

Вінницький національний технічний університет

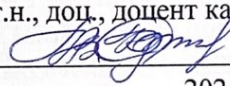
Факультет електроенергетики та електромеханіки

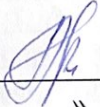
Кафедра електричних станцій та систем

Бакалаврська дипломна робота на тему:

**«АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТА УМОВ
ЗАСТОСУВАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ
СТРУМУ ТА НАПРУГИ»**

Виконав: студент 4 курсу, групи 1ЕЕ-206
спеціальності 141 – «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
за ОП «Електроенергетика та електротехніка»,
Кочик В. М. 

Керівник: к.т.н., доц., доцент каф. ЕСС
Остра Н. В. 
« ____ » _____ 2024 р.

Рецензент: к.т.н., доц. каф. ЕССЕМ
(наук. ступінь, вч. звання, назва кафедри)
 Бавенко О.П.
« ____ » _____ 2024 р.

Допущено до захисту
Завідувач кафедри ЕСС
д.т.н., професор Комар В.О.

« Н » об _____ 2024 р.

Вінниця ВНТУ – 2024 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій та систем
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань – 14 «Електрична інженерія»
Спеціальність – 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітньо-професійна програма – Електроенергетика та електротехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕСС

д.т.н., професор Комар В. О.

«11» 23 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Кочику Вадиму Михайловичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Аналіз конструктивних особливостей та умов застосування вимірювальних трансформаторів струму та напруги

Керівник роботи: к.т.н., доц., доцент каф. ЕСС Остра Наталя Вікторівна
затверджена наказом вищого навчального закладу від 11.03.2024 року №80

2. Термін подання студентом роботи червня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: Перелік літературних джерел за тематикою роботи: 1. Лесько В. О., Кравчук С. В., Сікорська О. В. Електричні апарати : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2017. – 145 с. 2. Лежнюк П. Д., Лагутін В. М., Тептя В. В. Проектування електричної частини електричних станцій : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2009. 194 с. 3. Посилання на періодичні видання. Вихідні дані для проведення обчислювальних експериментів: номінальні параметри вимірювальних трансформаторів струму та напруги, номінальна напруга ВРУ 220 кВ.

4. Зміст текстової частини: 1. Аналіз умов експлуатації та застосування вимірювальних трансформаторів струму. 2. Аналіз конструкцій вимірювальних трансформаторів струму. 3. Дослідження особливостей застосування та умов експлуатації вимірювальних трансформаторів напруги. 4. Аналіз будови вимірювальних трансформаторів напруги. 5. Аналіз умов вибору вимірювальних трансформаторів струму та напруги. 6. Охорона праці. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 1. Принципова схема вимірювального трансформатора струму. 2. Конструктивні особливості трансформатора струму типу ТПОЛ-10. 3. Особливості виконання схем з'єднань обмоток трансформаторів струму. 4. Принципова схема вимірювального трансформатора напруги. 5. Особливості виконання вимірювального трансформатора напруги типу ЗНОМ-20. 6. Види схем з'єднань обмоток трансформаторів напруги. 7. Аналіз умов вибору

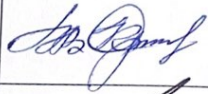
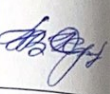
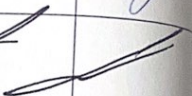
Індивідуальний навчальний план студ. Мільсевич Віталій Олександрович
гр. ЕСС-23м, 3-й № 03-23-354, спец. Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, Електричні станції та системи

1 семестр/триместр

№
1 Створення предметної області дослідження
2 Визначення та формулювання цілей
3 Складання

вимірювальних трансформаторів струму. 8. Особливості вимірювальних трансформаторів напруги.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконав прийняв
Спеціальна частина	Керівник роботи Остра Н. В., к.т.н., доц., доцент кафедри ЕСС		
Охорона праці	Кобилянський О. В. д.пед.н., проф., професор каф. БЖДПБ		

7. Дата видачі завдання 16 січня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва та зміст етапів	Термін виконання етапів роботи		Прим.
		початок	кінець	
1	Вступ. Огляд літературних джерел	21.01.24	03.02.24	
2	Аналіз умов експлуатації та застосування вимірювальних трансформаторів струму	04.02.24	22.02.24	
3	Аналіз конструкцій вимірювальних трансформаторів струму	23.02.24	10.03.24	
4	Дослідження особливостей застосування та умов експлуатації вимірювальних трансформаторів напруги	11.03.24	04.04.24	
5	Аналіз будови вимірювальних трансформаторів напруги	05.04.24	29.04.24	
6	Аналіз умов вибору вимірювальних трансформаторів струму та напруги	30.04.24	10.05.24	
7	Охорона праці	11.05.24	19.05.24	
8	Формування висновків по роботі, оформлення пояснювальної записки	20.05.24	25.05.24	
9	Виконання ілюстративної частини та оформлення презентації	26.05.24	04.06.24	
11	Перевірка БДР на плагіат. Попередній захист БДР	05.06.24	07.06.24	
12	Рецензування БДР	08.06.24	10.06.24	
	Захист БДР	За графіком		

Студент

Керівник роботи

(підпис)

(підпис)

Кочик В. М.

(ініціали та прізвище)

Остра Н.В.

(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

УДК 621.311.1

Кочик Вадим Михайлович «Аналіз конструктивних особливостей та умов застосування вимірювальних трансформаторів струму та напруги». Бакалаврська дипломна робота. – Вінниця: ВНТУ. – 2024. – 78 с. Бібліогр.: 23. Рис.: 27. Табл.: 9.

У бакалаврській дипломній роботі проаналізовано конструктивні особливості та умови застосування вимірювальних трансформаторів струму та напруги.

В першому розділі проаналізовано умови експлуатації та застосування вимірювальних трансформаторів струму. У другому розділі проаналізовано конструкції вимірювальних трансформаторів струму. Третій розділ присвячено дослідженню особливостей застосування та умов експлуатації вимірювальних трансформаторів напруги. У четвертому розділі проаналізовані конструкції вимірювальних трансформаторів напруги. У п'ятому розділі проаналізовано умови вибору вимірювальних трансформаторів струму та напруги для відкритої розподільної установки 220 кВ.

У розділі охорони праці розроблені заходи із охорони праці при обслуговуванні вимірювальних трансформаторів струму та напруги.

Ключові слова: вимірювальний трансформатор струму, вимірювальний трансформатор напруги, експлуатація, застосування, будова, відкрита розподільна установка, напруга трансформатора.

ABSTRACT

Kochyk Vadym «Analysis of design features and application conditions of current and voltage measuring transformers». Bachelor thesis. – Vinnytsia : VNTU. – 2024. – 78 p. Bibliography: 23. Fig.: 27. Tables. 9.

The bachelor's thesis analyzed the design features and conditions of use of current and voltage measuring transformers.

The first section analyzes the conditions of operation and application of measuring current transformers. In the second section, designs of measuring current transformers are analyzed. The third section is devoted to the study of the features of application and operating conditions of measuring voltage transformers. In the fourth chapter, designs of measuring voltage transformers are analyzed. The fifth section analyzes the conditions for selecting current and voltage measuring transformers for an open 220 kV switchgear.

In the labor protection section, labor protection measures have been developed in the maintenance of current and voltage measuring transformers.

Key words: measuring current transformer, measuring voltage transformer, operation, application, structure, open switchgear, transformer voltage.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 АНАЛІЗ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ.....	7
1.1 Принцип дії, призначення та основні параметри вимірювальних трансформаторів струму.....	7
1.2 Аналіз класифікацій трансформаторів струму.....	15
1.3 Дослідження способів перевірки трансформаторів струму.....	17
1.4 Методи зменшення похибок у трансформаторах струму	23
2 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ.....	28
2.1 Особливості конструкції вимірювальних трансформаторів струму.....	28
2.2 Особливості схем з'єднань обмоток трансформаторів струму	35
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ ТА УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ НАПРУГИ ..	41
3.1 Призначення, принцип дії та основні параметри вимірювальних трансформаторів напруги.....	41
3.2 Дослідження різновидів трансформаторів напруги	45
3.3 Аналіз способів перевірки трансформаторів напруги.....	46
3.4 Способи компенсації похибок у трансформаторах напруги	49
4 АНАЛІЗ БУДОВИ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ НАПРУГИ	50
4.1 Особливості конструкції трансформаторів напруги	50
4.2 Дослідження схем з'єднання обмоток в трансформаторах напруги	55
5 АНАЛІЗ УМОВ ВИБОРУ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ І НАПРУГИ	58
5.1 Умови вибору вимірювального трансформатора струму	58
5.2 Аналіз порядку вибору вимірювальних трансформаторів напруги.....	60
6 ОХОРОНА ПРАЦІ	62
6.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта.....	63
6.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць	63
6.1.2 Електробезпека.....	65
6.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	67

	3
6.2.1 Мікроклімат	67
6.2.2 Склад повітря робочої зони	67
6.2.3 Виробниче освітлення	68
6.2.4 Виробничий шум.....	69
6.3 Технічні рішення з пожежної безпеки	70
ВИСНОВКИ.....	73
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	75

ВСТУП

Українська електроенергетика зазнає великих збитків під час повномасштабного вторгнення. Масовані обстріли об'єктів критичної інфраструктури призвели до руйнування більш ніж 60% інфраструктури енергетики. Були пошкоджені або й повністю зруйновані теплові електростанції, теплоелектроцентралі, гідроелектростанції, магістральні та розподільні мережі, підстанції різних класів напруг та інші важливі об'єкти. У складних умовах функціонують також і атомні станції. Тому, відповідно до сучасних реалій, важливою задачею є забезпечення захисту усіх енергетичних об'єктів, а також відновлення пошкоджених електричних станцій, трансформаторних підстанцій, ліній електропередачі та багато інших об'єктів енергетики [1].

Завдяки зусиллям професійних фахівців, повного колапсу енергетики вдалось запобігти. Вдалось зберегти і відновити електропостачання в усіх регіонах, а також розпочати проведення ремонтних робіт. Відповідно до звіту Міненерго, станом на серпень 2023 року було здійснено ремонт п'яти атомних блоків, а також проводяться ремонтні роботи на 24 блоках теплових електростанцій, що складають 62% від сумарної кількості. Теплоелектроцентралі пошкоджені на 70%, при цьому інша частина перебуває в ремонті. Відремонтовано, або перебувають в стані ремонту й 32 гідроагрегати на гідроелектростанціях, що складають 68% від загальної потужності гідроенергетики.

Напруга електротехнічних установок може досягати високих значень, як декількох сотень кіловольт, і навіть вище. Струми в даних установках також можуть перевищувати величину в декілька кілоампер, і для безпосереднього вимірювання величини струму та напруги необхідне дороге та громіздке обладнання. Тому, доцільним рішенням в даному випадку є використання первинних вимірювальних перетворювачів струму та напруги [2].

Первинні вимірювальні перетворювачі струму являють собою пристрої, метою яких є створення уніфікованої шкали номінальних вторинних струмів, а також ізоляція вторинних вимірювальних кіл від силових (первинних) кіл.

На теперішній момент, як в енергетичній системі України, так і загалом в світі, найбільш розповсюдженими первинними вимірювальними перетворювачами струму є трансформатори струму.

Призначенням ж вимірювальних перетворювачів напруги є ізоляція вторинних (вимірювальних) кіл від первинних силових, і створення стандартної шкали вторинних номінальних напруг.

На сьогодні, в енергетичних системах застосовуються первинні вимірювальні перетворювачі напруги конденсаторного, електромагнітного типу та оптико-електронні. У первинних вимірювальних перетворювачах напруги оптико-електронного типу відсутні недоліки, що присутні у вимірювальних перетворювачах електромагнітного типу – це явище ферорезонансу, насичення магнітопроводу, проте їх вартість значно перевищує вартість традиційних перетворювачів напруги конденсаторного та електромагнітного типу, тому вони не застосовуються широко в Україні.

Найпоширенішими первинними вимірювальними перетворювачами напруги в Україні є трансформатори напруги, що виконані на електромагнітному принципі.

Отже, аналіз конструктивних особливостей та умов застосування вимірювальних трансформаторів струму та напруги в даний момент є **актуальною задачею** в умовах сучасного стану енергетики.

Метою даної бакалаврської дипломної **роботи** є аналіз конструктивних особливостей та умов застосування вимірювальних трансформаторів струму та напруги.

У відповідності із поставленою метою в роботі розв'язуються наступні **основні задачі**:

1. Аналіз умов експлуатації та застосування вимірювальних трансформаторів струму.

2. Аналіз конструкцій вимірювальних трансформаторів струму.
3. Дослідження особливостей застосування та умов експлуатації вимірювальних трансформаторів напруги.
4. Аналіз будови вимірювальних трансформаторів напруги.
5. Аналіз умов вибору вимірювальних трансформаторів струму та напруги
6. Аналіз питань щодо забезпечення охорони праці при обслуговуванні вимірювальних трансформаторів струму та напруги.

Об'єктом дослідження даної роботи є гідроелектрична станція, а **предметом дослідження** є вимірювальні трансформатори струму та напруги.

1 АНАЛІЗ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ

1.1 Принцип дії, призначення та основні параметри вимірювальних трансформаторів струму

Трансформатор струму (ТС) – це трансформатор, у якого первинна обмотка підключається послідовно до струмового кола силового обладнання, а до його вторинної обмотки приєднують захисні прилади (пристрої релейного захисту та автоматики), пристрої обліку електричної енергії (лічильники електроенергії) тощо, як показано на рисунку 1.1.

При нормальній експлуатації ТС, його вторинний струм, що протікає у вторинній обмотці є практично пропорційним струму в первинній обмотці, і є зсунутим відносно нього на кут, що близький до значення нуль градусів [3].



Рисунок 1.1 – Типова спрощена схема трансформатора струму

Призначенням вимірювального ТС є забезпечення перетворення змінного струму будь-якої величини в струм, необхідний для безпосереднього вимірювання за допомогою стандартних приладів обліку електричної енергії, а також перетворення змінного струму до значення, що буде зручним для вимірювання, тобто він необхідний для створення стандартної шкали вторинних номінальних струмів. Також, однією із ролей даного вимірювального приладу є ізоляція вторинних вимірювальних кіл від силових

первинних. Ізоляція первинних кіл від вторинних необхідна для безпеки вимірювань, оскільки напруга в первинних колах доволі часто може складати десятки, сотні кіловольт, що може нести загрозу життю людини.

ТС активно застосовуються для вимірювання електричного струму у пристроях релейного захисту та автоматики захисту електроенергетичних систем, тому однією з вимог для його ефективної роботи є висока точність. Вимірювальні ТС також використовуються для обліку спожитої, виробленої електроенергії, для підключення приладів релейного захисту, амперметрів.

Від ТС сильно залежить точність обліку електроенергії та вимірювання параметрів, вчасність спрацювання пристроїв релейного захисту у разі аварій та при особливих режимах роботи електричного обладнання.

Окрім ТС, принцип роботи який базується на електромагнітному принципі, за кордоном активно застосовуються оптико-електронні перетворювачі, котушки Роговського.

В оптико-електронному перетворювачі, який ще також називають оптичним ТС, в основу роботи покладений принцип Фарадея – ефект пропорційної залежності кута повороту лінійно поляризованого світла від дії величини напруженості магнітного поля електричному струму. Оптико-електронний перетворювач здатен вимірювати миттєві значення струму, не маючи прямого контакту з проводом. Сигнал від оптичного трансформатора струму передається по оптико-волоконному кабелю прямо до спеціальних перетворюючих приладів, де він перетворюється в цифровий або аналоговий електричний сигнал, який підводиться безпосередньо до пристроїв релейного захисту та автоматики. Такі пристрої зараз активно виробляють зарубіжні виробники, такі як NxtPhase.

Наступний прилад, а саме: котушка Роговського – це вимірювальний ТС, у якого відсутнє магнітне осердя, а струм первинної обмотки в ньому створює ЕРС у вторинній обмотці через повітряний простір. Котушка намотується на повітряне осердя таким чином, щоб через його отвір можна було пропустити шину з вимірюваним струмом. Задля зменшення збиткових ємностей,

намотувати витки на котушку необхідно в однаковому напрямку, з рівними відстанями один від одного.

Сильною стороною таких пристроїв, що виконані на основі котушки Роговського, є відсутність у первинному перетворювачі магнітопроводу, через що такі прилади мають значно меншу похибку, на відміну від пристроїв, виконаних на електромагнітному принципі. Відсутність магнітопроводу також здешевлює конструкцію, а ще завдяки цьому пристрій має менші габарити у порівнянні із традиційними первинними перетворювачами. Завдяки цим особливостям, пристрої, що виконані на основі котушки Роговського активно розробляються за кордоном, зокрема відомими виробниками, як фірма АВВ [4].

Хоча оптико-електронні перетворювачі та прилади, виконані на основі котушки Роговського і починають широко використовуватись за кордоном і є перспективними розробками, поки що їх вартість все ще перевищує ціну традиційних перетворювачів струму, тому вони не будуть в найближчому майбутньому активно експлуатуватись в Україні.

ТС доводиться працювати в різних режимах, що мають місце в електричних колах, а саме в усталеному і перехідному режимах.

Усталеним називають такий режим роботи трансформатора струму, за якого струми у первинній та вторинній обмотках не мають вільних затухаючих аперіодичних та періодичних складових. Одним із видів такого даного режиму є нормальний режим роботи трансформатора струму, при якому первинний та вторинний струми, похибки і напруги між обмотками не перевищують допустимих значень при заданих умовах експлуатації. До усталених режимів також відноситься трансформація струму короткого замикання, або іншого струму, що відмінний від нормального робочого струму установки, після затухання вільних складових.

Перехідним режимом роботи ТС називають електромагнітний процес, що виникає при переході від одного режиму до іншого, внаслідок різкої зміни параметрів первинного струму або навантаження. При перехідному режимі по

первинній та вторинній обмотках протікають вільні затухаючі складові струмів.

При вірному виборі трансформатора струму, в його обмотках в жодному з режимів не повинні перевищуватись допустимі за термічною і динамічною стійкістю значення.

Умови роботи трансформаторів струму, призначених для вимірювань, відрізняються від умов роботи захисних трансформаторів струму. Основним режимом роботи трансформатора струму для вимірювання є нормальний режим. При такому режимі ТС повинен забезпечувати пропорційне відтворення первинного струму з найменшими відхиленнями як модуля, так і фази.

