

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ЕНЕРГОСИСТЕМ ВИМІРЮВАЛЬНІ ТРАНСФОРМАТОРИ СТРУМУ

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою освітньою програмою «Системи забезпечення споживачів
електричною енергією», «Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології»
спеціальності G3 «Електрична інженерія»

Укладачі: А.В. Волошко, В.П. Калінчик, В.А. Побігайло

Електронне мережеве навчальне видання

Київ
КПІ ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО
2026

УДК 621. 314 (075.8)

В68

Укладачі:

*Волошко Анатолій Васильович, д-р техн. наук, проф.
Калінчик Василь Прокопович, канд. техн. наук, проф.
Побігайло Віталій Анатолійович, канд. техн. наук, доц.*

Рецензент

Розен В.П., д.т.н., професор кафедри систем автоматизації електромеханічних та мехатронних комплексів навчально наукового інституту енергозбереження та енергоменеджменту

Відповідальний редактор

В.А. Попов, д.т.н., професор кафедри електропостачання навчально-наукового інституту енергозбереження та енергоменеджменту

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 5 від 05.03.2026 р.)*

*за поданням вченої ради навчально-наукового інституту енергозбереження та енергоменеджменту
(протокол № 7 від 28.02.2026 р.)*

Релейний захист та автоматизація енергосистем. Вимірювальні трансформатори струму [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Системи забезпечення споживачів електричною енергією», «Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології» спец. ГЗ «Електрична інженерія»/ КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: А.В. Волошко, В.П. Калінчик, В.А. Побігайло. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026. – 112 с.

Розглядаються призначення, принцип дії, похибки і їх компенсація, способи і обсяги перевірок та випробувань вимірювальних трансформаторів струму, а також порядок визначення їх індивідуальних метрологічних характеристик і порядок складання їх паспорту-протоколу. В додатку наведено порядок визначення індивідуальних метрологічних характеристик трансформаторів струму та припустимі їх похибки. Контрольні питання, які наводяться після кожного розділу, допоможуть акцентувати увагу студентів на головних моментах представленого матеріалу. Навчальний посібник призначений для студентів спеціальності ГЗ «Електрична інженерія». Буде корисним для проведення лекційних та практичних занять з дисциплін «Релейний захист та автоматизації енергосистем», «Електричні апарати», «Електрична частина станцій і підстанцій», а також «Використання мікропроцесорної техніки та прилади обліку електричної енергії».

УДК 621. 314 (075.8)

Реєстр. № НП 25/26-256.. Обсяг 5,1 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026

Зміст

Передмова.....	5
1. Призначення вимірювальних перетворювачів і трансформаторів струму.....	6
2. Класифікація трансформаторів струму.....	7
3. Основні (номінальні) параметри й характеристики трансформаторів струму.....	12
4. Схеми заміщення, векторна діаграма трансформаторів струму.....	17
5. Метрологічні характеристики трансформатора струму.....	21
5.1. Струмова похибка.....	22
5.2. Кутова похибка.....	24
5.3. Повна похибка.....	24
6. Залежність похибок від зовнішніх чинників і режимів роботи.....	25
6.1. Залежність похибок від первинного струму.....	25
6.2. Залежність похибок від опору навантаження.....	28
7. Компенсація похибок трансформатора струму	29
8. Режими роботи трансформаторів струму.....	32
8.1. Робота трансформатора струму при короткому замиканні в контрольованій мережі.....	32
8.2. Робота трансформатора струму за наявності в струмі короткого замикання аперіодичної складової.....	34
8.3. Робота трансформатора струму при розімкнутій вторинній обмотці.....	40
9. Метрологічні вимоги до трансформаторів струму для обліку електричної енергії.....	42
10. Конструкція трансформаторів струму.....	45
11. Перевірки трансформаторів струму	52
11.1. Обсяг і види перевірок трансформаторів струму.....	52

11.2.	Підбір документації і ознайомлення з нею.....	53
11.3.	Зовнішній огляд трансформаторів струму та їх кіл.....	53
11.4.	Перевірка вторинних кіл трансформаторів струму.....	56
	11.4.1. Перевірка обриву кола.....	56
	11.4.2. Перевірка правильності ввімкнення вторинних кіл.....	56
11.5.	Визначення однополюсних виводів первинної та вторинної обмоток	58
11.6.	Перевірка вольт-амперних характеристик.....	63
11.7.	Вимірювання омичних опорів вторинних обмоток.....	71
11.8.	Перевірка встановлених коефіцієнтів трансформації.....	71
11.9.	Перевірка встановлених відгалуджень обмоток.....	76
11.10.	Визначення навантаження на трансформатор струму	81
11.11.	Визначення номінального опору насичення.....	85
11.12.	Перевірка перехідних омичних опорів струмових кіл.....	85
11.13.	Перевірка повторного замикання на землю.....	86
12.	Оптичні трансформатори струму.....	88
Додатки		101
Додаток А. Припустимі похибки трансформаторів струму для різних відносних первинних струмів		101
Додаток Б. Порядок визначення індивідуальних метрологічних характеристик трансформаторів струму (ГІД 34.09.101-2003)...		102
Додаток В. Паспорт-протокол трансформатора струму.....		105
Література		110

Передмова

Вимірювальні трансформатори струму – одні з найпоширеніших електричних апаратів. Ними оснащені всі приєднання напругою 0,4 кВ і вище.

Вимірювальні трансформатори служать для зниження первинних струмів, які підводяться до вимірювальних приладів і приладів реле захисту й автоматики. В установках змінного струму застосування вимірювальних трансформаторів струму дозволяє використовувати для вимірювання й контролю електричних величин стандартні вимірювальні прилади й релейну апаратуру. Також вимірювальні трансформатори ізолюють ці прилади й апаратуру від високої напруги для безпечного їх обслуговування.

У цьому навчальному посібнику розглядаються призначення, принцип дії, похибки та їх компенсація, способи і обсяги перевірок та випробувань вимірювальних трансформаторів струму, порядок визначення індивідуальних метрологічних характеристик вимірювальних трансформаторів, а також порядок складання їх паспорту-протоколу.

У додатку наведено порядок визначення індивідуальних метрологічних характеристик трансформаторів струму та припустимі їх похибки.

Навчальний посібник призначений для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Буде корисним для проведення лекційних та практичних занять з дисциплін «Електричні та електронні апарати», «Електрична частина станцій і підстанцій», «Основи релейного захисту та автоматизації електроенергетичних систем», а також «Використання мікропроцесорної техніки та прилади обліку електричної енергії».

1. Призначення вимірювальних перетворювачів і трансформаторів струму

Під вимірювальним перетворювачем струму (ВПС) будемо розуміти пристрій, призначений для перетворення первинного струму в такий вихідний сигнал, інформативні параметри якого функціонально пов'язані з інформативними параметрами первинного струму. Для створення ВПС можна використовувати різні фізичні явища. На даний час ВПС зазвичай створюються на основі трансформаторного ефекту, який широко застосовується в електротехніці, – у вигляді трансформатора.

Трансформатором струму (ТС), що є найпоширенішим ВПС, називається такий трансформатор, у якому за нормальних умов роботи вихідним сигналом є струм практично пропорційний первинному струму й при правильному ввімкненні зрушений відносно нього по фазі на кут близький до нуля.

Первинна обмотка ТС вмикається в коло послідовно (у розтин струмопроводу), а вторинна замикається на деяке навантаження (вимірювальні прилади й реле), забезпечуючи в ньому струм пропорційний струму в первинній обмотці.

У ТС високої напруги первинна обмотка ізольована від вторинної (земля) на повну робочу напругу. Один кінець вторинної обмотки зазвичай заземлюється. Тому вона має потенціал близький до потенціалу землі.

ТС за призначенням поділяються на ТС для вимірювань і ТС для захисту. У деяких випадках ці функції об'єднуються в одному ТС.

