резонансним.



а - схема протікання струмів у мережі при замиканні фази С на землю; б - векторна діаграма струмів у місці замикання

Рисунок 1.2 – Електрична мережа 3-35 кВ із резонансно заземленою нейтраллю

Практично, однак, через місце замикання протікає залишковий струм, що складається з активної й реактивної складових. Перша з них обумовлена активними опорами котушки й мережі, а друга (індуктивний або ємнісний струм) – неточним настроюванням котушки. Цей залишковий струм малий за значенням і знаходиться у фазі або становить невеликий кут відносно напруги на нейтралі \bar{U}_0 . Тому в тих випадках, коли ізоляційна міцність дугового проміжку, відновлюючись при проходженні струму через нуль, є більшою за робочу напругу мережі, дуга гасне й знову не відновлюється (наприклад, при грозових перекриттях лінійної ізоляції). У випадку ж порушення ізоляції (поломка ізоляторів, падіння проводу) дуга здобуває характер, що перемежовує. І мережа продовжує роботу в режимі однофазного замикання, однак, на відміну від некомпенсованої мережі, з малим струмом у дузі.

Компенсація ємнісного струму при резонансному або близькому до неї настроюванні дугогасильного реактора знижує швидкість відновлення напруги на ушкодженій фазі й амплітуду напруги, що відновлюється. Амплітуда перенапруги при такому настроюванні, за деякими дослідженнями, не перевищує $2,8 U_{\text{фм}}$, а ймовірність появи перенапруги вищої кратності менше, ніж у некомпенсованій мережі. Однак при розстроюванні компенсації більш ніж на 5 % перенапруги в компенсованих мережах і ймовірність появи граничних перенапруг такі самі, як і в мережах з ізольованою нейтраллю.

При неможливості резонансного настроювання переважно мати невелику перекомпенсацію ($I_c < I_L$). Недокомпенсація ємнісного струму в аварійних випадках (при несиметрії ємностей фаз) може призвести до появи перенапруг вищих, ніж у некомпенсованій мережі.

У мережах з резонансно заземленою (компенсованою) нейтраллю, так само як у мережах з незаземленими нейтралями, допускається тимчасова робота з замкнутою на землю фазою, поки не з'явиться можливість зробити необхідні перемикання для відділення ушкодженої ділянки. При цьому варто враховувати припустимий час роботи реактора 6 год.

Мережа з компенсованою нейтраллю (рисунок 1.3) містить дугогасильну котушку (ДГК), включену між нейтральною

точкою й землею. У нормальному режимі така мережа працює так само, як і мережа з ізольованою нейтраллю. При замиканні однієї фази на землю будуть такі самі наслідки, крім зменшення величини струму через місце пошкодження. Відбудеться це з такої причини: у реальних мережах струм замикання на землю містить невелику активну складову I_a , тому через місце замикання протікає струм I_3 , що дорівнює сумі ємнісного струму I_{3i} через дугогасильну котушку $I_{дгк}$ і струму I_a .

Зазначимо, що

$$\dot{I}_{cz} = 3 \cdot \dot{I}_c = \frac{3 \cdot U_\phi}{X_c} = \frac{3 \cdot U_\phi}{\frac{1}{j\omega C}} = j \cdot 3 \cdot U_\phi \cdot \omega C, \quad (1.4)$$

$$\dot{I}_{дгк} = \frac{U_\phi}{r_c + j\omega L_0} = \frac{U_\phi \cdot r_0}{r_0^2 + \omega^2 \cdot L_0^2} - j \cdot \frac{U_\phi \cdot \omega \cdot L_0}{r_0^2 + \omega^2 \cdot L_0^2} \cong \frac{U_\phi \cdot r_0}{\omega^2 \cdot L_0^2} - j \cdot \frac{U_\phi}{\omega \cdot L_0}. \quad (1.5)$$

Оскільки $r_0 \ll \omega L_0$, то

$$\dot{I}_u = g \cdot \dot{U}_\phi, \quad (1.6)$$

де g – провідність ізоляції кабельної лінії.

Знайдемо спільний струм замикання:

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_{cz} + \dot{I}_{дгк} + \dot{I}_u = 3 \cdot j \cdot U_\phi \cdot \omega C + \frac{U_\phi \cdot r_0}{\omega \cdot L_0^2} - j \frac{U_\phi}{\omega L_0} + g \cdot U_\phi = I_a + j(I_c - I_n), \quad (1.7)$$

де

$$I_a = U_\phi \cdot \left(g + \frac{r_0}{\omega \cdot L_0^2} \right), \quad (1.8)$$

$$I_c = 3 \cdot U_\phi \cdot \omega C, \quad (1.9)$$

$$I_L = \frac{U_\phi}{\omega \cdot L_0}, \quad (1.10)$$

$$I_3 = \sqrt{I_a^2 + (I_c - I_L)^2}. \quad (1.11)$$

Зробимо деякі перетворення:

$$\dot{I}_3 = j \cdot I_c \left(\frac{I_a}{j \cdot I_c} + 1 - \frac{I_L}{I_c} \right) = j \cdot I_c \cdot \left(1 - \frac{I_L}{I_c} - j \frac{I_a}{I_c} \right) = j \cdot I_c [(1 - q) - j \cdot \delta], \quad (1.12)$$

де

$$q = \frac{I_L}{I_c}, \quad (1.13)$$

$$\delta = \frac{I_a}{I_c}. \quad (1.14)$$

Якщо в останньому виразі будемо змінювати величину q , то можемо отримати графік, як на рисунку 1.3. Якщо живлення мережі здійснюється від джерела, що не має нейтральної точки, то застосовують спеціальний заземлюючий трансформатор - звичайний силовий трансформатор з виведеною нейтральною точкою в первинній обмотці (рисунок 1.2) або трансформатор Бауха [1].

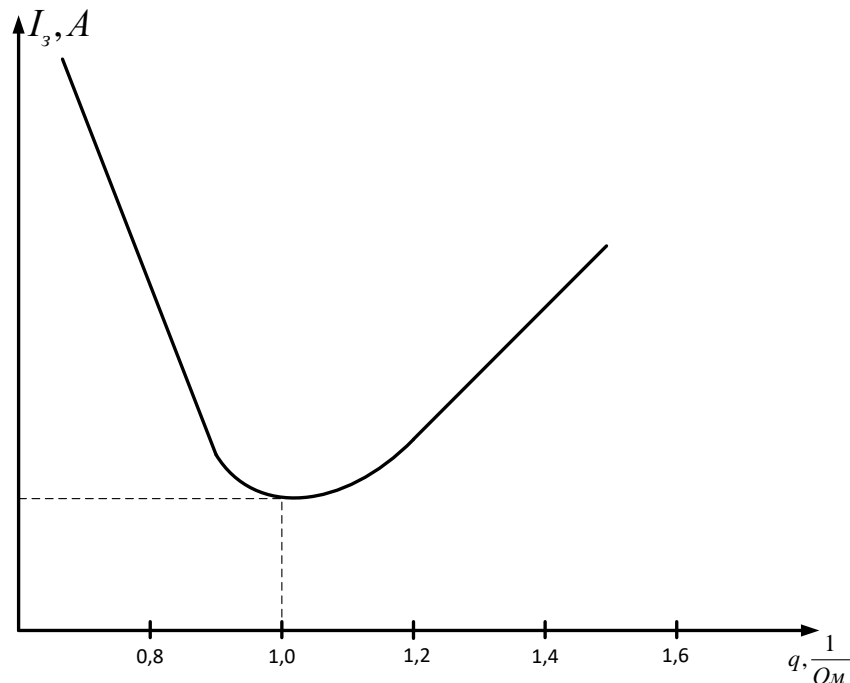


Рисунок 1.3 – Графік залежності протікання струму через місце замикання від індуктивного струму дугогасильної котушки

У нормальному режимі струми нульової послідовності будуть відсутні в первинній обмотці цього трансформатора й по котушці, що гасить, струм протікати не буде. Магнітний же потік цієї обмотки містить всі непарні гармоніки. Шляхом з'єднання

вторичної обмотки за схемою трикутника вдається демпфувати треті гармоніки магнітного потоку. Завдяки цьому трансформатор не перегрівается й з'являється можливість зменшити його потужність. Такий режим роботи ДГК і трансформатора Т є тривалим.

При виникненні замикання на землю по первинній обмотці трансформатора Т стануть протікати струми нульової послідовності I_0 , які створять у фазних вторинних обмотках трансформатора е. р. с. E_0 , але оскільки ці обмотки з'єднані послідовно, по них потече струм третьої гармоніки I_3 і створиться магнітний потік Φ_3 (рисунок 1.2), направлений майже проти потоку Φ_0 (активний опір обмоток малий).

По ДГК буде протікати трикратний струм нульової послідовності індуктивного характеру.

1.2.3 Трифазні електричні мережі 110 кВ і вище

Вони належать до мереж з великими струмами замикання на землю й працюють із ефективно заземленою нейтраллю (рисунок 1.4). У цих мережах з метою зниження струмів замикання на землю до значень, обумовлених параметрами апаратури і релейного захисту, допускається в частині трансформаторів нейтралі не заземлювати, однак заземлення нейтралей інших трансформаторів повинне обмежувати можливе підвищення напруги на розземлених нейтралях до значень, що допускаються класом ізоляції. При ізоляції обмоток трансформаторів поблизу нейтралі класу 35 кВ, як це виконується в цей час у трансформаторів, такий режим практично можливий тільки в мережах 110 кВ. Нейтралі всіх трансформаторів 220 кВ і вище заземлюються.

Відповідно до рекомендацій Міжнародного електротехнічного комітету (МЕК) до ефективно заземлених мереж відносять мережі ВН і СВН, нейтралі яких з'єднані з землею безпосередньо або через невеликий активний опір. Робота цих мереж з ізолюваною або з компенсованою нейтраллю не може бути обґрунтована ні технічними, ні економічними міркуваннями через великі струми замикання на землю й необхідності надмірного посилення ізоляції, що повинна бути розрахована на збільшення напруги до лінійного значення.

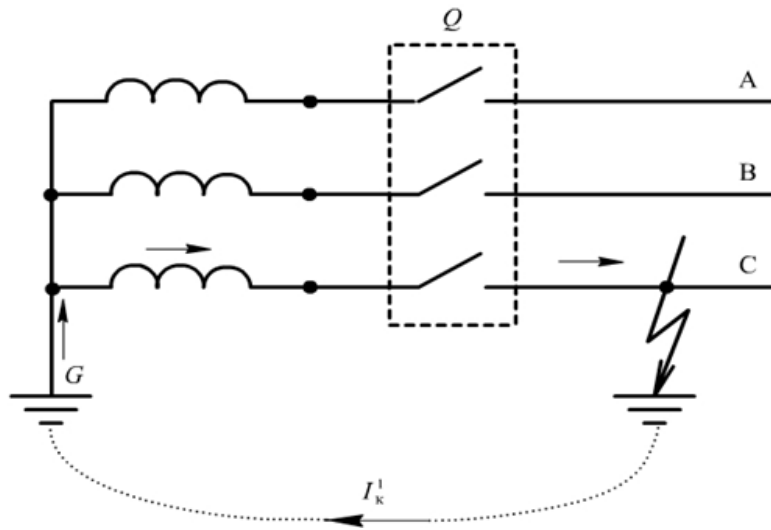


Рисунок 1.4 – Електрична мережа 110 кВ із ефективно заземленою нейтраллю

Мережі з ефективно заземленою нейтраллю застосовуються при номінальних напругах 110 кВ і вище, тому що в цьому випадку виникає електрична дуга навіть при наявності пристрою, що компенсує, і єдиним засобом боротьби з нею є вимикання.

Такий захід поліпшує надійність спрацьовування релейного захисту й знижує вартість ізоляції, тому що при однофазному короткому замиканні напруги фаз відносно землі не підвищуються, як при замиканні однієї фази на землю. Внутрішні перенапруги в мережах із глухозаземленою нейтраллю менше, ніж з компенсованою. Все це сприяє здешевленню електроустановок.

У цей час у мережі до 1000 В застосовуються чотирипровідні (для можливості одержання фазної й лінійної напруги) з обов'язковим заземленням нейтрального проводу й перевіркою опору петлі фаза-нуль для надійного відключення ділянки з ушкодженою ізоляцією. Однак у таких мережах допускається й застосування ізольованої нейтралі, якщо номінальна напруга 500 або 1000 В, але має бути передбачене автоматичне відключення несправної ділянки.

Вибір режиму нейтралі в мережах напругою вище 1000 В визначається надійністю роботи електроустановки, дотриманням необхідної якості напруги, економічністю. У мережах напругою до 1000 В вибір режиму нейтралі визначається в основному безпекою обслуговування.

Споживачі електричних мереж напругою 6-35 кВ, виконаних з ізольованою нейтраллю, не відчують замикання фази на землю, тобто такі мережі відрізняються високою надійністю електропостачання, але вимагають підвищеного рівня ізоляції й постійного контролю її стану. Мережі з компенсованою нейтраллю підвищують надійність електропостачання споживачів, що отримують живлення через протяжні кабельні лінії (лінії з великими ємнісними струмами однофазного-замикання), але не усувають недоліків, властивих мережам з ізольованою нейтраллю, здорожують їх. Відключення ушкодженої ділянки в мережах із глухозаземленою нейтраллю викликає необхідність застосування ряду заходів, що поліпшують безперебійність електропостачання.

Таким чином, вибір способу заземлення нейтралі являє собою комплексну проблему, він пов'язаний з надійністю електропостачання, якістю електроенергії, економічністю та безпекою експлуатації.

1.3 Опис лабораторної установки

Стенд №1 дозволяє дослідити всі режими нейтралі мереж. Принципова схема наведена на рисунку 1.4.

1 Перед початком роботи вивчити схему лабораторної установки, розміщення приладів, їхні межі вимірів, призначення комутаційних апаратів.

2 Зібрати схему мережі з ізольованою нейтраллю. Замірити фазні та лінійні напруги, струм навантаження, ємнісний струм (пофазно), побудувати векторну діаграму напруг і струмів у нормальному режимі. Результати вимірів занести в таблицю 1.1.

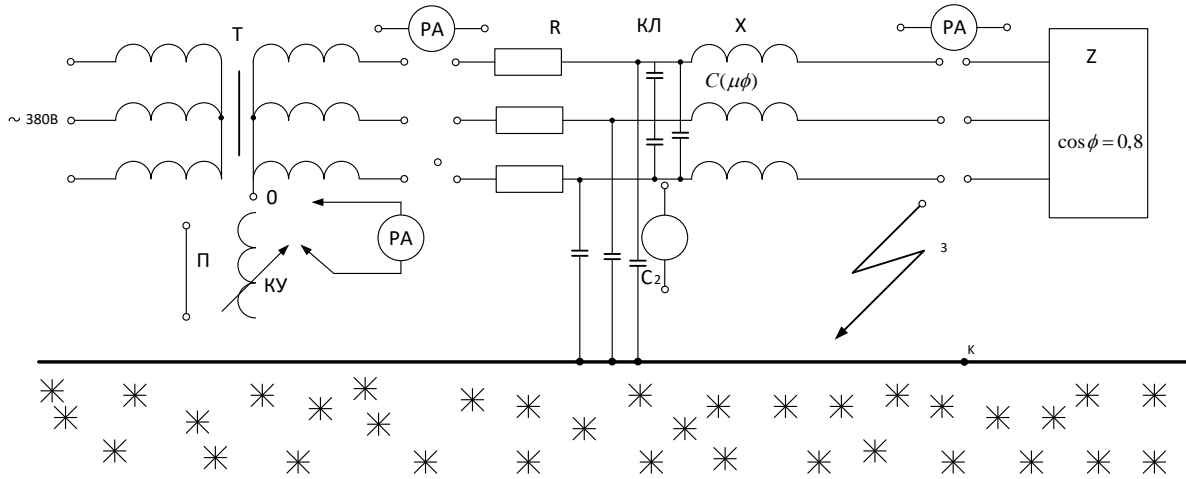
3 Кнопкою К зробити однофазне замикання на землю, заміряти напругу кожної фази відносно землі, виміряти лінійні напруги, струм в обмотках силового трансформатора і струм у колі навантаження. Побудувати векторну діаграму напруг і струмів у режимі замикання однієї фази на землю.

4 Зібрати схему мережі з компенсованою нейтраллю. У нормальному режимі повторити виміри по п. 2.

5 Зробити замикання фази на землю. Зробити виміри, аналогічні вимірам, зробленим у п. 3.

6 Змінюючи індуктивність ДГК, зняти залежність величини струму замикання на землю від струму в ДГК, побудувати графік.

7 Зібрати схему з глухозаземленою нейтраллю, повторити виміри по п. 2 у нормальному режимі.



Т - трансформатор 380/36 В з виведеною нейтраллю;
 КЛ - схема заміщення (Т-подібна) ділянки кабельної лінії з активними опором і ємностями відносно землі $C_{\text{ч}}$ (часткових) і між фазами ($C_{\text{мф}}$); КУ - змінна індуктивність для компенсації струму однофазного замикання; П - перемичка для глухого заземлення нейтралі; П1 - перемичка для замикання однієї фази на землю й однофазне коротке замикання

Рисунок 1.5 - Схема лабораторної установки

Таблиця 1.1 – Результати вимірів

| Вимірювана величина | Позначення | Мережа з ізольованою нейтраллю | | Мережа з компенсованою нейтраллю | |
|-----------------------|---|--------------------------------|--------------------|----------------------------------|--------------------|
| | | нормальний режим | замикання на землю | нормальний режим | замикання на землю |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Струм навантаження, А | $I_{\text{НА}}$ $I_{\text{НВ}}$ $I_{\text{НС}}$ | | | | |
| Струм витоку, А | $I_{\text{СА}}$ $I_{\text{СВ}}$ $I_{\text{СС}}$ | | | | |

Продовження таблиці 1.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------------------------------|----------------------------------|---|---|---|---|
| Струм джерела, А | I_A I_B I_C | | | | |
| Напруга фаз відносно землі, В | U_{A3} U_{B3} U_{C3} | | | | |
| Лінійна напруга, В | U_{AB} U_{BC} U_{CA} | | | | |

8 Зробити замикання фази на землю. Перевірити миттєве відключення мережі.

Стенд №2 дозволяє:

а) досліджувати електробезпеку таких трифазних мереж:

- трипровідної з ізольованою нейтраллю;
- трипровідної з заземленою нейтраллю;
- чотирипровідної з ізольованою нейтраллю;
- чотирипровідної з заземленою нейтраллю.

б) порівняти небезпеку дотику людини до однієї з фаз при нормальному режимі роботи мережі з небезпекою дотику людини до однієї з фаз при імітації аварійного режиму (одна з фаз замкнута на землю);

в) досліджувати такі залежності:

- небезпеку дотику людини до однієї з фаз залежно від опору ізоляції фаз при постійній ємності їх відносно землі;
- небезпеку дотику людини до однієї з фаз залежно від опору провід-людина-земля;
- небезпеку дотику людини до однієї з фаз залежно від ємності фаз відносно землі при постійному опорі ізоляції;

г) моделювати основні параметри кожної з вище зазначених мереж і визначати величину струму, що протікає через людину при доторканні її до струмоведучих частин.

Максимальний опір ізоляції 48 кОм. Ємності кожної фази кола імітуються за допомогою послідовно з'єднаних конденсаторів і резисторів і змінюються від 0,06 до 2 мкФ. Опір тіла людини імітується за допомогою резистора, величина якого змінюється в межах від 1 до 48 кОм та може підключатися до кожної фази.

Живлення стенда здійснюється від мережі трифазного змінного струму частотою 50 Гц, напругою 380 В. Споживна потужність не більше 0,2 кВт.

Стенд (рисунок 1.6) сконструйований у вигляді настільного переносного приладу.

На передній панелі стенда розташовані:

- тумблер вмикання стенда з написом "мережа";
- 3 лампочки сигналізації напруги мережі в кожній з фаз;
- тумблер вмикання нейтралі;
- тумблер вмикання заземлювача;
- ручки потенціометрів встановлення опору ізоляції і ємності фаз "А", "В", "С" і нейтралі "N";
- вимикачі ємності фаз і ємності нейтралі;
- ручка встановлення резистора, що імітує опір тіла людини;
- ручка перемикача (на 5 положень) для підключення резистора, що імітує опір тіла людини в кожній з фаз і нейтралі;
- ручка перемикача (на 5 положень) і кнопка для імітації аварійного режиму в кожній з фаз і нейтралі;
- ручка перемикача (на 11 положень) для підключення вольтметра;
- міліамперметр;
- перемикач меж міліамперметра;
- вольтметр.

Напруга подається від трифазної мережі змінного струму частотою 50 Гц, напругою 380 В через вимикач В1, запобіжники Пр-1 — Пр-3 на первинні обмотки трансформаторів Тр-1 — Тр-3. При вмиканні стенда в мережу загораються індикаторні лампочки Л1 - Л3, включені між кожною з фаз послідовно з резисторами R1 – R3 відповідно.

Три фази вторинних обмоток трансформаторів, нульовий провід і провід землі дозволяють відповідними перемиканнями тумблерів В2 і В3 комутувати кожну з мереж трифазного струму:

- трипровідну з ізолюваною нейтраллю;
- трипровідну з заземленою нейтраллю.

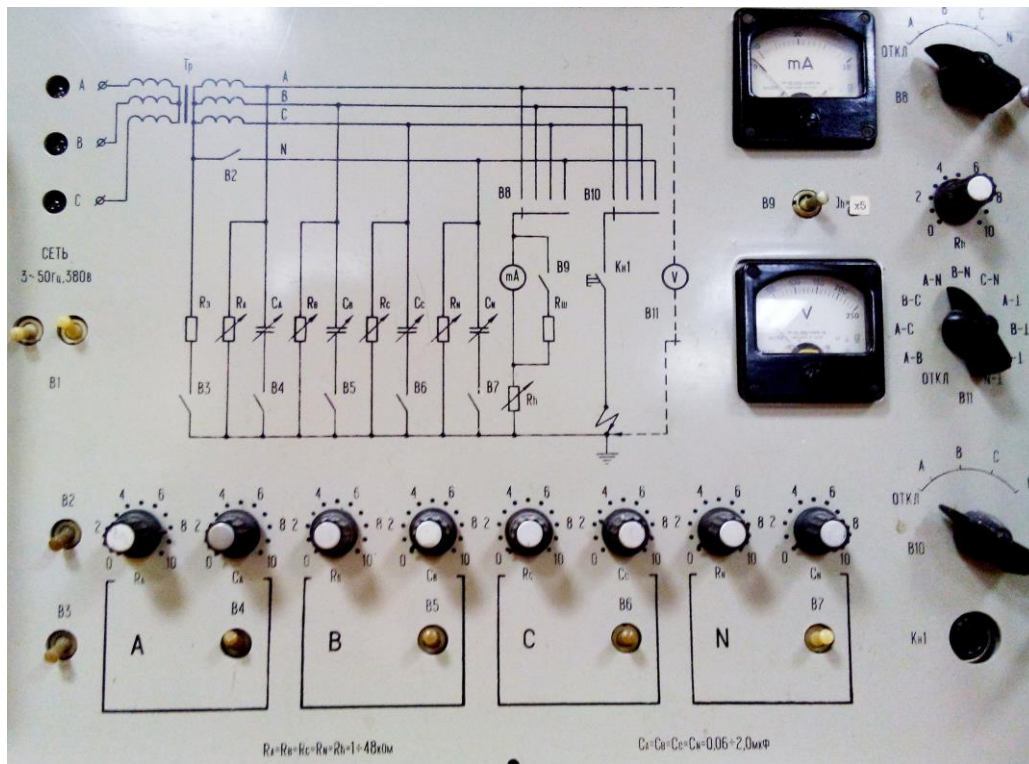


Рисунок 1.6 – Схема стенда № 2 лабораторної установки

Кожна фаза й нульовий провід мають свій блок імітації ізоляції. Для імітації опору ізоляції служать резистори фази 1 А - R5, R6; фази 1 В - R8, R9; фази 1 С - R11, R12; нейтралі - R14, R15; заземлення - R4. Величини, імітуючи опори, змінюються відповідно від 1 до 48 кОм в кожній фазі й нейтралі.