Робота ж більшої частини захисних ТС починається лише з моменту виникнення в лінії або обладнанні аварійного стану, що характеризується струмом перевантаження або струмом короткого замикання, що в декілька разів перевищує робочий струм лінії.

У ТС в робочому стані режим роботи близький до короткого замикання у вторинній обмотці, при цьому режимі струм намагнічення не є значним і зазвичай не досягає і 10% від значення вторинного струму. На відміну від трансформатора напруги, режим холостого ходу для трансформатора струму є небезпечним. Результируючий магнітний потік у магнітопроводі трансформатора струму рівний різниці магнітних потоків, що створюються у первинній та вторинній обмотках, і при нормальному режимі експлуатації це значення не є великим. Проте, при розмиканні кола вторинної обмотки, у сердечнику протікатиме лише магнітний потік первинної обмотки, що значно перевищує результируючий магнітний потік при нормальному режимі роботи. Внаслідок цього стрімко зростають втрати у сердечнику, відбувається процес перегрівання у трансформаторі струму і виникає загроза виходу з ладу, або й з'являється небезпека виникнення пожежі в ньому.

Крім того, на кінцях розімкненої вторинної обмотки виникає велика електрорушійна сила, що несе за собою загрозу життю обслуговуючому

персоналу, через це трансформатор струму заборонено підключати до лінії без підключеного до нього вимірювального приладу, а при необхідності відключення вимірювального приладу від вторинної обмотки трансформатора струму, вторинну обмотку необхідно закоротити. Тому, суворо заборонено розмикання вторинної обмотки трансформатора струму під час його експлуатації. У разі необхідності розривання цих кіл, спочатку необхідно їх замкнути перемичкою, встановленою за передбачуваного місця розриву. При встановленні перемички потрібно використовувати інструменти з ізолювальними рукоятками.

Відповідно до Правил улаштування електроустановок [5], трансформатори струму повинні забезпечувати наступні вимоги: вторинна обмотка ТС повинна обов'язково заземлюватись, для захисту людини від ураження електричним струмом у разі пробою ізоляції; повинна забезпечуватись точна робота пристроїв релейного захисту та автоматики – повна похибка ТС не повинна перевищувати значення в 10%; повна відсутність перенапруги, небезпечної для вторинного обладнання та обслуговуючого персоналу, що може виникнути на вторинній обмотці у разі максимального режиму короткого замикання; необхідне забезпечення надійної роботи вимірювальних органів релейного захисту та автоматики у разі протікання максимального струму трифазного короткого замикання, коли можливе спотворення форми кривої вторинного струму.

У разі виконання робіт на ТС або в колах, що підключені до їх вторинних обмоток, потрібно притримуватись наступних запобіжних заходів: затискачі вторинних обмоток до закінчення монтажу кіл, що підключаються до них, потрібно закоротити. Після підключення змонтованих кіл до ТС, закоротку варто перемістити на найближчу збірку затискачів і зняти її після повного закінчення монтажних робіт, а також перевірки вірності приєднань змонтованих кіл; заборонено відключати заземлювальний провідник вторинної обмотки до вимкнення приєднання; при перевірці полярності, перед додаванням імпульсів струму до первинної обмотки, пристрої слід підключити

до затискачів вторинної обмотки; заборонено застосовувати шини первинних обмоток у ролі струмопровідних під час монтажних робіт [6].

Одним із основних параметрів ТС є його номінальна напруга – тобто діюче значення лінійної напруги. Існує стандартна шкала номінальних напруг для трансформаторів струму: 0,66; 6; 10; 15; 20; 24; 27; 35; 110; 150; 220; 330; 500; 750; 1150 кВ.

Задля одноманітності вторинного обладнання також використовується стандартна шкала вторинних номінальних струмів: 1; 5 А. Завдяки цьому, стандартні трансформатори струму, маючи різні первинні номінальні струми, які залежать від класу напруги та потужності, завжди мають вторинний номінальний струм рівний 1 або 5 А. В Україні на напругу 330 кВ та вище застосовуються ТС із номінальним вторинним струмом 1 А, а для нижчого класу напруг використовують ТС із номінальним вторинним струмом рівним 5 А. За кордоном, трансформатори струму із номінальним струмом 1 А зазвичай не використовуються, а віддається перевага п'яти амперним трансформаторам струму для всіх класів напруг.

Також є стандартизовані й первинні номінальні струми, за наступним принципом: 15; 20; 30; 40; 50; 75; 100; 150; 200; 300; 400; 500; 600; 750; 800; 1000; 1200; 1500; 2000; 3000 А.

Відповідно до струмів у первинній та вторинній обмотках, використовується таке поняття як коефіцієнт трансформації, який показує, при якому первинному номінальному струмі у вторинному колі буде протікати стандартний струм (1 або 5 А). Коефіцієнт трансформації ТС являє собою відношення первинного номінального струму до номінального вторинного струму і записується у вигляді дроби, наприклад: $100/5$ – у первинній обмотці значення струму рівне 100 А, а у вторинній обмотці протікає струм 5 А.

Також у ТС присутні наступні три види похибок: струмова похибка, кутова та повна похибки. Всі три види похибок є взаємопов'язаними і залежать від струму намагнічення I_m , оскільки зі збільшенням насичення магнітопроводу росте значення опору намагнічення, що призводить до зростання

намагнічувального струму I_μ , і внаслідок цього зростає різниця між приведеним первинним та вторинним струмами.

Отже, першою похибкою є приведена струмова f , яка показує відносну різницю між значеннями приведенного первинного і вторинного струмів у трансформаторі, визначається за наступною формулою:

$$f = k_{\text{ном}} \cdot \frac{I_2 - I_1 \cdot 100\%}{I_1}, \quad (1.1)$$

де $k_{\text{ном}} = I_{1\text{ном}}/I_{2\text{ном}}$ – номінальне значення коефіцієнта трансформації.

У справжньому трансформаторі струм вторинної обмотки зсунутий по фазі відносно струму у первинній обмотці на кут, відмінний від 180 градусів. Тому, для відліку кутової похибки вектор струму вторинної обмотки повертають на 180 градусів.

Кутова похибка δ – це кут між вектором вторинного струму і вектором первинного струму. Вона демонструє, наскільки є зсунутою є величина струму вторинної обмотки відносно приведенного значення первинного струму. Дана похибка тісно пов'язана зі струмовою, якщо значення струмової похибки складає $f < 10\%$, тоді і кутова похибка $\delta < 10\%$. Коли перевернутий вектор вторинного струму випереджає первинний струм, тоді похибка додатна, а якщо відстає – тоді похибка має від'ємне значення.

Струмова та кутова похибки зазвичай використовується для оцінки роботи ТС при його номінальну режимі, коли $I_1 < I_{1\text{ном}}$.

Остання, повна похибка трансформатора струму ε – відношення модуля різниці комплексів вторинного струму і приведенного первинного до модуля комплексу приведенного первинного струму:

$$\varepsilon = \frac{|I_2 - I_1'|}{|I_1'|} \cdot 100\%. \quad (1.2)$$

Проте, дана формула використовується якщо струм синусоїдальний, в іншому ж випадку повна похибка визначається як відношення діючого значення різниці миттєвих значень первинного та вторинного струмів, до діючого значення первинного струму:

$$\varepsilon = \frac{100}{|I_1|} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T (k_{\text{ном}} \cdot i_2 - i_1)^2 \cdot dt, \%}, \quad (1.3)$$

де i_1, i_2 – миттєві значення первинного і вторинного струмів;

T – період промислової частоти (при $f = 50$ Гц, період $T = 0,02$ с).

Повна похибка зазвичай використовується для оцінювання роботи ТС під час короткого замикання, коли значення струму у первинній обмотці вище номінального. Величина повної похибки є завжди більшою за струмову похибку: $\varepsilon > f$.

Ще одним важливим параметром ТС є його клас точності. Величина класу точності відповідає граничній струмовій похибці трансформатора, при первинному струмі, рівному 1-1,2 від номінального.

Номінальний клас точності – це такий клас точності, який гарантується при номінальному вторинному навантаженні, і вказаний у паспорті.

За своїм класом точності ТС розрізняють за напрямком застосування: клас точності 0,2 – застосовується для точних вимірювань; 0,5 – використовують в лічильниках електричної енергії; 1,0 – для всіх технічних вимірювальних приладів; 10,0 – в релейному захисті та автоматичі.

Якщо в класі точності ТС присутня літера S, це означає, ТС знаходитиметься в своєму класі точності при величині первинного струму рівного від 0,2 до 1,2 від його номінального значення струму.

Ще однією характеристикою ТС є його номінальна гранична кратність – це кратність струму первинної обмотки відносно його номінального значення, за якої струмова похибка досягає 10%.

Номинальне навантаження – це загальний опір усього обладнання, що підключене до вторинної обмотки, при якому ТС працює із заданим граничним класом точності.

Струм термічної стійкості – найвище максимальне діюче значення струму короткого замикання за час t , при якому трансформатор струму працює протягом часу t без нагріву струмоведучих частин до температури, що перевищує допустимі при струмах короткого замикання.

Номинальний коефіцієнт безпеки електричних пристроїв являє собою відношення первинного струму номинально допустимої похибки до номинального струму у первинній обмотці.

Номинальний струм електродинамічної стійкості – максимальна величина струму первинної обмотки, при якому ТС повинен витримувати силовий електромагнітний вплив, коли закорочена його вторинна обмотка.

1.2 Аналіз класифікацій трансформаторів струму

За своєю роллю, метою застосування, трансформатори струму можна класифікувати за наступними відповідними ознаками.

За призначенням ТС розрізняють:

- вимірювальні – для підключення лічильників електроенергії, амперметрів, та інших вимірювальних приладів);
- захисні – для живлення пристроїв релейного захисту та автоматики. Такі трансформатори струму мають розширений діапазон вимірювань струмів короткого замикання;
- проміжні – необхідні для узгодження вторинних кіл трансформаторів та реле;
- лабораторні – для перевірки приладів і дослідницьких цілей. Вони мають підвищений клас точності.

За методом розташування, трансформатори струму поділяються на наступні види: опорні, для розміщення на опорних площинах; прохідні,

використовуються як вводи, розміщуються прямо в стінах, в стелі або в металевих конструкціях; вбудовані в електричні апарати.

За кількістю ступенів трансформації бувають одноступінчасті, багатоступеневі трансформатори струму, які можуть мати декілька ступенів трансформації струму.

За кількістю коефіцієнтів трансформації їх можна розділити на такі трансформатори струму, що мають один коефіцієнт трансформації, або декілька коефіцієнтів трансформації. Їх отримують за допомогою зміни кількості витків первинної або вторинної обмоток, або завдяки наявності декількох вторинних обмоток, що мають різну кількість витків, які можна перемикати між собою.

За місцем установки, а також кліматичними умовами, трансформатори струму розрізняють: для зовнішнього використання, застосовуються на відкритому просторі, у відкритих розподільних пунктах; для закритої експлуатації, використовуються у закритому просторі; вбудовані у електричні машини та апарати, такі як: трансформатори, генератори, вимикачі; переносні, для лабораторних вимірювань; накладні, які вставляються на прохідний ізолятор; для спеціального устаткування, на електричному транспорті, кораблях, шахтах [3].

За виконанням первинної обмотки їх класифікують як одновиткові, багатовиткові. Окрім цього, одновиткові трансформатори струму мають два різновиди, а саме: з власною первинною обмоткою, і без власної первинної обмотки .

Якщо одновитковий трансформатор струму не має власної первинної обмотки, його виконують шинним, роз'ємним або вбудованим.

Одновиткові трансформатори, в яких є власна первинна обмотка, поділяються на такі, які мають стрижневу, або U-подібну первинну обмотку.

Багатовиткові трансформатори струму із власною первинною обмоткою поділяються на трансформатори з: петльовою первинною обмоткою, в якій є кілька витків; котушковою первинною обмоткою, яку одягають на

магнітопровід; ланковою первинною обмоткою, в якій внутрішня ізоляція поділена між первинною та вторинною обмотками; рамоподібною первинною обмоткою, в якій майже вся частина внутрішньої ізоляції нанесена на первинну обмотку.

За призначенням вторинних обмоток: для вимірювання струму, обліку електричної енергії; для релейного захисту та автоматики, керування; лабораторні, для роботи з нормованою точністю в перехідних режимах.

За виконанням ізоляції: із сухою ізоляцією (фарфоровою, бакелітовою, литою епоксидною ізоляцією); з паперово масляною ізоляцією; з газоподібною ізоляцією; із в'язкою ізоляцією, які залиті компаундом.

За робочою напругою розрізняють: на низьку напругу (до 1000 В), і на високу напругу (понад 1000 В).

1.3 Дослідження способів перевірки трансформаторів струму

Перевірка ТС необхідна для визначення його стану, вона проводиться під час його налаштування, при введенні в експлуатацію нових пристроїв релейного захисту та автоматики, і при його довгій експлуатації [7].

Під час перевірки ТС перевіряють їх коефіцієнти трансформації, однополярності виводів обмоток, випробовують ізоляцію первинних, вторинних обмоток, та міжвиткової і міжсекційної ізоляції, проводиться перевірка їх схеми підключень. Також здійснюють перевірку на відхилення в 10%, додатково ще проводиться перевірка по намагнічувальним характеристикам.

Перевірка коефіцієнта трансформації встановлює його відповідність до номінального коефіцієнта трансформації. Для перевірки коефіцієнта трансформації від джерела струму у первинну обмотку ТС подають деякий струм I_1 , значення якого регулюють із використанням першого амперметра, а у вторинну обмотку вводять другий амперметр. Далі, згідно показів обох амперметрів визначається коефіцієнт трансформації, як відношення струму у

первинній обмотці до струму у вторинній обмотці. У випадку, якщо ТС має відгалуження, для кожного відгалуження окремо визначається коефіцієнт трансформації, визначається ж він шляхом послідовного підключення до кожної пари відгалужень.

Під час перевірки полярності ТС використовують джерело постійного струму, за що може послугувати, до прикладу, акумуляторна батарея напругою в 4,5 – 6 В. Акумуляторну батарею приєднують до затискачів L_1 , L_2 первинної обмотки, а у вторинне коло підключають вимірювальний прилад постійної напруги, до прикладу, вольтметр pV , як показано на рисунку 1.2. Далі, вмикають струм у первинному колі за допомогою рубильника S , під час цього у вторинній обмотці буде індукувати струм, що буде затухати за аперіодичним законом від деякого значення до нуля, в той же час вольтметр фіксуватиме величину і полярність однополярного імпульсу цієї напруги.

Якщо прийняти, що у первинній обмотці струм протікає від акумуляторної батареї в додатному напрямі, тобто від L_1 до L_2 , то при правильній полярності обмоток ТС, струм у вторинній обмотці протікатиме від I_1 до I_2 , в такому випадку вольтметр показуватиме короткочасний однополярний імпульс.

На рисунку 1.2 продемонстровано схема, яка використовується для визначення полярності обмоток.

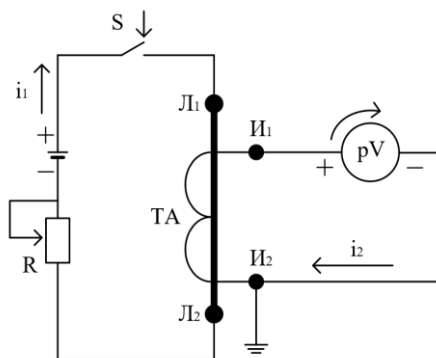


Рисунок 1.2 – Схема, що застосовується для визначення однополярності обмоток

Метод перевірки ТС із допомогою використання характеристик намагнічення представляє із себе побудову так званої намагнічувальної характеристики, тобто залежності напруги на вторинній обмотці від струму намагніченості у вторинній обмотці при розімкненій первинній обмотці. За допомогою намагнічувальної характеристики перевіряють наявність короткозамкнених витків у вторинній обмотці, а ще завдяки даним характеристикам можна порахувати похибку ТС з деякою точністю. Також по ним можна визначити доцільність застосування диференційних захистів у електричних мережах.

На рисунку 1.3 продемонстрована намагнічувальна характеристика ТС, у разі наявності короткозамкнених витків, і намагнічувальні характеристики однотипних і різнотипних ТС.

ТС також перевіряють на похибку в 10%, яка може проводитись кількома способами, а саме: за допомогою паспортних даних, за його вольт-амперною характеристикою, за кривими граничних кратностей [4].

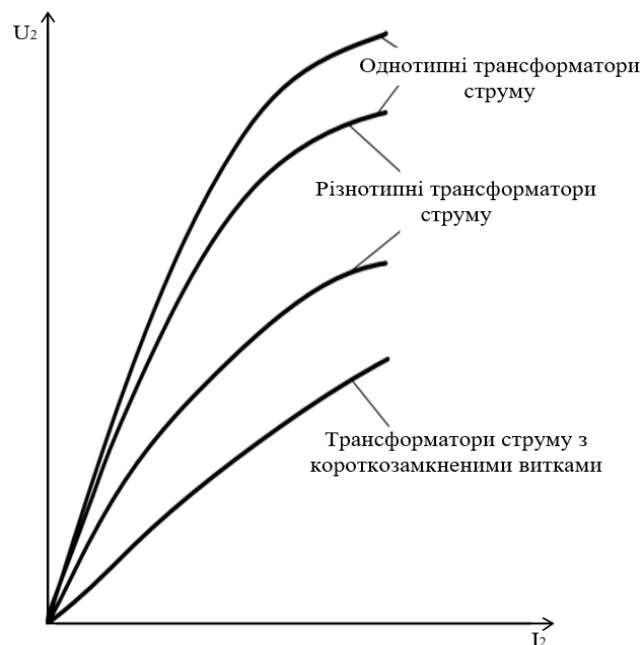


Рисунок 1.3 – Намагнічувальні характеристики однотипних, різнотипних ТС, та з короткозамкненими витками

Відповідно до цього методу, спочатку необхідно порахувати максимальне значення розрахункового струму короткого замикання $I_{1\text{розр}}$, значення якого сильно залежить від виконання вимірювальних приладів, що підключають до трансформатора струму.

Для максимального струмового захисту та струмової відсічки із незалежною витримкою часу, що виконані на електромеханічному принципі, він визначається як показано у формулі (1.4).

$$I_{1\text{розр}} = 1,1 \cdot I_{\text{с.з}}, \quad (1.4)$$

де $I_{\text{с.з}}$ – це розрахункове число струму у первинній обмотці спрацювання захисту.