ТС для вимірювань призначаються для передачі інформації вимірювальним приладам. Вони встановлюються в колах високої напруги або в колах зі змінним струмом, тобто в колах, де неможливе безпосереднє ввімкнення вимірювальних приладів. До вторинної обмотки ТС для вимірювань підключають амперметри, струмові обмотки ваттметрів, лічильників і аналогічних приладів. Таким чином, ТС для вимірювань забезпечує:

1) перетворення змінного струму будь-якого значення в змінний струм, прийнятний для безпосереднього вимірювання за допомогою стандартних вимірювальних приладів;

2) ізолювання вимірювальних приладів, до яких має доступ обслуговуючий персонал, від мережі високої напруги.

ТС для захисту призначаються для передачі вимірювальної інформації до пристроїв захисту й керування. Відповідно до цього ТС для захисту забезпечує:

1) перетворення змінного струму будь-якого значення в змінний струм, прийнятний для живлення пристроїв релейного захисту;

2) ізолювання реле, до яких має доступ обслуговуючий персонал, від кола високої напруги.

ТС в установках високої напруги необхідні навіть у тих випадках, коли зменшення струму для вимірювальних приладів або реле не потрібно.

2. Класифікація трансформаторів струму

Залежно від роду струму ВПС поділяються на вимірювальні перетворювачі змінного і постійного струму.

За призначенням ВПС поділяються на ВПС для вимірювань і ВПС для захисту. Останні можуть призначатися для роботи лише у сталих (статичних) режимах або в сталих і перехідних (динамічних) режимах.

Залежно від виду перетворення ВПС поділяються на перетворювачі струму в струм, струму в напругу (наприклад, трансреактори, магнітні ТС), струму в неелектричну величину (наприклад, у світловий потік). При цьому за способом представлення вихідної інформації ВПС поділяють на аналогові й дискретні.

З урахуванням застосовуваних номінальних напруг розрізняють ВПС низької (номінальна напруга до 1000 В) і високої напруги (1-1150 кВ і вище).

Всі ТС можна класифікувати за наступними основними ознаками:

За родом установки: ТС для роботи на відкритому повітрі (категорія розміщення 1 за ДСТУ 8216:2015); для роботи в закритих приміщеннях (за

ДСТУ 8216:2015); для вбудовування в порожнини електроустановки; для спеціальних установок (у шахтах, на суднах, електровозах і т.ін.).

Таблиця 1.1. Категорія розміщення ТС

Характеристика середовища усередині оболонки	Категорія розміщення ТС, встановлюваних усередині оболонок електроустановки, за ДСТУ 8216:2015, при різних категоріях самого електроустановки за тим самим ДСТУ			
	Категорія 1	Категорія 2	Категорія 3	Категорія 4
1. Газове середовище, ізолюване від зовнішнього повітря, або рідке середовище	4	4	4	4
2. Газове середовище, не ізолюване від зовнішнього повітря	2	2	3	4

За способом установлення (принцип конструкції): прохідні ТС (П), призначені для використання як ввід і встановлення в отворах стін, стелі або в металевих конструкціях; опорні (О), призначені для встановлювання на опорній площині; вбудовані (В), тобто призначені для встановлення в порожнини електроустановки, роз'ємні (Р). За 1. ДСТУ EN 61869-1:2017 [2-4] допускається поєднання декількох перерахованих принципів, а також конструктивне виконання, яке не відповідає перерахованим ознакам.

За числом коефіцієнтів трансформації: з одним коефіцієнтом трансформації; з кількома коефіцієнтами трансформації, які одержуються зміною числа витків первинної або вторинної обмотки чи обох обмоток, а також застосуванням декількох вторинних обмоток з різним числом витків, що відповідає різному номінальному вторинному струму.

За числом ступенів трансформації: одноступінчасті; каскадні (багатоступінчасті), тобто з декількома ступенями трансформації струму.

За виконанням первинної обмотки: одновиткові; багатовиткові. Одновиткові ТС (рис. 1) мають два різновиди: без власної первинної обмотки; з

власною первинною обмоткою. Одновиткові ТС, які не мають власної первинної обмотки, виконуються вбудованими, шинними або роз'ємними.

Вбудований ТС 1 являє собою магнітопровід з намотаною на нього вторинною обмоткою. Він не має власної первинної обмотки. Її роль виконує струмопровідний стрижень прохідного ізолятора. Цей ТС не має ізоляційних елементів між первинною та вторинною обмотками. Їх роль виконує ізоляція прохідного ізолятора.

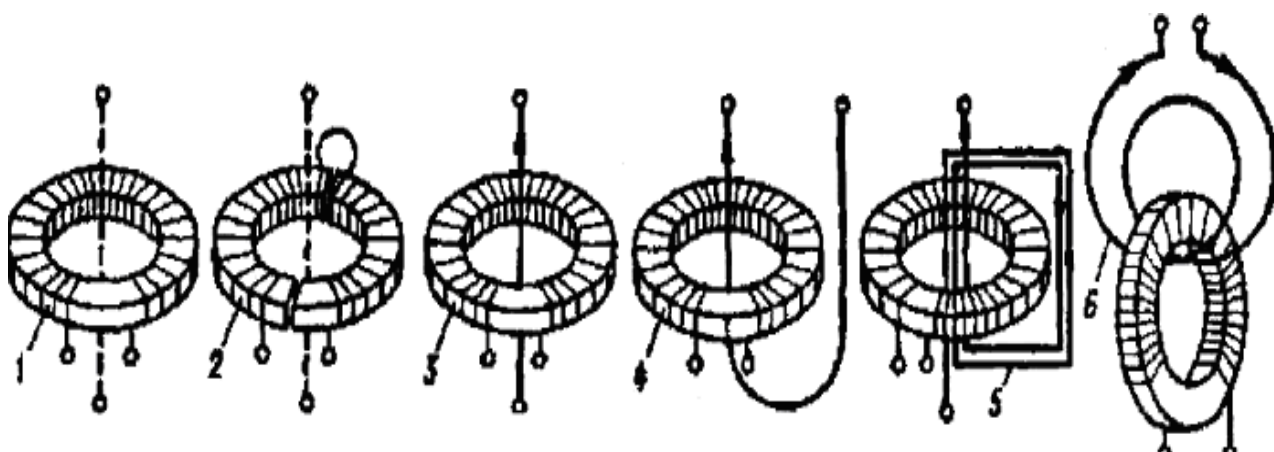


Рисунок 1 - Схема трансформатора струму

У шинному ТС 1 роль первинної обмотки виконують одна або кілька шин розподільного пристрою, які пропускаються під час монтажу крізь порожнину прохідного ізолятора. Останній ізолює таку первинну обмотку від вторинної.

Роз'ємний ТС 2 теж не має власної первинної обмотки. Його магнітопровід складається із двох частин, які стягуються болтами. Він може розмикатися і замикатися навколо провідника зі струмом, що є первинною обмоткою цього ТС. Ізоляція між первинною й вторинною обмотками накладена на магнітопровід із вторинною обмоткою.

Одновиткові ТС, які мають власну первинну обмотку, виконуються з стрижневою або з U-подібною первинною обмоткою.

ТС 3 має первинну обмотку у вигляді стрижня з круглим або прямокутним перетином, закріпленого в прохідному ізоляторі.

ТС 4 має U-подібну первинну обмотку, виконану таким чином, що на неї накладена майже вся внутрішня ізоляція ТС.

Багатовиткові ТС (рис. 1) виготовляються з котушковою первинною обмоткою, яка надягається на магнітопровід; з петлевою первинною обмоткою 5, що складається з декількох витків; з ланковою первинною обмоткою, виконаною таким чином, що внутрішня ізоляція ТС конструктивно розподілена між первинною й вторинною обмотками, а взаємне розташування обмоток нагадує ланки ланцюга; з ромбовидною первинною обмоткою, виконаною таким чином, що внутрішня ізоляція ТС нанесена в основному тільки на первинну обмотку, що має форму рима.