Для імітації ємності проводів фаз і нейтралі служать конденсатори C1, C2, C3, C4 відповідно для фаз А, В, С і нейтралі N.

Коло заземлення імітується резистором опором 4,7 Ом. Коло імітації людини підключається до кожної з фаз за допомогою перемикача B8. Опір тіла людини імітується резисторами R18 та R19 і змінюється від 1 до 48 кОм.

Для виміру струму, що протікає через імітатор людини, на передню панель винесено міліамперметр ИП1. Тумблер B9 служить для перемикання меж виміру міліамперметра.

Для імітування аварійного режиму передбачено коло з резистором R20 і кнопковим замикачем КН1, що підключається до кожної з фаз за допомогою перемикача B10. Вольтметр ИП2 за допомогою перемикача B11 дозволяє робити вимір фазних і

лінійних напруг. Реле P1 служить для контролю з'єднання корпусу стенда з контуром заземлення.

Вказівки заходів безпеки

Підключення шини заземлення й шнура живлення до мережі повинне виконуватися викладачем.

Перед приєднанням шнура живлення й шини заземлення переконатися в тому, що:

- автомат щита живлення вимкнений;
- тумблер "мережа" перебуває у вимкненому стані.

Підключення стенда до мережі здійснювати в заданій послідовності:

- вимкнути автомат щита живлення;
- з'єднати шину заземлення з контуром заземлення;
- приєднати трипровідний кабель живлення до мережі.

Щоб уникнути ураження електричним струмом при несправностях у стенді, його шину заземлення необхідно з'єднати з контуром заземлення, опір якого повинен бути 4 Ом.

У процесі профілактичних робіт забороняється робити заміну деталей під напругою; залишати без нагляду прилад під напругою.

Підготовка стенда до роботи:

- уважно ознайомитися з призначенням кожного органу керування й вказівками заходів безпеки;
- перевірити наявність і справність запобіжників;
- вимикачі, перемикачі й ручки керування встановити в положення "вимкнено";
- вимкнути тумблер "мережа", при цьому повинні загоратися лампочки сигналізації наявності трьох фаз напруги.

1.4 Порядок виконання роботи

1 Дослідження трипровідної мережі з ізольованою нейтраллю.

Для виконання експерименту необхідно, що тумблери В2 і В3 були вимкнені:

а) зняти залежність $I_h = f(r_A)$ при $R_h = \text{const}$ для нормального режиму роботи мережі:

- резистор R_h встановити в положення, що відповідають заданому значенню (задається викладачем);
 - резистор R_A , що імітує опір фази А (для фаз В і С відповідно R_B й R_C), встановити в нульове положення. У цьому випадку $r_{A,B,C} = 1 \text{ кОм}$;
 - тумблери В4, В5 й В6 повинні бути вимкнені (випадок, що не враховує ємності фаз А, В і С);
 - у вихідному положенні резистора R_6 , а потім за його допомогою, змінюючи r_A (значення опору визначаються викладачем), зняти показання міліамперметра ИП1 і дані I_h й r_A занести в таблицю;
 - для кожного значення $I_h = f(r_A)$, ввімкнувши перемикачем В11 вольтметр ИП2 у фазу А, заміряти й записати значення фазної напруги;
 - повторити аналогічно всі підпункти для фаз В і С. Значення занести в таблицю;
- б) виконати дослідження для аварійного режиму роботи мережі:
- імітація аварійного режиму забезпечується натисканням кнопкового замикача КН1 у момент зняття показань приладів ИП1 і ИП2;
 - дані занести в таблицю;
- в) зняти залежність $I_h = f(R_h)$ при $r_A = \text{const}$, $r_B = \text{const}$ у нормальному режимі роботи мережі:
- величини опорів фазних резисторів задаються викладачем. Тумблери В4, В5, В6, В7 вимкнені;
 - резистори R_A , R_B , R_C встановити в положення, що відповідає заданим величинам;
 - дискретно змінюючи опір резистора R_h (точки задаються викладачем), зняти показання міліамперметра ИП1 і занести їх у таблицю;
 - для кожного значення $I_h = f(R_h)$ зняти показання вольтметра ИП2, включаючи його поперемінно в кожну фазу;
 - дані занести в таблицю;
- г) виконати дослідження для аварійного режиму роботи мережі;

д) повторити всі пункти з урахуванням ємностей ізоляції фазних проводів, ввімкнувши тумблери В4, В5, В6 й В7. Дані внести в таблицю.

2 Дослідження трипровідної мережі з заземленою нейтраллю.

Нейтраль заземлюється за допомогою тумблера В3. Зробити всі операції аналогічно експерименту дослідження трипровідної мережі з ізолюваною нейтраллю. Дані необхідно занести в таблицю.

3 Дослідження чотирипровідної мережі з ізолюваною нейтраллю, що комутується за допомогою тумблера В2. Тумблер В3 вимкнути.

Зробити всі виміри аналогічно попереднім пунктам, додавши пункти, що враховують впливи опору і ємності ізоляції нейтралі провoda N (r_N , C_N – тумблер В7). Дані необхідно занести в таблицю.

4 Дослідження чотирипровідної мережі з заземленою нейтраллю. Ввімкнути тумблер В2 й В3. Порядок зняття залежностей аналогічний.

Дані необхідно занести в таблицю.

1.5 Зміст звіту

Звіт по лабораторній роботі повинен мати:

- 1) схеми мереж з різними ввімкненнями нейтралі;
- 2) векторні діаграми напруг і струмів;
- 3) таблиці з результатами замірів напруги і струмів у різних режимах.

1.6 Контрольні питання

1 Класифікація електричних мереж за способом заземлення нейтралі.

2 Робота трифазної мережі з ізолюваною нейтраллю в нормальному режимі (за векторною діаграмою струмів і напруг).

3 Робота трифазної мережі з ізолюваною нейтраллю при замиканні однієї фази на землю (за векторною діаграмою струмів і напруг).

4 Як черговий персонал довідається про ушкодження ізоляції однієї з фаз? Які повинні бути його дії при цьому?

5 Робота трифазної мережі з компенсованою нейтраллю в нормальному режимі.

6 Робота трифазної мережі з компенсованою нейтраллю при замиканні фази на землю.

7 Робота трифазної мережі з глухозаземленою нейтраллю в нормальному режимі й при замиканні на землю.

8 У яких мережах потрібно застосовувати компенсацію ємнісного струму замикання на землю?

9 Якою є залежність струму через місце замикання від індуктивного струму котушки (вивід формули, графік)?

10 Робота схеми трансформатора, що компенсує (трансформатор Бауха).

11 Чому вторинну обмотку силового трансформатора, що служить для підключення ДГК, бажано з'єднувати в трикутник?

12 Режим нейтралі в мережах напругою до 1000 В.

Лабораторна робота 2

Дослідження роботи багатотарифного мікропроцесорного трифазного лічильника електроенергії

2.1 Мета роботи

Дослідити роботу мікропроцесорного трифазного лічильника електроенергії АЛЬФА при різних режимах навантаження.

2.2 Загальні відомості

Лічильник АЛЬФА призначений для обліку активної і реактивної енергії в колах змінного струму, а також для використання у складі автоматизованих систем контролю та обліку електроенергії (АСКОЕ) для передачі вимірюваних параметрів на диспетчерський пункт з контролю, обліку й розподілу електричної енергії.

Принцип виміру полягає в тому, що виконується аналого-цифрове перетворення величин напруги й струму з наступним обчисленням енергії і потужності. Структурна схема лічильника АЛЬФА подана на рисунку 2.1.

Лічильник АЛЬФА складається з вимірювальних датчиків напруги й струму, основної електронної плати з мікропроцесорною схемою виміру й швидкодіючого мікроконтролера. Вимірювані величини та інші необхідні дані відображаються на дисплеї лічильника, виконаного на рідких кристалах.

Вимір струму й напруги силових кіл здійснюється за допомогою трансформаторів струму поліпшеної конструкції та резистивних схем дільника напруги.

Активна потужність обчислюється шляхом множення обмірюваних цифрових значень напруг і струмів за допомогою вимірювальної надвеликої інтегральної схеми (НВІС).

У лічильнику АЛЬФА використовується імпульсне джерело живлення, що дозволяє забезпечити широкий діапазон робочої напруги від 70 до 440 В.

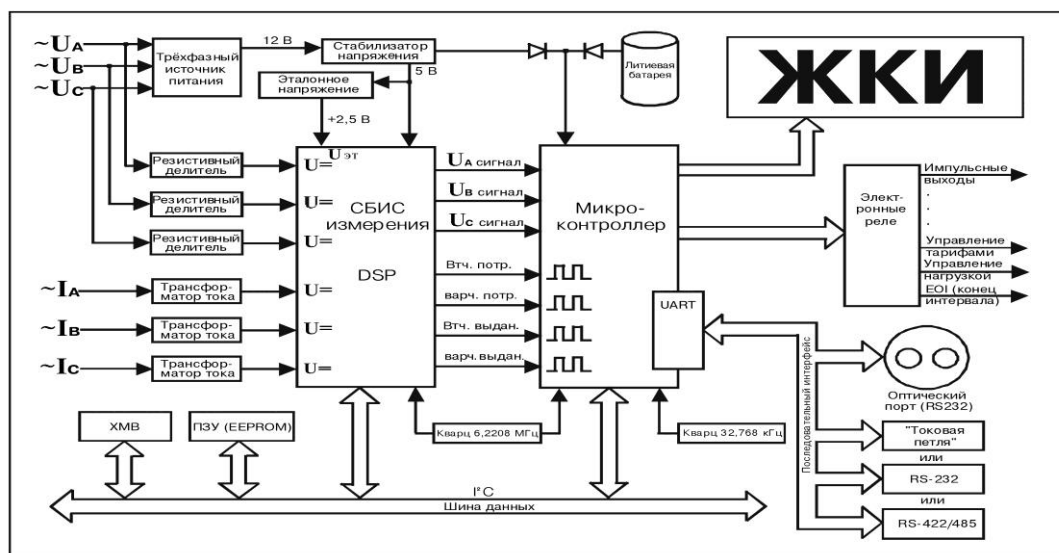


Рисунок 2.1 - Структурна схема лічильника АЛЬФА

Фазні напруги подаються безпосередньо на основну плату лічильника через резистивні дільники, використовувані для узгодження рівнів вхідних сигналів з вимірювальною НВІС. Всі

резистори - високоточні, металоплівкові з мінімальним температурним коефіцієнтом.

Первинний струм вимірюється за допомогою трансформаторів струму, спеціально розроблених відповідно до вимог лічильника АЛЬФА. Трансформатори струму мають незначну лінійну похибку і жорсткі вимоги до величини зсуву за фазою.

Два різних значення навантажувального опору використовуються у вихідному колі струму на основній електронній платі: менше значення опору встановлено для лічильників прямого вмикання й більше значення опору використовується для лічильників трансформаторного вмикання.

Лічильник АЛЬФА - універсальний лічильник з однаковою технологією виготовлення (і з однаковою точністю) для будь-якого застосування: трансформаторного або прямого вмикання.

Лічильник АЛЬФА трансформаторного вмикання працює в діапазоні струмів $I_{\text{ном}} = 1 \text{ А}$ - від 0.5 мА до 24 А, $I_{\text{ном}} = 5 \text{ А}$ - від 2.5 мА до 24 А.

Лічильник АЛЬФА прямого вмикання працює в діапазоні струмів $I_{\text{ном}} = 100 \text{ А}$ - від 20 мА до 150 А.

Мікроконтролер (НВІС), спеціально розроблений для лічильника АЛЬФА, веде весь процес виміру й обробки даних у цифровій формі, що дозволяє зберігати задану точність виміру у всьому діапазоні робочих температур від -40 до $+60^{\circ} \text{ С}$ при максимальному й мініимальному навантаженнях. Мікропроцесорне виконання лічильника АЛЬФА робить його програмувальним, що дозволяє використати лічильник із широким набором різноманітних функцій.

Програмування лічильників АЛЬФА здійснюється програмним пакетом EMFPLUS 2.30 (504MD), який поставляють на вимогу замовника. Зчитування показань з лічильника АЛЬФА забезпечується програмами EMFPLUS 2.30 (504MD), Альфамет, ALFALITE, ALFAPlus та ін.

НВІС виміру містить програмувальний цифровий сигнальний процесор з трьома вбудованими аналого-цифровими перетворювачами (АЦП). Вхідні сигнали напруги обробляються одним з АЦП, а вхідні сигнали струму - другим АЦП. Третій АЦП використовується для вибору вхідного сигналу нуля

напруги і струму. Вимір нуля напруги й струму збільшує точність вимірів при малих сигналах. Імпульси, кількість яких пропорційна вимірюваній енергії, з частотних виходів НВІС надходять на високопродуктивний мікроконтролер. Мікроконтролер здійснює функції контролю, передачі, приймання й відображення даних у лічильнику АЛЬФА.

Для рахунку часу календаря використовують кварцовий генератор. Час у лічильнику може автоматично коригуватися під час зчитування інформації за допомогою комп'ютера.

Під час перерв у подачі живлення всі ключові дані лічильника й дані про його конфігурації зберігаються в нерушій пам'яті НЗП (EEPROM) мікроконтролера. Дані багатотарифного режиму зберігаються в ОЗП мікроконтролера й ОЗП додаткової плати А+ доти, поки на лічильник надходить живлення. У період відключення основного живлення літієва батарея (якщо вона передбачена модифікацією лічильника) забезпечує живлення генератора імпульсів 32768 Гц, що підтримує роботу внутрішнього календаря для збереження правильного рахунку часу. Паралельно батареї через діод, що блокує, ввімкнено суперконденсатор. Спочатку енергія при перервах у подачі живлення надходить від суперконденсатора, що має достатню ємність для підтримки роботи пам'яті й календаря протягом декількох годин. Після розрядження конденсатора батарея забезпечує подачу живлення для зберігання даних протягом тривалого строку (до 2-3 років) залежно від температури навколишнього середовища.

Лічильник АЛЬФА складається з трьох основних блоків: корпус, електронний модуль й шасі.

Корпус лічильника АЛЬФА відрізняється за своїм зовнішнім виглядом від інших лічильників. Стабілізований ультрафіолетом сірий полікарбонатний корпус забезпечує захист від старіння і захищає від ударів і механічних пошкоджень. Прозоре віконце вварено за допомогою ультразвуку в лицьову поверхню кришки. Віконце покрите твердим і стійким до зношування покриттям. Крізь віконце чітко видні дані вимірів на дисплеї лічильника. Той самий корпус підходить для всіх типів лічильників АЛЬФА, що зменшує кількість комплектуючих деталей, спрощує збирання й наступну експлуатацію лічильників різних типів.

Модуль шасі включає основу, датчики струму, шини струму й напруги, сполучні кабелі кіл струму і напруги з основною електронною платою. Шасі лічильника складається з високоміцної литої основи, виготовленої з полікарбонатного пластику. До шасі кріпиться клемна колодка для підключення до силових кіл струму й напруги. Для лічильників прямого підключення на верхній частині клемника ставляться перемички, що з'єднують відповідні фази струму й напруги. На відміну від інших лічильників, у лічильнику АЛЬФА реалізовано велику відстань (кілька сантиметрів) між струмовводами фаз А, В і С, що дозволяє підвищити надійність і точність роботи лічильника при більших навантаженнях. До рознімачів шасі підключено також сполучні кабелі для зв'язку лічильника з різними пристроями збору даних по цифрових та імпульсних каналах. Залежно від установки лічильників АЛЬФА в три- або чотирипровідних лініях виготовляють двох- і трьохелементні лічильники АЛЬФА.

Електронний блок містить:

- основну електронну плату, що здійснює функції виміру й реєстрації;
- дисплей лічильника на рідких кристалах для відображення вимірюваних - величин та інших необхідних даних;
- елементи оптичного порту;
- знімний щиток (шильдик) з позначенням типу лічильника;
- перемикачі режимів роботи дисплея.

У корпус лічильника вбудовують додаткові електронні плати, які значно розширюють функціональні можливості лічильника. Додаткові плати підключаються до основної плати лічильника й один до одного за допомогою контактних рознімачів.

На дисплеї лічильника, наведеному на рисунку 2.2, висотою 25 мм по черзі з тривалістю від 1 до 15 с відображуються вимірювані параметри.

Послідовність і тривалість відображуваних параметрів визначається за допомогою програмного забезпечення. Можна запрограмувати для виводу на дисплей до 64 різних параметрів. РКІ функціонує і дозволяє здійснювати зчитування даних у температурних межах до - 40⁰С. РКІ може зберігатися без пошкодження при температурах до - 55⁰С.

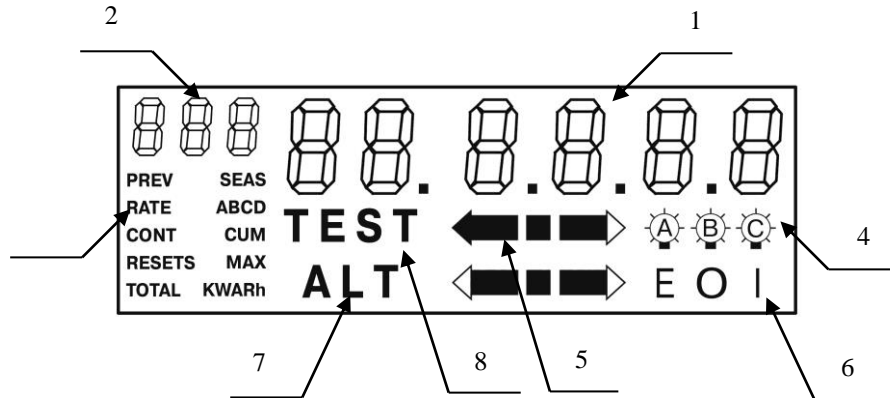


Рисунок 2.2 – Рідкокристалічний індикатор (РКІ) лічильника АЛЬФА

На дисплеї лічильника розташовані індикатори, що відображують відповідну інформацію:

1 Величини вимірюваних параметрів. РКІ показує на шести розрядах цифрові значення вимірюваних величин.

2 Цифровий індикатор. Три менші за розміром цифри показують номери параметрів, що відображуються.

3 Літерна зона індикаторів. Використовується як додаток до цифрових індикаторів для пояснення значень, що відображуються:

- ABCD - букви вказують на тарифні зони;
- CUM - сумарне значення максимальної потужності;
- KVARh - потужність або енергія в таких одиницях: k, kWh, kVA, kVAh, kVAR або kVARh;
- PREV - дані за попередній розрахунковий період або дані попереднього сезону й т. п.

Ці ідентифікатори можуть бути подані в різних комбінаціях для зазначення якого-небудь конкретного відображуваного значення, наприклад:

- RATE A kWh - кіловат-години за тарифну зону A;
- MAX k - значення максимальної потужності в кіловатах.

4 Індикатори напруг. Три індикатори, що показують наявність фаз (A, B, C), відображуються на РКІ у вигляді трьох окремих кіл з літерними позначеннями усередині. Кожне коло постійно світиться за наявності напруги. Якщо напруга відсутня, то індикатор фази мигає, вказуючи на несправність, що виникла.

5 Індикатори напрямку потоку енергії. Шість оптичних індикаторів вказують напрямок активної (верхній ряд) і реактивної або сповненої енергії (нижній ряд) залежно від модифікації лічильника. Права стрілка мигає, коли енергія споживається з мережі. Ліва стрілка мигає, коли енергія видається в мережу (вказуючи зворотний потік енергії). Стрілки індикаторів мигають з частотою, пропорційною прикладеному навантаженню.

6 Індикатор кінця інтервалу (EOI). Індикатор кінця інтервалу використовують для сигналізації про закінчення інтервалу усереднення при вимірі потужності. Індикація кінця часу інтервалу EOI виникає за 10 с до закінчення інтервалу усереднення, із закінченням цього інтервалу індикація EOI зникає.

Дисплей може бути запрограмований для роботи у двох режимах: нормальному й допоміжному.

Нормальний режим роботи

Лічильник завжди працює в нормальному режимі доти, поки не будуть натиснуті кнопки ALT або TEST або поки не буде виявлена помилка в роботі вузлів лічильника. У цьому режимі на дисплеї відображуються мінімальні дані, використовувані для комерційних розрахунків:

- споживання сумарне й по тарифних зонах активної (kWh) і реактивної (kVARh) енергії;
- час і дата споживання максимальної потужності (k) по окремих тарифних зонах;
- поточний час і дата і т. д.

Допоміжний режим (ALT)

Цей режим устанавлюється після натискання кнопки ALT. Звичайно застосовується для відображення даних, не використовуваних для комерційних розрахунків: кількість скидань показань лічильника; дата останнього зчитування; дата перепрограмування; час, дата й кількість перерв у подачі живлення; значення енергії і потужності за попередній період обліку й т. д.

Після закінчення одного повного циклу допоміжного режиму лічильник автоматично повертається до нормального режиму роботи.

Режим тестування (TEST)

Використовується звичайно для перевірки лічильника.

Режим помилки

Якщо лічильник виявляє умову, що впливає на його роботу або на схоронність накопичених даних, то він автоматично перемикається в режим помилки. Сигнали помилок і попереджень відображаються як повідомлення Err або F з відповідним кодовим позначенням, що вказує на характер помилки.

Залежно від вимог замовника лічильник АЛЬФА може бути виконаний у чотирьох основних виконаннях. Додаткові функції можуть бути отримані за допомогою установалення різних електронних плат, які підключаються до основної плати лічильника АЛЬФА.

A1D - базовий лічильник АЛЬФА.

Лічильник призначений для вимірювання активної енергії й максимальної потужності.

A1T - багатотарифний лічильник АЛЬФА.

Лічильник призначений для вимірювання активної енергії і максимальної потужності в багатотарифному режимі до 4 тарифів

A1R - лічильник АЛЬФА для вимірювання активної і реактивної енергії й потужності.

Має можливість виміру у двох варіантах:

- активна енергія і максимальна потужність у багатотарифному режимі й сумарна реактивна енергія без режиму багатотарифності;

- реактивна енергія й максимальна потужність у багатотарифному режимі й сумарна активна енергія без режиму багатотарифності.

Зміна варіанта вимірювання виконується за допомогою програмного забезпечення EMFPLUS.