За допомогою числа 1,1 враховується, яким чином зміниться кратність струму у первинній обмотці порівняно зі струмом у вторинній обмотці, за рахунок десяти відсоткової похибки трансформатора струму.

У разі використання максимального струмового захисту, що виконаний на цифровій основі, максимальне значення розрахункового струму короткого замикання рівне первинному струму короткого замикання, за яким проводиться розрахунок струмової уставки.

При дистанційному захисту лінії, що має живлення з однієї сторони максимальне значення розрахункового струму короткого замикання дорівнює максимальному струму під час короткого замикання в кінці першої зони дії дистанційного захисту.

Для повздовжнього диференційного захисту цей струм буде рівним максимальному струму зовнішнього короткого замикання.

При перевірці на відхилення 10% за допомогою паспортних даних, для ТС задається номінальна кратність струму $k_{\text{ном}}$, при якому в разі номінального імпедансу вторинного навантаження $z_{\text{ном}}$ буде підтримуватись робота ТС із допустимою похибкою менше 10%.

Допустиму кратність струму визначають за наступною формулою:

$$k_{10\text{доп}} = \frac{k_{\text{ном}} \cdot z_2 + z_{\text{ном}}}{z_2 + z_{\text{ном.розр}}}, \quad (1.5)$$

де $k_{\text{ном}}$ – номінальна кратність струму;

$z_{\text{ном}}$ – номінальний імпеданс навантаження;

z_2 – імпеданс у вторинній обмотці;

$z_{\text{ном.розр}}$ – фактичне число імпедансу навантаження трансформатора струму.

Далі, допустиму кратність струму необхідно порівняти із максимальною кратністю струму, яку можна визначити наступним чином:

$$k_{10} = \frac{I_{1\text{розр}}}{I_{1\text{ном}}}, \quad (1.6)$$

де $I_{1\text{ном}}$ – номінальний струм у первинній обмотці.

Якщо отримане значення $k_{10\text{доп}}$ більше за k_{10} , тоді це означає, що похибка у ТС не перевищує 10%.

Для перевірки ТС за вольт-амперною характеристикою для початку необхідно за наступною формулою порахувати розрахункове значення напруги на його вторинній обмотці:

$$U_{2\text{розр}} = I_{2\text{розр}} \cdot (Z_2 + Z_{\text{н.розр}}), \quad (1.7)$$

де $I_{2\text{розр}}$ – розрахунковий струм вторинної обмотки;

Z_2 – повний опір у вторинній обмотці;

$Z_{\text{н.розр}}$ – максимальне значення повного розрахункового опору навантаження вторинної обмотки.

Далі, із вольт-амперної характеристики необхідно знайти струм намагнічення I_{μ} . Після визначення струму намагнічення, за формулою (1.8) визначається повна похибка у відсотках:

$$\varepsilon = \frac{I_{\mu}}{I_{2\text{розр}}}, \quad (1.8)$$

Якщо отримана похибка буде становити менше 10%, можна зробити висновок що ТС справний.

Також для перевірки ТС використовують криві граничних кратностей, що є залежностями максимальної граничної кратності струму від значення імпедансу вторинного навантаження. Дані криві наводяться у паспортних даних конкретного ТС.

За кривою граничних кратностей шукають максимальне значення допустимого імпедансу навантаження, яке відповідає максимальній струмовій кратності k_{10} , і порівнюють його з релейним значенням імпедансу навантаження ТС. Якщо це значення буде менше від реального, тоді значення похибки не перевищує 10%.

Випробування ізоляції первинної обмотки проводиться із використанням випробувальної напруги. Випробувальна напруга прикладається між виводами первинної обмотки та замкнутими виводами вторинних обмоток. До вторинних обмоток повинні бути приєднані заземлені частини ТС.

Під час випробування вторинної обмотки, випробувальна напруга прикладається поступово між накоротко замкнутими виводами кожної вторинної обмотки та замкнутими накоротко іншими виводами вторинних обмоток, до яких приєднують заземлені частини трансформатора струму [8].

При випробуванні міжвиткової ізоляції вторинну обмотку необхідно розімкнути. Міжвиткова ізоляція повинна витримувати протягом однієї хвилини індукуючу в неї напругу при проходженні по первинній обмотці струму без пробою або пошкоджень. При перевірці міжсекційної ізоляції випробувальна напруга прикладається по чергово поміж кожною секцією, і з'єднаними між собою іншими секціями обмотки.

Також, у ТС проводиться перевірка на вірність схеми з'єднань вторинних обмоток. Для даної перевірки, первинні кола потрібно підключити до схеми із

використанням тимчасових з'єднуючих провідників, а далі потрібно подавати на прилад деякі значення струму, що становлять приблизно 10% від номінального струму. Після цього, за допомогою спеціального вимірювального приладу, вимірюють їх фази та струми у всіх вітках вторинних кіл. У разі правильного підключення схеми, вірне підключення з'єднуючих провідників не повинно викликати розрив кола у вторинній обмотці, при цьому повинне відбуватись вільне протікання струмів у вторинній обмотці до вторинного навантаження.

1.4 Методи зменшення похибок у трансформаторах струму

Існує багато методів зменшення похибки ТС, одним з найпростіших яких є метод виткової корекції. Зменшення струмової похибки досягається шляхом відмотування від вторинної обмотки деякого числа витків, тобто при витковій корекції кількість витків у вторинній обмотці стає меншою за номінальне число витків. Завдяки цьому зменшується значення магніторушійної сили у вторинній обмотці яка є направленою проти магніторушійної сили у первинній обмотці. МРС у первинній обмотці залишається незмінною, оскільки вона залежить тільки від значення струму у первинній обмотці і кількості витків у обмотці. Зменшення магніторушійної сили у вторинній обмотці призведе до збільшення результуючого магнітного потоку Φ_0 і магніторушійної сили намагнічування. Зі збільшенням результуючого магнітного потоку Φ_0 паралельно зростатиме і значення електрорушійної сили у вторинній обмотці, через що зросте і значення вторинного струму. Отже, пропорційно зі зменшенням кількості витків у вторинній обмотці вторинний струм зростатиме. Збільшення вторинного струму призводить до зменшення від'ємної струмової похибки, або й навіть до зміни її знаку.

Переважна частина способів компенсації похибок у ТС заснована на властивості феромагнітних матеріалів змінювати свою магнітну проникність в залежності від величини магнітної індукції. Шляхом штучної зміни величини

магнітної індукції в магнітопроводі можна збільшити його магнітну проникність, і тим самим знизити похибку.

Компенсацію похибок можна здійснити наступними способами:

1) Компенсація похибок шляхом випрямлення кривої намагнічення. Якщо випрямити криву намагнічення магнітопроводу, то відбудеться і випрямлення кривих струмової та кутової похибок. При малих первинних струмах струмова похибка зменшується, а при струмах, які близькі до номінального значення, зростає. Отже, крива струмової похибки випрямляється. Число витків, що компенсують, складає приблизно від 1 до 3% від загального числа витків у вторинній обмотці.

2) Компенсація підмагнічуванням магнітопроводу може проводитись від стороннього джерела енергії, або від допоміжного ТС. Для підмагнічення використовується струм з тією ж частотою, що і первинний струм потрібної частоти.

3) Компенсація підмагнічуванням від стороннього джерела енергії. У разі використання даного методу, магнітопровід складається з двох однакових магнітопроводів, що мають спільну вторинну обмотку. Окрім вторинної обмотки, на кожен магнітопровід намотується додаткова обмотка, що створює підмагнічування магнітопроводу. Додаткові обмотки мають однакову кількість витків і увімкнені зустрічно для уникнення впливу магнітного потоку, що створюється додатковими обмотками. Додаткові обмотки приєднані до стороннього джерела змінного струму з тією ж частотою, що і первинний струм.

4) Компенсація похибок шляхом підмагнічування від допоміжного ТС, що складається з магнітопроводу з накладеною на нього обмоткою. При цьому методі, живлення допоміжних обмоток, розташованих на магнітопроводах, відбувається від обмотки допоміжного трансформатора струму. Допоміжні обмотки мають однакову кількість витків і з'єднані зустрічно. Магнітопроводи з накладеними на них обмотками з'єднані разом, являючи собою один елемент. Підмагнічування від допоміжного ТС забезпечує зменшення похибок по

всьому діапазону струмів нормального режиму, проте ускладнює конструкцію всього ТС і збільшує його габарити. Компенсація похибок підмагнічуванням від стороннього джерела енергії або від допоміжного ТС забезпечує покращення кривої похибок на всій її протяжності.

5) Компенсація похибок із застосуванням протинамагнічувача. Така компенсація відрізняється від двох попередніх лише тим, що тут вторинна обмотка є як основною обмоткою, так і підмагнічувальною. Основна частина вторинної обмотки охоплює обидва магнітопроводи. Крім того, на один з магнітопроводів накладена обмотка, що з'єднана послідовно з основною обмоткою. Число витків у вторинній обмотці дещо менше за номінальну кількість. Відповідно до цього, на одному магнітопроводі число витків буде меншим за номінальне значення, а на іншому – більше за номінальне. На першому магнітопроводі МРС намагнічення збільшиться внаслідок меншої кількості вторинних витків, тут буде переважати первинна МРС. На другому магнітопроводі МРС намагнічення збільшиться за рахунок додаткової обмотки, тут буде переважати вторинна МРС.

До переваг цього методу можна віднести простоту і відносну дешевизну, проте ефективність даного методу дещо менша, ніж ефективність компенсації похибки від стороннього джерела енергії.

6) Компенсація похибок шляхом підмагнічуванням полями розсіювання. При даному методі вторинна обмотка розділена на дві частини: частини вторинної обмотки з'єднані послідовно і узгоджено. Первинна обмотка розташована на правому стержні магнітопроводу. Всередині магнітопроводу знаходиться магнітний шунт, по якому замикаються потоки розсіювання. Повітряний зазор між стержнями магнітопроводу і магнітним шунтом може змінюватись, що дозволяє змінювати в деяких межах потік розсіювання.

Вторинна обмотка розділена на дві частини, для збільшення потоків розсіювання. Магнітний шунт також збільшує потік розсіювання. Обравши магнітний опір шунта, можна при малих первинних струмах забезпечити незначний магнітний опір магнітопроводу. Внаслідок цього МРС, що

необхідна для протікання намагнічувального потоку, значно зменшується, що призводить до зменшення струмової та кутової похибок.

Таким чином, при малих значеннях первинних струмів похибки зменшуються, а при струмах, що наближаються до номінальних значень – збільшуються. Відповідно до цього, крива похибок випрямляється.

7) Компенсація похибок шляхом створення нульового проводу. При цьому методі магнітопровід складається з двох однакових магнітопроводів, на один з яких намотується частина вторинної обмотки з кількістю витків w_2 . Друга частина вторинної обмотки з кількістю витків w_3 намотана на другий магнітопровід, на який ще також намотано w_4 витків компенсуючої обмотки. Кількість витків вторинної і компенсуючої обмоток вибрані таким чином, що $0,5w_2 = w_3 = w_4$, з цього випливає, що $w_2 = w_3 + w_4$. Вторинна обмотка з кількістю витків $w_2 + w_3$ замикається на вторинне навантаження $Z_{2н}$, а компенсуюча обмотка – на регульований опір z_3 . При компенсації похибок шляхом створення нульового потоку розміри магнітопроводу збільшуються, оскільки він повинен бути розрахований на подвійне навантаження. За цим методом можна плавно регулювати струмову похибку, ведучи її до нуля. Цей метод має місце в деяких типах лабораторних ТС.

Також для зменшення похибки можливе збільшення перекрою магнітопроводу, через що зменшиться індукція, і, завдяки чому, зменшиться струм намагнічення, однак недоліком такого методу є збільшення габаритів трансформаторів і, відповідно, його ваги.

Під час виготовлення магнітопроводу для ТС також можна використовувати матеріали, що мають сильну магнітну проникність та невеликий кут втрат. Використання таких матеріалів дозволяє зменшити струм намагнічення, проте такі матеріали є дорогими, через що сильно зростає вартість ТС [4].

Як видно на рисунку 1.4, результуючий магнітний потік Φ відстає від струму намагнічення I'_μ на кут γ , що залежить від втрат у магнітопроводі. Цей магнітний потік Φ наводить у вторинній обмотці електрорушійну силу E_2 , під

дією якої у вторинній обмотці буде протікати струм I_2 , який буде зсунутий відносно електрорушійної сили E_2 на кутову похибку φ , яка визначається сумарним активним та реактивним опорами у вторинній обмотці ТС і опором навантаження Z_H .

Отже, похибку ТС можна зменшити шляхом використання короткозамкненого витка, у разі використання якого збільшується кут втрат γ , завдяки чому й зменшується кутова похибка δ .

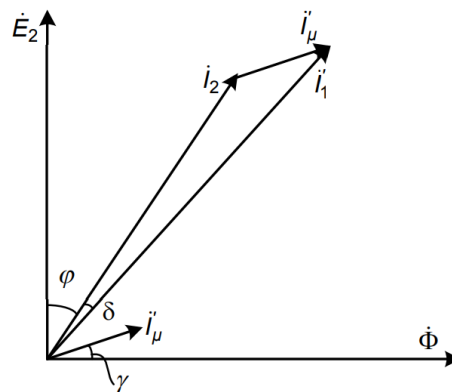


Рисунок 1.4 – Графік, що демонструє векторну діаграму трансформатора струму

Для зменшення похибки можна ще також зробити послідовне включення вторинних обмоток двох ТС, тоді значення обох електрорушійних сил додаються і їх результуюча вольт-амперна характеристика стає більшою, ніж характеристики цих трансформаторів струму окремо.

Також можливим є збільшення перекрою провідників для підключення вторинного навантаження, використання більш сучасних реле, що мають менше число розрахункового опору, або заміна старіших ТС на більш сучасні, що мають кращі характеристики.

2 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ

2.1 Особливості конструкції вимірювальних трансформаторів струму

У ТС, принцип роботи якого побудований на електромагнітному принципі, сердечник виконують із високоякісної трансформаторної сталі, первинна обмотка, як зазначалось раніше, підключена безпосередньо до струмового кола силового обладнання через затискачі Л_1 , Л_2 , а до затискачів вторинної обмотки И_1 та И_2 приєднують відповідне електричне навантаження – пристрої релейного захисту, автоматики, лічильники, як показано на рисунку 2.1.

На рисунку 2.1 продемонстровано, як у первинній обмотці w_1 протікає відповідний струм I_1 , що створює намагнічувальну силу F_1 . Далі, завдяки намагнічувальній силі в магнітопроводі утворюється магнітний потік Φ_1 , що індукуює у вторинній обмотці w_2 електрорушійну силу. Під дією цієї ЕРС у обмотці створюється намагнічувальна сила F_2 , а завдяки ній потік Φ_2 . Даний потік протидіє потоку Φ_1 за законом Ленца. Магнітні потоки обох обмоток векторно додаються, і утворюють результуючий магнітний потік $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$.

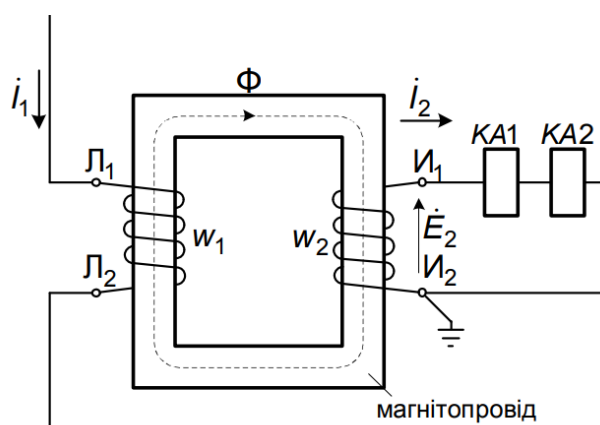


Рисунок 2.1 – Схема, що пояснює принцип роботи трансформаторів струму

Як видно на рисунку 2.1, результуючий магнітний потік Φ в осерді створюється намагнічувальною силою $I_\mu \cdot w_1$, тобто струм намагнічування I_μ є складовою первинного струму I_1 .

У ТС струм у первинній обмотці ніяк не залежить від режиму експлуатації його вторинного кола. Це пов'язано з тим, що первинний струм визначається опором навантаження в первинному колі $Z_{\text{НАВ1}}$, який повинен бути значно вищим за опір первинної обмотки при будь якій величині опору навантаження $Z_{\text{НАВ2}}$, що приєднане до вторинної обмотки. Значення опору $Z_{\text{НАВ2}}$ повинно бути значно меншим за опір вторинної обмотки трансформатора струму. Тому неважливо, буде вторинне коло замкненим накоротко, або буде розімкненим, струм у первинній обмотці в обох випадках буде мати однакову величину. Вторинні обмотки постійно під навантаженням, тому їх опір навантаження є нормованим відповідно до його коефіцієнта трансформації, оскільки у разі відхилення значення опору навіть на невеликий відсоток, можуть погіршуватись його вимірювальні властивості, а у разі високих відхилень підвищується напруга вторинної обмотки, що здатна здійснити пробій ізоляції.

Пробій ізоляції ТС може викликати зростання втрат у магнітопроводі, що призводить до його перегріву, і виникає загроза пожежі. Також у разі пробою, можливий вихід з ладу ТС, а в гіршому випадку з'являється загроза життю обслуговуючому персоналу. Якщо вторинна обмотка повністю розімкнена, у сердечнику не створюється компенсуючий магнітний потік, через що відбувається перегрів магнітопроводу, і можливе його вигорання. В цей же час магнітний потік у первинній обмотці сильно зростає, і втрати у магнітопроводі нагрівають його.

ТС виготовляють у вигляді шихтованого сердечника із холоднокатаної трансформаторної сталі, на який намотуються одна, або кілька вторинних обмоток. Первинну обмотку також можуть виконувати намотаною на сердечник, або у вигляді шини. В деяких конструкціях первинна обмотка взагалі не використовується, а виконується самим споживачем. Іноді сердечник

виконують із аморфних сплавів, що мають властивості розширення діапазону класу точності [9].

За своїм конструктивним виконанням кожен тип трансформатора струму має своє позначення: В – вбудований, Ш – шинний, П – прохідний, К – каскадний, Р – роз’ємний, О – опорний. За видом ізоляції розрізняють такі позначення: М – маслонаповнений, Ф – фарфорова покриття, Г – наповнений газом, П – пластмасовий корпус, Л – лита ізоляція.