За родом ізоляції між первинною і вторинною обмотками ТС виготовляються із твердої (порцеляна (П), лита ізоляція (Л), пресована ізоляція і т.ін.); з в'язкої (заливальні компаунди); з комбінованої (паперово-масляна (М), конденсаторного типу) або газоподібної (Г) (повітря або газ) ізоляції.

За числом магнітопроводів з вторинними обмотками, що називаються кернами, об'єднаних спільною первинною обмоткою: з одним керном, з кількома кернами.

За принципом перетворення струму ТС поділяються на електромагнітні й оптико-електронні.

У стандартах на трансформатори окремих видів (ДСТУ EN 61869-1:2017) допускають введення в буквену частину позначення додаткових літер. Допускається вилучення або заміна окремих літер, крім Т, для позначення особливостей конкретного ТС.

Структура умовного позначення трансформатора струму за ДСТУ EN 61869-1:2017



Питання для самоперевірки

- 2.1. Які основні ознаки та класифікація ТС.
- 2.2. Яка структура умовного позначення ТС.
- 2.3. Які основні відмінності між одновитковими і багатовитковими ТС?
- 2.4. Які існують середовища всередині оболонки електроустаткування?

3. Основні (номінальні) параметри й характеристики трансформаторів струму

Основними (номінальними) параметрами ТС відповідно до ДСТУ EN 61869-1:2017 [2-4] є:

1. Номінальна напруга ТС $U_{\text{ном}}$ — номінальна напруга кіл, для яких призначений ТС. Для вітчизняних ТС прийнята наступна шкала номінальних напруг, кВ:

0,66; 6; 10; 16; 20; 24; 27; 35; 110; 150; 220; 330; 500; 750; 1150

2. Номінальний первинний струм $I_{\text{ном}}$ — струм, який проходить по первинній обмотці, при якому передбачена тривала робота ТС, що вказується в паспортній таблиці ТС. Для вітчизняних ТС прийнята наступна шкала номінальних первинних струмів А:

1; 5; 10; 15; 20; 30; 40; 50; 75; 80;

400; 150; 200; 300; 400; 500; 600; 750; 800; 1000;

1200; 1500; 2000; 3000; 4000; 5000; 6000; 8000; 10000; 12000;

14 000; 16 000; 18 000; 20 000; 25 000; 28 000; 32 000; 35 000; 40 000.

У ТС, призначених для комплектування турбо- і гідрогенераторів, значення номінального струму понад 10 000 А можуть відрізнятися від наведених у даній шкалі значень.

ТС, розраховані на номінальний первинний струм 15; 30; 75; 150; 300; 600; 750; 1200; 1500; 3000 і 6000 А, повинні допускати протягом необмежено тривалого часу найбільший робочий первинний струм, який дорівнює відповідно 16; 32; 80; 160; 320; 630; 800; 1250; 1600; 3200 і 6300 А. В інших випадках найбільший первинний струм дорівнює номінальному первинному.

3. Номінальний вторинний струм $I_{2\text{ном}}$ — струм, який протікає по вторинній обмотці вказується в паспортній таблиці ТС. Номінальний вторинний струм приймається 1 або 5 А, причому струм 1 А допускається лише для ТС із номінальним первинним струмом до 4000 А. За погодженням з замовником допускається виготовлення ТС із номінальним вторинним струмом 2 або 2,5 А.

4. Вторинне навантаження ТС $Z_{2\text{ном}}$ відповідає повному опору його зовнішнього вторинного кола, вираженому в Омах при вказуваному коефіцієнту потужності. Вторинне навантаження може також характеризуватися повною потужністю $S_{2\text{ном}}$ у вольт-амперах; споживанню при даному коефіцієнту потужності й номінальному вторинному струмі.

Вторинне навантаження з коефіцієнтом потужності $\cos(\varphi_2) = 0,8$, при якому гарантується встановлений клас точності ТС або гранична кратність первинного струму щодо його номінального значення, називається номінальним вторинним навантаженням ТС $Z_{2\text{ном}}$.

Для вітчизняних ТС встановлені наступні значення номінального вторинного навантаження $Z_{2\text{ном}}$, вираженого у вольт-амперах, при коефіцієнту потужності $\cos(\varphi_2) = 0,8$ [2-4]:

1; 2; 2,5; 3; 5; 7,5; 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 75; 90; 100; 120.

Відповідні значення номінального вторинного навантаження (в Омах) визначаються виразом:

$$Z_{2\text{ном}} = S_{2\text{ном}} / I_{2\text{ном}}^2 \quad (3.1)$$

5. Коефіцієнт трансформації ТС дорівнює відношенню первинного струму до вторинного.

У розрахунках ТС застосовуються дві величини: дійсний і номінальний коефіцієнти трансформації $n_{\text{ном}}$. Під дійсним коефіцієнтом трансформації ($n_{\text{д}}$) розуміється відношення дійсного первинного струму до дійсного вторинного. Під номінальним коефіцієнтом трансформації $n_{\text{ном}}$ розуміється відношення номінального первинного струму до номінального вторинного.

6. Стійкість ТС до механічних і теплових впливів характеризується струмом електродинамічної стійкості й струмом термічної стійкості.

Струм електродинамічної стійкості $I_{\text{д}}$ дорівнює найбільшій амплітуді струму короткого замикання за увесь час його протікання, що ТС витримує без ушкоджень, які перешкоджають його подальшій справній роботі. Струм $I_{\text{д}}$ характеризує здатність ТС протистояти механічним (електродинамічним)

впливам струму короткого замикання. Електродинамічна стійкість може характеризуватися також кратністю K_d , яка являє собою відношення струму електродинамічної стійкості до амплітуди номінального первинного струму. Вимоги електродинамічної стійкості не поширюються на шинні, вбудовані й роз'ємні ТС.

Струм термічної стійкості I_T дорівнює найбільшому діючому значенню струму короткого замикання за проміжок t_T , що ТС витримує протягом усього проміжку часу без нагрівання струмопровідних частин до температур, які перевищують допустимі при струмах короткого замикання, і без ушкоджень, які перешкоджають його подальшій роботі.

Термічна стійкість характеризує здатність ТС протистояти тепловим впливам струму короткого замикання. Для висновків щодо термічної стійкості ТС необхідно знати не лише значення струму, який проходить через трансформатор, але і його тривалість або, інакше кажучи, загальну кількість виділеної теплоти, яка пропорційна добутку квадрату струму I_T і тривалості його t_T . Цей час, у свою чергу, залежить від параметрів мережі, в якій установлений ТС, і змінюється від однієї до декількох секунд.

Термічна стійкість може характеризуватися кратністю струму термічної стійкості K_T , яка являє собою відношення струму термічної стійкості до діючого значення номінального первинного струму.

Відповідно до 1. ДСТУ EN 61869-2:2017 для вітчизняних ТС встановлені наступні струми термічної стійкості:

а) односекундний I_{1T} або двосекундний I_{2T} (або кратність їх K_{1T} і K_{2T} по відношенню до номінального первинного струму) для ТС на номінальні напруги 330 кВ і вище;

б) односекундний I_{1T} або трисекундний; I_{3T} (чи кратність їх K_{1T} і K_{3T} по відношенню до номінального первинного струму) для ТС на номінальні напруги до 220 кВ включно.