A1K – лічильник повної енергії. Він ідентичний лічильнику АЛЬФА типу A1R, за винятком того, що виконується вимір повної енергії і потужності замість реактивної.

Для розширення функціональних можливостей лічильника АЛЬФА використовуються дві плати - плата A+ і плата C (плата реле).

Лічильник АЛЬФА має такі додаткові функціональні можливості:

- вимірювання активної й реактивної енергії у двох напрямках;
- запис і зберігання даних графіка навантаження;
- передача результатів вимірювання по імпульсних або цифрових каналах зв'язку.

Додаткова плата А+ використовується для додання базовим типам лічильників А1R, А1К функцій вимірювання енергії і потужності у двох напрямках, а також зберігання даних графіка навантаження (до чотирьох каналів), у тому числі і для А1Т. Плата А+ випускається в трьох модифікаціях: АТ, ОL, АL. При використанні плати А+ базові типи лічильників можуть бути модифіковані в такі типи: А1Т-О, А1R-АО, А1R-OL, А1R-AL, А1К-АО, А1К-OL, А1К-AL (буква L позначає наявність функції зберігання даних графіка навантаження, а буква А позначає функцію вимірювання енергії й потужності у двох напрямках).

А1Т-L – багатотарифний лічильник активної енергії і максимальної потужності з записом графіка активного навантаження в пам'ять лічильника.

Конструкція лічильника ідентична конструкції А1Т, за винятком того, що дозволяє записувати дані за вимірюваною потужністю для кожного інтервалу усереднення. Ці дані можуть зчитуватися підприємством щомісяця або на вимогу для забезпечення комплексного запису потужності за розрахунковий період відповідно до реального часу й дати.

А1R-L – багатотарифний лічильник активної й реактивної енергії й максимальної потужності з записом графіка активного навантаження в пам'ять лічильника.

Конструкція лічильника ідентична конструкції А1R, за винятком того, що дозволяє записувати дані з вимірюваної активної енергії для кожного інтервалу усереднення.

А1R-A – багатотарифний лічильник, що вимірює активну і реактивну енергію й максимальну потужність у двох напрямках.

Основні характеристики цього типу лічильника ідентичні типу А1R, за винятком того, що даний лічильник має додаткову здатність проводити виміри в багатотарифному режимі активної й реактивної енергії у двох напрямках.

Лічильник може бути запрограмований на кожний з наступних наборів показань. Одноквадрантні виміри в багатотарифному режимі активної й реактивної енергії й потужності:

- споживана активна енергія;
- споживана реактивна енергія (тільки один квадрант);
- середнє значення коефіцієнта потужності $\cos\phi$ останнього інтервалу усереднення активної потужності;
- середнє значення коефіцієнта потужності $\cos\phi$ за розрахунковий період.

Двоквадрантні виміри в багатотарифному режимі активної й реактивної енергії й потужності:

- споживана активна енергія;
- реактивна енергія 1-го квадранта (індуктивне навантаження);
- реактивна енергія 4-го квадранта (ємнісне навантаження);
- середнє значення коефіцієнта потужності $\cos\phi$ останнього інтервалу;
- усереднення активної потужності;
- середнє значення коефіцієнта потужності $\cos\phi$ за розрахунковий період.

Чотириквадрантні виміри в багатотарифному режимі активної і реактивної енергії й потужності:

- споживана активна енергія;
- видана активна енергія;
- реактивна енергія 1-го квадранта;
- реактивна енергія 2-го квадранта;
- реактивна енергія 3-го квадранта;
- реактивна енергія 4-го квадранту;
- реактивна потужність 1-го квадранта в момент максимального споживання активної потужності;
- реактивна потужність 1-го квадранта в момент максимального виробітку активної потужності.

A1R–AL – багатотарифний лічильник, що вимірює активну й реактивну енергію і максимальну потужність із записом у пам'ять лічильника графіків активного й реактивного навантаження у двох напрямках.

Лічильник АЛЬФА має максимальний набір функцій. Основні характеристики цього лічильника ідентичні типу А1R-А, за винятком того, що встановлена додаткова пам'ять на платі А+ дає можливість записати значення потужності за повний обліковий період.

У пам'ять можуть бути записані значення таких вимірюваних величин, як активна потужність у двох напрямках і реактивна потужність у двох напрямках.

Інтервали запису потужності можуть бути обрані з ряду 1, 3, 5, 10, 15, 30, 60 хв. Глибина запису даних у пам'ять залежить від інтервалу часу, обраного для запису, і кількості використовуваних каналів. Наприклад, при 4-канальному записі з інтервалом усереднення 30 хв дані накопичуються протягом 20 днів; з інтервалом в 5 хв - протягом 53 днів.

А1К-А – багатотарифний лічильник, що вимірює активну й повну енергію і максимальну потужність у двох напрямках.

Основні характеристики цього лічильника ідентичні типу А1К, за винятком того, що даний лічильник має можливість проводити виміри активної енергії у двох напрямках і повної енергії.

Крім того, є можливість вимірювання коефіцієнта потужності в таких режимах:

- середнє значення коефіцієнта потужності за розрахунковий період для спожитої активної енергії;
- значення коефіцієнта потужності останнього інтервалу усереднення для спожитої активної енергії;
- значення коефіцієнта потужності останнього інтервалу усереднення для виданої активної енергії.

А1К-А – багатотарифний лічильник, що вимірює активну й повну енергію і максимальну потужність із записом у пам'ять лічильника графіків активного й повного навантаження у двох напрямках.

Основні характеристики лічильника ідентичні типу А1К-А, за винятком того, що запис даних на пам'ять лічильника, зроблений лічильником А1К-А, здійснюється подібно запису в лічильнику А1R-АL.

На платі С (плата Реле) розташовано інтерфейси лічильника АЛЬФА, які використовуються для організації зв'язку лічильника з

різними пристроями збору даних по імпульсних або цифрових каналах зв'язку.

Можна замовити й установити в обрану модифікацію лічильника АЛЬФА електронну плату С з одним або більше напівпровідниковими реле, які можуть бути запрограмовані для виведення такої інформації:

- перше реле - вихід по активній спожитій енергії;
- друге реле - вихід по реактивній спожитій енергії;
- третє реле - вихід по активній виданій енергії;
- четверте реле - вихід реактивної виданої енергії.

Частота імпульсів на виході реле пропорційна вимірюваній потужності, а кількість - вимірюваній енергії (активної й реактивної у двох напрямках залежно від типу лічильника). Для збільшення перешкодозахищеності переданої інформації електронні реле виконані для струму навантаження до 100 мА з робочою напругою до 120 В. Ці реле можуть працювати як на постійному, так і на змінному струмі.

Електронна плата з двома гальванічно розв'язаними групами реле.

Плата дозволяє здійснювати зчитування інформації з лічильника АЛЬФА по імпульсних каналах на дві незалежні системи АСКОЕ.

На платі можуть бути розміщені групи по два напівпровідникових реле й по п'ять на кожен канал. Частота імпульсів на виходах реле може задаватися в широкому діапазоні за допомогою програмного забезпечення EMPFLUS, що дозволяє включати лічильники АЛЬФА практично в будь-яку існуючу систему АСКОЕ.

На платі С разом з електронними реле можуть бути розміщені також інші (цифрові) інтерфейси. «Струмова петля» з оптичною розв'язкою на 1,5 кВ дозволяє передавати по одній парі інформаційних проводів не тільки дані про вимірювану енергію й потужність, але й численну додаткову інформацію:

- час і дата початку відключення живлення або фази;
- час і дата закінчення перерви живлення або вмикання фази;
- тип лічильника й сталі, що відображують схему підключення лічильника до зовнішніх кіл;

- наявність тарифних зон і їхній добовий розподіл;
- дані самодіагностики лічильника й розшифровка цих повідомлень та інші дані.

Інтерфейс “струмова петля” використовується у випадках, де потрібні підвищені вимоги й вірогідність переданої інформації, оскільки протокол обміну передбачає видачу підтвердження правильності прийнятої та переданої інформації.

Інтерфейс “струмова петля” дозволяє передавати інформацію послідовним кодом на відстані до 150 м. Протоколи обміну за інтерфейсом “струмова петля” підтримуються апаратно-програмними засобами плати А+. Тому для можливості роботи лічильника за інтерфейсом “струмова петля” лічильник повинен мати у своєму складі плату А+ (модифікації AL, AT або OL).

Інтерфейс RS-485 дозволяє зчитувати інформацію з лічильника з відстані до 1,5 км, а також поєднувати до 31 лічильника на загальну шину без яких-небудь додаткових пристроїв.

Оптичний порт використовується для зв'язку лічильника АЛЬФА з комп'ютером для заводського калібрування, програмування, метрологічної перевірки, задавання різних сталих.

Крім того, оптичний порт використовується при знятті інформації з лічильників АЛЬФА на місці їх установлення за допомогою інженерного пульта або переносних комп'ютерів Notebook.

Кабель UNICOM PROBE являє собою пристрій зв'язку між оптичним портом лічильника й послідовним портом комп'ютера RS-232. UNICOM PROBE перетворює оптичні сигнали лічильника у рівень напруг послідовного інтерфейсу RS-232. Довжина кабелю перетворювача 2 м. Живлення пристрою може здійснюватися або від батареї 9 В, або від мережного адаптера.

На платі є додаткове п'яте реле, що використовується для керування навантаженням. Регулювання навантаження може здійснюватися в таких режимах:

- спрацьовування реле в тарифних зонах відповідно до заданої уставкою потужності (для кожної тарифної зони можна визначити уставку спрацьовування реле);
- спрацьовування реле з настанням заданої тарифної зони.

Реле регулювання навантаження може використовуватися як сигнальне у випадку перевищення потужності заданої уставки. Лічильник має програмні й апаратні засоби захисту. Кожен лічильник має свій пароль, що використовується на рівні обміну інформацією між лічильником і комп'ютером, за допомогою якого здійснюється доступ до даних лічильника і його перепрограмування.

Крім того, програмне забезпечення має свої вхідні коди, що перешкоджають роботі з програмним пакетом несанкціонованим особам.

Програмний пакет EMFPLUS 2.30 (504MD) надає три різні рівні доступу до лічильників для споживача; експлуатаційних служб; енергопостачальних організацій; ремонтних служб; енергопостачальних організацій, що мають право Держперевірки.

У конструкції лічильника забезпечується подвійне пломбування між кришкою і основою. Кришка лічильника запечатується пломбою заводу-виготівника при проведенні калібрування і тестування лічильника, а також пломбою Держстандарту при проведенні перевірки лічильників держперевіряльником.

Кришка клемника може бути опечатана додатковою пломбою при установленні лічильника службами місцевого Енергозбуту. Кришку лічильника не можна зняти, не знявши спочатку кришку клемника без порушення пломби.

Електронні вузли лічильника під керуванням його програмних засобів піддаються самодіагностиці кожні 24 години. При цьому перевіряється робота всіх основних вузлів лічильника АЛЬФА: вбудованої батареї; мікропроцесора; пам'яті; внутрішніх інтерфейсів; робота сегментів дисплея й т. д.

Виявлена несправність викликає появу на дисплеї лічильника повідомлення про помилку.

Лічильник АЛЬФА записує в пам'ять кількість всіх відключень живлення (до 9999 відключень), а також час і дату початку й кінця останнього відключення живлення. Лічильник зберігає кількість скидань потужності (до 99), які мали місце з моменту останнього перепрограмування лічильника. У пам'яті лічильника зберігається також кількість днів з моменту останнього скидання потужності, а у випадку роботи лічильника

в багатотарифному режимі й дата останнього скидання потужності. Лічильник записує загальну кількість звертань до лічильника через оптичний порт (до 99), а також останню дату перепрограмування і дату, коли які-небудь дані в самому лічильнику були змінені.

Перегляд журналу зв'язків здійснюється за допомогою програмного забезпечення EMFPLUS.

2.3 Перелік апаратури та приладів

Джерело напруги; автомат триполюсний; вимикачі; опори; котушки індуктивності; конденсатори; лічильник АЛЬФА; секундомір.

2.4 Порядок виконання роботи

1 Приєднати схему, наведену на рисунку 5.1, до лічильника АЛЬФА. Отримати дозвіл викладача на проведення вимірів.

2 За допомогою відповідних вимикачів сформувати навантаження у всіх фазах, яке має активний характер. Провести виміри кількості споживання електричної енергії упродовж визначеного часу.

3 За допомогою відповідних вимикачів сформувати навантаження у всіх фазах, яке має активно-індуктивний характер. Провести виміри кількості споживання електричної енергії упродовж визначеного часу.

4 За допомогою відповідних вимикачів сформувати навантаження у всіх фазах, яке має активно-ємнісний характер. Провести виміри кількості споживання електричної енергії упродовж визначеного часу.

5 Ввімкнути всі вимикачі й сформувати послідовне вмикання елементів схеми усіх типів в усіх фазах. Провести виміри кількості споживання електричної енергії упродовж визначеного часу.

6 Зробити висновки.

2.5 Контрольні запитання

- 1 Принцип роботи лічильника АЛЬФА.
- 2 Чим відрізняється робота лічильника АЛЬФА в разі трансформаторного вмикання від прямого вмикання?
- 3 Чому лічильник АЛЬФА випускається в кількох модифікаціях?
- 4 Які інтерфейси використані в лічильнику АЛЬФА?
- 5 У яких режимах може працювати лічильник?

Лабораторна робота 3

Дослідження пристроїв контролю стану ізоляції

3.1 Мета роботи

Набути практичних навичок при проведенні різних випробувань стану ізоляції електроустаткування систем електропостачання.

3.2 Контроль стану ізоляції в мережах з ізольованою нейтраллю

Електричні мережі напругою 6-35 кВ повинні працювати з ізольованою або заземленою через дугогасильний апарат нейтраллю.

З ізольованою нейтраллю працюють трифазні мережі, у яких величини ємнісних струмів однофазного замикання на землю не перевищують:

- 10 А в мережах напругою 35 кВ;
- 15 А в мережах напругою 15-20 кВ;
- 20 А в мережах напругою 10 кВ;
- 30 А в мережах напругою 6 кВ.

Крім того, з ізольованою нейтраллю працюють електроустановки напругою до 1000 В, до яких висуваються підвищені вимоги з безпеки (метрополітен і т. п.).

На рисунку 3.1 подана елементарна електрична система з ізольованою нейтраллю, що містить генератор, лінію електропередачі й навантаження.

Будь-яка ЛЕП, так само як і інші елементи системи, має певну ємність відносно землі. Оскільки ємність лінії електропередачі значно перевищує ємності інших елементів СЕП, то останніми можна знехтувати.

Для зручності аналізу можна замінити рівномірну розподілену уздовж лінії ємність на зосереджену загальну ємність, прикладену до середини лінії.

Ємнісні струми I_{co} кожної фази в нормальному режимі роботи рівні між собою, тобто

$$I_{co(A)} = I_{co(B)} = I_{co(C)}. \quad (3.1)$$

Сумарні струми в кожній фазі, що представляють струми генератора, дорівнюють

$$\begin{cases} I_{rA} = I_{HA} + I_{co(A)} \\ I_{rB} = I_{HB} + I_{co(B)} \\ I_{rC} = I_{HC} + I_{co(C)} \end{cases} \quad (3.2)$$

де I_{HA} , I_{HB} , I_{HC} - струми навантаження відповідних фаз.

Векторна діаграма напруг і струмів для нормального режиму наведена на рисунку 3.2.

Із векторної діаграми рисунка 3.2

$$\begin{cases} I_{HA} + I_{HB} + I_{HC} = 0 \\ I_{co(A)} + I_{co(B)} + I_{co(C)} = 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

Таким чином, у нормальному режимі струму в землі немає.

Вплив ємності виявляється лише в тому, що кут зсуву фаз між напругою й струмом у генератора менше, ніж у навантаження, тобто при нормальному режимі наявність ємності ліній електропередачі сприяє поліпшенню $\cos \varphi$ системи.

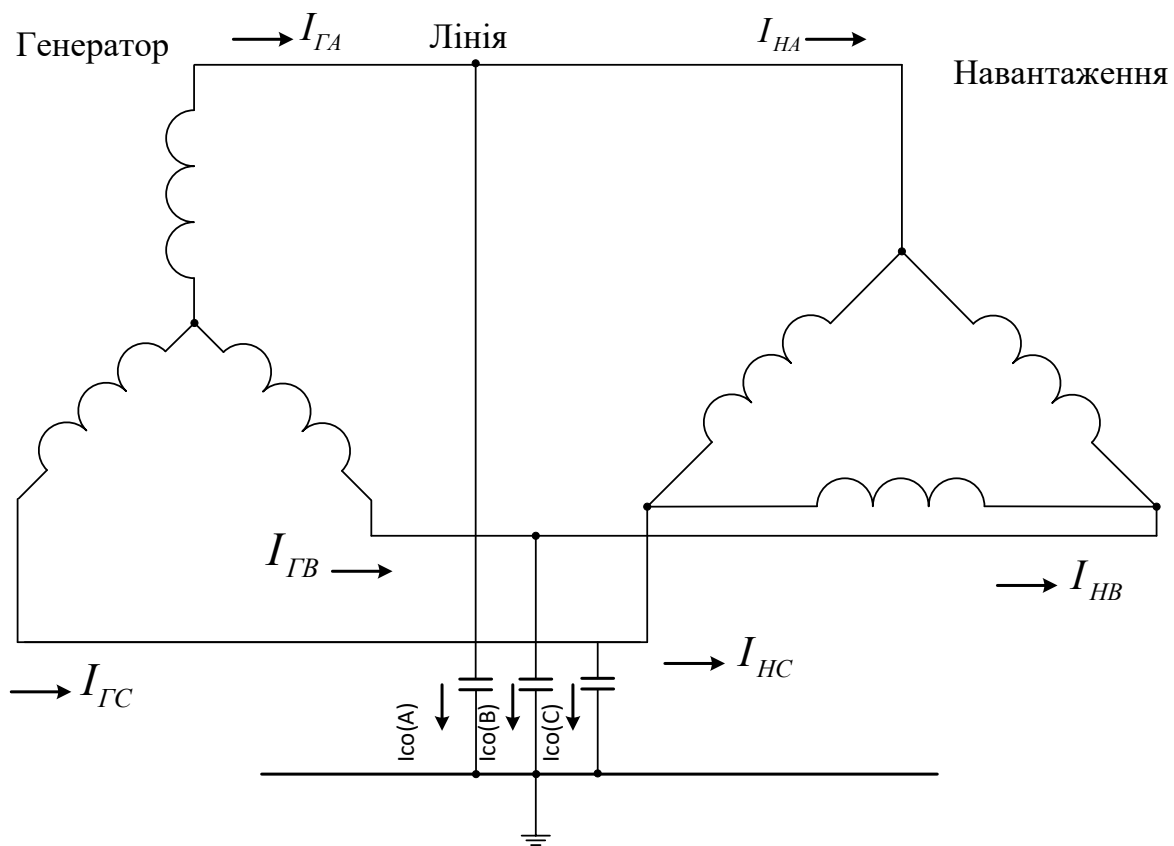


Рисунок 3.1 – Схема системи з ізольованою нейтраллю

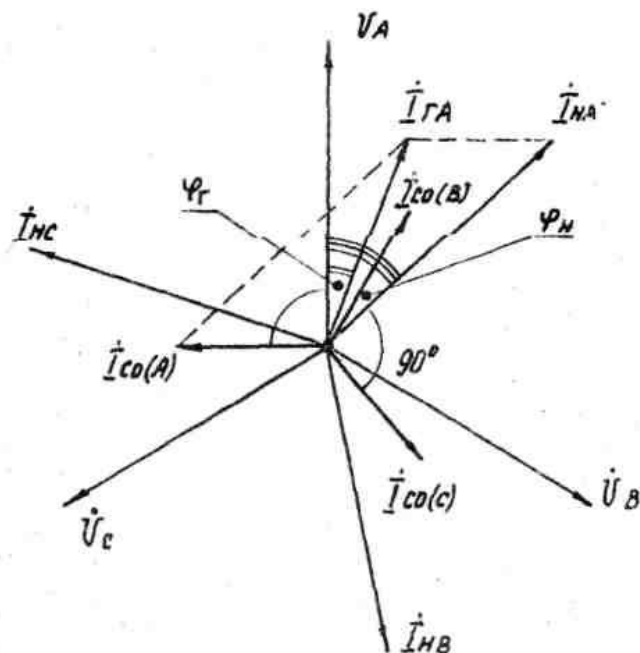


Рисунок 3.2 – Векторна діаграма напруг і струмів для нормального режиму

Якщо в одній з фаз, наприклад у фазі С, відбулося глухе замикання на землю, то напруга цієї фази відносно землі стане рівною нулю, а в неушкоджених - збільшиться в 3 рази, тобто до лінійної напруги.

Це пояснюється тим, що при однофазному замиканні на землю в місці пошкодження виникають напруги нульової послідовності U_0 , які у всіх трьох фазах рівні по величині й мають однаковий напрямок, протилежний вектору напруги ушкодженої фази. При глухому замиканні на землю вектор напруги нульової послідовності дорівнює по величині вектору фазної напруги падіння, а при замиканні на землю через перехідний опір - менше від фазного.

З векторної діаграми (рисунок 3.3) видно, що при глухому замиканні фази С на землю

$$v' = v'_B = \sqrt{3 \cdot v_A},$$

$$v'_C = 0.$$

Неважко переконатися, що лінійні напруги при однофазному замиканні на землю не змінюються, тобто

$$\dot{v}'_{AB} = \dot{v}_{AB},$$

$$\dot{v}'_{BC} = \dot{v}_{BC},$$

$$\dot{v}'_{AC} = \dot{v}_{AC}.$$

Таким чином, живлення споживачів, включених на лінійну напругу мереж з ізольованою нейтраллю, не порушується при однофазних замиканнях на землю.

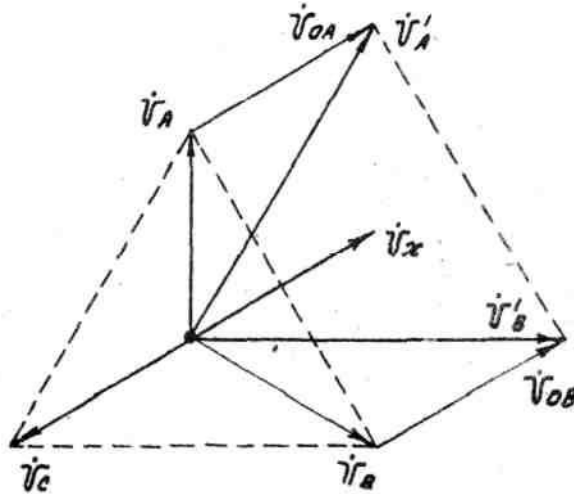


Рисунок 3.3 – Векторна діаграма при глухому замиканні фази С на землю

При замиканні фази С на землю ємність цієї фази шунтується й стає рівною нулю. Що стосується фаз А та В, то внаслідок підвищення напруг цих фаз відносно землі в 3 рази ємнісні струми в них також зростуть у 3 рази (рисунок 3.4, а).

$$\begin{cases} \dot{I}_{CA} = \sqrt{3} \cdot \dot{I}_{co(A)} \\ \dot{I}_{CB} = \sqrt{3} \cdot \dot{I}_{co(B)} \\ \dot{I}_{CC} = 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

Тепер сума значень всіх струмів не буде дорівнювати нулю й у землі з'явиться струм. Побудуємо векторну діаграму напруг і струмів для розглянутого випадку (рисунок 3.4, б). З неї видно, що струм, який проходить у землі й через точку замикання, дорівнює

$$\dot{I}_c = \sqrt{3} \cdot \dot{I}_{CA} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{3} \cdot \dot{I}_{co} = 3 \cdot \dot{I}_{co}. \quad (3.5)$$

Тут замість \dot{I}_{CA} можна також підставити \dot{I}_{CB} . Таким чином, ємнісний струм при замиканні однієї фази на землю дорівнює потрійному значенню ємнісного струму однієї фази при нормальному режимі.