За своїми конструкціями ТС відрізняються за взаємним розташуванням первинної та вторинної обмоток, магнітопроводу та їх кількістю, тому для того щоб продемонструвати їх конструктивні особливості, буде окремо розглянуто будову деяких конкретних типів ТС.

Вимірювальний трансформатор струму із елегазовою ізоляцією ТОГ-330 використовується в електричних мережах змінного струму з частотою 50/60 Гц і напругою 330 кВ, призначений для передачі сигналів вимірювальної інформації пристроям вимірювання, керування, релейного захисту та автоматики, його конструкція показана на рисунку 2.2.

Однією із конструктивних особливостей ТОГ-330 є те, що одна його обмотка, яка використовується для обліку електричної енергії, має клас точності 0,2S, а інші обмотки необхідні для застосування у вторинних колах релейного захисту та сигналізації. Його первинна обмотка розділена на дві секції, кожна з яких має свій коефіцієнт трансформації завдяки зовнішній комутації контактних пластин. Для захисту від надлишкового тиску в ТС використовується мембрана, що активується у разі зростання тиску при внутрішньому короткому замиканні. Активна частина виконана римоподібною, покриття зроблена із матеріалів холодного затвердіння, завдяки цьому можливий її ремонт прямо під час експлуатації.

Відповідно до рисунку 2.2, ТОГ-330 складається з наступних елементів: 1 – корпус; 2 – силіконова покриття; 3 – первинна обмотка; 4 – вторинна обмотка; 5 – підставка; 6 – ізолятори; 7 – мембрана; 8 – виводи вторинної обмотки; 9 – конденсатор; 10 – основа трансформатора струму; 11 – коробка

виводів; 12 – вентиль; 13 – манометр; 14 – заземлювальні бобишки; 15 – захисне покриття манометра; 16 – захисне покриття вентилля; 17 – захисне покриття первинних проводів [3].

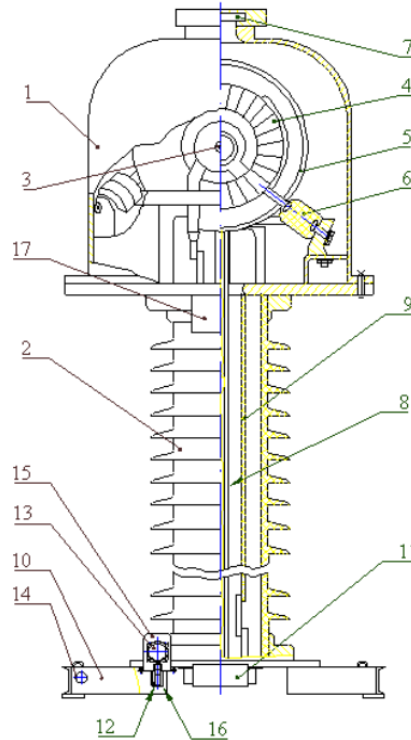


Рисунок 2.2 – Особливості будови трансформатора струму ТОГ-330

Основними перевагами ТОГ-330 є його якісні метрологічні характеристики, невеликий рівень забруднення силіконової покритки, вибухо- і пожежобезпека, гідрофобність поверхні силіконових ізоляторів, в ньому також відсутні експлуатаційні втрати.

Розглянемо ще один ТС – ТФЗМ-220. В його позначенні буква Ф означає – фарфорова покритка, З – вторинна обмотка ланкового типу М – заповнений маслом.

Конструкція ТФЗМ-220 показана на рисунку 2.3. Як показано на рисунку, він складається із наступних елементів: 1 – показник масла; 2 – кришка; 3 – пристрій для перемикавання коефіцієнта трансформації, 4 – розширювач масла;

5 – екранне кільце; 6 – захисна арматура; 7 – комплект вторинних обмоток; 8 – циліндрична покришка.

Одна з його вторинних обмоток призначена для вимірювання, інші три – для використання в колах релейного захисту. Вторинні обмотки розташовані не у нижній частині порцелянової покришки, а ближче до її середини, через що покришка має форму циліндра. Розширювач масла виготовлений у вигляді металевої конструкції із алюмінієвої виливки, у його стінках знаходяться затискачі первинної обмотки та показник масла [10].

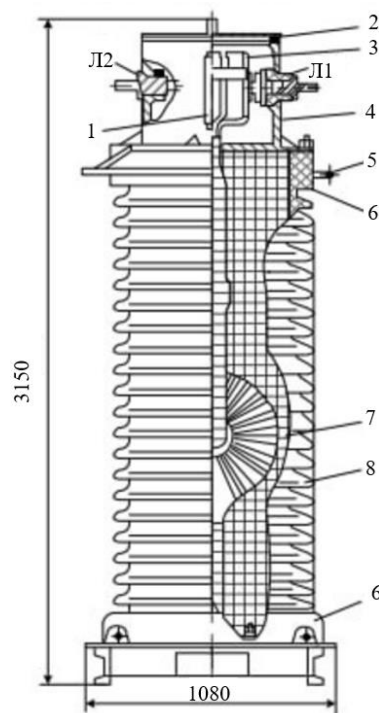


Рисунок 2.3 – Особливості конструкції ТФЗМ-220

До зовнішньої частини затиску підключають струмопровідні шини, а до внутрішньої – підключають початок і кінець первинної обмотки із використанням хомутів. Пристрій для переключання коефіцієнтів трансформації представляє із себе конструкцію, на якій закріплені виводи чотирьох секцій, що утворюють первинну обмотку, даний пристрій прикріплюється до затискачів первинної обмотки.

На верхній частині розширювача масла закріплена кришка, яка має дихальний клапан із поглиначом вологи. В нижній частині розширювача масла, для рівномірного розподілення напруги і збільшення напруги корони, вмонтовані захисна арматура і екранне кільце.

Типовими конструкціями прохідних ТС є ТПОЛ-10, ТПОЛ-20, ТПОЛ-35.

ТПОЛ-10 являє собою одновиткову прохідну конструкцію, конструкція якого показана на рисунку 2.4. Дві його вторинні обмотки 7 намотані провідниками типу ПЕТВ з діаметром 1,7 мм на стрічкові магнітопроводи тороїдальної форми 5, ізолювані по торцям шайбами 6 із двоміліметрового електрокартону і двома шарами кабельного паперу. В якості міжшарової ізоляції використовується склотканина. Поверх обмотки накладений один шар кіперної стрічки.

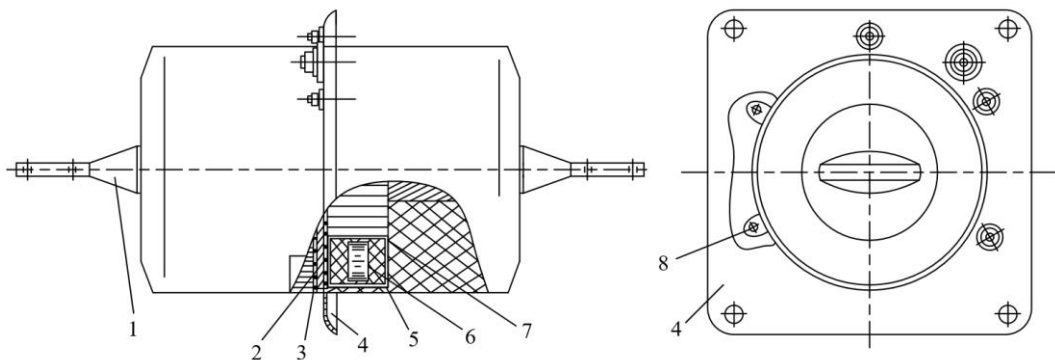


Рисунок 2.4 – Особливості будови ТС типу ТПОЛ-10

Комплект із двох вторинних обмоток закріплюється за допомогою шнура на металевому кільці 3, ізолюваному від обмоток шайбами 2 із електрокартону. Виступаючі вушка 8 кільця 3 встановлюються в пазах заливної форми і фіксують в ній обмотки. Щоб не виникав замкнений контур, кільце має зазор.

Первинна обмотка 1 виконана у вигляді мідного стержня з лопатками, що мають по чотири отвори для приєднання зовнішньої шини, покрита двома шарами просоченої лаком кіперної стрічки.

Після заливки до виступаючих вушок кільця кріпляться фланцем 4, штампований з дюралюмінієвого листа товщиною 4 мм, в якому є чотири отвори діаметром 13 мм для кріплення трансформатора на місці установки.

ТС типу ТЛ-0,66 показаний на рисунку 2.5. Виготовляють даний ТС на струми від 5 до 400 А для роботи у районах з помірним або тропічним кліматом. Лита ізоляція забезпечує вищу надійність приладу у порівнянні з виробами із сухою ізоляцією, просоченою лаком, а також забезпечує стійкість до кліматичних і механічних впливів зовнішнього середовища.

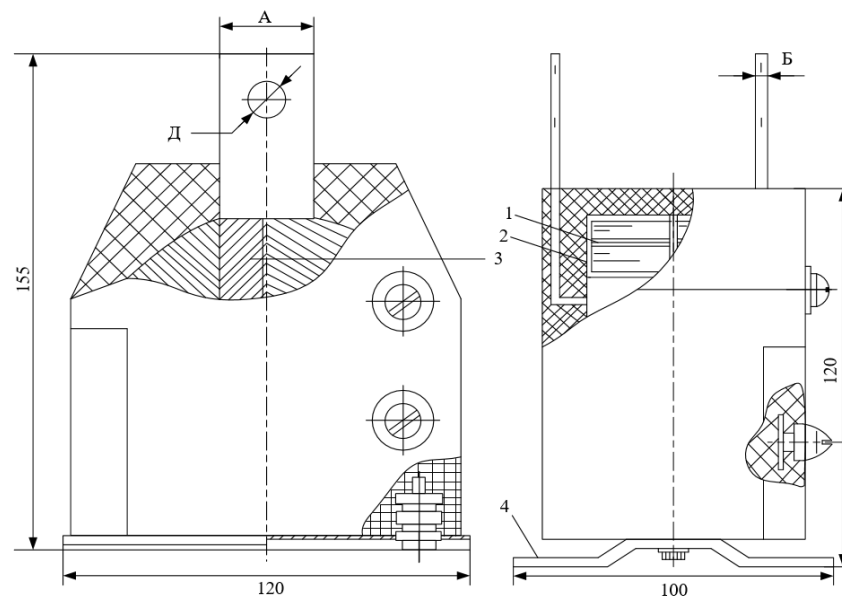


Рисунок 2.5 – Конструктивні особливості ТЛ-0,66 УТЗ

У даному трансформаторі використовується стрічковий магнітопровід тороїдальної форми 1, який оснащений отвором для виткової корекції. Перед накладанням на магнітопровід буферного шару, що складається з відбортованих шайб, прокладок 2 з картону товщиною 1,5 мм і кіперної стрічки, у отвір магнітопроводу вставляється липоксинова трубка, в яку пропускається перший виток вторинної обмотки, чим і забезпечується корекція 1/2 витка. Для кріплення кінця кіперної стрічки застосовується липка стрічка.

Вторинна обмотка з магнітопроводом просочується лаком, задля створення плівки, що протидіє проникненню компаунда при заливанні.

Первинна обмотка з виготовляється із мідної стрічки марки ЛММ, що набирається в пакет потрібного перерізу в залежності від номінального струму. ТЛ-0,66 виготовляється в залежності від первинного струму на 300 та 400 А, що визначає відповідно кількість витків, а також розміри і конфігурацію виводів первинної обмотки.

В заливній формі магнітопровід з обмотками кріпиться за допомогою виводів обмоток за рахунок їх жорсткості. В нижній частині ТС розміщені дві втулки, до яких кріпиться металева основа трансформатора 4, призначена для монтажу трансформатора в електричній установці. Вимірювальні кола до виводів вторинної обмотки приєднуються за допомогою гвинтів М5.

2.2 Особливості схем з'єднань обмоток трансформаторів струму

Схема з'єднань обмоток ТС залежить від призначення пристроїв релейного захисту та автоматики, тому їх існує багато видів.

Схема з'єднань обмоток повної зірки зображена на рисунку 2.6. Такий вид схеми дає можливість контролювати усі фазні струми, зі струмом нульової послідовності включно, тому даний тип схеми використовується для пристроїв релейного захисту, що реагують на всі типи коротких замикань.

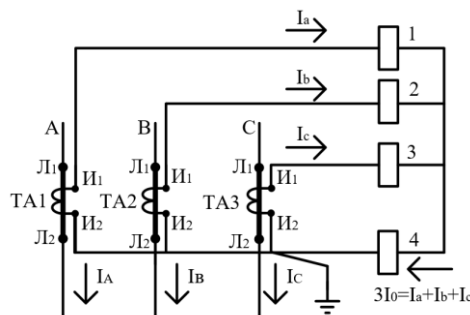


Рисунок 2.6 – Схема з'єднань вторинних обмоток «повна зірка»

Наступна схема з'єднань – двофазна дворелейна схема зображена на рисунку 2.7, за допомогою якої можна у фазах А і С можна безпосередньо контролювати струми. Даний тип схеми застосовується у мережах із ізольованою нейтраллю для захисту від міжфазних коротких замикань, як і у попередній схемі, чутливість даної схеми до всіх видів міжфазних коротких замикань однакова [4].

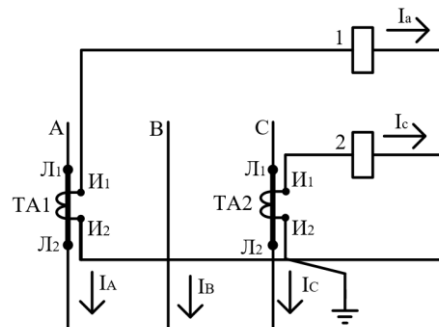


Рисунок 2.7 – Двофазна дворелейна схема з'єднань вторинних обмоток

Третій тип схеми – двофазна трирелейна схема, яка використовується лише для захистів від міжфазних коротких замикань, застосовується у мережах із ізольованою нейтраллю, чутливість для всіх видів міжфазних коротких замикань є однакою. Дана схема зображена на рисунку 2.8.

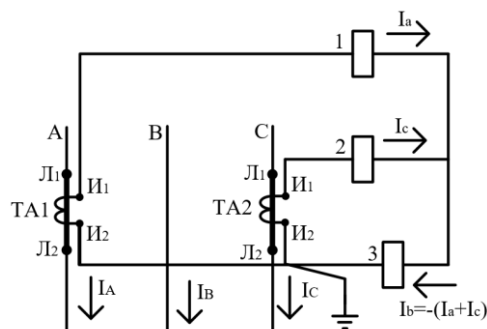


Рисунок 2.8 - Двофазна трирелейна схема з'єднань вторинних обмоток

Наступна схема – «вісімка», а саме однорелейна схема включення трансформаторів струму на різницю струмів у двох фазах, показана на рисунку 2.9. Використовується для живлення приладів, які необхідні для живлення оперативним струмом приладів релейного захисту, а також даний тип схеми використовують в схемах захисту електричних двигунів малої потужності. У такій схемі чутливість до різних видів коротких замикань є різною. При двофазних коротких замиканнях між фазами А і В або В і С в струмовому реле протікає вторинний струм, а при двофазному короткому замиканні у фазах А і С – подвійне значення струму. Струм двофазного короткого замикання рівний близько 0,87 струму трифазного короткого замикання. У разі трифазного короткого замикання в струмовому реле протікає струм в корінь з трьох разів більший, ніж струмів у вторинній обмотці трансформатора струму.

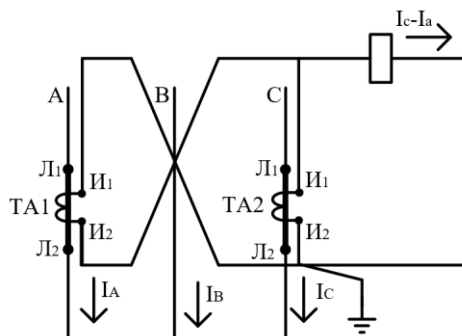


Рисунок 2.9 - Однорелейна схема включення ТС на різницю струмів у двох фазах

На рисунку 2.10 продемонстрована схема з'єднання вторинних обмоток у «трикутник». Такий тип схеми використовують у схемах диференційного захисту, для уникнення зсуву по фазах між струмами у плечах захисту, проте у разі використання такої схеми збільшується величина опору навантаження вторинної обмотки трансформатора струму. Якщо диференційний захист виконаний на цифровій основі, фазовий зсув усувається алгоритмічно і використовується схема з'єднання вторинних обмоток в «зірку».

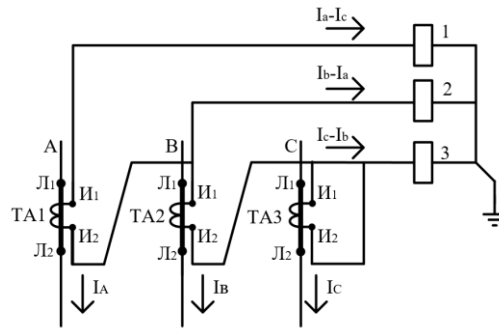


Рисунок 2.10 - Схема з'єднання вторинних обмоток у «трикутник»

Ще один вид з'єднань вторинних обмоток – в якості фільтра струму нульової послідовності, при паралельному підключенні вторинних обмоток в усіх трьох ТС у реле буде протікати струм, який пропорційний струму нульової послідовності: $I_p = 3I_0 = I_a + I_b + I_c$. На рисунку 2.11 продемонстрований даний тип схеми, застосовують таке з'єднання для захистів, які реагують на короткі замикання на землю у електричних мережах напругою від 110 кВ із ефективно заземленою нейтраллю. Через те, що в мережах з такою напругою можливі виникнення великих значень струмів нульової послідовності, що можуть досягати таких значень як номінальні струми у первинній обмотці, похибки ТС при таких режимах повинні відповідати вимогам релейного захисту, тобто струмова похибка не повинна бути більшою за 10%.

Даний вид схеми не використовується у мережах з ізольованою нейтраллю, в яких виникають струми нульової послідовності набагато нижчі за номінальні струми первинної обмотки трансформатора струму, через те що отриманий даним способом струм нульової послідовності має високу похибку. Похибка кожного лінійного трансформатора струму рівна 10%, тоді похибка у визначенні струму нульової послідовності може бути рівною 30%, у разі використання даної схеми з'єднань.