Між струмами електродинамічної й термічної стійкості повинні бути наступні співвідношення:

для ТС на номінальній напрузі 330 кВ і вище

$$I_{\text{д}} \geq 1,8 \sqrt{2} I_{1\text{Т}} \quad \text{або} \quad I_{\text{д}} \geq 1,8 \sqrt{2} I_{2\text{Т}} \quad (3.2)$$

для ТС на номінальній напрузі до 220 кВ

$$I_{\text{д}} \geq 1,8 \sqrt{2} I_{1\text{Т}} \quad \text{або} \quad I_{\text{д}} \geq 1,8 \sqrt{2} I_{3\text{Т}} \quad (3.3)$$

Температура струмопровідних частин ТС при струмі термічної стійкості не повинна перевищувати: 200 °С для струмопровідних частин з алюмінію; 250°С для струмопровідних частин з міді та її сплавів, які стикаються з органічною ізоляцією або мастилом, і 300 °С для струмопровідних частин з міді та її сплавів, які не стикаються з органічною ізоляцією або мастилом. При визначенні вказаних значень температури варто виходити з початкових її значень, які відповідають тривалій роботі ТС при номінальному струмі.

Значення струмів електродинамічної й термічної стійкості ТС державним стандартом не нормуються, однак вони повинні відповідати електродинамічній і термічній стійкості інших апаратів високої напруги, встановлюваних в одному колі із ТС.

7. Механічне навантаження визначається тиском вітру зі швидкістю 40 м/с на поверхню ТС й натягом проводів, які підводяться (у горизонтальному напрямку в площині виводів первинної обмотки), і повинно бути не менш:

500 Н - для ТС до 35 кВ включно;

1000 Н - для ТС на 110-220 кВ;

1500 Н - для ТС на 330 кВ і вище.

Такі основні технічні параметри й характеристики ТС. При проектуванні ТС крім цих параметрів повинні враховуватися наступні вимоги до конструкції:

- контактні затискачі виводів первинної обмотки ТС повинні виконуватися з урахуванням вимог ДСТУ ІЕС 61238-1-3:2019 [6], а ТС зовнішньої установки - з урахуванням, крім того, вимог ДСТУ ІЕС 61238-1-3:2019 [6]. Контактні затискачі виводів вторинних обмоток повинні виконуватися з урахуванням вимог ДСТУ ІЕС 61238-1-3:2019. Контактні затискачі вторинних обмоток вбудованих ТС можуть бути розташовані на

конструктивних елементах апарата, у який вбудований ТС. У ТС зовнішньої установки контактні затискачі виводів вторинної обмотки повинні знаходитись у спеціальних коробках, які надійно захищають їх від атмосферних опадів. Позначення вивідних кінців первинних і вторинних обмоток ТС виконується відповідно до ДСТУ EN 61869-1:2017;

- маслонаповнений ТС повинен мати маслорозширювач (компенсатор) і показчик рівня масла. Місткість маслорозширювача повинна забезпечувати постійну наявність у ньому масла за всіх режимів роботи ТС від відімкненого стану до нормованого струмового навантаження і при коливаннях температури навколишнього повітря, встановлених для даного кліматичного району.

У ТС на номінальні напруги 330 кВ і більше обов'язково повинен бути передбачений захист масла від зволоження, наприклад, за допомогою сільфонів. Доцільно такий само захист передбачати й у ТС на менші напруги;

- розміри показчика рівня масла повинні бути такими, щоб обслуговуючий персонал міг з безпечної відстані спостерігати за рівнем масла в ТС;

- ТС, які мають масу понад 50 кг, повинні мати пристосування для підйому. Якщо такі пристосування неможливо виконати, то завод-виготовлювач повинен вказувати в інструкції місця захвату ТС при підйомі;

- ТС, у яких амплітуда напруги на розімкнутій вторинній обмотці при номінальному струмі в первинній обмотці перевищує 350 В, повинні мати напис: «Увага! Небезпечно! На розімкнутій обмотці висока напруга»;

- ТС, крім вбудованих, повинні мати контактну площадку для приєднання заземлюючого провідника й заземлюючий затискач відповідно до вимог ДСТУ 2817-94 і ДСТУ EN 61010-1:2014 [7,8]. Біля заземлюючого затискача повинен бути встановлений знак заземлення за ДСТУ 2817-94. Зазначені вимоги не поширюються на ТС з корпусом з литої смоли або пластмаси, що не мають підлягаючих заземленню металевих частин, а також на ТС, не підлягаючих заземленню відповідно до ДСТУ 2817-94.

Питання для самоперевірки

- 3.1. Яка шкала номінальних напруг $U_{\text{ном}}$ для ТС.
- 3.2. Яка шкала номінальних первинних струмів $I_{1\text{ном}}$ для ТС.
- 3.3. Яке вторинне навантаження ТС $Z_{2\text{ном}}$.
- 3.4. Як визначаються коефіцієнти трансформації струму - номінального $n_{\text{ном}}$ і дійсного n_d .
- 3.5. Які відмінності між термінами струм електродинамічної стійкості й струм термічної стійкості.

4. Схеми заміщення, векторна діаграма трансформаторів струму

На основі схеми заміщення і векторної діаграми встановлюються співвідношення основних величин, які характеризують роботу ТС. На рис. 2 наведені схеми заміщення ТС з магнітним зв'язком обмоток (рис. 2, а) і електричним зв'язком обмоток (рис. 2, б) та з електричним зв'язком обмоток і виключенням r_1' та x_1' (рис. 2, в).

В якості коефіцієнту приведення параметрів схеми до вторинної обмотки застосоване відношення числа витків ω_2/ω_1 . При такому коефіцієнті приведення значення X_2 може бути від'ємним. Параметр X_2 у Т-подібній схемі заміщення є чисто розрахунковим, і від'ємний знак не має фізичного змісту. Оскільки r_1' й x_1' ввімкнені послідовно з більшим опором Z_1 , на роботу ТС вони не впливають [13, 14].

Позитивні напрямки струмів на схемі заміщення відповідають позитивним напрямкам, прийнятим на схемах умовних позначень, де зірочками (*) відмічені однополярні виводи первинної та вторинної обмоток (їх початки або кінці при намотуванні витків в одну сторону).

При розгляді роботи трансформатора варто мати на увазі той факт, що наявність у ТС сталевго сердечника обумовлює нелінійність опору вітки намагнічування $Z_{\text{нам}}^1$. Внаслідок цього приведенний струм

$$I_1' = I_{1\text{ном}}/n_{\text{ном}}, \quad (4.1)$$

де $n_{\text{ном}} = I_{1\text{ном}}/I_{2\text{ном}}$ - номінальний коефіцієнт трансформації; $I_{\text{нам}}$ - струм намагнічування; $I_{\text{нам}}$ і I_2 (вторинний струм), як правило, несинусоїдальні. Сума цих струмів дорівнює струму I_1 , який зазвичай приймається синусоїдальним.