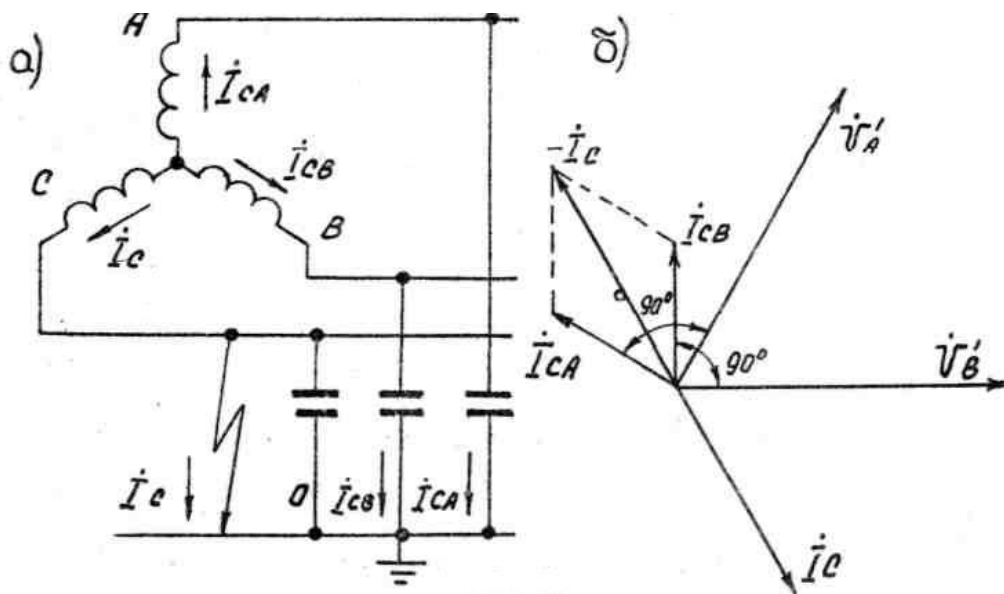
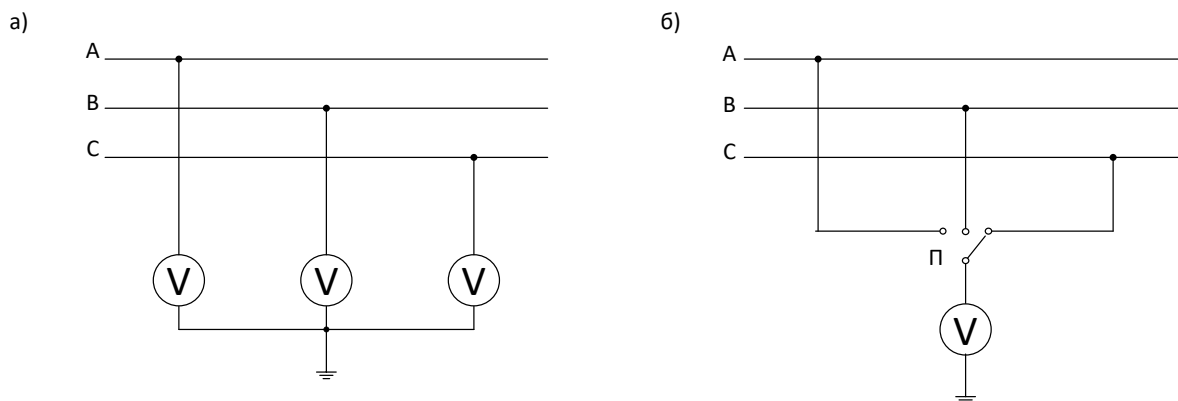


Рисунок 3.4 – Схема замикання на землю фази С (а) та векторна діаграма (б)

При значних струмах замикання на землю це призводить до того, що в місці замикання виникає перемежована дуга, що періодично гасне й знову загоряється при певній величині ємнісного струму. Ця дуга викликає наведення в контурі, що містить активні, індуктивні опори і ємності, значні е.р.с. При цьому виникають перенапруги, що перевищують номінальну напругу системи у 2,5 - 3 рази, природно, що робота системи при таких замиканнях на землю, що перевищують зазначені вище величини, не допускається.

У системах з малими струмами замикання на землю ушкодження, ізоляції однієї фази безпосередньо не виявляються, оскільки, як показано вище, ушкоджена лінія й споживачі, ввімкнені на лінійну напругу, продовжують нормально працювати. Тим часом тривала робота мережі з ізолюваною нейтраллю при однофазному замиканні на землю неприпустима, тому що може відбутися пробій ізоляції в неушкоджених фазах. Тому в мережах з ізолюваною нейтраллю обов'язково передбачаються спеціальні пристрої, так звані пристрої контролю ізоляції, за допомогою яких здійснюється сигналізація появи однофазного замикання на землю. Ці пристрої являють собою найпростіший захист від однофазних замикань на землю.

У мережах напругою до 1000 В для контролю стану ізоляції приймаються три або один вольтметри (рисунок 3.5). У першому випадку (рисунок 3.5, а) три однакові вольтметри з'єднують у зірку, нейтраль якої заземлюють. У нормальному режимі роботи мережі вольтметри показують фазні напруги.



| | |
|------------------------------------|-----------------------------------|
| а – підключення трьох вольтметрів; | б – підключення одного вольтметра |
|------------------------------------|-----------------------------------|

Рисунок 3.5 – Підключення вольтметрів у мережах напругою до 1000 В

При глухому замиканні однієї з фаз на землю показання вольтметра ушкодженої фази стає рівним нулю, а показання двох інших вольтметрів збільшуються в 3 рази, тобто до лінійної напруги.

Заземлення нейтралі вольтметрів є необхідною умовою роботи пристрою, тому що в іншому випадку при однофазному замиканні на землю показання вольтметрів порівняно з нормальним режимом не змінюються.

Вольтметр, включений за схемою на рисунку 3.5, б, у нормальному режимі роботи мережі буде показувати нуль у всіх положеннях перемикача П. За наявності однофазного замикання на землю вольтметр в ушкодженій фазі покаже нуль, у неушкоджених фазах - лінійну напругу. В установках напругою вище 1000 В вольтметри контролю ізоляції вмикаються через трансформатори напруги. Для цього в установках 6, 10 кВ застосовуються трифазні п'ятистріжневі трансформатори напруги НТМИ. Схема з'єднання обмоток НТМИ й вмикання

приладів для контролю ізоляції наведена на рисунку 3.6, а. Трансформатор має три трифазні обмотки, розташовані на трьох робочих стрижнях: одну первинну й дві вторинні.

Первинна обмотка з'єднується в зірку з заземленою нейтраллю.

Одна вторинна обмотка з'єднується за цією самою схемою й використовується для живлення вольтметрів контролю ізоляції й паралельних котушок інших вимірювальних приладів і реле захисту. Друга вторинна обмотка з'єднується в розімкнутий трикутник і використовується для звукової (світлової) сигналізації однофазного замикання на землю.

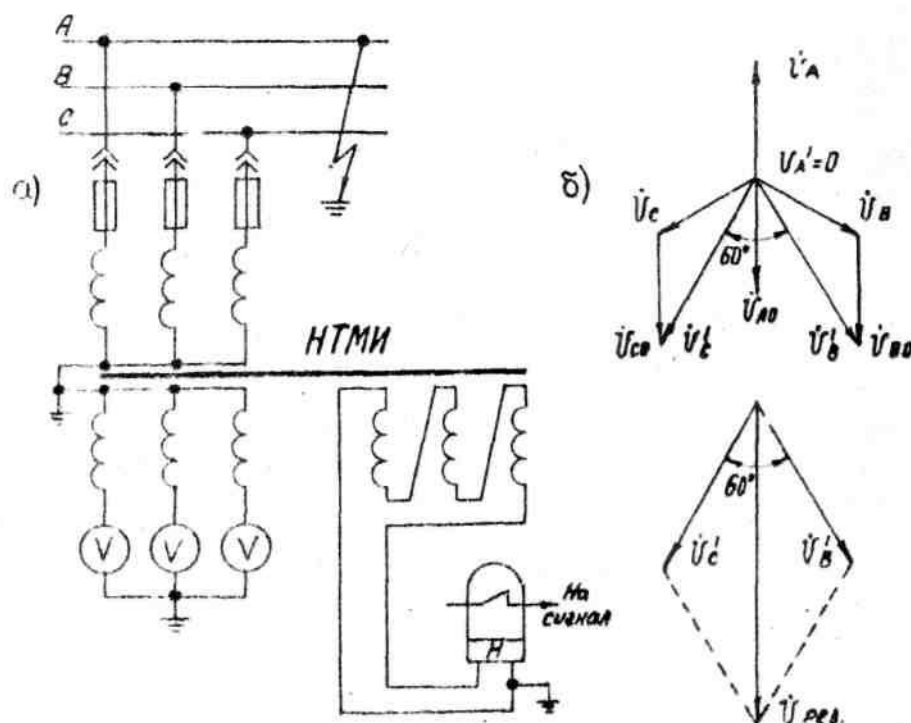


Рисунок 3.6 – Схема з'єднання обмоток НТМИ й вмикання приладів для контролю ізоляції

У нормальному режимі напруга на кінцях розімкнутого трикутника дорівнює нулю внаслідок симетрії фазних напруг. При замиканні однієї фази на землю зазначена напруга підвищується до $3U_{\phi}$ за рахунок появи напруги нульової послідовності (рисунок 3.6, б). Звичайна кількість витків цієї обмотки беруть такою, щоб на виводах трикутника при замиканні на землю одержати лінійну напругу.

Заземлення нейтралі первинної обмотки необхідно для правильної роботи схеми. Тільки в цьому випадку при замиканні, наприклад, фази А на землю первинна обмотка цієї фази виявляється замкнутою через землю накоротко, і магнітний потік у сердечнику цієї фази буде дорівнювати нулю. Отже, у вторинній обмотці струм, що намагнічує, буде дорівнювати нулю й вольтметр, включений у фазу А, покаже нуль. Магнітні потоки у фазах В і С збільшаться й вольтметри цих фаз покажуть лінійну напругу. Якби нейтраль первинної обмотки не була заземлена, розподіл магнітних потоків у робочих стрижнях при замиканні однієї з фаз на землю залишився б таким самим, як і при нормальному режимі, і вольтметри не змінили б своїх показань.

Нейтраль і один з кінців вторинних обмоток заземлюють за правилами електробезпеки на випадок пробою ізоляції між обмотками високої й низької напруг. З метою заходів з електробезпеки заземлюється й нейтральна точка вольтметрів.

Для пристроїв контролю стану ізоляції не можна застосовувати трифазні тристрижневі трансформатори напруги, тому що при тривалому однофазному замиканні на землю вони будуть сильно перегріватися й виходити з ладу. Причиною перегріву трансформатора є відсутність магнітопроводу для магнітних потоків нульової послідовності, що виникають у первинній обмотці при однофазному замиканні на землю (рисунок 3.7, а).

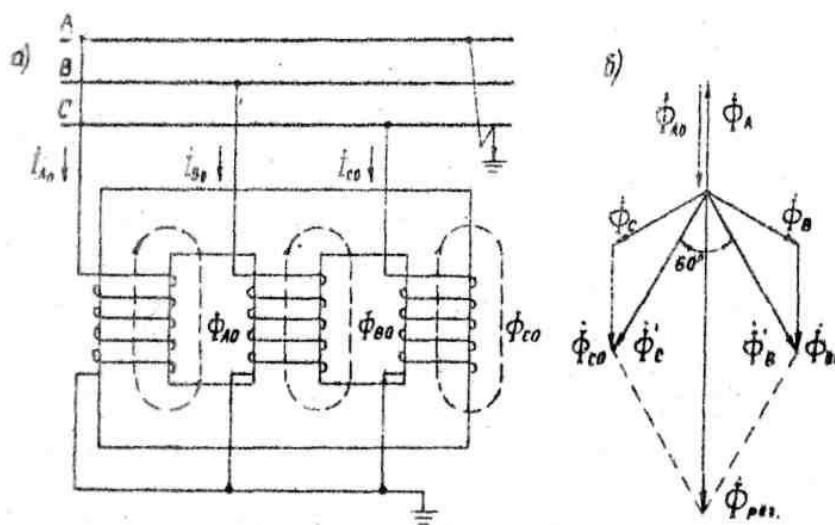


Рисунок 3.7 – Схема магнітопроводу трьохстрижневих трансформаторів

Магнітні потоки нульової послідовності, як і струми нульової послідовності, рівні по величині й збігаються по фазі. Тому вони не зможуть замкнутися через стрижні сусідніх фаз магнітопроводу й змушені замикатися через повітря й сталевий кожух трансформатора, що сильно розігрівається. Крім того, для проведення магнітного потоку через повітря потрібна більша сила, що намагнічує. У зв'язку з цим струми нульової послідовності, а отже, і повні струми у всіх трьох фазах мають значну величину, викликаючи перегрів обмоток трансформатора.

У трифазних п'ятистрижневих трансформаторів напруга подібного перегріву обмоток і кожуха не відбувається, оскільки в них є вільні крайні стрижні для замикання результуючого магнітного потоку при однофазному замиканні на землю $\Phi_{рез}$, рівного потрійному значенню потоку однієї фази при нормальному режимі (рисунок 3.7, б).

Щоб виключити можливість застосування для контролю стану ізоляції трифазних трьохстержневих трансформаторів, нейтральна точка високовольної обмотки не виводиться на кришку трансформатора.

Для контролю стану ізоляції можуть застосовуватися також три однофазні трансформатори напруги (рисунок 3.8), оскільки в них кожна фаза має свій сердечник і підсумовування магнітного потоку не відбувається. Призначення заземлень обмоток і приладів таке саме, як і для НТМИ.

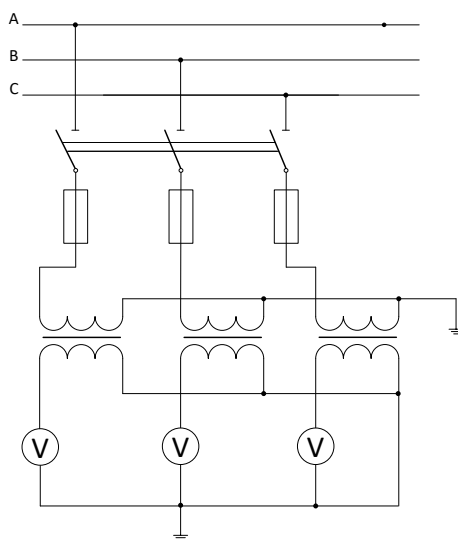


Рисунок 3.8 – Схема контролю стану з трьох однофазних трансформаторів

На напруги 20-35 кВ з метою контролю стану ізоляції виготовляються тільки однофазні трансформатори напруги.

3.3 Завдання та вказівки на виконання лабораторної роботи

При підготовці та у процесі виконання лабораторної роботи студенти повинні:

- 1) вивчити загальні відомості контролю стану ізоляції в мережах з ізольованою нейтраллю;
- 2) ознайомитися з устаткуванням лабораторної установки, записати дані вимірювальних приладів і трансформаторів напруги;
- 3) зробити зовнішній огляд устаткування лабораторної установки й перевірити справність кіл вольтметрів і трансформаторів напруги;
- 4) дослідити роботу пристрою для візуального контролю стану ізоляції в мережах з ізольованою нейтраллю:
 - у нормальному режимі;
 - при глухому замиканні на землю;
 - при замиканні на землю однієї з фаз через перехідні опори;
- 5) перевірити роботу схеми звукової сигналізації однофазного замикання на землю;
- б) оформити звіт по роботі.

3.4 Опис лабораторної установки

Лабораторна установка дозволяє зібрати дві схеми для контролю стану ізоляції в мережах змінного струму:

- а) схему для візуального контролю стану ізоляції в мережах з ізольованою нейтраллю (рисунок 3.9);
- б) схему для звукової сигналізації однофазного замикання на землю (рисунок 3.10).

У комплект лабораторної установки входять:

- лабораторний стіл;
- три однофазних трансформатори напруги 380/100 В типу НОСВ-0,5 (класу точності 0,5);
- трифазний трансформатор 380/380 В для перетворення трифазної мережі з заземленою нейтраллю (мережа лабораторії) у мережу з ізольованою нейтраллю;

- три амперметри типу Э59 (0÷5А) для контролю ємнісних струмів.

На вертикальній панелі лабораторного стола змонтовано:

- пакетний вимикач Р для підключення установки до мережі;
- три вольтметри типу Э377 (0÷150 В) для візуального контролю стану ізоляції;

- вольтметр типу Э377 (0÷250 В) для контролю напруги на вході реле РН;

- реле максимальної напруги ЭН 524/200;

- вимикачі Р1 і Р2 для створення штучного замикання на землю в одній з фаз мережі;

- клеми вольтметрів, реле напруги, трансформаторів напруги (ТН1, ТН2, ТН3), ємностей, що імітують ємність кабельних ліній (С1, С2, С3), опору R₀, джерела змінного струму (фази А, В, С);

- лампа Л1 для світлової сигналізації про появу однофазного замикання на землю.

3.5 Порядок виконання лабораторної роботи

1 Дослідження схеми візуального контролю стану ізоляції мереж змінного струму з ізольованою нейтраллю.

Зібрати схему, зображену на рисунку 3.9.

Ввімкнути вимикач Р.

Зняти показання вольтметрів V1, V2, V3, амперметрів А1, А2, А3 у нормальному режимі; виміряти лінійні напруги.

Вимикачем Р₂ замкнути одну з фаз на землю, записати показання приладів при глухому замиканні. Вимкнути вимикач Р₂.

Вимикачем Р1 замкнути одну з фаз на землю через опір R₀, зняти показання приладів.

По обмірюваних фазних напругах побудувати векторні діаграми й визначити лінійні напруги. Результати дослідів занести в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати дослідів контролю стану ізоляції

| Фазні і лінійні напруги | | Фаза А | Фаза В | Фаза С |
|------------------------------------|--------------------------|--------|--------|--------|
| Нормальний режим | $U_{\text{ф}}, \text{В}$ | | | |
| | $U_{\text{л}}, \text{В}$ | | | |
| | $I_{\text{с}}, \text{А}$ | | | |
| Глухе однофазне замикання на землю | $U_{\text{ф}}, \text{В}$ | | | |
| | $U_{\text{л}}, \text{В}$ | | | |
| | $I_{\text{с}}, \text{А}$ | | | |
| Замикання фази на землю | $U_{\text{ф}}, \text{В}$ | | | |
| | $U_{\text{л}}, \text{В}$ | | | |

2 Дослідження схеми звукової сигналізації однофазного замикання на землю.

Зібрати схему, зображену на рисунку 3.10.

Ввімкнути схему під напругу й перевірити її роботу в нормальному режимі роботи мережі (ввімкнувши вимикач Р).

Вимикачем Р1 замкнути одну з фаз на землю, перевірити роботу світлової й звукової сигналізації, зняти показання вольтметра.

Побудувати векторну діаграму й по ній визначити напругу спрацьовування реле.

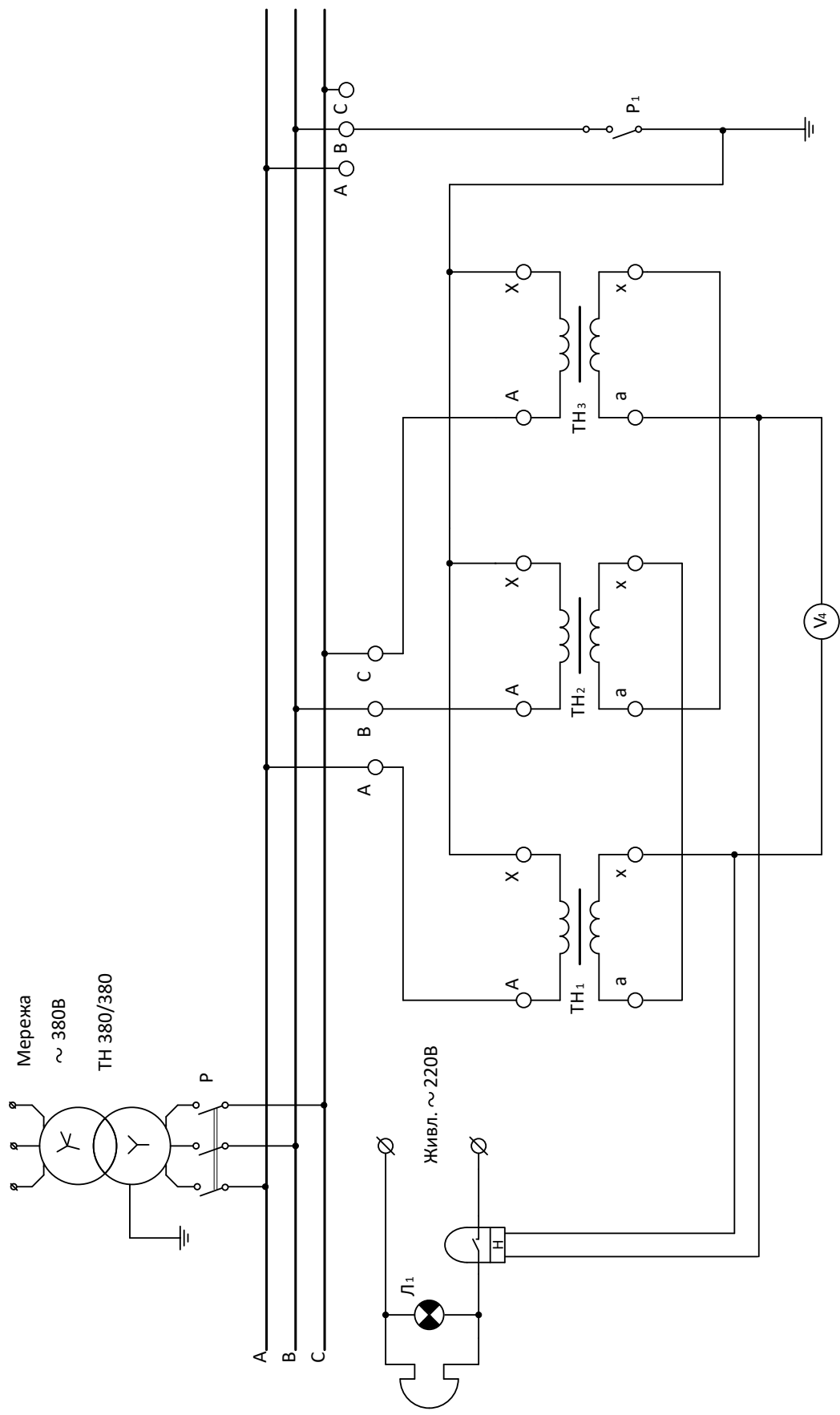


Рисунок 3.10 – Схема для звукової сигналізації однофазного замикання на землю

3.6 Зміст звіту

Звіт по роботі повинен містити:

- основні дані трансформаторів напруги;
- схеми (рисунок 3.9 і 3.10);
- результати вимірів і розрахунків;
- векторні діаграми нормального режиму, однофазного глухого замикання, замикання на землю через перехідний опір; векторну діаграму для визначення напруги спрацьовування $U_{рез}$ реле;
- короткі висновки по роботі.