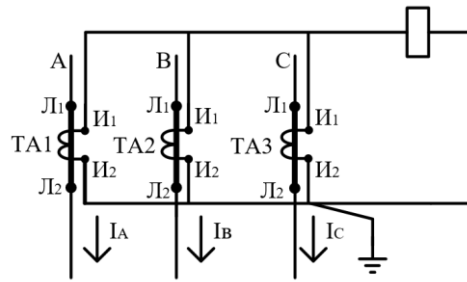


Рисунок 2.11 – Схема з'єднання вторинних обмоток в якості фільтра струму нульової послідовності

Кабельні ТС нульової послідовності застосовуються для виявлення, а також реєстрації струму нульової послідовності у разі замикання на землю у кабельних електричних мережах із ізолюваною нейтраллю з напругою до 35 кВ включно, схема з'єднання показана на рисунку 2.12.

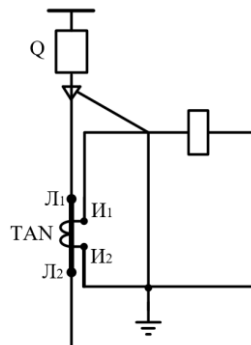


Рисунок 2.12 – Схема підключення кабельного трансформатора струму

В кабельному ТС магнітопровід охоплює всі 3 жили кабелю, в цей же час дані жили є первинними обмотками. На магнітопровід намотана вторинна обмотка, що має більшу кількість витків, і до неї підключене струмове реле. У разі замикання фази на землю в струмовому реле буде протікати струм рівний $3I_0$, а при відсутності замикань протікатиме лише струм небалансу, який залежить від рівня струмів у жилах кабелю.

Завдяки своїй конструкції, кабельний ТС може реєструвати невеликі значення струмів нульової послідовності, які набагато нижчі за лінійні струми, які одночасно протікають в жилах кабелю.

Окрім розглянутих раніше схем з'єднань вторинних обмоток ТС, також використовується послідовне і паралельне з'єднання вторинних обмоток ТС, яке показано на рисунку 2.13.

Послідовне з'єднання вторинних обмоток (рисунок 2.13, а) – це з'єднання, при якому у одного з ТС кінець вторинної обмотки I_2 підключають до початку вторинної обмотки I_1 іншого ТС. При такому типі з'єднанні еквівалентний опір навантаження кожного ТС падає в 2 рази. При послідовному з'єднанні застосовуються однотипні ТС, що мають однакові коефіцієнти трансформації і номінальні струми у вторинних обмотках.

Також зустрічається схема паралельного з'єднання вторинних обмоток ТС, схема з'єднань якої показана на рисунку 2.13, б. У такій схемі об'єднують однойменні затискачі вторинних обмоток I_1 та I_2 . При паралельному з'єднанні еквівалентний опір навантаження кожного ТС зростає у два рази.

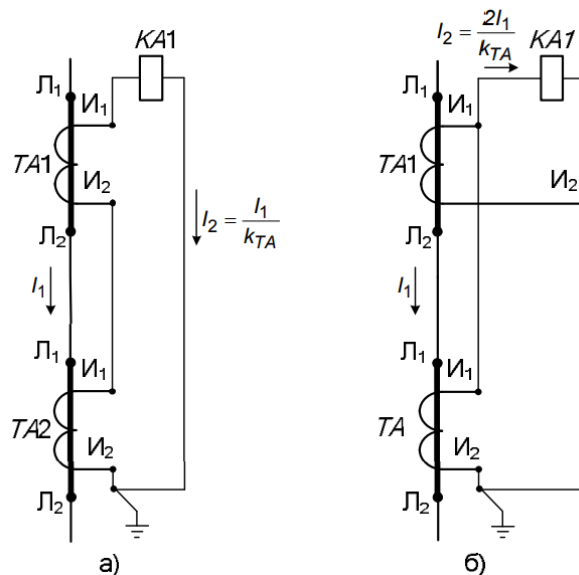


Рисунок 2.13 – Послідовна та паралельна схема з'єднань вторинних обмоток

З ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ ТА УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ НАПРУГИ

3.1 Призначення, принцип дії та основні параметри вимірювальних трансформаторів напруги

Трансформатор напруги (ТН) являє собою трансформатор, у якому первинну обмотку підключають до мережі високої напруги, а вторинну обмотку приєднують до пристроїв релейного захисту та автоматики, лічильників електроенергії. Осердя ТН виготовляють із високоякісної трансформаторної сталі.

Призначенням ТН є перетворення високих значень напруги на більш низькі, для зручності вимірювань, а також ізоляція первинних силових кіл від вторинних вимірювальних. Також вони необхідні для створення стандартної шкали номінальних вторинних напруг.

ТН активно застосовуються у розподільних пунктах високої, середньої напруги і необхідні для передачі сигналів вимірювальним приладам, пристроям релейного захисту і автоматики [11]. Зазвичай, ТН виконують однофазними, і використовують у розподільних пунктах у комплекті з трьох одиниць одночасно, кожен із яких має по одній первинній обмотці, але з великою кількістю витків, що значно перевищує число витків у вторинній обмотці.

Первинну обмотку в ТН ізолюють від вторинної обмотки відповідно до встановленого класу напруги. Задля безпеки обслуговуючого персоналу, один з виводів у вторинній обмотці повинен бути обов'язково заземленим, завдяки цьому в ТН прилади релейного захисту і вимірювальні засоби ізольовані від первинної обмотки, в якій висока напруга.

Відповідно до векторної діаграми ТН, показаної на рисунку 3.1, його магнітний потік Φ відстає від намагнічувального струму I_μ на деякий кут γ , що характеризує активні втрати у магнітопроводі.

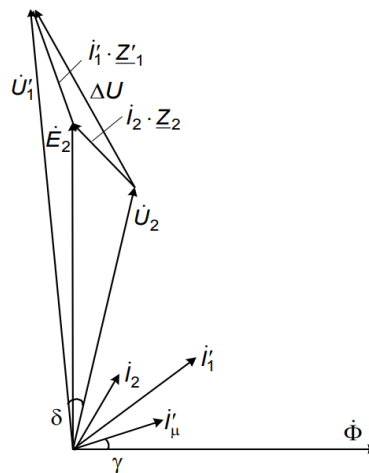


Рисунок 3.1 – Графік, що показує векторну діаграму вимірювального трансформатора напруги

При зміні потокозчеплення ψ_2 у вторинній обмотці наводиться електрорушійна сила E_2 , завдяки якій у замкненій на навантаження вторинній обмотці протікає вторинний струм I_2 . Напруга вторинної обмотки відмінна від електрорушійної сили E_2 на значення спаду напруги $I_2 Z_2$ вторинної обмотки. Прикладена напруга до первинної обмотки U_1 в такому разі відмінна від E_2 на спад напруги у первинній обмотці $I_1 Z_1$.

Кожен ТН повинен мати клас точності, що відповідає вимогам, установленими нормативними документами, які залежать від характеру приєднаного навантаження: для живлення лічильників технічного обліку та розрахункових лічильників повинен забезпечуватись клас точності не менш як 0,5; для живлення вимірювальних приладів: класу точності 1 та 1,2 ТН повинен мати клас точності 0,5, для класу точності 2,5 ТН повинен мати клас точності рівний 1; для живлення кіл релейного захисту та автоматики ТН повинен мати клас точності 3.

При живленні вторинних навантажень різного характеру від одного і того ж ТН, він повинен мати найбільший клас точності, що потрібний для роботи приєднаної до нього апаратури.

Схема увімкнення ТН і його схема вторинних кіл повинна забезпечувати надійне живлення приєднаної до нього апаратури обліку електроенергії, релейного захисту та автоматики, вимірювання.

Втрати напруги у вторинних колах, що знижують точність роботи підключеного до ТН обладнання, відповідно до ПУЕ [5], не повинні перевищувати наступні значення: для панелей релейного захисту та автоматики – 3%; для щитових приладів та датчиків, що використовуються для всіх видів вимірювань – 1,5%; для лічильників технічного обліку – 1,5%; для пристроїв АРЗ – 1%; для розрахункових лічильників та вимірювальних перетворювачів, що необхідні для введення інформації в обчислювальні прилади – 0,5%; для розрахункових лічильників міжсистемної лінії електропередачі – 0,25%.

Одним із основних параметрів ТН є його номінальна напруга обмоток, тобто значення напруги на первинній та вторинній обмотках.

Для одноманітності застосовуваного вторинного обладнання, використовують стандартну шкалу вторинних номінальних напруг, а саме: лінійну напругу 100В і фазну номінальну напругу, яка дорівнює $100/\sqrt{3}$ В. Також на вторинних обмотках, які з'єднані в розімкнений трикутник, застосовується напруга 100/3В.

Також стандартизовані і напруги у первинних обмотках, що мають такі значення: 3; 6; 10; 15; 20; 24; 27; 35; 110; 150; 220; 330; 500; 750 кВ.

Номінальна потужність ТН – його максимальна потужність при номінальному коефіцієнті трансформації, яка може бути знятою із трансформатора, якщо його похибка не виходитиме за межі класу точності.

Ще одним із важливих параметрів ТН є його коефіцієнт трансформації – відношення витків первинної та вторинної обмоток. Відповідно до векторної діаграми, при відсутності навантаження, коли струм у вторинній обмотці рівний нулю, струм у первинній обмотці рівний струму намагнічення I_μ . При такому режимі приведені значення первинної напруги трохи відмінне від електрорушійної сили E_2 у вторинній обмотці, оскільки при номінальній

первинній напрузі струм намагнічення трансформатора напруги дорівнює не більше 1% від номінального струму первинної обмотки.

Отже, номінальний коефіцієнт трансформації можна також порахувати і як співвідношення напруги у первинній та вторинній обмотках.

$$k_H = \frac{w_1}{w_2} = \frac{U_{1H}}{U_{2H}}, \quad (3.1)$$

де w_1 – кількість витків у первинній обмотці;

w_2 – число витків у вторинній обмотці;

U_{1H} – номінальна первинна напруга;

U_{2H} – номінальна вторинна напруга.

Наступний параметр – номінальне вторинне навантаження. Струм вторинної обмотки визначають як відношення вторинної напруги до вторинного опору навантаження:

$$I_2 = \frac{U_2}{Z_2}. \quad (3.2)$$

Вторинна потужність визначається як:

$$I_2 = \frac{U_2^2}{Z_2}. \quad (3.3)$$

Також у ТН розрізняють похибку за напругою та його кутом.

Відносна похибка за напругою визначається наступним чином:

$$\Delta U_{\%} = \frac{k_H \cdot U_2 - U_1}{U_1} \cdot 100\%, \quad (3.4)$$

де U_1 – значення напруги, яке подається на первинну обмотку;

U_2 – величина напруги на затискачах у вторинній обмотці.

Якщо відношення напруги, яке подане на первинну обмотку до напруги на затискачах вторинної обмотки рівне номінальному коефіцієнту трансформації, тоді похибка рівна нулеві.

Залежно від похибки за напругою, ТН мають різні класи точності, які можуть бути рівними: 0,2; 0,5; 1; 3 і які відповідають приведеній допустимій похибці як 0,2%; 0,5%; 1%; 3%. Класом точності 0,2 користуються для лабораторних вимірювань; 0,5 – для обліку електричної енергії; 1,0 - для технічних вимірювальних приладів; 3,0 – використовується у релейному захисті та сигналізації.

Кутова похибка ТН – визначається як величина кута між первинної та вторинною напругою, повернутою на 180° . Величина даної похибки не повинна перебільшувати зміну напруги первинної обмотки в діапазоні 0,8 – 1,2 від номінальної напруги. Якщо напруга у вторинній обмотці випереджає напругу первинної обмотки, тоді кутова похибка має додатній знак [12].

3.2 Дослідження різновидів трансформаторів напруги

Відповідно до свого призначення, конструкції, ТН класифікують за наступними ознаками.

За своїм призначенням ТН розрізняють такі:

- вимірювальний ТН – призначений для відправлення сигналів до вимірювальних приладів;
- захисний ТН – необхідний передачі сигналів пристроям релейного захисту;
- ТН подвійного призначення – виконує одразу дві функції, а саме захисну та вимірювальну.
- узгоджувальний ТН – для узгодження напруги вторинної обмотки та номінальної напруги навантаження.

За кількістю фаз ТН розрізняють однофазні та трифазні;

За способом охолодження у ТН поділяють на наступні види:

- сухі, з природнім повітряним охолодженням;
- масляні, з масляним охолодженням;
- з литою ізоляцією

За власною кількістю обмоток ТН поділяють на двохообмоткові та трьохобмоткові;

За місцем установки розрізняють ТН для:

- зовнішньої установки, які встановлюють у відкритому середовищі, до прикладу, у відкритих розподільних пунктах;
- внутрішньої установки, які використовують у закритих приміщеннях;
- для комплектних розподільних установок.

3.3 Аналіз способів перевірки трансформаторів напруги

Перевірка ТН проводиться як під час його налаштування, так і після завершення монтажних робіт [7].

Однією із перевірок ТН є визначення вірності виконання його вторинних кіл. Для цього на первинну обмотку необхідно подати напругу величиною 380В від джерела напруги. Після подачі напруги, у вторинних колах з'явиться напруга величиною в кілька мілівольт, яка необхідна для роботи вимірювального приладу, із використанням якого вимірюють значення напруги по чергово у кожній фазі розімкненого трикутника, а також зірки ТН. Таким чином перевіряють відсутність короткого замикання у вторинних колах.

Фазування в ТН проводиться з метою перевірки, чи за всіх положень пристроїв, які перемикають кола напруги, на реле подаються однойменні фази від різних ТН. Для перевірки обидва ТН потрібно включати на одну напругу з боку первинної обмотки, а вторинні обмотки які фазують, повинні бути з'єднаними в одній точці схеми, однакової для обох трансформаторів. В загальному випадку це забезпечується шляхом заземленням вторинних обмоток. За допомогою вольтметра вимірюють напруги між кожним виводом

вторинних обмоток одного ТН і кожним виводом іншого ТН. При однаковому складанні схем ТН значення напруги під час вимірювань між однойменними фазами повинне бути рівним нулеві, а під час вимірювання між різнойменними виводами повинне дорівнювати лінійній або фазній напрузі.

Також перевіряють роботу заземлення вторинних обмоток та екранів кабелів, ізоляцію проводів та вторинних кіл напруги, перекрій проводів а також тип кабелю, що з'єднує обмотки ТН з шинами кіл вторинної напруги. Додатково продзвонюють струмопровідні жили кабелю, перевіряють на спрацювання захисні автоматичні вимикачі, які захищають вторинні кола напруги від перевантажень та різних типів коротких замикань.

Визначення опору короткого замикання потрібне для розрахунків струмів коротких замикань та захисту від них у вторинних колах. Первинні обмотки ТН необхідно надійно закоротити, струм вторинної обмотки потрібно довести до найбільшого можливого, проте не більшого за номінальний струм, що відповідає максимальній потужності ТН. Спотворення форми кривої струму та напруги не відбудеться, через те що опір закороченого ТН буде лінійним, тому вимірювання можливо виконувати із використанням приладу будь-якого типу. Клас точності приладів повинен бути не нижчим за 0,5.

Визначення однополярних виводів потрібно виконувати для ТН із порушеними заводськими позначеннями виводів, і для ТН, що підлягали ремонту з відключенням вторинних обмоток. Для перевірки використовується будь-який вимірювальний прилад постійного струму із позначеннями полярності затискачів і потрібною чутливістю, до прикладу міліамперметр або мілівольтметр.

Ще для перевірки ТН будують його векторну діаграму у завантаженому стані, із використанням таких приладів, як ВАФ-85. Побудова проводиться наступним чином: спочатку подається номінальна напруга на первинну обмотку, далі вимірюють величину напруги у кожній вторинній обмотці, за цими і даними будується векторна діаграма ТН. У випадку, коли вторинні кола виконані вірно, його векторна діаграма виглядає як на рисунку 3.2.

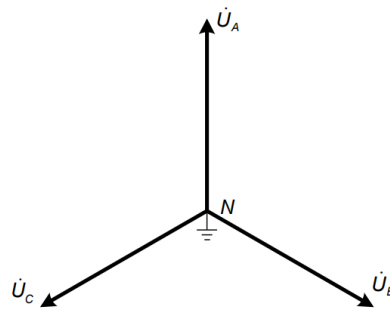


Рисунок 3.2 – Векторна діаграма трансформатора напруги у разі правильного виконання вторинних кіл

Дослід короткого замикання необхідно проводити для всіх ТН. Бажано проводити випробування з осцилографуванням струму короткого замикання для всіх ТН потужних електростанцій та підстанцій 110-330 кВ, де захист вторинних кіл від коротких замикань зазвичай працює на межі чутливості. Дослід короткого замикання слід виконувати за спеціальною програмою, складеною індивідуально для кожного випадку із урахуванням конкретної схеми кожного ТН. Місце короткого замикання необхідно обирати на кінці ділянки мережі, що захищається даним вимикачем. Вид короткого замикання обирається таким, щоб струм був якомога меншим. Включення на коротке замикання потрібно виконувати за допомогою додаткового автоматичного вимикача. Необхідно забезпечувати вимкнення короткого замикання на випадок відмови вимикача, що перевіряють [13].

Проводиться також випробування електричної міцності ізоляції. Під час цього потрібно враховувати, що у реле та вимірювальних приладів, в яких обмотки струму та напруги розташовані на одному каркасі, струмові похибки виникають зі своїх кіл і з'єднують тимчасово з обмотками напруги.

При перевірці вторинних кіл ТН, необхідно подавати по черзі напругу на кожну із жил, в цей час решту жил потрібно з'єднувати між собою і заземлювати.

Кабелі на час зазначених випробувань необхідно від'єднувати від шин щита або панелей приладів захисту і автоматики. Після завершення

випробувань схему необхідно відновити і перевірити ще раз опір ізоляції повністю складеної схеми відносно землі.

3.4 Способи компенсації похибок у трансформаторах напруги

Кутова похибка ТН складається із ще двох похибок: похибки за струмом холостого ходу і струму навантаження. Реактивний опір в обмотках вносить від'ємну величину кутової похибки, активний вносить додатну похибку. За режиму холостого ходу трансформатора струму його кутова похибка має додатний знак, а при чисто активному навантаженні, коли коефіцієнт потужності вторинної обмотки $\cos\varphi_2=1$, похибка стає від'ємною при збільшенні потужності. Коли коефіцієнт потужності $\cos\varphi_2 = 0,5$ – кутова похибка лінійно збільшується як і потужність, при цьому похибка має додатний знак.