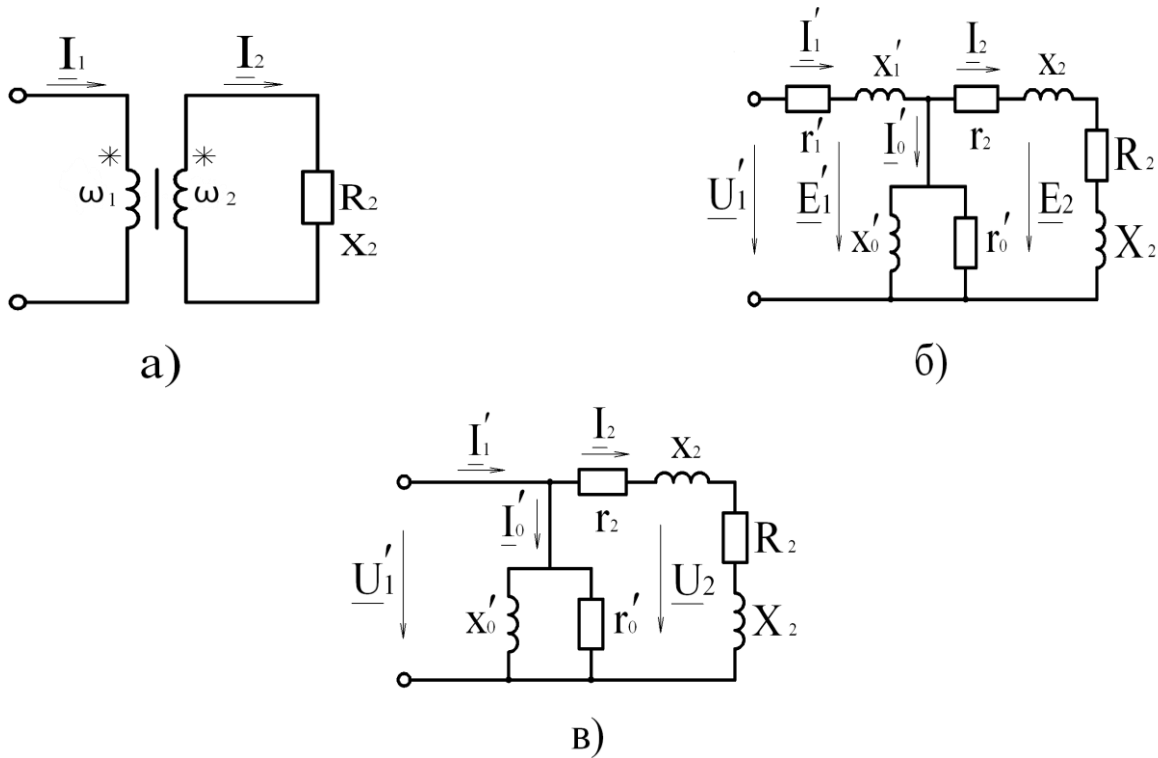


Рисунок 2 - Схеми заміщення трансформатора струму.

- а) з магнітним зв'язком обмоток;
- б) з електричним зв'язком обмоток;
- в) з електричним зв'язком обмоток і виключенням r_1' і x_1' .

r_1' , x_1' – параметри первинної обмотки, приведені до вторинної обмотки;

r_2 – активний опір вторинної обмотки;

x_2 - індуктивний опір вторинної обмотки;

R_2 , X_2 – параметри навантаження;

r_0' , x_0' – параметри вітки намагнічування.

Несинусоїдальні струми й напруги не можуть зображатися векторами, оскільки їхні гармонічні складові мають різні частоти. Тому при розгляданні роботи ТС за допомогою векторних діаграм несинусоїдальні струми й напруги

умовно замінюються еквівалентними синусоїдальними, які мають такі самі діючі значення.

Умовні позитивні напрямки струмів і напруг (а) і векторна діаграма ТС (б) наведені на рис. 3,а та рис. 3,б відповідно.

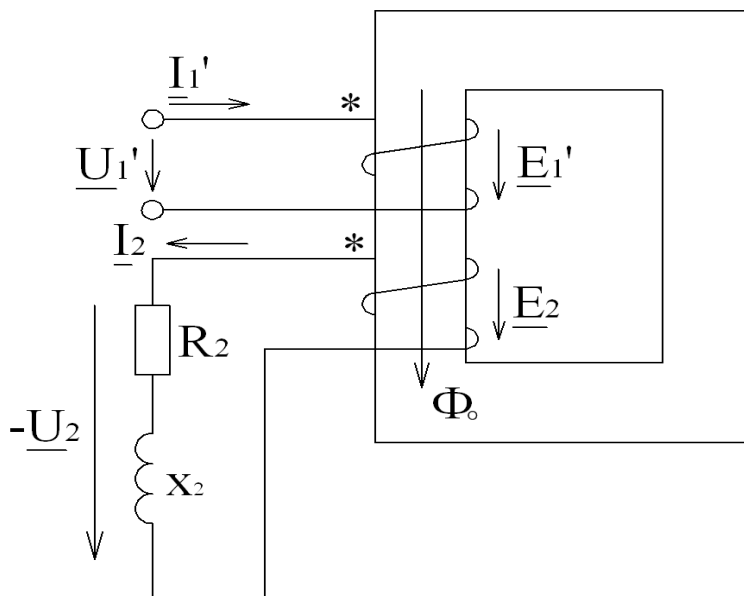


Рисунок 3,а - Умовні позитивні напрямки струмів і напруг ТС.

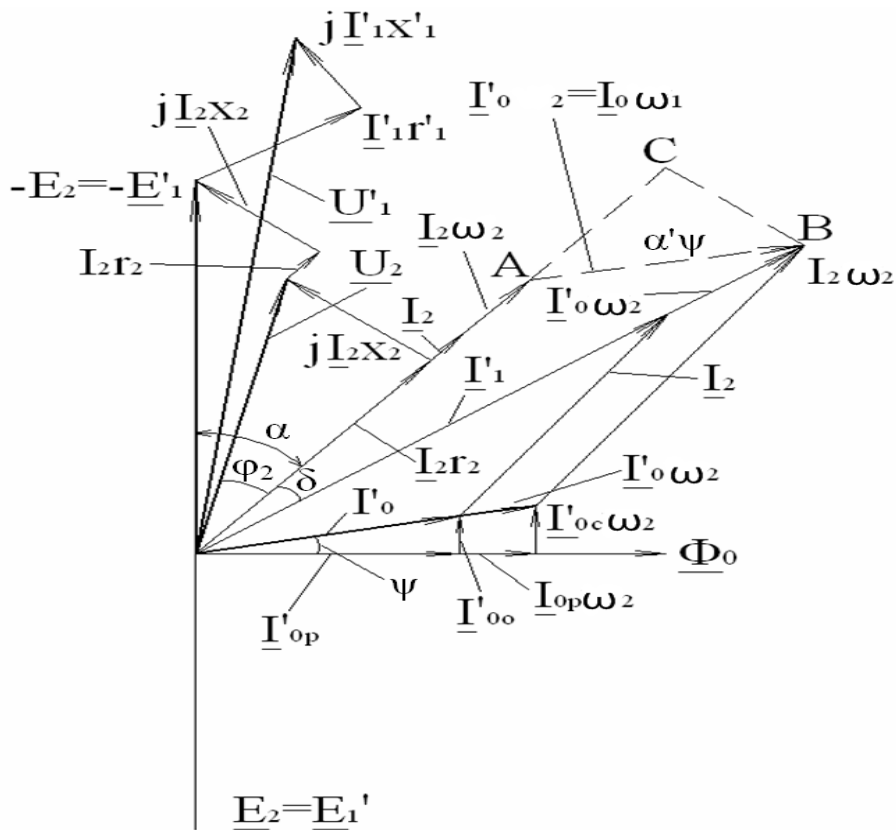


Рисунок 3,б - Векторна діаграма ТС.