3.7 Контрольні питання

1 У яких мережах і чому застосовуються пристрої контролю стану ізоляції?

2 Що являє собою пристрій контролю ізоляції в установках напругою до 1000 В?

3 Які трансформатори напруги застосовуються для контролю стану ізоляції в електричних мережах напругою вище 1000 В?

4 Яке призначення заземлень нейтралей обмоток вимірювальних трансформаторів?

5 Чому не можна застосовувати трифазні тристиржневі трансформатори напруги для контролю стану ізоляції?

6 Як працюють пристрої контролю стану ізоляції в мережах з ізольованою нейтраллю?

Лабораторна робота 4

Дослідження основних співвідношень між струмами і напругами при несиметричному короткому замиканні

4.1 Мета роботи:

- опанувати основні положення методу симетричних складових;
- виконати дослідження співвідношень між струмами й напругами при різних видах несиметричного короткого замикання;
- зняти та побудувати векторні діаграми струмів і напруг для заданого виду несиметричного короткого замикання, а також зробити порівняльну оцінку величини струму різних видів короткого замикання.

4.2 Загальні відомості

Несиметричним коротким замиканням називається таке замикання, при якому фази системи не будуть перебувати в однакових умовах роботи.

У трифазних системах із заземленою нейтраллю мають місце однофазне, двофазне й трифазне на землю коротке замикання в одній точці.

Для розрахунку несиметричних режимів у лінійних трифазних колах, коли е.р.с., напруги й струми у фазах відрізняються по величині й фазі, застосовується метод симетричних складових. Суть методу полягає в тому, що будь-яку несиметричну трифазну систему е.р.с., напруг і струмів можна представити в загальному випадку у вигляді суми трьох симетричних трифазних систем прямої, зворотної й нульової послідовностей, які називаються симетричними складовими даних несиметричних трифазних систем. Цей метод дає можливість звести складне завдання розрахунку несиметричного режиму до більш простого завдання розрахунку того самого кола при симетричному режимі, тому що симетричні складові струмів зв'язані законом Ома з симетричними складовими напруг тільки однойменної послідовності.

Для побудови векторних діаграм струмів і напруг у точці несиметричного короткого замикання приймемо такі позначення:

$x_{\Sigma 1}$, $x_{\Sigma 2}$, $x_{\Sigma 0}$ – результуючі опори схем заміщення прямої, зворотної й нульової послідовностей;

E_2 – е.р.с. еквівалентного синхронного генератора, що у схемі заміщення прямої послідовності замінює всі генератори, що живлять в електричній системі точку короткого замикання;

$U^{(n)}_{KA1}$, $U^{(n)}_{KA2}$, $U^{(n)}_{KA0}$ – фазні напруги в точці несиметричного короткого замикання;

$U^{(n)}_{KA}$, $U^{(n)}_{KB}$, $U^{(n)}_{KC}$ – складові напруг прямої, зворотної й нульової послідовностей для фази А в точці несиметричного короткого замикання;

$I^{(n)}_{KA}$, $I^{(n)}_{KB}$, $I^{(n)}_{KC}$ – фазні струми в точці несиметричного короткого замикання;

$I^{(n)}_{KA1}$, $I^{(n)}_{KA2}$, $I^{(n)}_{KA0}$ – складові струми фази А прямої, зворотної й нульової послідовностей у точці короткого замикання;

n - символ, що позначає вид короткого замикання;

$n = 1$ - символ, що позначає однофазне коротке замикання;

$n = 2$ - символ, що позначає двофазне коротке замикання;

$n = 1,1$ - символ, що позначає двофазне коротке замикання на землю;

$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ – оператор повороту векторів на 120° проти напрямку руху годинникової стрілки;

$a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$ – оператор повороту векторів на 240° проти напрямку руху годинникової стрілки.

Для більш наочної ілюстрації умов, що характеризують будь-який вид несиметричного короткого замикання, будемо припускати, що коротке замикання відбувається не в дійсно заданій точці, а на деякому відгалуженні від не (рисунок 4.1). Опір проводів цього відгалуження будемо приймати рівним нулю. Струми в проводах зазначеного відгалуження будуть струмами у відповідних фазах у точках короткого замикання.

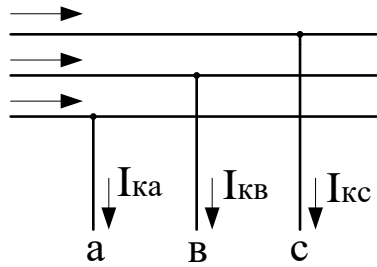


Рисунок 4.1 - Визначення струмів короткого замикання у відгалуженні

Припустимо, що для заданої точки короткого замикання схеми заміщення різних послідовностей уже приведені до найпростішого вигляду й розраховані їхні результуючі опори $x_{\Sigma 1}, x_{\Sigma 2}, x_{\Sigma 0}$.

Припустимо також, що в режимі, що передує короткому замиканню, електричне коло не навантажене і струми у фазах дорівнюють нулю. Застосування методу симетричних складових дозволяє записати такі розкладання струмів і напруг у точці короткого замикання на їхні симетричні складові:

$$\begin{aligned} \dot{U}^{(n)}_{KA} &= \dot{U}^{(n)}_{KA1} + \dot{U}^{(n)}_{KA2} + \dot{U}^{(n)}_{KA0}; \\ \dot{U}^{(n)}_{KB} &= \dot{U}^{(n)}_{KB1} + \dot{U}^{(n)}_{KB2} + \dot{U}^{(n)}_{KB0}; \\ \dot{U}^{(n)}_{KC} &= \dot{U}^{(n)}_{KC1} + \dot{U}^{(n)}_{KC2} + \dot{U}^{(n)}_{KC0}. \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}^{(n)}_{KA} &= \dot{I}^{(n)}_{KA1} + \dot{I}^{(n)}_{KA2} + \dot{I}^{(n)}_{KA0}; \\ \dot{I}^{(n)}_{KB} &= \dot{I}^{(n)}_{KB1} + \dot{I}^{(n)}_{KB2} + \dot{I}^{(n)}_{KB0}; \\ \dot{I}^{(n)}_{KC} &= \dot{I}^{(n)}_{KC1} + \dot{I}^{(n)}_{KC2} + \dot{I}^{(n)}_{KC0}. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Використовуючи оператори повороту a і a^2 , напруги й струми фаз можна виразити через симетричні складові фази, опинившись в особливому режимі, що відрізняється від режиму роботи двох інших фаз. Так, наприклад, при однофазному короткому замиканні - це фаза замкнута; при двофазному або трифазному короткому замиканні на землю - неущкоджена фаза. З огляду на це вирази (4.1), (4.2) можна записати в такому вигляді:

$$\begin{aligned}
\dot{U}^{(n)}_{KA} &= \dot{U}^{(n)}_{KA1} + \dot{U}^{(n)}_{KA2} + \dot{U}^{(n)}_{KA0}; \\
\dot{U}^{(n)}_{KB} &= a^2 \dot{U}^{(n)}_{KA1} + a \dot{U}^{(n)}_{KA2} + \dot{U}^{(n)}_{KA0}; \\
\dot{U}^{(n)}_{KC} &= a \dot{U}^{(n)}_{KA1} + a^2 \dot{U}^{(n)}_{KA2} + \dot{U}^{(n)}_{KA0}.
\end{aligned} \tag{4.3}$$

$$\begin{aligned}
\dot{I}^{(n)}_{KA} &= \dot{I}^{(n)}_{KA1} + \dot{I}^{(n)}_{KA2} + \dot{I}^{(n)}_{KA0}; \\
\dot{I}^{(n)}_{KA} &= a^2 \dot{I}^{(n)}_{KA1} + a \dot{I}^{(n)}_{KA2} + \dot{I}^{(n)}_{KA0}; \\
\dot{I}^{(n)}_{KA} &= a \dot{I}^{(n)}_{KA1} + a^2 \dot{I}^{(n)}_{KA2} + \dot{I}^{(n)}_{KA0}.
\end{aligned} \tag{4.4}$$

Струми й напруги симетричних складових можна виразити через фазні струми й напруги в точці несиметричного короткого замикання шляхом нескладних перетворень виразів (4.3), (4.4). Ці вирази одержали назву формул розкладання

$$\begin{aligned}
\dot{U}^{(n)}_{KA1} &= \frac{1}{3}(\dot{U}^{(n)}_{KA} + a \dot{U}^{(n)}_{KB} + a^2 \dot{U}^{(n)}_{KC}); \\
\dot{U}^{(n)}_{KA2} &= \frac{1}{3}(\dot{U}^{(n)}_{KA} + a^2 \dot{U}^{(n)}_{KB} + a \dot{U}^{(n)}_{KC}); \\
\dot{U}^{(n)}_{KA0} &= \frac{1}{3}(\dot{U}^{(n)}_{KA} + \dot{U}^{(n)}_{KB} + \dot{U}^{(n)}_{KC}).
\end{aligned} \tag{4.5}$$

$$\begin{aligned}
\dot{I}^{(n)}_{KA1} &= \frac{1}{3}(\dot{I}^{(n)}_{KA} + a \dot{I}^{(n)}_{KB} + a^2 \dot{I}^{(n)}_{KC}); \\
\dot{I}^{(n)}_{KA2} &= \frac{1}{3}(\dot{I}^{(n)}_{KA} + a^2 \dot{I}^{(n)}_{KB} + a \dot{I}^{(n)}_{KC}); \\
\dot{I}^{(n)}_{K0} &= \frac{1}{3}(\dot{I}^{(n)}_{KA} + \dot{I}^{(n)}_{KB} + \dot{I}^{(n)}_{KC}).
\end{aligned} \tag{4.6}$$

На підставі другого закону Кірхгофа для замкнутих електричних кіл, що відповідають схемам заміщення прямої, зворотної й нульової послідовностей, можна записати

$$\begin{aligned}
\dot{U}^{(n)}_{K1} &= \dot{E}_\Sigma - \dot{I}^{(n)}_{K1} \cdot x_{\Sigma 1}; \\
\dot{U}^{(n)}_{K2} &= -\dot{I}^{(n)}_{K2} \cdot x_{\Sigma 2}; \\
\dot{U}^{(n)}_{K0} &= -\dot{I}^{(n)}_{K0} \cdot x_{\Sigma 0}
\end{aligned} \tag{4.7}$$

Рівності (4.7) виражають принцип незалежності симетричних складових, що полягає в тому, що:

- реальне електричне коло подається у вигляді трьох самостійних електричних кіл, по кожному з яких протікає струм тільки однієї послідовності;

- струм тієї або іншої послідовності, протікаючи по електричному колу, створює спадання напруги лише своєї послідовності й не може створити спадання напруги інших послідовностей.

4.3 Однофазне коротке замикання

Короткому замиканню однієї фази (наприклад, фази А) на землю (рисунок 4.2), відповідають такі початкові умови:

$$\begin{aligned}\dot{U}^{(1)}_{KA} &= 0; \\ \dot{I}^{(1)}_{KB} &= 0; \\ \dot{I}^{(1)}_{KC} &= 0.\end{aligned}\tag{4.8}$$

тобто фазна напруга замкнутої фази дорівнює нулю, а струми в неушкоджених фазах відсутні. Застосовуючи першу з умов (4.8) до першої рівності (4.3), одержимо

$$\dot{U}^{(n)}_{KA1} = -(\dot{U}^{(1)}_{KA2} + \dot{U}^{(1)}_{KA0}).\tag{4.9}$$

Це означає, що складові напруги зворотної й нульової послідовностей ушкодженої фази при однофазному короткому замиканні врівноважують складові напруги прямої послідовності. При цьому напрямок вектора напруги прямої послідовності протилежний напрямку вектора зворотної й нульової послідовності.

Застосовуючи дві останні умови (4.8) до рівностей (4.6), будемо мати

$$\dot{I}^{(1)}_{KA1} = \dot{I}^{(1)}_{KA2} = \dot{I}^{(1)}_{KA0} = \frac{1}{3}\dot{I}^{(1)}_{KA}.\tag{4.10}$$

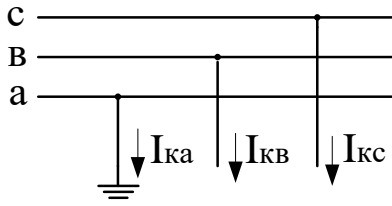


Рисунок 4.2 – Однофазне коротке замикання

Величину струму прямої послідовності при однофазному замиканні на землю можна визначити шляхом підстановки у вираз (4.9) значень \dot{U}_{KA1} , \dot{U}_{KA2} з виразів (4.7) з урахуванням рівності (4.10):

$$\dot{I}^{(1)}_{KA1} = \frac{\dot{E}_{A\Sigma}}{j(x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0})}. \quad (4.11)$$

Симетричні складові напруг у місці короткого замикання, виражені через сумарні реактивності й струм прямої послідовності, за виразами (4.7), (4.9) мають вигляд

$$\begin{aligned} \dot{U}^{(1)}_{K0} &= -jx_{\Sigma 0} \dot{I}^{(1)}_{KA1}; \\ \dot{U}^{(1)}_{KA2} &= -jx_{\Sigma 2} \dot{I}^{(1)}_{KA1}; \\ \dot{U}^{(1)}_{KA1} &= -j(x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}) \dot{I}^{(1)}_{KA1}. \end{aligned} \quad (4.12)$$

Фазні (відносно землі) напруги в місці короткого замикання дорівнюють

$$\begin{aligned} \dot{U}^{(1)}_{KB} &= a^2 \dot{U}^{(1)}_{KA1} + a \dot{U}^{(1)}_{KA2} + \dot{U}^{(1)}_{K0} = j[(a^2 - a)x_{\Sigma 2} + (a^2 - 1)x_{\Sigma 0}] \dot{I}^{(1)}_{KA1}; \\ \dot{U}^{(1)}_{KC} &= j[(a - a^2)x_{\Sigma 2} + (a - 1)x_{\Sigma 0}] \dot{I}^{(1)}_{KA1}. \end{aligned} \quad (4.13)$$

На підставі залежностей (4.1), (4.2), (4.9) і (4.10) можна побудувати векторні діаграми струмів і напруг у точці однофазного короткого замикання на землю фази А (рисунок 4.3).

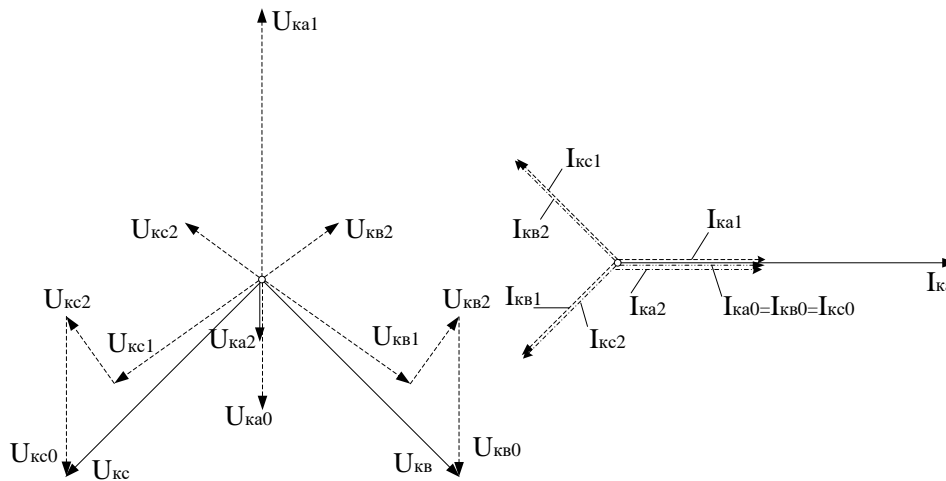


Рисунок 4.3 – Векторні діаграми напруг і струмів при однофазному короткому замиканні

Кут θ_U між векторами напруг неушкоджених фаз може змінюватися в межах від 60° до 180° залежно від співвідношення між $x_{\Sigma 2}$ і $x_{\Sigma 0}$.

За відсутності заземлених нейтралей, коли $x_{\Sigma 0} = \infty$, $\theta_U = 60^\circ$. Якщо $x_{\Sigma 2} = x_{\Sigma 0}$, то кут $\theta_U = 120^\circ$. При $x_{\Sigma 2} < x_{\Sigma 0}$ кут $\theta_U < 120^\circ$, при $x_{\Sigma 2} > x_{\Sigma 0}$ $\theta_U > 120^\circ$. При великій кількості глухозаземлених нейтралей в електричній системі й при короткому замиканні в безпосередній близькості від них $x_{\Sigma 0}$ знехтуємо, оскільки воно є малим порівняно з $x_{\Sigma 2}$, $\theta_U \cong 180^\circ$. Оскільки при розрахунках струмів короткого замикання прийнято знехтувати активним опором електричного кола, вважаючи коло чисто індуктивним. На векторних діаграмах (рисунок 4.3) вектори струму прямої послідовності показані відставальними по фазі на 90° від відповідних їм векторів напруги прямої послідовності.

$$\begin{aligned}
 \dot{I}^{(2)}_{KA} &= 0; \\
 \dot{I}^{(2)}_{KB} &= -\dot{I}^{(2)}_{KC}; \\
 \dot{U}^{(2)}_{KB} - \dot{U}^{(2)}_{KC} &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{4.14}$$

Короткому замиканню фаз В і С (рисунок 4.4) відповідають початкові умови

$$\dot{U}_{KB}^{(2)} - \dot{U}_{KC}^{(2)} = 0.$$

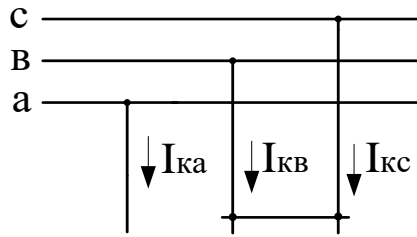


Рисунок 4.4 – Двофазне коротке замикання

Оскільки система струмів урівноважена, $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$, тобто $\dot{I}_{K0} = 0$. Отже, використовуючи перше співвідношення (4.2), можна записати

$$\dot{I}_{KA1}^{(2)} = -\dot{I}_{KA2}^{(2)}. \quad (4.15)$$

Підставляючи дві перші початкові умови (4.14) у вираз (4.6), виразимо струми прямої й зворотної послідовності в неушкодженій фазі через струм короткого замикання однієї з ушкодженої фаз:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{KA1}^{(2)} &= \frac{1}{3} \dot{I}_{KB}^{(2)} (a - a^2) = j \frac{\dot{I}_{KB}^{(2)}}{\sqrt{3}}; \\ \dot{I}_{KA2}^{(2)} &= \frac{1}{3} \dot{I}_{KB}^{(2)} (a^2 - a) = -j \frac{\dot{I}_{KB}^{(2)}}{\sqrt{3}}. \end{aligned} \quad (4.16)$$

Використовуючи третю початкову умову двофазного короткого замикання й підставляючи значення $\dot{U}_{KB}^{(2)}$, $\dot{U}_{KC}^{(2)}$ з виразу (4.3) у вирази (4.14), визначимо симетричної складові напруги неушкодженої фази (фази А):

$$a^2 \dot{U}_{KA1}^{(2)} + a \dot{U}_{KA2}^{(2)} + \dot{U}_{K0}^{(2)} - a \dot{U}_{KA1}^{(2)} - \dot{U}_{KA2}^{(2)} - \dot{U}_{K0}^{(2)} = (a^2 - a)(\dot{U}_{KA1}^{(2)} - \dot{U}_{KA2}^{(2)}) = 0,$$

звідки

$$\dot{U}_{KA2}^{(2)} = \dot{U}_{KA1}^{(2)}. \quad (4.17)$$

Отримане співвідношення (4.17) дозволяє прирівняти праві частини перших двох виразів (4.7) і визначити величину струму прямої послідовності:

$$\dot{I}^{(2)}_{KA1} = \frac{E_{\Sigma A}}{j(x_{\Sigma 1} + x_{z2})}. \quad (4.18)$$

Симетричні складові напруг у місці короткого замикання у відповідності з другим співвідношенням (4.7) і виразами (4.15), (4.17) дорівнюватимуть

$$\dot{U}^{(2)}_{KA1} = \dot{U}^{(2)}_{KA2} = j x_{z2} \dot{I}^{(2)}_{KM}. \quad (4.19)$$

Напряга нульової послідовності U_{K0} може мати довільне значення, тому що при двофазному короткої замиканні зсув нейтралі системи відносно землі не впливає на величини струмів, оскільки відсутній шлях для струмів нульової послідовності через землю ($Z_{Z0} = \infty$). Приймаємо, що $U_{K0} = 0$.

Фазні напруги в місці короткого замикання можуть бути визначені з виразів (4.1) з урахуванням останньої рівності (4.14) і рівності (4.19). Тоді $\dot{U}^{(2)}_{KA} = 2\dot{U}^{(2)}_{KA1}$;

$$\dot{U}^{(2)}_{KB} = \dot{U}^{(2)}_{KC} = (a^2 + a)\dot{U}^{(2)}_{KA1} = -\dot{U}^{(2)}_{KA1} = -\frac{1}{2}\dot{U}^{(2)}_{KA}. \quad (4.20)$$

На підставі отриманих рівностей (4.14), (4.16), (4.20) побудовано векторні діаграми струмів і напруг при двофазному короткому замиканні між фазами В і С (рисунок 4.5).

Короткому замиканню фаз В і С на землю (рисунок 4.6) відповідають такі початкові умови:

$$\begin{aligned} \dot{I}^{(1.1)}_{KA} &= 0; \\ \dot{U}^{(1.1)}_{KB} &= 0; \\ \dot{U}^{(1.1)}_{KC} &= 0. \end{aligned} \quad (4.21)$$

Підставляючи у вираз (4.4) першу рівність (4.21), одержимо

$$\dot{I}^{(1,1)}_{KA1} = -\dot{I}^{(1,1)}_{KA2} + \dot{I}^{(1,1)}_{KA0}. \quad (4.22)$$

Це означає, що складові струми зворотної й нульової послідовності в застосуванні до неушкодженої фази врівноважують складові прямої послідовності.