У ТН величину кутової похибки можна зменшити шляхом використання компенсувальних обмоток. У разі використання компенсувальних обмоток, при чисто активному навантаженні вноситься додаткова поправка, а при індуктивному навантаженні використовується інша схема з'єднань, яка вносить від'ємну поправку.

Похибку за напругою у ТН можна компенсувати завдяки зменшенню кількості витків у первинній обмотці. Коли у первинній обмотці зменшують кількість витків, коефіцієнт трансформації стає меншим за своє номінальне значення, внаслідок чого напруга у вторинній обмотці зростає. У первинній обмотці зменшують кількість витків на таку величину, щоб за режиму холостого ходу ТН мав максимальну допустиму похибку за напругою для свого класу точності.

4 АНАЛІЗ БУДОВИ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ НАПРУГИ

4.1 Особливості конструкції трансформаторів напруги

У ТН первинну обмотку підключають до фаз А, В, С мережі високої напруги, а вторинну обмотку з'єднують з відповідним навантаженням, як показано на рисунку 4.1.

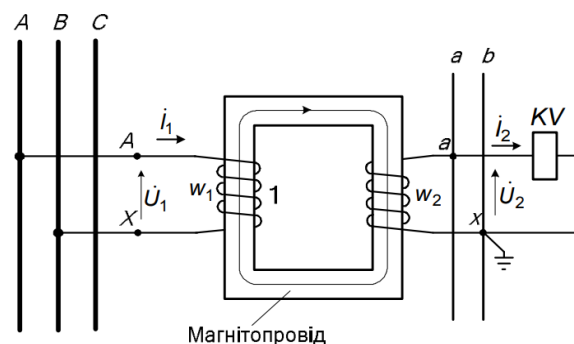


Рисунок 4.1 – Типова схема трансформатора напруги з двома обмотками

Відповідно до рисунку 4.1, у первинній обмотці w_1 із напругою U_1 протікає струм I_1 , завдяки якому утворюється намагнічувальна сила F_1 , що визначається як добуток струму I_1 на кількість витків первинної обмотки w_1 . Під впливом намагнічувальної сили F_1 , у магнітопроводі формується магнітний потік Φ_1 , що створює у вторинній обмотці електрорушійну силу E_2 , під дією якої, при замкненій на навантаження вторинній обмотці w_2 утворюється струм I_2 , що створює намагнічувальну силу F_2 , яка утворює магнітний потік Φ_2 . Магнітний потік у вторинній обмотці протидіє магнітному потокові первинної обмотки, намагнічувальні сили первинної, вторинної обмотки та їх потоки додають, і утворюється такий параметр, як результуючий магнітний потік $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$.

Кожен ТН має відповідне позначення, в якому: Н – трансформатор напруги; О – однофазний; Т – трифазний; М – масляне охолодження; С –

природне повітряне охолодження; Л – лита ізоляція; К – каскадного типу; З – заземлені кінці первинної обмотки; І – з обмоткою для контролю ізоляції мережі; Ф – в порцеляновій покритті.

За конструктивним виконанням, ТН, які виготовляють для класу напруги 35 кВ і менше, сильно схожі із силовими трансформаторами. Зазвичай на такі класи напруги виготовляються трансформатори, у яких один з виводів високої напруги заземлений, або обидва виводи високої напруги ізолювані.

Трифазні ТН використовуються за напруги 18 кВ і менше. Однофазні ТН застосовуються для будь якої напруги [9].

Однофазні ТН виготовляються як триобмотковими, так і двообмотковими. Двообмоткові ТН типу НОС, НОЛ, НОМ, необхідні для ввімкнення на міжфазну напругу у мережі з ізолюваною нейтраллю. Ізоляція обмотки розрахована відносно корпусу на міжфазну ізоляцію.

Трифазні ТН виготовляють в наступних модифікаціях: двообмоткові тристрижневі, триобмоткові з двома магнітопроводами (антирезонансні) і триобмоткові п'ятистрижневі. У трифазних триобмоткових антирезонансних ТН присутні два магнітопроводи, що з'єднані один з одним в загальну конструкцію. ТН забезпечує вимірювання трьох фазних, лінійних напруг та напруги нульової послідовності. ТН витримує без пошкоджень усі види однофазних замикань на землю у мережі без обмеження часу.

Трифазні тристрижневі ТН застосовуються для живлення вимірювальних приладів релейного захисту та автоматики і мають групу з'єднань Y/Y_{H-0} або V/V_{-0} . Ізоляція первинних обмоток розрахована на міжфазну напругу, яка можливо буде подана до первинних обмоток протягом тривалого часу в умовах однофазного замикання на землю в прилеглій мережі.

Обмотки п'ятистрижневих ТН типу НТМІ розміщені на трьохстрижневому осерді. Крайні стрижні необхідні для замикання магнітних потоків нульової послідовності. Дані ТН мають групу з'єднання Y_H/Y_{H-0} . Нульові точки первинної та вторинної обмоток, що з'єднані в «зірку» виведені, а обмотки розраховані на міжфазну напругу.

В установках напругою до 1 кВ застосовуються сухі ТН, в яких обмотки виконуються провідниками, а ізоляція між ними – електрокартоном. На напругу 6 – 1150 кВ у відкритих та закритих розподільних пунктах використовуються ТН із масляною ізоляцією, в яких для ізоляції обмоток та охолодження, первинна та вторинна обмотки заливаються маслом.

У ТН, що призначені для використання в мережах з високим струмом замикання на землю, та які працюють з глухозаземленими нейтральми, додаткові вторинні обмотки з'єднують в «розімкнений трикутник» і виконують на номінальну напругу 100 В, з номінальним коефіцієнтом трансформації $k_{\text{ном}} = U_{\text{ном.фаз}}/100$. У ТН, що використовуються в мережах з низьким струмом замикання на землю, які мають ізольовану нейтраль при напрузі 35 кВ і нижче, додаткові вторинні обмотки виконують на номінальну напругу 100/3 В, з $k_{\text{ном}} = U_{\text{ном.фаз}}/33$.

У мережах напругою 110 кВ ТН піддаються сильному впливу дії атмосферних перенапруг, тому необхідно вживати заходів для отримання рівномірного розподілу напруг по котушках первинної обмотки. Для цього, над первинними обмотками встановлюють екрани, які з'єднують електрично з крайнім витком первинної обмотки.

Габарити ТН залежить від його ізоляції, тому там, дозволяє ситуація, його виготовляють для вимірювання напруги між фазою та землею, завдяки чому зникає необхідність застосування ізоляції для заземленого виводу у первинній обмотці, що дозволяє зменшити габарити і здешевити конструкцію трансформатора.

Каскадні ТН типу НКФ виконуються у вигляді маслозаповнених блоків, що містять по 2 каскади кожен, виконані на одному двострижневому осерді. ТН на 110 кВ є одним з таких блоків, а на напругу 220, 330 і 500 кВ, ТН складають відповідно з двох, трьох та чотирьох послідовно з'єднаних двокаскадних блоків.

У розподільних установках з напругою 110 кВ і більше використовуються ТН типу НКФ – каскадного типу в порцеляновій покритті, будову якого

показано на рисунку 4.2. Відповідно до рисунку, 1 – це ввід високої напруги; 2 – маслорозширювач; 3 – фарфорова сорочка; 4 – основа трансформатора напруги; 5 – коробка з вводами низької напруги.

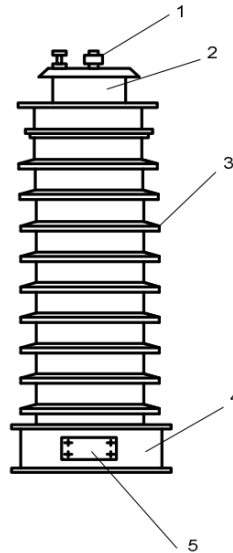


Рисунок 4.2 – Особливості будови трансформатора напруги НКФ-110

НКФ-110 містить в собі двохстрижневий магнітопровід, у якому на кожному зі стержнів розташована первинна обмотка, що розрахована на половину фазної напруги $U_{\phi}/2$, первинні обмотки ізолювані від магнітопроводу на таку ж напругу. На нижній стержень магнітопроводу намотані вторинні обмотки, як основна, так і додаткова. У такому ТН первинна обмотка рівномірно розподіляється по магнітопроводах, через що покращується ізоляція обмотки, задля рівномірного розподілу навантаження по первинних обмотках, використовується обмотка зв'язку. Його блок, в який входить магнітопровід, первинна та вторинні обмотки, заливається маслом і закривається фарфоровим корпусом [3].

ТН типу ЗНОЛ, ЗНОМ на напругу 6-24 кВ призначені для генераторів, при цьому маслонаповнені ТН типу ЗНОМ пристосовані для монтажу у комплектні пофазні струмопроводи. Корпус, з виводами вторинної обмотки на ньому,

замикають зовні. Бак ЗНОМ, вбудований в струмопровід, робиться з немагнітної сталі, заради уникнення нагрівання внаслідок вихрових струмів.

У комплектних шинопроводах потужних генераторів використовуються однофазні трансформатори напруги з масляною системою охолодження і заземленими кінцями первинної обмотки – ЗНОМ. Конструктивна схема трансформатора напруги типу ЗНОМ-20 показана на рисунку 4.3.

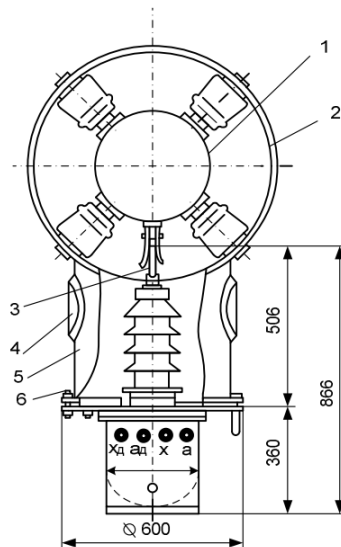


Рисунок 4.3 – Конструктивні особливості трансформатора напруги ЗНОМ-20

Як показано на рисунку 4.3, цифрою 1 позначено струмопровід, 2 – екран, 3 – ножовий контакт, 4 – оглядовий люк, 5 – патрубок, 6 – болт, яким прикріплюють кришку трансформатора.

Ножовим контактом, що знаходиться на ввіді первинної обмотки, до пружинних контактів приєднують ТН. Кришку закріплюють болтами до патрубку з оглядовими люками, через це вводи первинної обмотки трансформатора напруги знаходяться в закритому ізольованому відгалуженні екрана струмопроводу. Пружинні контакти закріплюють на струмопроводі, що закривають екраном. Баки виготовляють із немагнітної сталі, задля зменшення намагнічувальних втрат.

Окрім ТН, призначених для живлення кіл релейного захисту та автоматики, на електричних станціях широко застосовуються допоміжні однофазні ТН типу ЗОМ, що мають дві вторинні обмотки.

За своєю конструкцією, ТН типу ЗОМ аналогічні до ТН типу ЗНОМ, проте відрізняються тим, що не мають класу точності. У них похибки не нормуються, і, зазвичай, вони дещо більші за передбачені галузевими нормами.

Трифазні ТН з масляною системою охолодження і з додатковою обмоткою для контролю ізоляції мережі НТМІ використовуються для приєднання приладів контролю ізоляції. Вигляд НТМІ-10 показано на рисунку 4.4.



Рисунок 4.4 – Вигляд трансформатора напруги НТМІ-10

У трансформаторів напруги типу НТМІ магнітопровід виконують п'ятистріжневим, такі трансформатори мають три обмотки. Такі трансформатори використовуються для створення вимірювального сигналу, призначеного для вимірювальних приладів, та засобів релейного захисту.

4.2 Дослідження схем з'єднання обмоток в трансформаторах напруги

Схеми з'єднань обмоток у ТН залежать від призначення приладів релейного захисту і автоматики, а також від конструкції самого ТН [4].

На рисунку 4.5 показана схема підключення обмоток однофазного ТН до трифазної мережі. За допомогою такого виду з'єднання можна контролювати тільки одну величину напруги із використанням реле напруги.

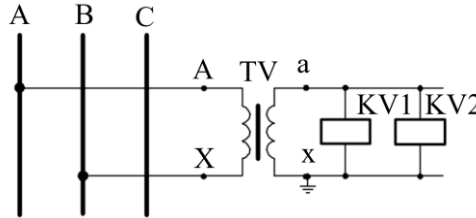


Рисунок 4.5 – Схема підключення однофазного трансформатора напруги до трифазної мережі

Схема підключення двох однофазних ТН до трифазної мережі показана на рисунку 4.6. Такий тип схеми має назву «неповний трикутник», для її виконання необхідно кінець первинної обмотки одного ТН з'єднати з початком первинної обмотки другого ТН, таким же способом потрібно з'єднати і вторинні обмотки. За допомогою такої схеми можна контролювати усі міжфазні напруги, проте не контролюються фазні напруги відносно землі. Для того, щоб по обмотках не протікали додаткові струми, через які зростають похибки, не варто вмикати навантаження між фазами А та С в такій схемі.

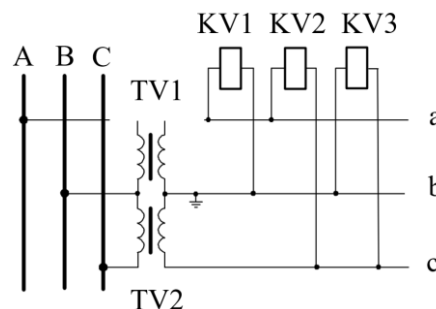


Рисунок 4.6 - Схема підключення двох однофазних трансформаторів напруги до трифазної мережі «неповний трикутник»

Схема підключення трьох однофазних ТН до трифазної мережі продемонстрована на рисунку 4.7 та має назву «зірка – нуль». Такий тип схеми дозволяє контролювати усі напруги в фазах відносно землі та міжфазні напруги. Замість трьох однофазних ТН можна також застосовувати один трифазний п'ятистрижневий ТН.

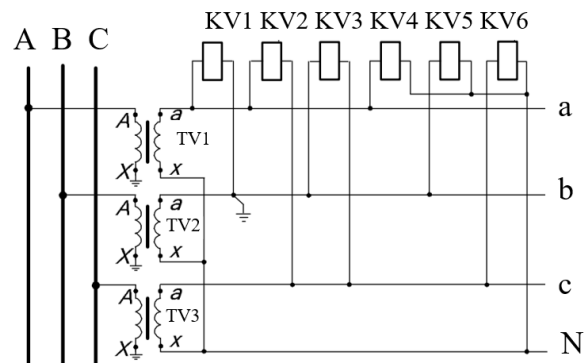


Рисунок 4.7 – Схема підключення трьох однофазних трансформаторів напруги до трифазної мережі «зірка – нуль»

Схема «розімкнений трикутник», що показана на рисунку 4.8, використовується для контролю напруги нульової послідовності. В такій схемі до реле напруги підводиться напруга, що пропорційна напрузі нульової послідовності.

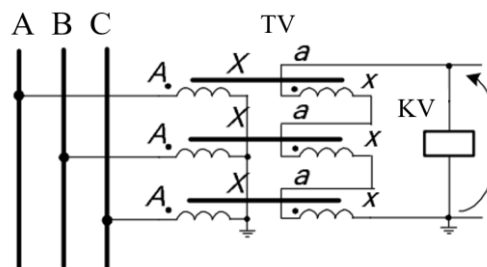


Рисунок 4.8 – Схема підключення трансформатора напруги «розімкнений трикутник»

5 АНАЛІЗ УМОВ ВИБОРУ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ І НАПРУГИ

5.1 Умови вибору вимірювального трансформатора струму

У цьому розділі проведемо вибір вимірювального ТС для відкритої розподільної установки на напругу 220 кВ при проектуванні гідроелектростанції потужністю 180 МВт. Обираємо ТС типу ТФЗМ-220Б-ІІ, параметри якого: $U_{\text{ном}} = 220$ кВ; $I_{1\text{ном}} = 0,6$ кА; $I_{2\text{ном}} = 1$ А; $Z_{2\text{ном}} = 30$ Ом; $t_{\text{тер}} = 3$ с; клас точності – 0,5. Перевірку проводимо за наступними умовами [14]:

За напругою установки:

$$U_{\text{уст}} = 220 \text{ (кВ)} \leq U_{\text{ном}} = 220 \text{ (кВ)}.$$

По допустимій величині струму:

$$I_{\text{роб.макс}} \leq I_{1\text{ном}},$$

де $I_{\text{роб.макс}}$ – робочий максимальний струм найбільш потужного приєднання, кА:

$$I_{\text{роб.макс}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot 0,95}, \quad (5.1)$$

де $S_{\text{ном}}$ – повна потужність найбільш потужного приєднання у ВРУ, МВА.

$$I_{\text{роб.макс}} = \frac{37,5}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,95} = 0,104 \text{ (кА)};$$

$$I_{\text{роб.макс}} = 0,104 \text{ (кА)} \leq I_{1\text{ном}} = 0,6 \text{ (кА)}.$$

Перевірка по вторинному навантаженню:

$$Z_2 \leq Z_{2\text{ном}},$$

де Z_2 – розрахункове навантаження, Ом:

$$Z_2 = \Sigma Z_{\text{пр}} + R_{\text{к}} + R_{\text{з.пров}}, \quad (5.2)$$

де $\Sigma Z_{\text{пр}}$ – загальний опір приладів, Ом;

$R_{\text{к}} = 0,1$ Ом – опір контактів;

$R_{\text{з.пров}}$ – опір з'єднувальних проводів, Ом.

Для перевірки ТС за вторинним навантаженням, потрібно користуючись схемою включення та технічними параметрами приладів визначити навантаження по фазах для найбільш завантаженого ТС. Як видно з таблиці 5.1, найбільш завантаженими ТС є трансформатори в фазах А і С.