де \underline{E}_1^I - електрорушійна сила (ЕРС) первинної обмотки;

I_1^I - струм первинної обмотки;

\underline{E}_2 - ЕРС вторинної обмотки;

ω_2 – кількість витків вторинної обмотки;

ω_1 – кількість витків первинної обмотки;

З рис.3,а випливає, що позитивний напрямок ЕРС первинної обмотки \underline{E}_1^I співпадає з позитивним напрямком струму I_1^I . Оскільки магнітний потік $\underline{\Phi}_0$ пронизує й первинну й вторинну обмотки, то ЕРС вторинної обмотки \underline{E}_2 збігається з напрямком ЕРС \underline{E}_1^I . При прийнятому позитивному напрямку струму I_2 , у відповідності з другим законом Кірхгофа, для вторинної обмотки маємо:

$$I_2 \cdot R_2 + j I_2 \cdot X_2 + I_2 \cdot r_2 + j I_2 \cdot X_2 = - E_2. \quad (4.2)$$

Знак мінус перед \underline{E}_2 обумовлений тим, що ЕРС \underline{E}_2 спрямована зустрічно струму I_2 . При побудові векторної діаграми вторинного кола ТС необхідно враховувати, що ЕРС \underline{E}_2 відстає від магнітного потоку $\underline{\Phi}_0$ на кут 90° :

$$\underline{E}_2 = - \omega_2 \frac{d\Phi_0}{dt}. \quad (4.3)$$

Проводимо вектор $-\underline{E}_2$ і будуємо трикутники падіння напруги на навантаженні R_2 , X_2 і на вторинній обмотці r_2 . Напруга на навантаженні \underline{U}_2 визначається виразом:

$$\underline{U}_2 = I_2 (R_2 + j X_2). \quad (4.4)$$

Первинний струм I_1^I знаходимо, скориставшись законом повного струму:

$$\underline{I}_0 \cdot \omega_1 = I_1 \omega_1 - I_2 \cdot \omega_2$$

або

$$I_1 \omega_1 = \underline{I}_0 \omega_1 + I_2 \cdot \omega_2. \quad (4.5)$$

Приведений первинний струм:

$$\underline{I}_1^I = \underline{I}_1 \cdot \frac{\omega_1}{\omega_2}. \quad (4.6)$$

Намагнічуючий струм:

$$\underline{I}'_o = \underline{I}_o \cdot \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad (4.7)$$

Виходячи з (4.5) - (4.7)

$$\underline{I}'_1 = \underline{I}'_o + \underline{I}_2 \quad (4.8)$$

Намагнічуючий струм \underline{I}'_o має активну складову \underline{I}'_{oa} , яка необхідна для подолання активних втрат у сталі магнітопроводу.

Реактивна складова \underline{I}'_{op} необхідна для проведення магнітного потоку $\underline{\Phi}_o$ через активний опір сталі магнітопроводу R_m .

Для первинного кола ТС є справедливою рівність:

$$-\underline{E}_2 + \underline{I}'_1 \cdot r'_1 + j\underline{I}'_1 x'_1 = \underline{U}'_1 \quad (4.9)$$

або

$$\underline{U}'_1 = -\underline{E}'_1 + \underline{I}'_1 \cdot r'_1 + j\underline{I}'_1 x'_1 \quad (4.10)$$

що відповідає

$$\underline{E}'_1 = \underline{E}_2 \quad (4.11)$$

Додавши до вектора $-\underline{E}'_1$ падіння напруги від струму \underline{I}'_1 на опорі $r'_1 + jx'_1$, одержимо напругу на первинній обмотці \underline{U}'_1 .

Питання для самоперевірки

- 4.1. Приведіть схему заміщення з магнітним і електричним зв'язком обмоток.
- 4.2. Який коефіцієнт приведення параметрів схеми заміщення до вторинної обмотки.
- 4.3. Що обумовлює нелінійність опору кола намагнічування $Z_{\text{нам}}^1$?
- 4.4. Побудуйте векторну діаграму вторинного кола ТС.

5. Метрологічні характеристики трансформатора струму

У ДСТУ EN 61869-1:2017 регламентовані три види похибок ТС – струмова, кутова й повна. Всі вони є кількісними характеристиками відмінностей вторинного струму ТС (звичайно, помноженого на номінальний

коефіцієнт трансформації $n_{ном}$), від первинного. Стандарт регламентує похибки тільки в сталому режимі і лише при синусоїдальному первинному струмі.

Визначення понять цих похибок наведені в [2-4] (засновані на номінальному коефіцієнті трансформації).

5.1. Струмова похибка

Під похибками ТС мають на увазі відмінності вектора вторинного струму I_2 від вектора приведенного первинного струму I_1' по модулю і куту. Ці відмінності обумовлені головним чином наявністю струму намагнічування $I_{нам}$, який створює магнітний потік у сердечнику трансформатора.

Якби намагнічувальний струм I_0 дорівнював нулю, то дотримувалася б рівність первинних і вторинних магніторушійних сил (МРС) $F_2=F_1$, або для модулів:

$$I_1/I_2 = w_1/w_2 = I_{1ном}/I_{2ном} = n_{ном}. \quad (5.1.1)$$

При цьому струмова похибка дорівнювала б нулю. У дійсності $I_0 \neq 0$. Отже, струмова похибка визначиться як

$$\Delta I\% = -\frac{F_1 - F_2}{F_1} 100. \quad (5.1.2)$$

За різницю $F_1 - F_2$ (не зважаючи на δ -кут діелектричних втрат) можна взяти проекцію вектора на вісь струму I_2 .

Тоді похибка по струму (струмова похибка) виражається в такий спосіб:

$$\Delta I\% = -\frac{I_0 \cdot \omega_1}{F_1} \sin(\alpha + \psi) \cdot 100. \quad (5.1.3)$$

З (5.1.3) випливає, що чим менший намагнічуючий струм, тим менша струмова похибка. Намагнічувальний струм пов'язаний з напруженістю поля H законом повного струму:

$$H \cdot l = I_0 \cdot \omega_1, \quad (5.1.4)$$

де l - середня довжина магнітопроводу.

Чим менша напруженість поля H , тим менше $I_0 \cdot \omega_1$.

Магнітний потік Φ_0 визначає вторинну ЕРС:

$$E_2 = 4,44f\omega_2\Phi_0. \quad (5.1.5)$$

Виходячи з цього, чим більша E_2 , тим більший магнітний потік Φ_0 . Із зростанням Φ_0 збільшується напруженість H , намагнічуюча сила $I_0 \cdot \omega_1$ і струмова похибка $\Delta I, \%$.

Для зменшення похибки опір вторинного кола намагаються робити якомога меншим, оскільки при цьому зменшується E_2 :

$$E_2 = I_2 \sqrt{(R_2 + r_2)^2 + (X_2 + x_2)^2}, \quad (5.1.6)$$

де R_2, X_2 – відповідно активний і реактивний опір навантаження;

r_2, x_2 - відповідно активний і реактивний опір вторинної обмотки ТС.

У звичайних силових трансформаторах, які є джерелом напруги, опір навантаження значно вищий опору обмоток, а вихідна потужність

$$P_2 = \frac{U_2^2}{Z_{2H}}, \quad (5.1.7)$$

обернено пропорційна опору навантаження. Струм навантаження також обернено пропорційний опору навантаження:

$$I_2 = \frac{U_2}{Z_{2H}}. \quad (5.1.8)$$

У ТС опір вторинної обмотки іноді навіть більше опору навантаження. При $I_0 \cdot \omega_1 = 0$ існує рівність МРС ($F_1 = F_2$). При цьому вторинний струм

$$I_2 = I_1 \cdot \frac{\omega_1}{\omega_2}, \quad (5.1.9)$$

визначається первинним струмом I_1 і від опору навантаження не залежить.

Тобто ТС є джерелом струму. Вихідна потужність

$$P_2 = I_2^2 \cdot Z_{2H}, \quad (5.1.10)$$

пропорційна опору навантаження. При зміні навантаження Z_{2H} вторинний струм I_2 не змінюється (оскільки він визначається первинним струмом I_1).

У загальному вигляді, струмова похибка характеризує відносне розходження діючих значень струмів, виражається у відсотках і визначається за формулою

$$\Delta I, \% = \frac{I_2 \cdot n_{ном} - I_1}{I_1} = \frac{I_2 - I_1 / n_{ном}}{I_1 / n_{ном}} \cdot 100, \quad (5.1.11)$$

де $n_{\text{ном}}$ – номінальний коефіцієнт трансформації;

I_1 і I_2 – діючі значення відповідно первинного й вторинного струмів.

5.2. Кутова похибка

Кутова похибка визначається як кут δ між вектором первинного струму і вектором першої гармоніки вторинного струму (рис. 3,б). Вона виражається в градусах (хвилинах) або радіанах (сантирадіанах) і вважається позитивною, коли вектор вторинного струму випереджає вектор первинного струму [13].