Підставляючи у вираз (4.5) дві останні рівності (4.21), знайдемо напруги симетричних складових, які рівні між собою й по величині становлять одну третину повної напруги цієї фази.

$$\dot{U}^{(1,1)}_{KA1} = U^{(1,1)}_{KA2} = \dot{U}^{(1,1)}_{KA0} = \frac{1}{3}U^{(1,1)}_{KA}. \quad (4.23)$$

Відповідно до двох рівностей (4.7) і (4.23) можна записати $\dot{I}^{(1,1)}_{KA2} \cdot j x_{z2} = j \cdot x_{z0} \dot{I}^{(1,1)}_{KA0}$

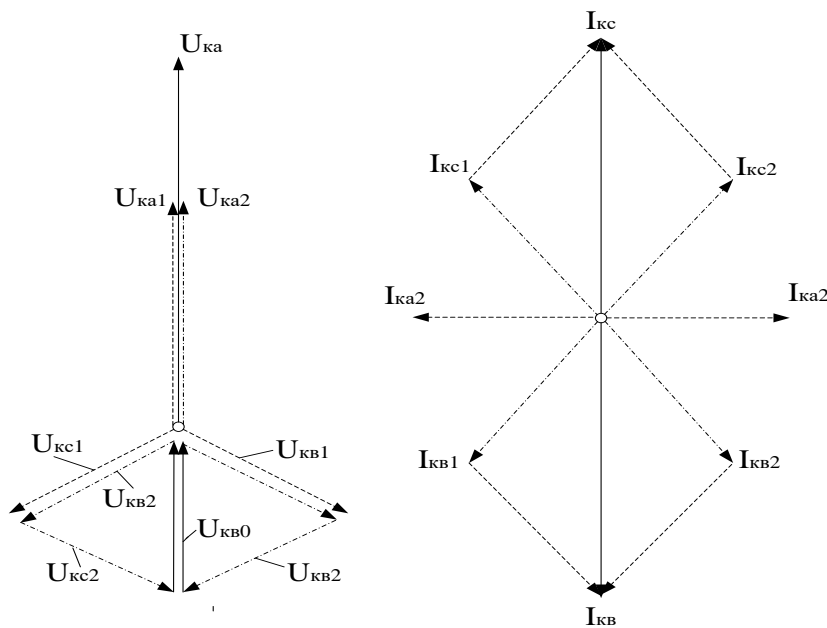


Рисунок 4.5 – Векторні діаграми напруг і струмів при двофазному короткому замиканні

Додавши до обох частин даної рівності й з огляду на рівність (4.22), після перетворень одержимо $j x_{z2} \dot{I}^{(1,1)}_{KA0}$.

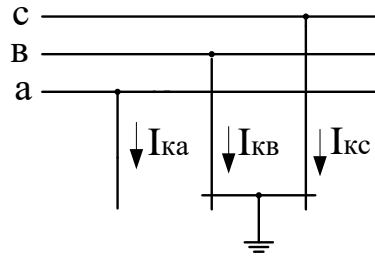


Рисунок 4.6 – Двофазне коротке замикання на землю

$$\dot{i}^{(1.1)}_{KA1} = -\dot{i}_{KA1} \frac{x_{\Sigma A}}{(x_{\Sigma 2} + x_{z0})}, \quad (4.24)$$

$$\dot{i}^{(1.1)}_{KA2} = -\dot{i}^{(1.1)}_{KA1} \frac{x_{\Sigma A}}{(x_{\Sigma 2} + x_{z0})}. \quad (4.25)$$

З першої рівності (4.7), з огляду на рівності (4.23) і (4.24), знайдемо

$$\dot{i}^{(1.1)}_{KA1} = \frac{E_{\Sigma A}}{j[x_{\Sigma 2} + (x_{\Sigma 2} \| x_{z0})]}. \quad (4.26)$$

На підставі рівностей (4.21), (4.23) побудовано векторну діаграму струмів і напруг для точки двофазного замикання фази В і С на землю (рисунок 4.7).

Порівнюючи рисунки 4.3 і 4.7, можна бачити, що векторна діаграма струмів для двофазного короткого замикання на землю подібна до векторної діаграми напруг при однофазному короткому замиканні. Кут θ_1 між струмами ушкоджених фаз на векторній діаграмі струмів залежно від співвідношення між результуючими опорамі зворотної й нульової послідовностей може мати величину в межах $60^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$, причому θ_1 наближається до 60° , коли $x_{\Sigma 0}$ прагне до нуля, і до 180° , коли $x_{\Sigma 0}$ стає нескінченно більшим, що відповідає умовам двофазного короткого замикання.

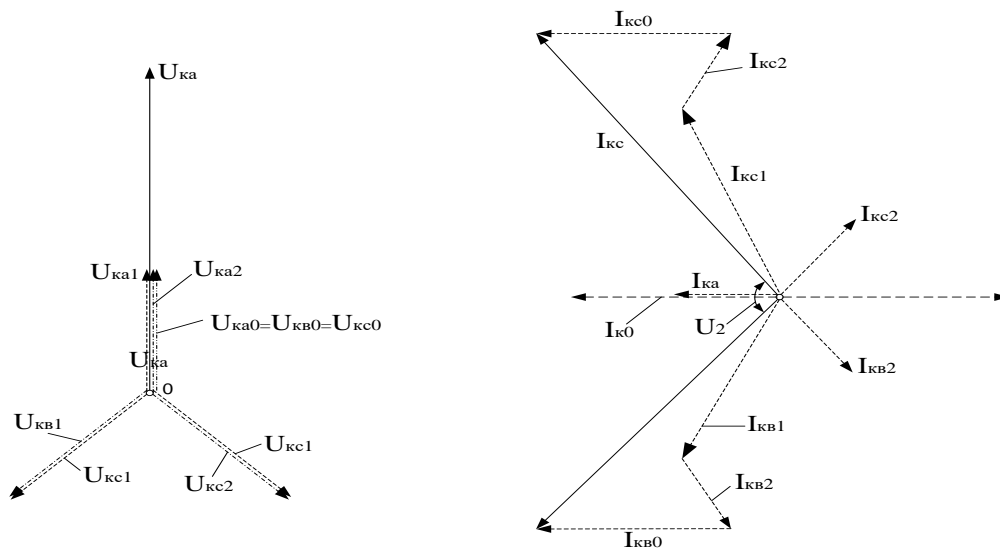


Рисунок 4.7 – Векторні діаграми напруг і струмів при двофазному короткому замиканні на землю

4.4 Правило еквівалентності прямої послідовності

Аналізуючи розглянуті вище вирази для симетричних складових струмів і напруг у місці несиметричного короткого замикання, можна помітити, що струми зворотної й нульової послідовності й напруги всіх послідовностей пропорційні струму прямої послідовності. Тому завдання розрахунку будь-якого несиметричного короткого замикання можна звести до знаходження струму прямої послідовності в місці розглянутого виду короткого замикання.

За формулами (4.2), (4.18), (4.26) формулу струму прямої послідовності особливої фази А при будь-якому виді несиметричного короткого замикання можна подати як

$$I^{(n)}_{KA1} = \frac{E_{\Sigma A}}{jx_{\Sigma 1} + Z^{(n)}_{\Delta}}, \text{ де } Z^{(n)}_{\Delta} \text{ – додатковий опір.}$$

Оскільки фазні струми в місці короткого замикання також пропорційні струму прямої послідовності, модуль фазного струму в місці будь-якого несиметричного короткого замикання в загальному вигляді можна подати як $I^{(n)}_K = m^{(n)} \cdot I^{(n)}_{K1}$.

Значення додаткового опору $Z^{(n)}_{\Delta}$ й величини коефіцієнта m при різних видах короткого замикання наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Додатковий опір $Z^{(n)}_{\Delta}$ та величини коефіцієнта m при різних видах короткого замикання

| Вид замикання | n | $Z^{(n)}_{\Delta}$ | $m^{(n)}$ |
|-------------------|-----|----------------------------|---|
| Трифазне | 3 | 0 | 1 |
| Двофазне | 2 | jx_{z2} | $\sqrt{3}$ |
| Однофазне | 1 | $j(x_{z2} + x_{z0})$ | 3 |
| Двофазне на землю | 1,1 | $jx_{z2} \parallel x_{z0}$ | $\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{\Sigma 2} \cdot x_{\Sigma 0}}{(x_{z2} + x_{z0})^2}}$ |

Таким чином, струм прямої послідовності будь-якого несиметричного короткого замикання може бути визначений як струм при трифазному короткому замиканні в точці, віддаленій від дійсної точки короткого замикання на додатковий опір $Z^{(n)}_{\Delta}$, що не залежить від параметрів схеми прямої послідовності і для кожного виду короткого замикання визначається результируючим опором зворотної й нульової послідовностей відносно розглянутої точки схеми.

4.5 Опис лабораторної установки

Лабораторна установка виконана на спеціальному лабораторному стенді, на вертикальній панелі якого встановлені й постійно з'єднані комутаційні прилади й затискачі для підключення вимірювальної апаратури та опорів (реостатів), що обмежують струм у колі. Реостати й вся вимірювальна апаратура розташовуються на горизонтальному столі лабораторного стенда.

Принципова схема лабораторної установки подана на рисунку 4.8. Суцільними лініями показано з'єднання, які вже виконані на лабораторному стенді, а пунктирними лініями - з'єднання, які студент повинен виконати самостійно при підготовці лабораторної установки до експерименту.

Схема лабораторної установки містить такі елементи:

- силовий трансформатор ТС, що дозволяє змінювати напругу живлення до необхідної величини;
- контактор для вмикання трансформатора ТС у мережу;

- вимикач 1В для вмикання й вимикання контактора К ;
- три реостати типу РСП (150 Ом; 1,7 А) для обмеження величини струму короткого замикання;
- перемикачі 1П, 2П, 3П, що дозволяють імітувати в заданій точці різні види короткого замикання. Положення перемикача того або іншого виду короткого замикання в різних з'єднаннях фаз підбираються відповідно до таблиці 4.2;
- фільтр струму нульової послідовності (ФСНП), складений із трьох ідентичних вимірювальних трансформаторів струму;
- фільтр напруги нульової послідовності (ФННП), складений із трьох ідентичних вимірювальних трансформаторів напруги;
- об'єднаний фільтр струму прямої і зворотної послідовностей;
- об'єднаний фільтр напруги прямої і зворотної послідовностей;
- перемикач 6П, призначений для підключення фільтра струму до вимірювальних трансформаторів струму, що вимірює величини струму прямої і зворотної послідовностей при різних видах імітованого короткого замикання. Перемикач має 6 положень. Табличка-показчик перемикача 6П показує, у яке положення повинен бути поставлений перемикач для вимірювання необхідної величини при заданому виді короткого замикання;
- перемикач 7П, призначений для підключення фільтра напруги до вимірювальних трансформаторів напруги, що вимірює величини напруги прямої і зворотної послідовностей при різних видах імітованого короткого замикання. Перемикач має 6 положень. Табличка-показчик перемикача 7П показує, у яке положення повинен бути поставлений перемикач для вимірювання необхідної величини при заданому виді короткого замикання.

Примітка. Для спрощення схеми фільтра струму й напруги прямої й зворотної послідовностей, а також перемикачі 6П і 7П показані у вигляді прямокутників;

- вимірювальний комплект типу К-50 для вимірювання напруги, підведеної до лабораторної установки від трансформатора ТС, величини струму й споживаної потужності в колі короткого замикання;

- векторметр типу Ц-50 для вимірювання кута зсуву фаз між напругами або струмами в точці короткого замикання;
- амперметр A_0 для вимірювання струму нульової послідовності (на виході ФСНП);
- амперметр A_Φ для вимірювання струму прямої і зворотної послідовностей у колі короткого замикання (на виході фільтра струму);
- вольтметр V_0 для вимірювання напруги нульової послідовності (на виході ФННП) у точці короткого замикання;
- вольтметр V_Φ для вимірювання напруг прямої і зворотної послідовностей у точці короткого замикання (на виході фільтра напруги), а також фазних напруг у точці короткого замикання;
- перемикач 4П, призначений для підключення вольтметра до фільтра напруги, що вимірює величини напруги прямої і зворотної послідовностей, або до перемикача 5П для вимірювання фазних напруг у точці короткого замикання;
- перемикач 5П, що дозволяє підключати вольтметр V_Φ до різних фаз трифазного кола в точці короткого замикання;
- вимикач 2У для вмикання напруги мережі, що живить через затискачі ~ 220 В векторметр.

Таблиця 4.2 – Положення перемикача того або іншого виду короткого замикання в різних сполученнях фаз

| Вид короткого замикання | З'єднання фаз при короткому замиканні | Положення перемикача | | | | | | | | |
|-------------------------|---------------------------------------|----------------------|---|---|----|---|---|----|---|---|
| | | 1П | | | 2П | | | 3П | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Однофазне | АО | X | | | | X | | | | X |
| | ВО | | | X | | X | | | | X |
| | СО | | X | | | | X | | | X |
| Двофазне | АВ | X | | | X | | | | X | |
| | ВС | | | X | | | X | | X | |
| | СА | X | | | | | X | | X | |
| Двофазне на землю | АВО | X | | | X | | | | | X |
| | ВСО | | | X | | | X | | | X |
| | САО | X | | | | | X | | | X |
| Трифазне | АВС | X | | | X | | | | | |

4.6 Підготовка до виконання лабораторної роботи

Для виконання експериментальної частини лабораторної роботи необхідно:

- вивчити опис лабораторної роботи;
- ознайомитися з правилами користування векторметром;
- вивчити пристрій і принцип дії фільтрів симетричних складових струмів і напруг);
- накреслити принципову схему лабораторної установки (рисунок 4.8) у бланку звіту та підготувати дані для таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

| Вид короткого замикання | Напруга трансформатора | | | Напруга у точці короткого замикання | | | I_A | I_B | I_C | U_1 | U_2 | U_0 | I_1 | I_2 | I_0 | P | φ | θ_0 | θ_1 |
|-------------------------|------------------------|-------|-------|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-----------|------------|------------|
| | U_A | U_B | U_C | U_A | U_B | U_C | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

4.7 Порядок виконання роботи

1 Підготувати робоче місце в лабораторії для виконання експериментальної частини лабораторної роботи:

а) зібрати на лабораторному стенді ту частину лабораторної установки, що на принциповій схемі (рисунок 4.8) позначена пунктирними лініями;

б) ознайомитися з правилами користування вимірювальним комплектом К-50, поміщеними на внутрішній стороні кришки приладу;

в) установити перемикачі комплекту К-50 у такі положення:

– перемикач вольтметра на оцінку 150 В;

– перемикач амперметра на оцінку 1 А;

г) увести повністю навантажувальні реостати;

д) вилку живлення векторметра ввімкнути в гнізда ~ 220 В.

2 Доповісти керівникові занять про те, що схема лабораторної установки зібрана.

Потім з дозволу керівника приступити до практичного виконання лабораторної роботи.

Вимикачем 1У ввімкнути живлення лабораторної установки.

Вимикачем 2У подати живлення на векторметр і прогріти його. Для цього необхідно натиснути на кнопку "ПУСК" і тримати її 20 с.

Відповідно до вказівок таблиці 4.2 здійснити по черзі однофазні замикання всіх трьох фаз (А, В, С) і за допомогою реостатів РСП установити в кожній фазі струм величиною 0,5 А. Вимірювання струму здійснювати за допомогою амперметра комплекту К-50, ставлячи перемикач фаз відповідно в положення А, В, С залежно до того, у якій фазі встановлюється величина струму.

3 За вказівкою керівника занять імітувати один з видів короткого замикання.

Використовуючи даної таблиці 4.2. за допомогою комплекту К-50 і інших вимірювальних приладів зробити вимір всіх величин, обумовлених таблицею 4.3.

При цьому необхідно виміряти:

- струм короткого замикання, потужність і фазну напругу на затискачах трансформатора ТС приладами комплекту К-50;

- струм нульової послідовності амперметра A_0 ;

- струм прямої й зворотної послідовності амперметром A_Φ , користуючись перемикачем вибору послідовності 6П. Показання приладу необхідно помножити на коефіцієнт $k_1=1,76$;

- напругу нульової послідовності вольтметром V_0 . Показання приладу необхідно множити на коефіцієнт $k_{V_0}=0,83$;

- напругу прямої й зворотної послідовності вольтметром. До початку вимірювання напруги перемикач 4П поставити в нижнє положення U_ϕ . Показання приладу необхідно помножити на коефіцієнт $k_U=0,4$;

- напругу в точці короткого замикання вольтметром U_ϕ . Для цього необхідно перемикач 4П поставити у верхнє положення $U_{кз}$, а перемикач 5П – у положення А, В, С по черзі.

4 Векторметром зробити вимір кута зрушення фаз між напругами або струмами (залежно від виду короткого замикання).

5 Результати вимірів показати керівникові занять, після чого виключити живлення лабораторної установки.

6 Приступити до побудови векторних діаграм у звіті.

Кут зсуву фаз φ між векторами напруги й струму розрахувати за формулою

$$\varphi = \arccos \frac{P_{\phi}}{U_{\phi} I_{\phi}},$$

де P_{ϕ} - фазна потужність, Вт;

I_{ϕ} - фазний струм, А;

U_{ϕ} - фазна напруга, В.

4.8 Зміст звіту

У звіті повинні бути наведені:

- 1 Схема лабораторної установки (рисунок 4.8).
- 2 Таблиці вимірювальних і розрахованих величин.
- 3 Векторні діаграми.
- 4 Висновки по роботі.

4.9 Контрольні питання

1 Які допущення лежать в основі застосування методу симетричних складових для розрахунку струмів несиметричних режимів?

2 У чому полягає принцип незалежності дії симетричних складових і як він виражається математично?

3 У чому полягає фізична сутність правила еквівалентності прямої послідовності?

4 У якому співвідношенні перебувають струми й напруги різних послідовностей при двофазному короткому замиканні?

5 У якому співвідношенні перебувають струми і напруги різних послідовностей при однофазному короткому замиканні?

6 У якому співвідношенні перебувають струми й напруги різних послідовностей при двофазному короткому замиканні на землю?

7 Чим пояснити, що векторна діаграма струмів для однофазного короткого замикання має такий самий вигляд, як і векторна діаграма напруг для двофазного замикання на землю, а векторна діаграма напруг для однофазного короткого замикання має такий самий вигляд, як і векторна діаграма струмів для двофазного короткого замикання на землю?

8 У чому полягає принцип дії фільтрів струму й напруги нульової послідовності?

Лабораторна робота 5

Паралельна робота трансформаторів

5.1 Мета роботи

Знайомство з умовами паралельної роботи трифазних двообмоткових трансформаторів, а також придбання практичних навичок у маркуванні вивідних кінців обмоток і збірці певної групи з'єднань обмоток трансформатора.

5.2 Загальні відомості

Паралельне вмикання декількох трансформаторів широко застосовується в енергетичних системах. При паралельній роботі в періоди малих навантажень можна частину трансформаторів відключати, чим досягається зменшення втрат енергії. При виході з ладу одного трансформатора інші продовжують працювати, а несправний трансформатор може бути замінений резервним. При паралельному вмиканні можливо також виведення трансформаторів у плановий або аварійний ремонт без якого-небудь порушення безперебійного забезпечення споживачів

електроенергією. І, нарешті, тільки при використанні паралельного вмикання ряду трансформаторів можуть бути трансформовані ті величезні потужності, які потрібно передавати на великі відстані і багаторазово перетворювати в сучасних енергосистемах.

Паралельною роботою двох або декількох трансформаторів називається така їх робота, при якій первинні обмотки усіх трансформаторів підключаються до загальних шин живлячої мережі, а вторинні обмотки - до загальних шин споживача (рисунок 5.1).

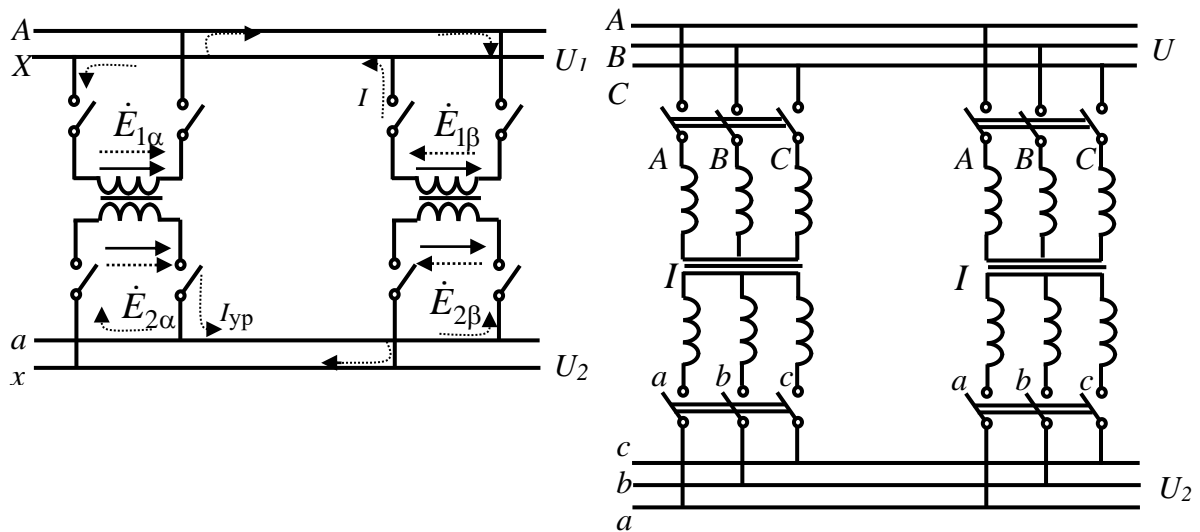


Рисунок 5.1 – Схема паралельної роботи однофазних (а) і трифазних (б)

Для досягнення найкращих умов паралельної роботи трансформаторів необхідно, щоб загальне навантаження підстанції розподілялося між працюючими трансформаторами пропорційно їхнім номінальним потужностям. Такий розподіл навантаження досягається при дотриманні умов:

- 1) рівності коефіцієнтів трансформації;
- 2) рівності напруги короткого замикання;
- 3) тотожності груп з'єднання обмоток трансформаторів.

З'ясуємо вплив кожної з вищезгаданих умов на прикладі двох однофазних трансформаторів.

Умова рівності коефіцієнтів трансформації. При однакових коефіцієнтах трансформації паралельно працюючих трансформаторів у режимі холостого ходу забезпечується

рівність їхніх вторинних е.р.с. При цьому в замкнутому контурі, утвореному вторинними обмотками трансформаторів, сума е.р.с. дорівнює нулю, і зрівняльний струм не виникає.

У разі нерівності коефіцієнтів трансформації в контурі, утвореному вторинними обмотками трансформаторів, з'являється зрівняльний струм (навіть у режимі холостого ходу). Напрямок зрівняльного струму показаний на рисунку 5.1, а для випадку знижувальних трансформаторів.

Як видно з рисунка 5.1, а, зрівняльний струм у контурі вторинних обмоток "співпадає" за напрямом з е.р.с. і "протилежний" е.р.с. Складаючись із струмом навантаження, зрівняльний струм обумовлює нерівномірне навантаження трансформаторів, що призводить до недовикористання трансформатора з великим коефіцієнтом трансформації.

За ДСТУ, для трансформаторів з коефіцієнтом трансформації $K_T < 3$ і трансформаторів власних потреб підстанцій допускається $K = 1 \%$, для усіх інших трансформаторів відхилення від середнього значення не повинне перевищувати $0,5 \%$, де

$$\Delta K = \frac{K_\alpha - K_\beta}{\sqrt{K_\alpha \cdot K_\beta}}. \quad (5.1)$$

Умова рівності напруги короткого замикання. При паралельній роботі трансформаторів первинна і вторинна напруга співпадає як за величиною, так і по фазі. Це означає, що падіння напруги в обох трансформаторах мають бути рівні.