Таблиця 5.1 – Перелік технічних параметрів необхідних приладів

№	Прилад	Тип	Навантаження, ВА		
			А	В	С
1	Амперметр реєструючий	Н-394	-	10	-
2	Ватметр	Д-345	0,5	-	0,5
3	Варметр	Д-345	0,5	-	0,5
4	Лічильник активної енергії	И-680	2,5	-	2,5
5	Ватметр реєструючий	Н-395	10	-	10
6	Ватметр (щит турбіни)	Д-345	0,5	-	0,5
	Сумарне значення		14	10	14

Загальний опір приладів визначаємо за наступною формулою:

$$\Sigma Z_{\text{пр}} = \frac{\Sigma S_{\text{пр}}}{I_{2\text{н}}^2}, \quad (5.3)$$

де $\Sigma S_{\text{пр}}$ – сумарне навантаження приладів.

$$\Sigma Z_{\text{пр}} = \frac{14}{1^2} = 14 \text{ (Ом)}.$$

Допустимий опір з'єднувальних обмоток:

$$R_{з.пров} = Z_{2н} - \Sigma Z_{пр} - R_k; \quad (5.4)$$

$$R_{з.пров} = 30 - 14 - 0,1 = 15,9 \text{ (Ом)}.$$

Визначимо потрібний переріз проводу:

$$q_{роз} = \frac{\rho \cdot l}{R_{з.пров}}, \quad (5.5)$$

де $\rho = 0,0175$ - питомий опір міді;

l – довжина проводу, м.

$$q_{роз} = \frac{0,0175 \cdot 130}{15,9} = 0,14 \text{ (мм}^2\text{)}.$$

Обираємо кабель типу АКРВГ з мідними жилами і перерізом $1,5 \text{ мм}^2$.

Визначимо вторинне навантаження ТС:

$$Z_2 = \frac{0,0175 \cdot 130}{1,5} + 0,1 + 15,9 = 17,52 \text{ (Ом)};$$

$$Z_2 = 17,52 \text{ (Ом)} \leq Z_{2н} = 30 \text{ (Ом)}.$$

Перевірка за всіма умовами пройдена, тому ТС було обрано вірно.

5.2 Аналіз порядку вибору вимірювальних трансформаторів напруги

Вимірювальні ТН обираються відповідно до напруги установки [14]. Для прикладу, обираємо ТН для ВРУ на напругу 220 кВ гідроелектростанції потужністю 180 МВт. Обираємо ТН типу НКФ-220-58У1, $U_{н1} = 220 \text{ кВ}$.

Зробимо перевірку обраного ТН за його вторинним навантаженням:

$$S_{2\text{розр}} \leq S_{2\text{н}},$$

де $S_{2\text{розр}}$ – розрахункове навантаження ТН;

$S_{2\text{н}}$ – вторинна номінальна потужність ТН.

Для визначення розрахункового навантаження ТН скористаємось таблицею 5.2, в якій вказані навантаження ТН.

Таблиця 5.2 – Параметри трансформатора напруги

Назва	Тип	С однієї катушки	К-сть катушок	cosφ	sinφ	P, Вт	Q, вар
Вольтметр	Е-335	2	1	1	0	2	-
Ватметр	Д-345	2	2	1	0	4	-
Ватметр (щит турбіни)	Д-345	2	2	1	0	4	-
Варметр	Д-345	2	2	1	0	4	-
Датчик активної потужності	Е-829	10	-	1	0	10	-
Датчик реактивної потужності	Е-830	10	-	1	0	10	-
Лічильник активної енергії	И-680	2	2	0,38	0,92	4	9,7
Ватметр реєструючий	Н-395	10	2	1	0	10	-
Вольтметр реєструючий	Н-393	10	1	1	0	10	-
Частотомір	Е-362	1	1	1	0	1	-
Частотомір (щит турбіни)	Е-362	1	1	1	0	1	-
Сумарне значення						70	9,7

Розрахункове навантаження ТН визначаємо за наступною формулою:

$$S_{2\Sigma} = \sqrt{P_{\Sigma}^2 + Q_{\Sigma}^2}; \quad (5.6)$$

$$S_{2\Sigma} = \sqrt{70^2 + 9,7^2} = 70,67 \text{ (В} \cdot \text{А)};$$

$$S_{2\text{розр}} = 70,67 \cdot 3 = 212 \text{ (В} \cdot \text{А)} \leq S_{2\text{н}} = 400 \text{ (В} \cdot \text{А)}.$$

Оскільки умова виконується, ТН обраний вірно і працюватиме в обраному класі точності.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, що спрямовані на збереження життя, здоров'я і працездатності людини у процесі трудової діяльності. Головною метою охорони праці є створення на кожному робочому місці безпечних умов праці, безпечної експлуатації обладнання, зменшення або повна нейтралізація дії шкідливих і небезпечних виробничих факторів на організм людини і, як наслідок, зниження рівня виробничого травматизму та професійних захворювань. Особливо важливим є дотримання вимог охорони праці в електроенергетиці, оскільки виробництво, передача, розподіл та споживання електричної енергії вимагають високої технічної культури забезпечення електробезпеки під час проєктування, спорудження, монтажу, налагодження, експлуатації та ремонту електроустановок.

У даному розділі розробляються заходи із охорони праці при обслуговуванні електрообладнання, вимірювальних трансформаторів струму та напруги в тому числі, в приміщенні релейних панелей комплектної розподільної установки на гідроелектростанції. Основним устаткуванням РУ є: вимикачі, роз'єднувачі, трансформатори струму та напруги, вимірювальні прилади, збірні шини, розрядники, реактори електричні. Задля забезпечення можливості ремонту розподільних установок або ділянок мережі, не припиняючи енергопостачання споживачі, збірні шини розподільних установок розділяють на секції та системи.

На електротехнічний персонал, що здійснює обслуговування електричного обладнання комплектної розподільної установки, впливають наступні небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

Фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна,

загальна); освітлення: природне (відсутність), штучне (недостатня освітленість).

Хімічні фактори: аерозолі фіброгенної дії (пил).

Фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщення у просторі. До показників, що характеризують напруженість праці, належать: інтелектуальні, сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи [15].

6.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта

6.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць

Для безпечної експлуатації вимірювальних трансформаторів струму та напруги, відповідно до правил улаштування електроустановок [5], повинен дотримуватись ряд вимог, що описані нижче.

1) Переріз жил кабелів та проводів мають задовольняти вимогам їх захисту від короткого замикання без витримки часу, допустимих тривалих струмів, термічній стійкості, а також забезпечувати роботу апаратів в заданому класі точності.

2) Кількість вторинних обмоток ТС, їх клас точності мають забезпечувати окреме підключення пристроїв РЗА і систем обліку та вимірювань до різних вторинних обмоток. Основні та резервні захисти кожного елемента мережі має бути включено на окремі вторинні обмотки ТС.

3) Заземлення у вторинних колах ТС потрібно передбачати в одній точці на найближчій від ТС збірці затискачів або затискачах ТС.

4) Вторинні обмотки ТН треба заземлювати з'єднанням нейтральної точки або одного з кліщів обмотки із заземлювальним пристроєм. Заземлення

вторинної обмотки ТН має бути виконаним на найближчій від ТН збірці затискачів або на затискачах ТН.

5) ТН повинні бути захищені від коротких замикань у вторинних колах автоматичними вимикачами. Автоматичні вимикачі потрібно встановлювати у всіх незаземлених провідниках після збірки затискачів, за винятком кола нульової послідовності ТН в мережах з великими струмами замикання на землю. У вторинних колах ТН має бути забезпечено можливість створення видимого розриву.

6) На ТН, установлених у мережах з малими струмами замикання на землю без компенсації ємнісних струмів, потрібно передбачати захист від перенапруги в разі самовільних зміщень нейтралі та в разі виникнення ферорезонансу.

7) ТН мають підлягати контролю справності кіл напруги. Релейний захист, кола якого живляться від ТН, має бути обладнано пристроями, які: автоматично виводять захист із дії в разі вимкнення автоматичних вимикачів, перегорання запобіжників та інших порушень кіл напруги; сигналізують про порушення кіл напруги, якщо ці порушення не призводять до помилкового спрацьовування захисту в умовах нормального режиму, але можуть призвести до зайвого спрацьовування в інших умовах.

8) Для контролю увімкненого стану автоматичних вимикачів, установлених у колах вторинних обмоток ТН, який використовується в схемах релейного захисту, АПВ, протиаварійної автоматики, треба застосовувати швидкодійні реле-повторювачі. Реле-повторювачі повинні мати окреме живлення і підключатись через окремі автоматичні вимикачі з обов'язковим контролем обриву кіл живлення.

Згідно з правилами безпечної експлуатації електроустановок [6], забороняється розривати кола вторинних обмоток ТС. У разі необхідності розривання цих кіл, їх слід попередньо замкнути перемичкою, встановленою до передбачуваного місця розриву (починаючи від ТС). Для встановлення перемички необхідно застосовувати інструмент з ізолювальними рукоятками.

При виконанні робіт на ТС або в колах, підімкнених до їх вторинних обмоток, необхідно дотримуватись наступних запобіжних заходів:

- затискачі вторинних обмоток до закінчення монтажу кіл, що підключаються до них, слід закоротити. Після приєднання змонтованих кіл до ТС, закоротку слід перенести на найближчу збірку затискачів і зняти її тільки після повного закінчення монтажу та перевірки правильності приєднання змонтованих кіл;

- у разі перевірки полярності, перед подаванням імпульсного струму до первинної обмотки прилади слід приєднати до затискачів вторинної обмотки.

- забороняється використовувати шини первинних обмоток як струмопровідні під час виконання монтажних та зварювальних робіт. Забороняється від'єднувати заземлювальний провідник вторинної обмотки до виникнення приєднання.

Згідно з правилами пожежної безпеки в Україні [16], електричне обладнання, апарати, електрощити зі ступенем захисту оболонок менше IP44 повинні розміщуватись на відстані не менше 1 метра від горючих матеріалів, або можуть бути оснащені автономними системами пожежогасіння.

Місця з'єднання жил проводів і кабелів, а також з'єднувальні та відгалужувальні затискачі повинні мати мінімальний перехідний опір, щоб уникнути їх перегрівання і пошкодження ізоляції стиків. Струм втрат ізоляції стиків повинен бути не більше струму втрат ізоляції цілих жил цих проводів і кабелів.

6.1.2 Електробезпека

Живлення електричного обладнання та системи освітлення у приміщенні релейних панелей здійснюється від чотирьохпровідної трифазної мережі 380 x 220 В (фазна напруга (фаза-нуль) – 220 В, а міжфазна лінійна (фаза-фаза) – 380В).

Категорія умов з небезпеки електротравматизму – з підвищеною небезпекою.

Наведемо технічні рішення щодо запобігання електротравмам:

1) Технічні рішення із запобігання електротравм від контакту з нормально струмоведучими елементами електроустаткування:

- ізоляція нормально струмоведучих елементів електроустаткування відповідно з вимогами нормативів;
- розміщення неізольованих струмоведучих елементів у металевих шафах;
- використання засобів орієнтації в електроустаткуванні, що запобігає помилковим діям при обслуговуванні та експлуатації електроустаткування – написи, таблички, попереджувальні знаки, різнокольорова ізоляція провідників окремих елементів електросхем;

2) Технічні рішення щодо запобігання електротравм при переході напруги на нормально неструмопровідні елементи електроустаткування: використання занулення – навмисного електричного з'єднання нормально неструмоведучих елементів устаткування із заземленим нульовим проводом. При зануленні пробій на корпус призводить до короткого замикання фази. Спрацьовує захист від короткого замикання – і пошкоджений споживач відключається від мережі.

3) Електрозахисні засоби: обслуговуючий персонал обов'язково повинен мати випробувальні засоби захисту, які перед тим як застосовувати обов'язково необхідно перевірити на справність, відсутність зовнішніх пошкоджень. Перевірити також потрібно дату наступної перевірки засобу захисту, оскільки, якщо їх термін придатності вийшов, користуватись ними заборонено.

Використовуються наступні основні електрозахисні засоби захисту, ізоляція в яких здатна витримувати робочу напругу протягом тривалого часу, завдяки чому можна доторкатись до струмопровідних частин, що знаходяться під напругою: діелектричні рукавиці, покажчики напруги, ізолювальні штанги, ізолювальні та струмовимірювальні кліщі.

Також використовуються наступні додаткові електрозахисні засоби, що захищають обслуговуючий персонал від напруги дотику, напруги кроку, а також попереджають персонал про можливість помилкових дій: переносні

заземлення, діелектричні калоші, діелектричні килимки, плакати та знаки безпеки, ізолювальні накладки та підставки.

6.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

6.2.1 Мікроклімат

Відповідно до параметрів мікроклімату, що нормуються за ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми клімату виробничих приміщень [17], відносяться: температура і відносна вологість повітря, швидкість його переміщення. Допустимі параметри мікроклімату для умов, що розглядаються (категорія робіт та період року), наведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Параметри мікроклімату приміщення

Період року	Категорія робіт	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	Па	17-29	65 при 26 °C	0,2 – 0,4
Холодний	Па	15-24	Не більш 75	не більш 0,3

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату приміщення, відповідно до ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціювання [18], передбачається:

1. Провітрювання приміщення;
2. Використання вентиляторів обдуву в теплий період року;
3. Використання калорифера в холодний період року.

6.2.2 Склад повітря робочої зони

Якість повітря згідно з ДСТУ-Н Б А 3.2-1:2007. Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва [19], у першу чергу, залежить від наявності, рівня небезпечності та кількості шкідливих речовин. Шкідливі

речовини можуть потрапляти до організму людини інгаляційними та іншими шляхами надходження.

Характерні забруднюючі речовини для досліджуваного приміщення наведені в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Можливі забруднювачі повітря та їх ГДК

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

Для забезпечення складу повітря робочої зони, відповідно до ДБНВ.2.5-67:2013 [18], передбачено такі рішення:

1. Провітрювання приміщення;
2. Встановлення пиловловлюючих засобів.

6.2.3 Виробниче освітлення

Для загального штучного освітлення приміщень потрібно використовувати найбільш енергоекономічні джерела світла, віддаючи перевагу при рівній потужності джерелам світла з більшою світловіддачею та терміном служби, з виконанням вимоги не знижувати якість освітлювального устаткування для зниження енерговитрат. Для загального штучного освітлення доцільно використовувати розрядні та світлодіодні джерела світла, які за однакової потужності з тепловими джерелами, мають більшу світлову віддачу та з більшим терміном експлуатації.

За найменшим або еквівалентним розміром освітлення визначаються характеристика та розряд зорової роботи, за характеристикою фону та контрастом об'єкту з фоном – підрозряд зорової роботи та, відповідно, нормовані значення комбінованого та загально штучного освітлення. Визначення нормовані значення штучного освітлення занесені в таблицю 6.3.

Таблиця 6.3 – Нормовані значення виробничого освітлення

Харак-ка зорової роботи	Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкту з фоном	Характеристика фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природнє $E_{н.пр}$	Суміщене $E_{н.сум}$
						всього	У т.ч. від загального		
Високої точності	Від 0,3 до 0,5 включно	III	в	малий середній великий	світлий середній темний	600	200	-	3

Для забезпечення нормованого значення штучної освітленості E_n передбачено застосування люмінесцентних ламп. Віддача світла люмінесцентної лампи в середньому у 5 разів більша, ніж у лампи розжарювання. При цьому споживання електроенергії знижується на 80%, при цьому звичний рівень освітлення приміщень залишається. Працює в 6-10 разів довше за лампи розжарювання.

6.2.4 Виробничий шум

Допустимі рівні звукового тиску у октавних смугах частот, еквівалентні рівні звуку на робочих місцях наводяться в ДСН 3.3.6.037-99 [20].

Допустимі рівні звукового тиску та рівні звуку для постійного широкосмугового шуму наведені в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного (непостійного) широкосмугового (тонального) шуму

Вид трудової діяльності, робоче місце	Рівні звукового тиску в дБ в октавних смугах із середньогерметичними частотами, Гц								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Виконання робіт на постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях та на території підприємства	107	95	87	82	78	75	73	71	69

Для забезпечення допустимих параметрів шуму (поліпшення шумового клімату) в приміщенні проєктом передбачено застосування мало шумових вентиляторів для боротьби з вентиляційним шумом.

6.3 Технічні рішення з пожежної безпеки

Пожежна безпека промислових та інших об'єктів регламентується за правилами пожежної безпеки в Україні.

Досліджуване приміщення в даному розділі відповідно до ДСТУ Б В.1.1-36:2016 [21] відноситься до категорії Д (зниженопожежонебезпечна) за вибухопожежною небезпекою - речовини і/або матеріали, що зазначені вище для категорій приміщень В (крім горючих газів, горючих пилу і/або волокон), а також негорючі речовини і/або матеріали в холодному стані (за температури навколишнього середовища), за умов, що приміщення, в яких знаходяться (зберігаються, переробляються, транспортуються) зазначені вище речовини і/або матеріали, не відносяться до категорій А, Б або В.

Відповідно до ДБН В.1.1.7-2016 [22], досліджуване приміщення має ступінь вогнестійкості II - Будинки з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону із застосуванням листових і плитних негорючих матеріалів.

У таблиці 6.5 відповідно до ДБН В.1.1.7-2016 наведені Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) та максимальні межі поширення вогню по них.

Таблиця 6.5 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвилинах) та максимальні межі поширення вогню по них

Ступінь вогнестійкості будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвилинах) і максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	Стіни				колони	сходові площадки, сходи, балки, марші сходових кліток	перекрыття між поверхів (у т.ч. горищі та над підвалами)	елементи суміщених покриттів	
	Несучі та сходових кліток	само-несучі	Зовнішні несучі	внутрішні несучі (перегородки)				плити, настили, прогони	Балки, ферми, арки, рами
II	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	E1 15 M0	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M0	RE 15 M0	R30 M0

Межі вогнестійкості самонесучих стін, які враховуються в розрахунках жорсткості та стійкості будинку, приймають, як для несучих стін. Будівельні конструкції класифікують за вогнестійкістю та здатністю поширювати вогонь. Показником вогнестійкості є межа вогнестійкості конструкції, що визначається часом (у хвилинах) від початку вогневого випробування за стандартним температурним режимом до настання одного з граничних станів конструкції:

- втрати несучої спроможності (R);
- втрати цілісності (E);
- втрати тепло та ізолювальної спроможності (I)

Відповідно до ДБН В.1.1-7:2016 [22] протипожежні перешкоди та мінімальні меж їх вогнестійкості наведені в таблиці 6.6.