Користуючись методом еквівалентних синусоїд і векторною діаграмою, кутова похибка δ може бути визначена через значення кута втрат у сталі γ , кута ϕ_2 між векторами вторинної ЕРС E_2 і вторинним струмом I_2 , а також через відношення модулів векторів, приведених до числа вторинної обмотки I_{02}/I_{12} :

$$\sin\delta = \frac{I_{02}}{I_{12}} \cos(\phi_2 + \gamma). \quad (5.2.1)$$

5.3. Повна похибка

Повна похибка E , виразу у відсотках, визначається формулою

$$E = \frac{100}{I_1} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (i_2 n_{\text{ном}} - i_1)^2 dt}, \quad (5.3.1)$$

де I_1 – діюче значення первинного струму;

i_2 та i_1 – миттєві значення вторинного і первинного струму відповідно;

T - тривалість періоду струму;

t - поточний час.

Величина

$$(i_2 n_{\text{ном}} - i_1) = i_{E1} \quad (5.3.2)$$

називається первинним миттєвим струмом повної похибки.

Аналогічно визначається вторинний миттєвий струм повної похибки

$$\left(\frac{i_2 - i_1}{n_{\text{ном}}} \right) = i_{E2}. \quad (5.3.3)$$

Повна похибка може бути виражена через i_{E2} :

$$E = \frac{100}{\frac{I_1}{n_{\text{НОМ}}}} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(i_2 - \frac{i_1}{n_{\text{НОМ}}} \right)^2 dt} = \frac{I_{E2} n_{\text{НОМ}}}{I_1} 100, \quad (5.3.4)$$

де I_{E2} – діюче значення струму i_{E2} .

Питання для самоперевірки

- 5.1. Назвіть основні метрологічні характеристики ТС.
- 5.2. Які причини виникнення струмової (амплітудної) похибки ТС.
- 5.3. Яка формула для визначення струмової похибки ТС.
- 5.4. Які причини виникнення кутової похибки ТС.
- 5.5. Яке визначення повної похибки ТС.

6. Залежність похибок

від зовнішніх чинників і режимів роботи

6.1. Залежність похибки від первинного струму

У процесі роботи первинний струм ТС змінюється в широких межах – приблизно від 5% $I_{\text{НОМ}}$ до струму короткого замикання (КЗ). Заради спрощення можна припустити, що $\sin(\alpha + \psi) = 1$.

Тоді

$$\Delta I = \frac{I_o \omega_1}{F_1}. \quad (6.1.1)$$

Оскільки $I_1 \omega_1 \approx I_2 \omega_2$, то

$$\Delta I = \frac{I_o \omega_1}{F_2}. \quad (6.1.2)$$

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_{02}} = \frac{4,44 f \omega_2 B_m S}{Z_{02}}, \quad (6.1.3)$$

де

$$Z_{02} = R_2 + r_2 + j(X_2 + x_2).$$

Остаточно отримаємо

$$\Delta I = \frac{H I Z_{02}}{4,44 f \omega_2^2 B_m S}, \quad (6.1.4)$$

оскільки $B_m / H = \mu_a$, то

$$\Delta I = \frac{Z_{02}}{4,44 f \omega_2^2 \mu_a S} \quad (6.1.5)$$

При зміні первинного струму змінюється тільки магнітна проникність μ_a .

Якщо $F_1 \approx F_2$, то

$$F_1 = F_2 = \frac{4,44 f \omega_2 S}{Z_{02}} B_m, \quad (6.1.6)$$

тобто зі зростанням первинного струму індукція в магнітопроводі зростає лінійно.

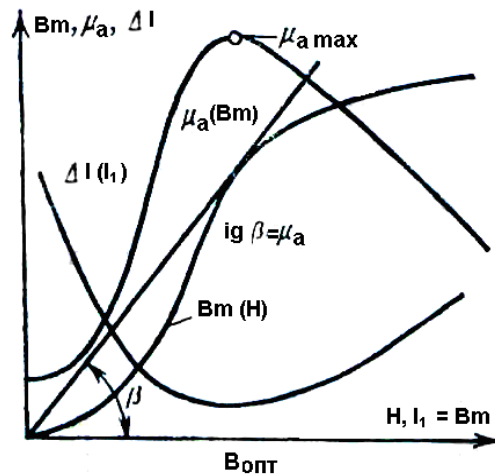


Рисунок 4 - Залежність похибки трансформатора струму від первинного струму

Абсолютна магнітна проникність матеріалу μ_a та індукція B_m пов'язані кривою $\mu_a(B_m)$ (рис.4). На тому самому рисунку наведена крива $B_m(H)$. З ростом первинного струму спочатку μ_a збільшується і похибка падає, досягаючи при $V_{опт}$ мінімального значення. При подальшому зростанні первинного струму проникність падає через насичення магнітопроводу, а похибка ΔI збільшується.

ТС не повинен мати великих похибок при номінальному струмі і струмі КЗ. Оскільки індукція насичення лежить в області 2 Тл, то в незкомпенсованих ТС номінальне значення індукції вибирають у межах 0,06 - 0,1 Тл. У силових трансформаторах індукція вибирається 1,45-1,7 Тл, і під час роботи вона змінюється мало.

За відсутності компенсації похибка по струму завжди від'ємна і з ростом первинного струму змінюється за U-подібною кривою. Аналогічно залежить від струму кутова похибка, але вона має позитивний знак.

Для одержання певного класу точності похибка ТС повинна перебувати в допустимих межах. Так, похибки для ТС класу точності 0,5 повинні лежати всередині області, обмеженої ламаними лініями 3 (рис.4) при навантаженні $(0,25 \div 1)I_{2\text{ном}}$ і $\cos \varphi_2 = 0,8$.

Для магнітних матеріалів, застосованих у ТС, у робочому діапазоні індукцій (0,06-0,1 Тл) криву намагнічування можна апроксимувати рівнянням

$$H=0,82 B_m^{0,6} . \quad (6.1.7)$$

Введемо відношення (кратність) первинного I_1 і вторинного I_2 струмів до їхнього номінального значення:

$$I_1/I_{1\text{ном}} \approx I_2/I_{2\text{ном}} = n_{\text{ном}}$$

Тоді похибку ΔI можна виразити через індукцію B_m :

$$\Delta I = \frac{Hl}{nI_{1\text{ном}} \omega_1 \frac{l}{nI_{1\text{ном}} \omega_1 m}^{0,6}} . \quad (6.1.8)$$

Величину B_m виразимо через струм $I_{2\text{ном}}$:

$$B_m = \frac{nI_{2\text{ном}} Z_{02}}{4,44 f \omega_2 S \frac{nI_{2\text{ном}}^2 Z_{02}}{4,44 f I_{2\text{ном}} \omega_2 S \frac{nI_{2\text{ном}}^2 Z_{02}}{4,44 f I_{1\text{ном}} \omega_1 S}}} . \quad (6.1.9)$$

Підставивши (6.1.9) в (6.1.8), одержимо

$$\Delta I = \frac{0,821}{nI_{1\text{ном}} \omega_1} \left(\frac{nI_{2\text{ном}}^2 Z_{02}}{4,44 f I_{1\text{ном}} \omega_1 S} \right)^{0,6} = \frac{0,821 I_{2\text{ном}}^{1,2} Z_{02}^{0,6}}{(4,44 f)^{0,6} n^{0,4} (I_{1\text{ном}} \omega_1)^{1,6} S^{0,6}} , \quad (6.1.10)$$

де l – середня довжина магнітного потоку в магнітопроводі;

Z_{02} – опір вітки вторинного струму (повний опір вторинного кола й вторинної обмотки);

f – частота змінного струму;

S - дійсний перетин магнітопроводу;

Відповідно, кутова похибка визначиться як:

$$\delta = \frac{1193321 I_m \cdot Z_{0,2}^{0,6} \cdot I_{2H}^{1,2}}{\left(\frac{I_1}{I_{1H}}\right)^{0,4} \cdot f^{0,6} \cdot f_{1H}^{1,6} \cdot S^{0,6}} \cdot \cos(\psi - \alpha), \quad (6.1.11)$$

де ψ - кут втрат;

α – кут зміщення фаз між вторинною ЕРС. - E_2 і вторинним струмом I_2 .