Струм навантаження розподіляється між трансформаторами обернено пропорційно до їхніх опорів короткого замикання

$$\frac{I_\alpha}{I_\beta} = \frac{z_{K\beta}}{z_{K\alpha}}. \quad (5.2)$$

Перемножуючи обидві частини рівності між собою, отримаємо

$$\frac{I_{\alpha}}{I_{\beta}} \cdot \frac{I_{\beta H}}{I_{\alpha H}} = \frac{z_{K\beta} I_{\beta H}}{z_{K\alpha} I_{\alpha H}} = \frac{U_{K\beta}}{U_{K\alpha}}, \quad (5.3)$$

де $I_{\beta H}$ і $I_{\alpha H}$ - номінальні значення струмів відповідно для першого і другого трансформаторів. Таким чином, при нерівності напруг короткого замикання відносні значення струмів трансформаторів розподіляються обернено пропорційно напруженням короткого замикання.

ДСТУ рекомендує, щоб для паралельно працюючих трансформаторів напруги короткого замикання мали відхилення від їхнього середнього арифметичного значення не більш ніж на 10 %.

Умова приналежності трансформаторів до однієї і тієї самої групи з'єднання. При недотриманні цієї умови в замкнутому контурі, утвореному вторинними обмотками, діятиме різниця е.р.с., обумовлена зсувом по фазі вторинних лінійних напруг трансформаторів. Під дією цієї е.р.с. у контурі з'явиться зрівняльний струм, значення якого буде мінімальним, якщо групи трансформаторів відрізняються на одиницю, але і тоді зрівняльний струм у декілька разів перевищує номінальний. Тому включення на паралельну роботу трансформаторів з різними групами з'єднання обмоток неприпустимо.

5.3 Порядок виконання роботи

1 Маркування вивідних кінців обмоток трансформатора.

Об'єктами дослідження є трифазний двохобмотковий трансформатор і три однофазних трансформатори. На стенді вказані вводи, що належать до високої і низької сторін маркування трансформаторів.

Промаркувати вивідні кінці обмоток трансформаторів:

- знайти пари виводів, що належать одній фазі;
- знайти обмотки високої і низької сторін, розташовані на одному стрижні;
- визначити початок і кінці фаз.

Маркування вивідних кінців обмоток трансформатора може бути виконано за допомогою джерела і вольтметра змінного струму.

У групі з шести виводів, що належать високій або низькій стороні кожного з трансформаторів, потрібно знайти пару виводів, що належать одній фазі. Індикатором наявності електричного кола між двома виводами, які належать високій стороні трансформатора, є показання вольтметра.

Один кінець контрольного кола приєднують до будь-якої клеми групи виводів, а інший кінець почерзі приєднують до решти п'яти клем. При підключенні до клеми, що належить тій самій фазі, індикатор покаже наявність кола. Аналогічно "визначають" інші групи виводів досліджуваного трансформатора, відзначаючи в протоколі випробувань наявність електричного кола між клемами.

Умовно прийнявши будь-яку обмотку високої сторони за фазу 1 і підключивши її до джерела напруги, знаходять фази 2, 3 на високій стороні і однойменні фази на низькій стороні за величиною відхилення стрілки вольтметра.

Принцип визначення можна пояснити з рисунка 5.2. Якщо за фазу 1 була прийнята обмотка, розташована на крайньому стержні, то величини магнітних

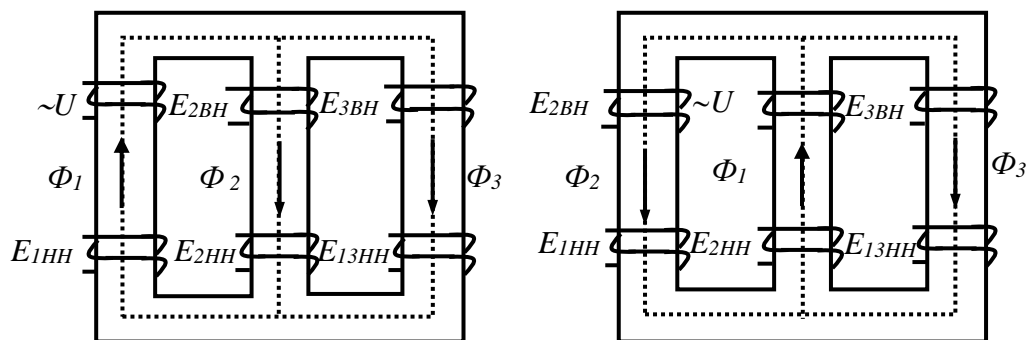


Рисунок 5.2 - Розподіл магнітного потоку в осерді при живленні крайньої фази (а); середньої фази (б)

потоків, зчеплених з фазами, знаходяться в такому співвідношенні: $\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3$, причому $\Phi_2 > \Phi_3$ через різницю в магнітних опорах на шляху цих потоків. Оскільки е.р.с.,

індуковані у фазах, пропорційні магнітним потокам, то на високій стороні $E_{2вн} > E_{3вн}$, а на низькій $E_{1нн} > E_{2нн} > E_{3нн}$.

Для вимірювання е.р.с. і, отже, визначення фаз використовуються вольтметри зі шкалою, розрахованою на номінальну напругу ($U_{1н}$ - на високій стороні, $U_{2н}$ - на низькій).

Якщо в результаті вимірювань у 2 і 3 фазах обмотки вищої напруги е.р.с. виявляться рівними, це означає, що обмотка, прийнята за фазу 1, розташована на середньому стрижні. Експеримент слід повторити, підключивши до джерела напруги іншу обмотку вищої напруги.

Обмотки високої і низької напруги, розташовані на середньому стрижні, належать фазі В, обмотки, розташовані на крайніх стрижнях, належать фазам А і С.

Приймаючи один з виводів фази А на високій стороні за "початок" (А), а інший - за "кінець" (Х), визначаємо початок і кінці інших фаз. Початок і кінці фаз В і С на високій стороні визначаємо відповідно В - У і С - Z, а фаз а, b і с на низькій стороні відповідно а-х, b-у, с-z. Принцип визначення початку і кінців фаз відносно прийнятих для фази А є таким: якщо підключити фазу А до джерела напруги (рисунок 5.2), то в обмотках інших фаз індукуватимуться е.р.с. вказаного на рисунку 5.3 напрямку.

З'єднавши кінець Х підключеної до джерела живлення фази з будь-яким затиском іншої фази на високій або низькій сторонах, можна за величиною е.р.с., виміряною між затискачем А і вільним затискачем іншої фази (рисунок 5.4), визначити початок і кінець іншої фази. Наприклад, якщо е.р.с. обмоток складаються, то кінець Х з'єднаний з кінцем У, при відніманні е.р.с. кінець Х сполучений з початком В. Для фази А на високій стороні визначення початку (С) і кінця (Z) аналогічно фазі В.

Маркування фаз на низькій стороні слід також проводити, враховуючи напрям е.р.с. в обмотках (рисунок 5.3). Схема для визначення "початків" і "кінців" для обмоток низької напруги наведена на рисунку 5.5.

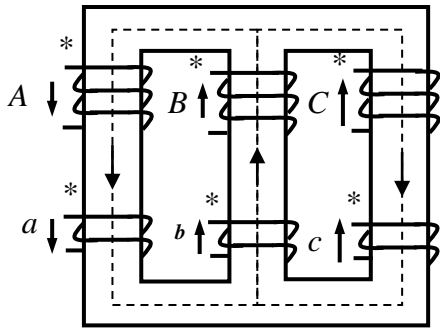


Рисунок 5.3 – З в'язок між потоками взаємоіндукції і е.р.с., індукованої в обмотках

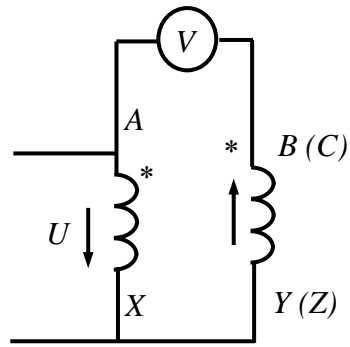


Рисунок 5.4 – Схема для визначення "початку" і "кінців" обмоток високої напруги

2 Схеми і групи з'єднань обмоток трансформатора.

З'єднати обмотки трансформаторів за заданою викладачем схемою і перевірити дослідним шляхом правильність з'єднань. Побудувати векторну діаграму.

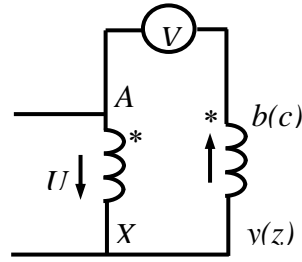
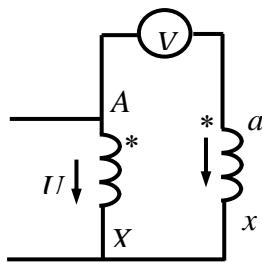


Рисунок 5.5 – Схема для визначення початку і кінців обмоток низької напруги

Для отримання заданої викладачем схеми і групи з'єднання обмоток необхідно попередньо побудувати діаграму лінійних і фазних напруг. У якості прикладу на рисунках 5.6 і 5.7 наведено схему і векторну діаграму для ($\Delta/Y - 7$). Задана схема і група з'єднання обмоток трансформатора збирається на стенді.

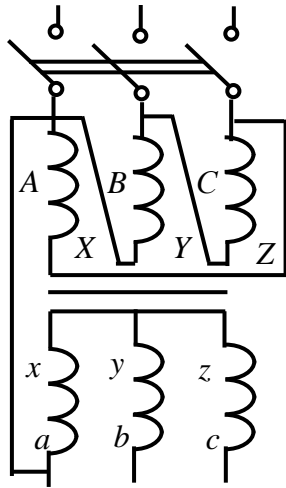


Рисунок 5.6 – Схема з'єднання обмоток трансформатора $\Delta/Y-7$

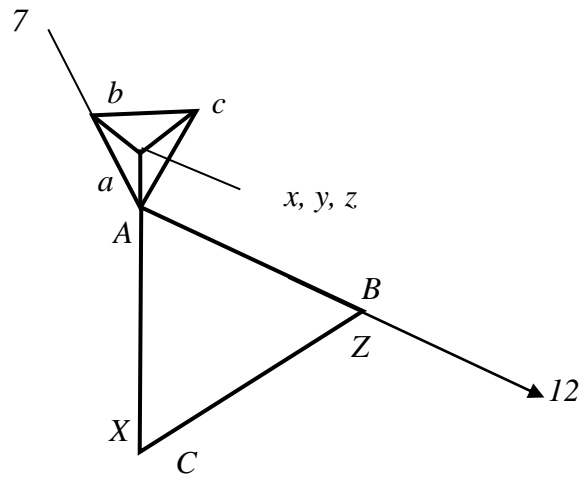


Рисунок 5.7 – Векторна діаграма для обмоток трансформатора $\Delta/Y-7$

Необхідно дослідним шляхом визначити відповідність бажаної і отриманої групи з'єднання. Для визначення відповідності теоретичної та практичної схеми і групи вимірюємо напруги між точками Bb, Bc, Cc, Cb, ab, bc, ac. Будуємо ABC, вважаючи, що напруги між точками "A" і "B", "B" і "C" і "A" і "C" однакові. Точки "A" і "a" з'єднані перемичкою, тому вважають точку "A" суміщеною з точкою "a". Точку "b" знаходять на перетині кіл, проведених їх точок "B" і "C" як з центрів з радіусами, рівними виміряним напруgom між точками Bb та Cb, а точку "c" - на перетині кіл, проведених з тих самих точок з радіусами, рівними виміряним напруgom між точками Bc та Cc.

Масштаб для всіх напруг має бути однаковим. Група з'єднань визначається кутом, виміряним за напрямком годинникової стрілки між векторами напруг AB і Ab.

3 Включення трансформаторів на паралельну роботу.

Ввімкнути трансформатори на паралельну роботу. Зняти і побудувати зовнішні характеристики при спільній роботі трансформаторів на активне навантаження.

Вмикання трансформаторів на паралельну роботу проводиться, наприклад, за схемою рисунка 5.8. Перш ніж включити трансформатори на паралельну роботу (замкнути рубильник ВК4), необхідно переконатися в рівності вторинних

напруг обох трансформаторів і в тому, що напруга між однопотенціальними затискачами рубильника ВК4 дорівнює нулю. Для цього вимірюють напругу між вторинними лінійними провідниками однойменних фаз обох трансформаторів.

При однакових групах з'єднань і правильному приєднанні первинних і вторинних обмоток трансформаторів до рубильника ВК4 показання вольтметра дорівнюватимуть нулю.

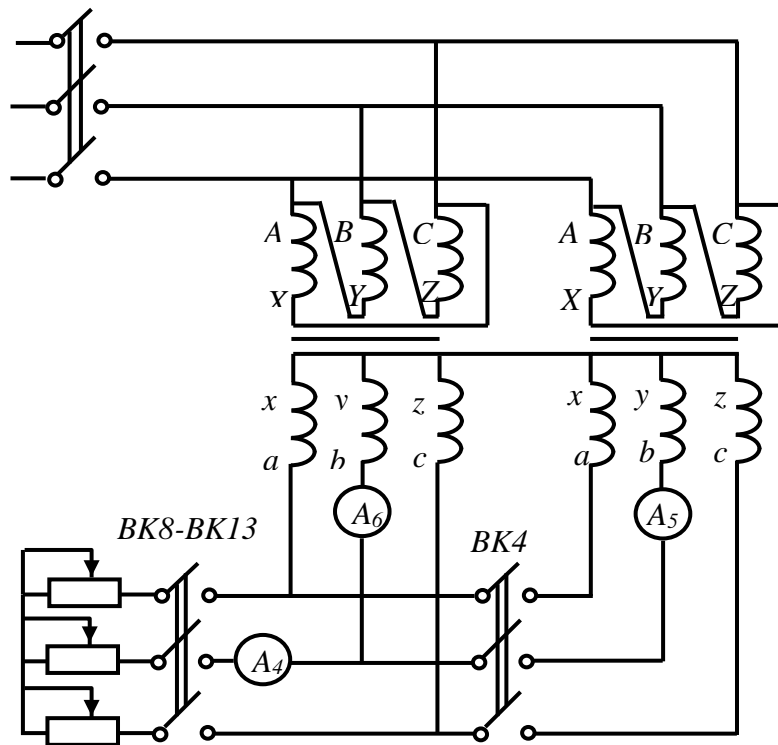


Рисунок 5.8 – Схема вмикання трансформаторів на паралельну роботу

5.4 Контрольні питання

- 1 Умови вмикання трансформаторів на паралельну роботу.
- 2 Чому є неприпустимим паралельне вмикання трансформаторів, що мають різні групи з'єднання обмоток?
- 3 Чи можлива паралельна робота трансформаторів, що мають різні коефіцієнти трансформації?
- 4 Накресліть векторну діаграму напруг і зрівняльних струмів при неоднакових коефіцієнтах трансформації.

5 Чи можлива паралельна робота трансформаторів, що мають різні напруги короткого замикання?

6 Як розподіляється навантаження між паралельно працюючими трансформаторами при неоднакових напругах короткого замикання?

7 У яких схемах з'єднання обмоток трифазних трансформаторів існує третя гармоніка е.р.с.?

8 У яких випадках і для чого застосовують нульовий провід?

9 Які групи з'єднання трансформаторів ви знаєте?

10 Накресліть векторну діаграму і схему вмикання обмоток для групи (Δ/Y - 11. Як з цієї групи отримати з'єднання (Δ/Y - 7, (Δ/Y - 5)?

11 Як визначити групи з'єднання обмоток трансформатора дослідним шляхом?

12 Які стандартні позначення початків і кінців обмоток трансформаторів застосовуються на сьогодні?

13 Як експериментальним шляхом визначити, що обмотки розташовані на середньому стрижні тристрижневого трансформатора?

14 Як ви будете визначати "початок" і "кінці" обмоток?

15 Як здійснити маркування обмотки низької напруги за наявності джерела високої напруги?

Лабораторна робота 6

Дослідження несиметричного навантаження трифазного трансформатора

6.1 Мета роботи

Дослідження несиметрично навантаженого трансформатора при крайніх випадках несиметрії: однофазному й двофазному короткому замиканні.

6.2 Загальні відомості

При експлуатації трифазних трансформаторів можливі випадки несиметричного навантаження, коли струми в різних фазах неоднакові за величиною і мають різний зсув відносно своїх фазних напруг. Такі несиметричні навантаження виникають при вмиканні зварювальних трансформаторів, потужних однофазних електричних печей і т. д. Несиметричне навантаження може виникнути також при аварійних ситуаціях, наприклад у випадку обриву лінії при одно- або двофазному короткому замиканні. Несиметричне навантаження фаз трансформаторів призводить до несиметрії напруг, що небажано як для споживачів електричної енергії, так і для самого трансформатора. Так, наприклад, несиметрія напруг є причиною швидкого перегорання ламп розкалювання у випадку підвищення напруги понад номінальну або зменшення світлової віддачі джерел світла при зниженні напруги в окремих фазах. Несиметрія напруг знижує також потужність двигунів змінного струму.

При несиметричному навантаженні й у самому трансформаторі може виникнути ряд додаткових явищ, що негативно впливають на роботу трансформатора: додаткові втрати в сталі й обмотках, значні місцеві перевищення температур, насичення сердечника й т. д.

При математичному аналізі несиметричних режимів користуються методом симетричних складових, відповідно до якого струм кожної фази можна подати як суму струмів прямої, зворотної й нульової послідовностей.

Оскільки трансформатор являє собою статичний апарат, то для струмів прямої й зворотної послідовностей його обмотки мають однакові опори. Тому немає необхідності розглядати окремо всі три складові, а можна обмежитися двома, одна з яких дорівнює складовій нульової послідовності, а інша - сумі складових прямої й зворотної послідовностей:

$$I'_a = I_{a1} + I_{a2}. \quad (6.1)$$

Тоді несиметрична система фазних струмів може бути розкладена на дві системи:

$$\dot{I}_a = \dot{I}'_a + \dot{I}_{a0}, \quad \dot{I}_b = \dot{I}'_b + \dot{I}_{b0}, \quad \dot{I}_c = \dot{I}'_c + \dot{I}_{c0}, \quad (6.2)$$

де $I_{a0}=I_{b0}=I_{c0}=I_n$ – струм нульової послідовності.

При несиметричному навантаженні струм нульової послідовності з'являється тільки в тих випадках, коли існують умови для його протікання. Такі умови створюються за наявності нейтрального проводу або заземлення нейтралі на вторинній стороні.

У трансформаторі відсутні всі складові нульової послідовності (струму, напруги) при будь-якому характері несиметрії, якщо не виведена жодна з нейтралей.

Несиметричне навантаження за відсутності струму нульової послідовності

Кожну фазу трансформаторів при несиметричних навантаженнях можна розглядати незалежно як однофазний трансформатор. Для цих схем існують такі загальні закономірності:

- первинні фазні струми можуть бути визначені з умови рівноваги первинних і вторинних намагнічувальних сил (якщо зневажити струмом, що намагнічує):

$$I_{A\Phi} = -\dot{I}_{a\phi} / k; \quad (6.3)$$

- первинні й вторинні фазні напруги можуть бути знайдені за відповідними лінійними напругами з умови, що нейтраль фазних напруг перебуває в центрі ваги трикутника, утвореного лінійними напругами.

Із цих умов струми первинного кола для розглянутих у роботі схем визначаються так:

а) двофазне коротке замикання для схеми Y/Y (рисунок 6.1).

Струми вторинного кола: $\dot{I}_a = -\dot{I}_b = \dot{I}_n; \quad \dot{I}_c = 0.$

Струми первинного кола:

$$\dot{I}_A = -\dot{I}_a / k = -\dot{I}_H / k; \quad \dot{I}_b = -\dot{I}_b / k; \quad \dot{I}_c = \dot{I}_c / k = 0,$$

де I_H – струм навантаження;

$k = w_{\text{вн}} / w_{\text{внн}}$ - коефіцієнт трансформації;

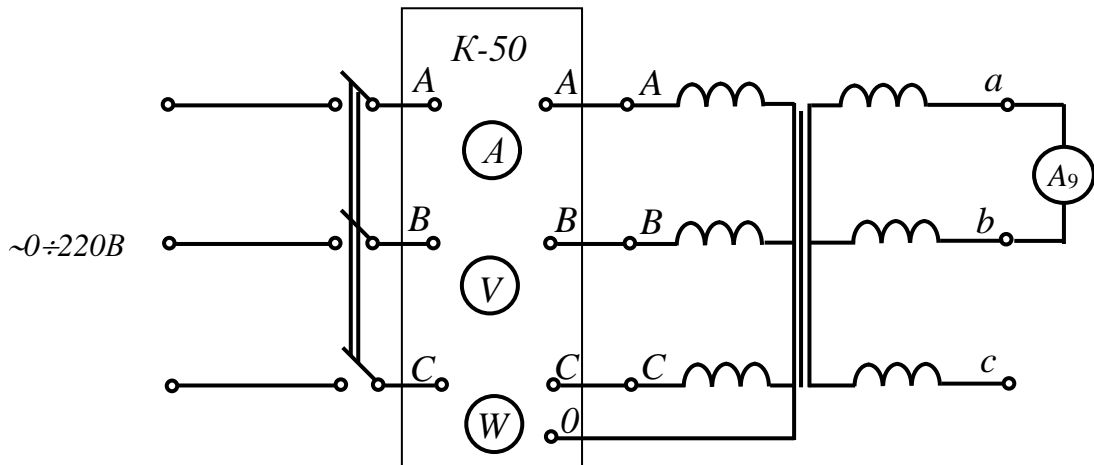


Рисунок 6.1 - Двофазне коротке замикання для Y/Y

б) двофазне коротке замикання для схеми Δ/Y (рисунок 6.2).