Таблиця 6.6 – Протипожежні перешкоди та мінімальні межі їх вогнестійкості

Протипожежні перешкоди	Тип протипожежних перешкод	Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди (у хвилинах)	Тип заповнення прорізів, не нижче	Тип протипожежного тамбур-шлюзу, не нижче
Стіни	1	REI 150	1	1
Перегородки	1	EI 45	2	1
Перекриття	1	REI 150	1	1

Згідно з ДБН Б.2.2-12:2019 [23], протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами слід приймати за таблицею 6.7 (чисельник). В умовах забудови, що склалася, протипожежні відстані між житловими будинками та від житлових будинків до будівель і споруд іншого призначення слід визначати згідно з протипожежними вимогами даних норм, наведеними у таблиці 6.7. Протипожежні відстані від житлових, громадських, адміністративно-побутових будинків промислових підприємств, гаражів до виробничих, складських, сільськогосподарських будинків і споруд слід приймати за таблицею 6.7 (знаменник).

Таблиця 6.7 - Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами, а також до виробничих будинків, сільськогосподарських будівель і споруд

Ступінь вогнестійкості будинку	Відстані при ступені вогнестійкості будинків, м		
	I, II	III	IIIa, IIIб, IV, Iva, V
II	6/9	8/9	10/12

У разі виникнення пожежі робітники повинні прийняти всі заходи щодо ліквідації вогню. Місце, що загорілось, варто гасити вогнегасниками. У разі загорання електропроводів варто відключити лінію. Ізоляцію електропроводів потрібно гасити тільки порошковими вогнегасниками, або піском.

У приміщенні релейних панелей комплектної розподільної установки встановлено 7 порошкових вогнегасників ВП-5.

Вогнегасники повинні бути розміщені на легкодоступних та видимих місцях і регулярно перевірятись відповідно до графіку, встановленого за нормативними документами.

ВИСНОВКИ

В даній бакалаврській дипломній роботі було виконано аналіз конструктивних особливостей та умов застосування вимірювальних трансформаторів струму на напруги.

В першому розділі роботи проаналізовано умови експлуатації та застосування вимірювальних трансформаторів струму. Також, розглянуто принцип дії, призначення та основні параметри вимірювальних трансформаторів струму, їх класифікацію, що залежить від робочої напруги, методу розташування, місця установки, кліматичних умов, виконання обмоток, ізоляції та інших факторів. Крім того, досліджено способи перевірки вимірювальних трансформаторів струму, та методи зменшення похибок в них.

Також, у другому розділі роботи проаналізовано конструкції вимірювальних трансформаторів струму, зокрема розглянуто конструктивні особливості наступних моделей трансформаторів струму, що відрізняються між собою за робочою напругою, способом ізоляції, місцем установки та іншими параметрами: ТПОЛ-10, ТОГ-330, ТЛ-0,66, ТФЗМ-220. Досліджено схеми з'єднань обмоток, що залежать від призначення пристроїв релейного захисту та автоматики.

В третьому розділі досліджено особливості застосування та умови експлуатації вимірювальних трансформаторів напруги. Проаналізовано їх призначення, принцип дії, основні параметри. Досліджено різновиди вимірювальних трансформаторів напруги, способи їх перевірки та методи компенсації похибок.

У четвертому розділі проведено аналіз будови вимірювальних трансформаторів напруги. Під час розробки розділу було розглянуто особливості конструкції таких моделей трансформаторів напруги, як: НТМІ-10, НКФ-110, ЗНОМ-20. Досліджено і схеми з'єднання обмоток у вимірювальних трансформаторах напруги, що відрізняються між собою

залежно від призначення пристроїв релейного захисту та автоматики, а також і від самої конструкції трансформаторів напруги.

У п'ятому розділі роботи також проаналізовано умови вибору вимірювальних трансформаторів струму та напруги. Зокрема, було проведено вибір вимірювальних трансформаторів струму та напруги для відкритої розподільної установки на напругу 220 кВ.

У розділі охорони праці розроблено заходи з охорони праці при обслуговуванні вимірювальних трансформаторів струму та напруги при проєктуванні електричних станцій та підстанцій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. <https://blog.youcontrol.market/ieliektroienierghietika-ukrayini-stand-i-pierspektivi/>.
2. Кочик В.М., Остра Н.В. АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТА УМОВ ЗАСТОСУВАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ ТА НАПРУГИ / Міжнародна науково-практична інтернет-конференція студентів, аспірантів та молодих науковців «Молодь у науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2024)» Вінниця 2024. [Електронний ресурс].
<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2024/paper/view/21684>
3. Лесько В. О., Кравчук С. В., Сікорська О. В. Електричні апарати : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2017. – 145 с.
4. Кідиба В. П. Релейний захист електроенергетичних систем : Підручник. – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська Політехніка», 2013 – 533 с.
5. Правила улаштування електроустановок. Видання офіційне. Міненерговугілля України. Харків : Видавництво «Форт», 2017. 760 с.
6. Правила безпечної експлуатації електроустановок: НПАОП 40.1-1.01-97: Затв. 06.10.1997 № 257 / Держ. Комітет України по нагляду за охороною праці. Харків : Видавництво «Форт», 2008. 144 с.
7. Гобрей Р. М. Технічне діагностування, випробування та вимірювання електрообладнання в умовах монтажу, налагоджування і в експлуатації / Гобрей Р. М., Рубаненко О. Є., Таловерья В, Л. – Київ: Науково-технічний учбово-консультаційний центр Ас ЕлЕнерго, 2008 – 528 с.
8. СОУ-Н МПЕ 40.1.35.301 : 2004. Перевірка трансформаторів струму, які використовуються в схемах релейного захисту. Інструкція. – 78 с.
9. Релейний захист і автоматика : Навчальний посібник / С. В. Панченко, В. С. Блиндюк, В. М. Баженов та ін; за редакції Баженова – Харків: УкрДУЗТ, 2020 – Ч.1 – 250 с.

10. Бржезицький В. О., Зелінський В. Ц., Лежнюк П. Д., Рубаненко О. Є. Електричні апарати: підручник. Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2016. 602 с.
11. Лагутін В. М., Тептя В. В., Вишневецький С. Я. Власні потреби електричних станцій : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2008. 102 с.
12. Яндульський О.С., Дмитренко О. О. Релейний захист. Цифрові пристрої релейного захисту, автоматики та управління електроенергетичних систем (Електронне видання) : навч. посіб / О. С. Яндульський, О. О. Дмитренко, під загальною редакцією д.т.н. О. С. Яндульського – К: НТУУ «КПІ», 2016 – 102 с.
13. Релейний захист електроенергетичних систем [Електронний ресурс]: підручник / Є. І. Сокол, Г.А. Сендерович, О. Г. Гриб, А. О. Запорожець, І. О. Самойленко, В. В. Скопенко, І. Т. Карплюк, С. В. Швець, М. В. Черкашенко, О. Ю. Заковоротний, Н. С. Захаренко, Н. В. Рудевич, Ю. Ф. Тесик, С. Ю. Пронзелева, В. Є. Кривонос, І. С. Ярова – Харків : ФОП Бровін О. В., 2020 – 306с.
14. Лежнюк П. Д., Лагутін В. М., Тептя В. В. Проектування електричної частини електричних станцій : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2009. 194 с.
15. Методичні вказівки до виконання розділу з охорони праці в кваліфікаційних роботах здобувачів освітнього ступеня бакалавра галузі знань 14 «Електрична інженерія» / уклад.: С. В. Дембіцька, І. М. Кобилянська, О. В. Кобилянський. – Вінниця: ВНТУ, 2022. – 65 с.
16. НАПБА.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні: наказ від 30.12.2014. №1417. [Чинний від 2021-01-22]. Вид. офіц. К. : 2014. 84 с.
17. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень: Постанова від 01.12.1999 р. № 42 . К.: Міністерство охорони здоров'я України.
18. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. [Чинний від 2014-01-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2013. 140 с.
19. ДСТУ-Н Б А 3.2-1:2007. Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. [Чинний від 2007-12-01] Вид. офіц. Київ. 2007.

20. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. [Чинний від 1999-12-01]. Київ. 1999.

21. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. [На заміну НАПБ Б.03.002-2007; чинний від 2017-01-01]. Вид. офіц. Київ. 2016.

22. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. [На заміну ДБН В.1.1-7-2002; діючий]. Вид. офіц. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. 2016.

23. ДБН Б.2.2-12:2019 Планування і забудова територій. [На заміну ДБН Б.2.2-12:2018; чинний від 2019-10-01]. Вид. офіц. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. 2019.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А
(обов'язковий)

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ
ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Аналіз конструктивних особливостей та умов застосування
вимірювальних трансформаторів струму та напруги.

Тип роботи: Бакалаврська дипломна робота
(БДР, МКР)

Підрозділ: кафедра електричних станцій та систем,
факультет електроенергетики та електромеханіки
(кафедра, факультет)

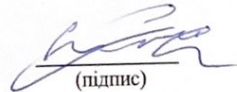
Показники звіту подібності Unicheck

Оригінальність 98% Схожість 2%

Аналіз звіту подібності (відмітити необхідне):

- ✓ 1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.
3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

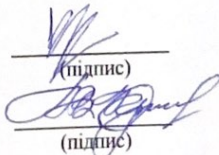
Особа, відповідальна за перевірку


(підпис)

Вишневський С. Я.
(прізвище, ініціали)

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

Автор роботи


(підпис)

Кочик В. М.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи

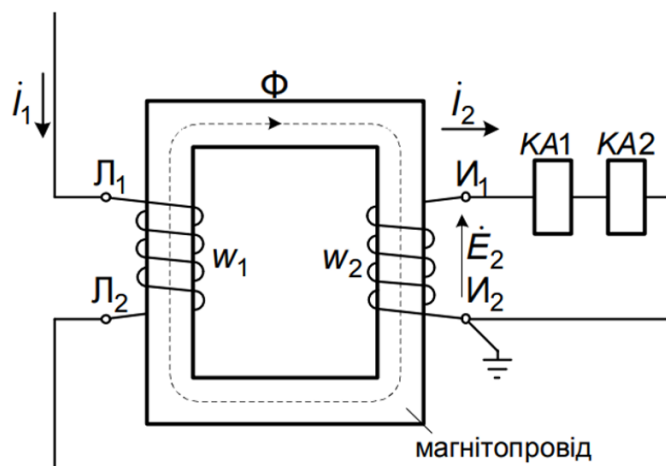
Остра Н. В.
(прізвище, ініціали)

ДОДАТОК Б
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

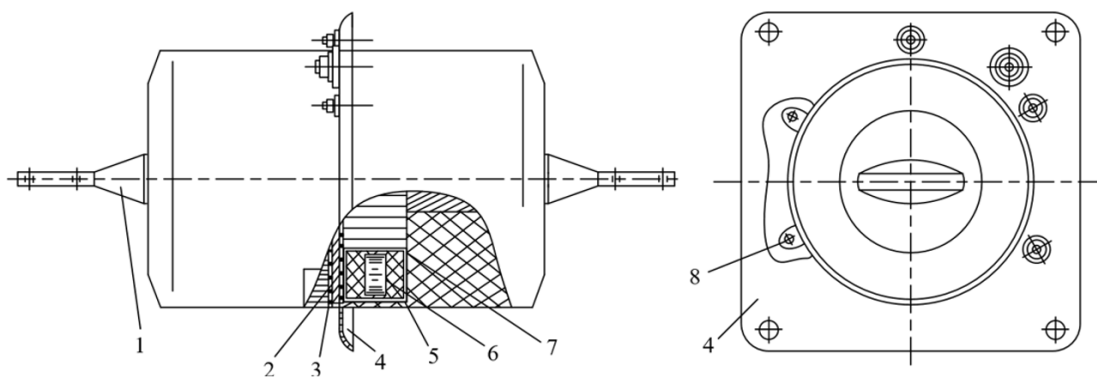
АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТА УМОВ
ЗАСТОСУВАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ
СТРУМУ ТА НАПРУГИ

Принципова схема вимірювального трансформатора струму



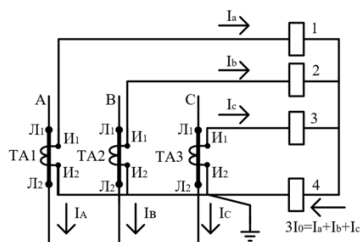
1

Конструктивні особливості трансформатора струму типу ТПОЛ-10

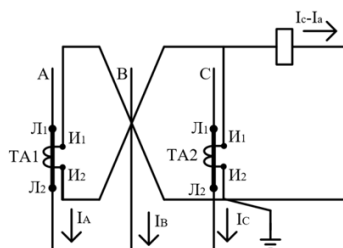


2

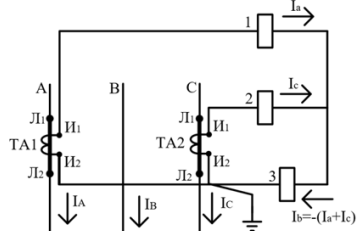
Особливості виконання схем з'єднань обмоток трансформаторів струму



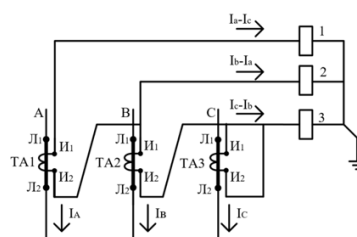
1. Схема з'єднання «Повна зірка»



3. Однорелейна схема з'єднання



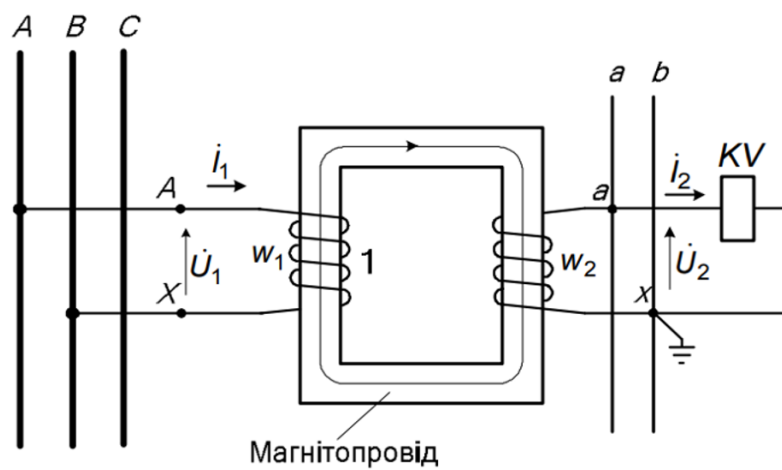
2. Двофазна трирелейна
схема з'єднання



4. Схема з'єднання «трикутник»

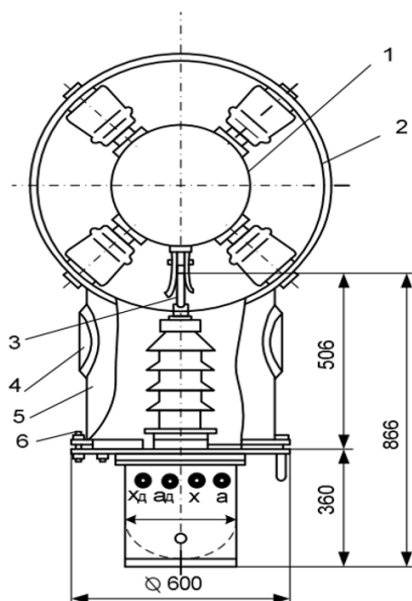
3

Принципова схема вимірювального трансформатора напруги



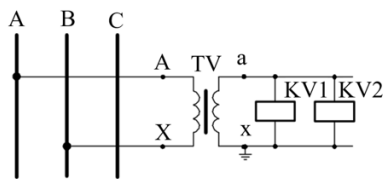
4

Особливості виконання вимірювального трансформатора напруги типу ЗНОМ-20

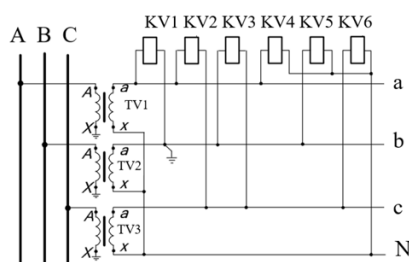


5

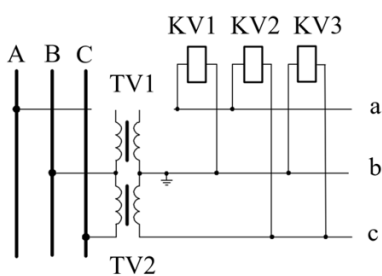
Види схем з'єднань обмоток трансформаторів напруги



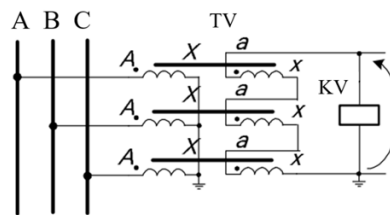
1. Схема підключення однофазного трансформатора напруги до трифазної мережі



3. Схема підключення «зірка – нуль»



2. Схема підключення «неповний трикутник»



4. Схема підключення «розімкнений трикутник»

6

Аналіз умов вибору вимірювальних трансформаторів струму

Вибір вимірювальних трансформаторів струму проводиться за наступними умовами:

- за напругою установки: $U_{\text{уст}} \leq U_{\text{ном}}$
- по допустимій величині струму: $I_{\text{max}} \leq I_{\text{ном}}$

- за конструкцією та класом точності;

- за електродинамічною стійкістю:
$$\left. \begin{aligned} i_y &\leq K_d \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{ном}}; \\ i_y &\leq i_{\text{дин}}, \end{aligned} \right\}$$

- за термічною стійкістю:
$$\left. \begin{aligned} B_k &\leq (K_T \cdot I_{\text{ном}})^2 \cdot t_T; \\ B_k &\leq I_T^2 \cdot t_T, \end{aligned} \right\}$$

- по вторинному навантаженню: $Z_2 \leq Z_{2\text{ном}}$



Зображення трансформатора струму
ТФЗМ-220Б

7

Особливості вибору вимірювальних трансформаторів напруги

Вибір вимірювальних трансформаторів напруги проводиться за наступними умовами:

- за напругою установки: $U_{\text{уст}} \leq U_{\text{ном}}$
- за конструкцією та схемою з'єднання обмоток;
- за класом точності;
- за вторинним навантаженням: $S_{2\Sigma} \leq S_{\text{ном}}$



Зображення трансформатора напруги
НКФ-220-58У1

8