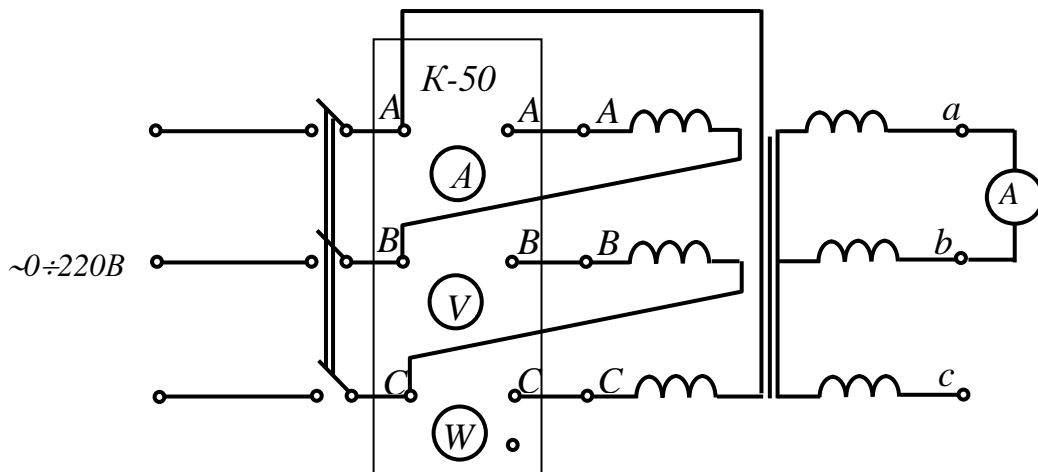


Рисунок 6.2 - Двофазне коротке замикання для Δ/Y

Струми вторинного кола:

$$\dot{I}_a = -\dot{I}_b = \dot{I}_H; \quad \dot{I}_c = 0.$$

Фазні струми первинного кола:

$$\dot{I}_{A\phi} = -\dot{I}_a / k = -\dot{I}_n / k; \quad \dot{I}_{B\phi} = -\dot{I}_b / k; \quad \dot{I}_{C\phi} = \dot{I}_c / k = 0.$$

Лінійні первинні струми визначаються як різниця фазних:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{A\phi} - \dot{I}_{C\phi} = -\dot{I}_n / k; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{B\phi} - \dot{I}_{A\phi} = 2\dot{I}_n / k; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{C\phi} - \dot{I}_{B\phi} = -\dot{I}_n / k.$$

Несиметричне навантаження за наявності струму нульової послідовності

При дослідженні несиметричного навантаження трансформаторів, що мають нейтральний провід або заземлену нейтраль на вторинній стороні, варто розрізняти два випадки:

- струми нульової послідовності можуть протікати тільки по вторинній обмотці трансформатора, наприклад при з'єднанні обмоток Y/Y_0 ;

- струми нульової послідовності можуть протікати як по вторинній, так і по первинній обмотці, наприклад при з'єднанні обмоток Δ/Y_0 :

а) однофазне коротке замикання для схеми Y/Y_0 (рисунок 6.3).

У вторинному колі трансформатора будуть протікати струми всіх послідовностей. По нульовому проводу протікає струм нульової послідовності і дорівнює сумі струмів нульової послідовності трьох фаз. Значення струму нульової послідовності будь-якої фази дорівнює $\dot{I}_{00} = \dot{I}_{b0} = \dot{I}_{c0} = \dot{I}_n / 3$.

З огляду на те, що струми у фазах вторинного кола дорівнюють $\dot{I}_a = \dot{I}_n, \dot{I}_b = \dot{I}_c = 0$, визначимо складові струмів фаз, прямої і зворотної послідовностей, скориставшись для цього виразом (6.2):

$$\dot{I}'_a = \dot{I}_a - \dot{I}_{a0} = \frac{2}{3}\dot{I}_n; \quad \dot{I}'_b = \dot{I}_b - \dot{I}_{b0} = \frac{1}{3}\dot{I}_n; \quad \dot{I}'_c = \dot{I}_c - \dot{I}_{c0} = -\frac{1}{3}\dot{I}_n.$$

Струм нульової послідовності в первинній обмотці, з'єднаної в зірку без нульового проводу, протікати не може, тому що для нього немає провідного контуру. Тому в первинну обмотку трансформується тільки сумарна складова прямої й зворотної послідовностей вторинних струмів:

$$\dot{I}_A = -\dot{I}'_a / k = -\frac{2}{3} \cdot \frac{I_H}{k}; \quad \dot{I}_B = -\dot{I}'_b / k = \frac{1}{3} \cdot \frac{I_H}{k}; \quad \dot{I}_C = -\dot{I}'_c / k = \frac{1}{3} \cdot \frac{I_H}{k}.$$

Струм нульової послідовності, протікаючи тільки по вторинному колі, є струмом, що намагнічує, тому що він магнітно не врівноважується струмом первинного кола. Він створює у всіх стрижнях потік нульової послідовності Φ_0 , що наводить в обмотках е.р.с. нульової послідовності E_0 .

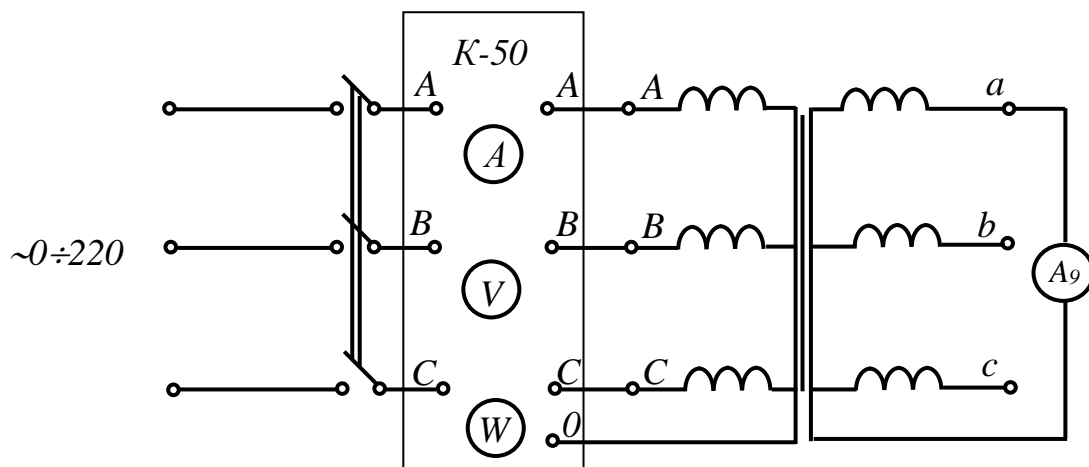


Рисунок 6.3 - Однофазне коротке замикання для Y/Y₀

При цьому для первинної й вторинної обмоток будуть справедливі рівняння

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= -\dot{E}_A + \dot{I}_{A\phi} z - \dot{E}_0 = \dot{U}'_A + \dot{I}_{a0} z_{00}; \\ U_B &= U'_B + I_{b0} z_{00}; \\ U_C &= U'_C + I_{c0} z_{00}; \\ \dot{U}_a &= -\dot{E}_a + \dot{I}_a z_2 + \dot{E}_0 = \dot{E}_0 - \dot{I}_a z_2 - \dot{I}_0 z_{00} = \dot{U}'_a - \dot{I}_a z_H; \\ \dot{U}_b &= \dot{U}'_b - \dot{I}_0 z_H; \\ \dot{U}_c &= \dot{U}'_c - \dot{I}_a z_H. \end{aligned} \tag{6.4}$$

де: $z_H = z_{00} + z_2$ – повний опір фази вторинної обмотки струму нульової послідовності, причому

$$z_{00}=r_{00}+jx_{00}, \quad z_2=r_2+jx_2,$$

де r_{00} – активний опір, обумовлений втратами активної потужності в сталевих частинах трансформатора від потоку нульової послідовності;

x_{00} – індуктивний опір взаємної індукції струму нульової послідовності;

r_2 – активний опір вторинної обмотки;

x_2 – індуктивний опір розсіювання вторинної обмотки.

Оскільки центри зірок фазних напруг $\dot{U}'_A, \dot{U}'_B, \dot{U}'_C$ і $\dot{U}'_a, \dot{U}'_b, \dot{U}'_c$ збігаються з центрами трикутників лінійних напруг, то відповідно до формул (6.4) центр дійсних фазних напруг $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ зміщений відносно центра лінійних напруг на величину $\dot{I}_0 z_{00}$, а фазних напруг $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$ - на величину $\dot{I}_0 z_n$.

Потоки нульової послідовності Φ_0 у кожний момент часу дорівнюють один одному й однаково спрямовані, тому в тристрижневому трансформаторі вони будуть замикатися між ярмами поза магнітною системою трансформатора, тобто по повітрю, по стінках бака. У цьому випадку магнітний опір струму нульової послідовності досить великий, тому потік Φ_0 і е.р.с. E_0 , що наводиться, малі. Невеликою й величина зсуву нульової точки зірки дійсних фазних напруг із центра трикутника лінійних напруг. У груповому трансформаторі, що складається з трьох однофазних трансформаторів, потік Φ_0 замикається по тому самому магнітопроводу, що й головний магнітний потік Φ , що має малий магнітний опір. Отже, величина потоку Φ_0 і величина е.р.с., що наводиться, будуть більшими. Великою буде й величина зсуву нульової точки $I_0 z_{00}$;

б) однофазне коротке замикання для схеми Δ/Y_0 (рисунок 6.4).

При будь-якому несиметричному навантаженні трансформатора, обмотки якого з'єднані за схемою Δ/Y_0 , у первинну обмотку будуть трансформуватися не тільки струми прямої й зворотної послідовностей, але й струми нульової послідовності, для яких обмотка, з'єднана трикутником, є провідним контуром.

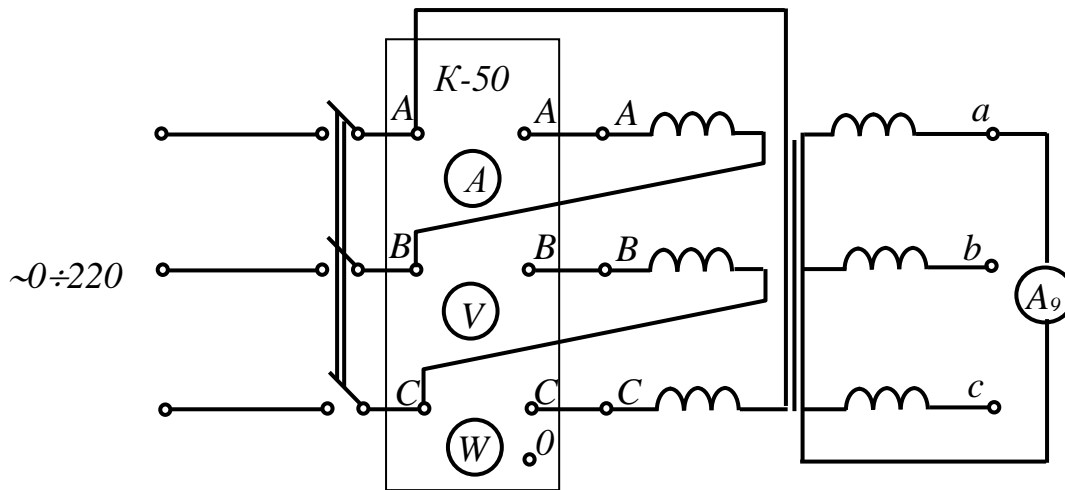


Рисунок 6.4 – Однофазне коротке замикання для Δ/Y_0

Струми вторинного ланцюга: $\dot{I}_a = -\dot{I}_b = \dot{I}_n; \dot{I}_c = 0$.

Струми у фазах первинного ланцюга:

$$\dot{I}_{A\phi} = -\dot{I}_a / k = -\dot{I}_n / k; \quad \dot{I}_{B\phi} = -\dot{I}_b / k;$$

Лінійні первинні струми:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{A\phi} - \dot{I}_{C\phi} = -\dot{I}_n / k; \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{B\phi} - \dot{I}_{A\phi} = 2\dot{I}_n / k; \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{C\phi} - \dot{I}_{B\phi} = -\dot{I}_n / k \end{aligned}$$

Центр зірки вторинних фазних напруг зсунеться відносно центра ваги трикутника лінійних напруг на величину $\dot{I}_0 z_2$, а не на $\dot{I}_0 z_2$, що має місце при схемі Y/Y_0 .

6.3 Порядок виконання роботи

1 Визначити дослідним шляхом первинні фазні та лінійні напруги і струми для таких схем і навантажень:

а) при двофазному короткому замиканні для схеми Y/Y (рисунок 6.1);

б) при двофазному короткому замиканні для схеми Δ/Y (рисунок 6.2);

в) при однофазному короткому замиканні для схеми Y/Y_0 (рисунок 6.3);

г) при однофазному короткому замиканні для схеми Δ/Y_0 (рисунок 6.4);

д) при однофазному замиканні трифазної групи трансформаторів для схеми Y/Y_0 (рисунок 6.3).

2 Визначити опори z_n, r_n, x_n схеми заміщення для струмів нульової послідовності для схеми Y/Y_0 .

Обробка дослідних даних:

1 Розрахувати з дослідних даних п. в) і д) опір z_n, r_n, x_n, z_{00} схеми заміщення струму нульової послідовності для з'єднання обмоток трансформаторів Y/Y_0 при однофазному короткому замиканні.

2 Знайти розрахунковим шляхом первинні лінійні й фазні струми для схеми п. 1 і порівняти з дослідними значеннями.

3 За даними дослідів п. в) і д) побудувати в масштабі векторні діаграми первинних лінійних і фазних напруг.

4 За векторними діаграмами для напруг знайти зсув нульових точок зірок первинних фазних напруг із центрів трикутників лінійних напруг.

5 Розрахувати зсув нульової точки зірки первинних фазних напруг для дослідів п. в) і д) за знайденим з п. 2 опором z_{00} і порівняти його з дослідними значеннями, отриманим з векторної діаграми.

6 Зробити висновки про доцільність застосування схем з'єднань, що досліджувались, і порівняти їх з рекомендаціями ДСТУ.

6.4 Пояснення й вказівки до роботи

1 Об'єктами дослідження є трифазний стрижневий і трифазний груповий трансформатори.

Як первинна обмотка використовується обмотка ВН, що живиться від джерела регульованої напруги (РНТ) $0 \div 220$ В. Перед вмиканням мережного вимикача РНТ необхідно встановити в положення, при якому його вихідна напруга дорівнює нулю (крутити ручку до упору проти годинникової

стрілки). Після вмикання мережного вимикача, плавно піднімаючи напругу на первинній обмотці, установити на вторинній обмотці трансформатора струм $I=15$ А і зробити всі необхідні виміри. У досліді п. д) груповий трансформатор підключати безпосередньо до мережі з $U=110$ В.

Вимір напруг і струмів виконується за допомогою вимірювального комплексу К-50. Слід пам'ятати, що прилад при з'єднанні нейтралі трансформатора й нейтралі комплексу вимірює напругу фаз трансформатора (рисунки 6.1 і 6.3). Для вимірювання фазної напруги мережі нульовий провід необхідно відключити.

Результати дослідів заносяться в таблицю 6.1.

Таблиця 6.1 – Досліди несиметричного короткого замикання

| Схема з'єднання | I_n А | I_{af} | | I_{bf} | | I_{cf} | | I_A | | I_B | | I_C | |
|-----------------|------------|------------|--------|------------|--------|------------|--------|------------|--------|------------|--------|------------|--------|
| | | розрахунок | дослід | розрахунок | дослід | розрахунок | дослід | розрахунок | дослід | розрахунок | дослід | розрахунок | дослід |
| | | | | | | | | | | | | | |
| Схема з'єднання | | U_{AB} | | U_{BC} | | U_{CA} | | U_A | | U_B | | U_C | |

3 У досліді визначення опорів z_n , r_n , x_n схеми заміщення для струмів нульової послідовності у випадку з'єднання обмоток трансформатора за схемою Y/Y_0 по фазах вторинної обмотки НН повинен протікати тільки струм нульової послідовності, а первинна обмотка ВН повинна являти собою розімкнутий контур. Цій умові відповідає живлення однофазним струмом трьох послідовно з'єднаних фаз вторинної обмотки НН при розімкнутій первинній обмотці ВН, як показано на рисунку 6.5. Знижена напруга, підведена від регулятора напруги, є в цьому випадку напругою нульової послідовності, а опір обмотки НН - опором струму нульової послідовності. Схема заміщення трансформатора, що відповідає цьому досліді, показана на рисунку 6.6.

Значення струму в п. 3 (п. 6.3) варто брати рівним струму нульової послідовності в досліді в), що дорівнює для стрижневого трансформатора $I_a = I_n/3$ (при $I_n=15$ А струм $I_a=5$ А) і для групового трансформатора – $I_0=I_n/3=5/3=1,67$ А.

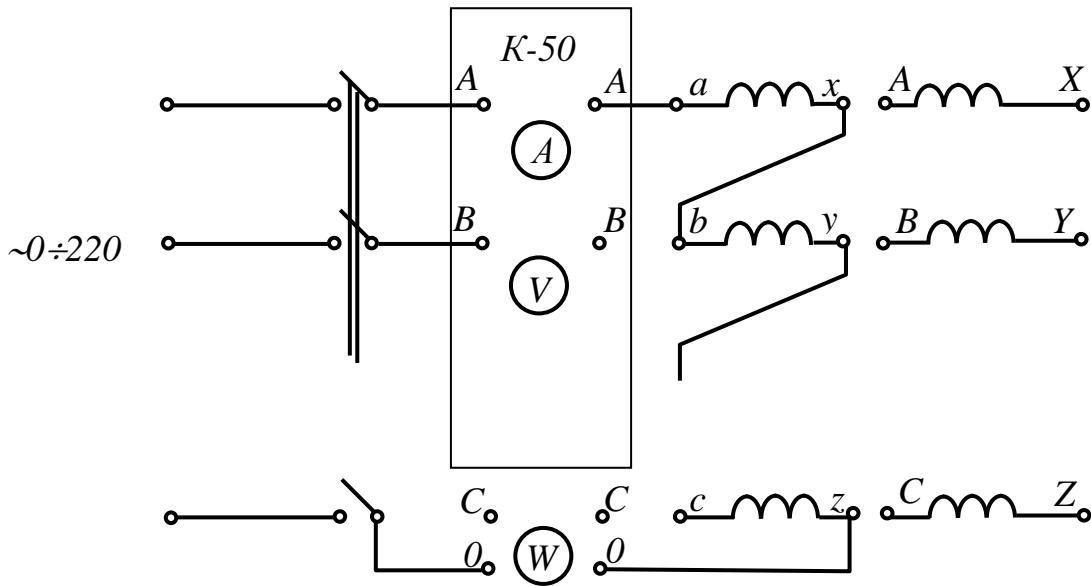


Рисунок 6.5 – Схема з'єднання обмоток трансформатора для визначення опору струму нульової послідовності

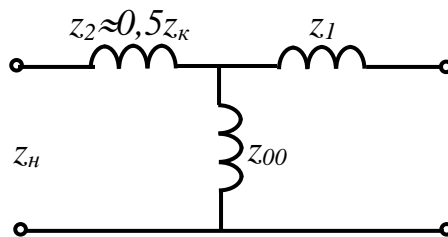


Рисунок 6.6 – Схема заміщення трансформатора для струмів нульової послідовності

$$z_n = \frac{U_{0\phi}}{I_0} = \frac{U_0}{3I_0};$$

$$r_n = \frac{P_a}{3I_a^2}; \quad x_n = \sqrt{z_n^2 - r_n^2};$$

$$z_{00} = \sqrt{(r_n - 0,5r_k)^2 + (x_n - 0,5x_k)^2},$$

де z_2 – опір вторинної обмотки НН;
 z_{00} – опір взаємоіндукції;
 r_k і x_k – активний і індуктивний опори короткого замикання трансформатора, наведені до вторинної обмотки.

Для досліджуваних трансформаторів вони дорівнюють: для стрижневого $r_k=0,2$ Ом, $x_k=0,03$ Ом; для групового $r_k=0,2$ Ом, $x_k=0,05$ Ом (таблиця 6.2).

Таблиця 6.2 –Результати досліджуваних параметрів

| Дослід | | | | Розрахунок | | | |
|--------------------|--------------------|----------------|----|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| U _a , В | I _a , А | P ₀ | | z _н , Ом | r _н , Ом | x _н , Ом | X ₀₀ , Ом |
| | | довідкове | Вт | | | | |
| | | | | | | | |

3 При підготовці до виконання роботи або після проведення експериментальної частини (за вказівкою викладача) необхідно розрахувати фазні й лінійні струми первинного кола, задавшись струмом навантаження $I_n=15$ А для стрижневого трансформатора й $I_n=5$ А для групового (при розрахунках струмом, що намагнічує, знехтувати).

Результати розрахунку занести в таблицю 6.1.

4 Діаграми первинних лінійних напруг у дослідях п в) і г) (п. 6.3) являють собою трикутники. Масштаб напруг варто вибрати таким, щоб сторони трикутника лінійних напруг були не менше 80...100 мм.

5 Зсув нульової точки при несиметричному навантаженні визначають як відстань, обмірювану в масштабі напруги, між центром трикутника лінійних напруг і нульовою точкою фазних напруг.

6 Зсув $\dot{U}_{Aa} = kI_0 z_{00}$ нульової точки зірки первинних фазних напруг розраховують для струму, що дорівнює струму нульової послідовності в досліді п. в) і г) (п. 6.3) ($I_a=5$ А при $I_n=15$ А).

6.3 Контрольні питання

1 Чому у випадку двофазного короткого замикання при з'єднанні обмоток трансформатора за схемою Y/Y_0 нейтральна точка зсувається, а при з'єднанні обмоток Δ/Y не зсувається?

2 Чому за відсутності струмів нульової послідовності можна проводити дослідження несиметричної роботи трансформатора без розкладання струмів на симетричні складові?

3 Наведіть приклади несиметричного навантаження трансформатора.

4 До чого призводить несиметричне навантаження трансформатора?

5 До яких неприємних наслідків в експлуатації призводить несиметрія фазних напруг?

6 У яких випадках при несиметричному навантаженні з'являється струм нульової послідовності?

7 По яких шляхах замикається магнітний потік нульової послідовності в тристріжневому трансформаторі?

8 По яких шляхах замикається магнітний потік нульової послідовності в груповому трансформаторі?

9 Для чого й у яких випадках застосовують компенсаційну обмотку в трансформаторі?

10 Який вплив обмотки, з'єднаної в трикутник, на зсув нульової точки зірки фазних напруг із центра лінійних напруг?

11 Якою є частота струму нульової послідовності, що протікає по нульовому проводу при несиметричному навантаженні?

12 Чому по обмотці, з'єднаної трикутником, протікає струм не тільки основний, але й потрійної частоти, що не залежить від навантаження?

13 Як можна визначити опір нульової послідовності трансформатора?

14 У яких випадках струм нульової послідовності, що протікає по вторинній обмотці, є струмом, що намагнічує і створює магнітний потік нульової послідовності?

15 Як визначити струм нульової послідовності, якщо відомо струм нульового проводу?

16 Який метод застосовується при дослідженні несиметричного навантаження?

17 Який існує принцип визначення струмів у первинному колі трансформатора при різних схемах з'єднання обмоток, якщо відомі струми навантаження?

18 У яких схемах струм нульової послідовності не трансформується в первинне коло?

19 У якому трансформаторі, що має схему обмоток Y/Y_0 , буде більшим зсув нульової точки при несиметричному навантаженні:

а) у трансформаторі, поміщеному в сталевий бак або в трансформаторі без бака;

б) у трансформаторі стрижневому або груповому?

20) За якою схемою з'єднують первинну обмотку групового трансформатора, якщо вторинні обмотки з'єднані в Y_0 ? Чому?

21) У яких випадках несиметричного навантаження має місце перекручування зірки фазних напруг?

Список літератури

1 Марквардт, К.Г. Электроснабжение электрофицированных железных дорог [Текст] / К.Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1985. – 463 с.

2 Мамошин, Р.Р., Электроснабжение электрофицированных железных дорог [Текст] / Р.Р. Мамошин, А.Н. Зимакова. – М: Транспорт, 1980. – 296 с.

3 ЦЕ-0002. Інструкція з технічного обслуговування і ремонту пристроїв електропостачання систем сигналізації, централізації та блокування [Текст]: затв. наказом Укрзалізниці [Текст] від 09 лютого 2012 р. №048-Ц. – К., 2012. – 53 с.