6.2. Залежність похибок від опору навантаження

Робочим режимом ТС є режим короткого замикання, коли намагнічуюча сила (н.с.) $I_0 \omega_1$ мала в порівнянні з $I_1 \omega_1$ і нею можна знехтувати при порівнянні $I_1 \omega_1$ і $I_2 \omega_2$, тоді $I_1 \omega_1 = I_2 \omega_2$.

При незмінному первинному струмі I_1 величина вторинного струму I_2 також незмінна й дорівнює $I_2 = I_1 \cdot \frac{\omega_1}{\omega_2}$.

При зміні опору Z_{2H} величина струму I_2 практично залишається сталою. Збільшується тільки ЕРС E_2 . Це призводить до зростання потоку і н.с. $I_0 \omega_1$, що спричиняє збільшення похибки.

У дійсності, оскільки н.с. $I_1 \omega_1$ є сталою, то збільшення $I_0 \omega_1$ призводить до зменшення н.с. $I_2 \omega_2$, тобто до зменшення струму I_2 . З метою зниження похибки бажано, щоб активний і реактивний опори вторинної обмотки були якомога меншими.

На похибку впливає не лише абсолютна величина навантаження Z_{2H} , але й її характер. Так, при індуктивному навантаженні зі зростанням кута α похибка по струму буде збільшуватись, похибка по куту - зменшуватись.

Похибка трансформатора залежить також від розмірів сердечника l , S і величини μ . Скорочення довжини сердечника l призводить до зменшення н.с. $I_0 \omega_1$. Збільшення перерізу S призводить до зменшення індукції B , а отже, і н.с. $I_0 \omega_1$. Однак похибка спадає повільніше, ніж зростає перетин, а отже, і вага сталі. Тому такий шлях зменшення похибки не завжди є раціональним.

За інших рівних умов перехід до матеріалу з більшою проникністю зменшує похибку. Хороші результати дає застосування сталі Э-310.

Питання для самоперевірки

- 6.1. Покажіть залежність похибки ТС від величини первинного струму.
- 6.2. Наведіть формулу визначення струмової похибки ТС від магнітної індукції.
- 6.3. Наведіть формулу визначення кутової похибки ТС від магнітної індукції.
- 6.4. Як зменшується похибки ТС від опору навантаження.

7. Компенсація похибок трансформатора струму

Для зменшення похибок застосовується їх компенсація. Розрізняють компенсацію струмової й кутової похибки. Частіше всього необхідна компенсація струмової похибки. Ця компенсація виконується для діапазону $(0,1 \div 0,2) I_{1ном}$ і в ТС, що використовуються для вимірювань. У ТС, які використовуються для релейного захисту, компенсація похибки застосовується рідше.

Найпростішим методом компенсації струмової похибки є виткова корекція. Якщо $\omega_2 = \omega_{2ном} = \omega_{1ном} n_{ном}$, то похибка завжди має від'ємний знак. Якщо число витків вторинної обмотки зменшити (відмотати), то при $\omega_2 < \omega_{2ном}$ коефіцієнт трансформації стає меншим, а вторинний струм $I_1 \cdot \frac{\omega_1}{\omega_2}$ може перевищувати $I_{2ном} = I_{1ном} \cdot \frac{\omega_1}{\omega_{2ном}}$. Таким чином, створюється позитивна похибка по струму, яка частково компенсує від'ємну.

Струмова похибка з урахуванням відмотування вторинних витків

$$\Delta I_{\%} = \left[-\frac{I_o \omega_1}{F_1} \sin(\alpha + \psi) - \frac{\omega_2 - \omega_{2ном}}{\omega_{2ном}} \right] 100. \quad (7.1)$$

Другий член у дужках є витковою корекцією. На рис. 5 криві 1 належать до трансформатора без компенсації, а криві 2— до того ж трансформатора після відмотування вторинних витків.

При відмотуванні вторинних витків крива похибки переміщується паралельно до самої себе в область менших похибок і при великому струмі може бути навіть позитивною. Якщо вторинне навантаження мале ($0,25 \cdot Z_{2H}$), то похибка може навіть вийти за припустимі межі даного класу.

Найбільшу компенсацію необхідно вводити при малих первинних струмах. Однак при цьому в області номінальних струмів при малих навантаженнях з'являється позитивна похибка, яка виходить за межі класу.

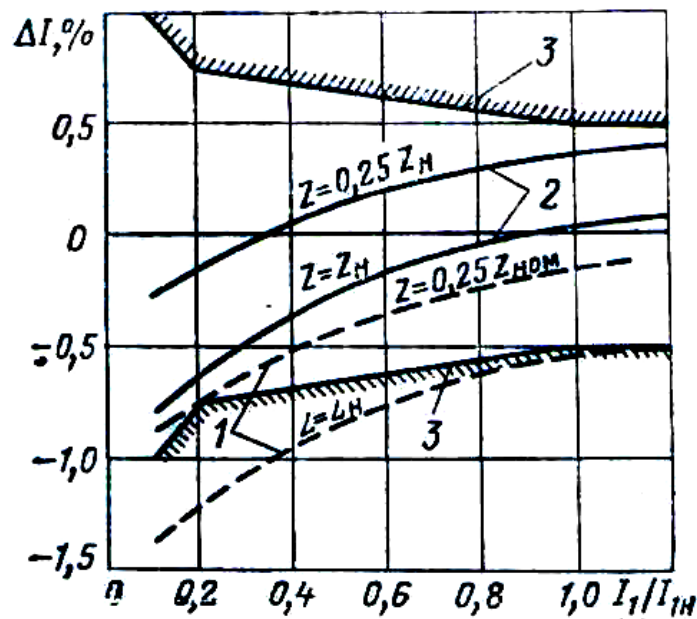


Рисунок 5 - . Компенсація похибки трансформатора струму відмотуванням вторинних витків

Тому виткова корекція не завжди ефективна, що є її недоліком.

Відмотування вторинних витків не впливає на кутову похибку. Для зменшення кутової похибки на магнітопроводі ТС установлюється короткозамкнений виток. Введення такого витка викликає збільшення активних втрат у магнітопроводі і реактивного магнітного опору $X_{мст}$, і в результаті зростає кут втрат ψ . При цьому кутова похибка зменшується, а похибка по струму збільшується. Таку компенсацію доцільно застосовувати, коли за струмовою похибкою є запас.

Існують також інші методи компенсації. Широко застосовується метод шунта, який полягає у підвищенні магнітної проникності шляхом

підмагнічування магнітопроводу ТС полями розсіювання (рис.6). Вторинна обмотка виконана у виді відповідно сполучених котушок 1 і 2 із числом витків ω_2' і ω_2'' відповідно. Первинна обмотка 3, що має ω_1 витків, розташована на правому стрижні. Всередині магнітопроводу розташовується магнітний шунт 4. Якщо не враховувати струм, що намагнічує, то можна записати

$$\underline{I}\omega_1 - \underline{I}_2\omega_2' - \underline{I}_2\omega_2'' = 0. \quad (7.2)$$

Розподілення вторинної обмотки по двох стрижнях і встановлення шунта 4 створюють збільшені потоки розсіювання. На лівому стрижні при проходженні струму \underline{I}_2 створюється магніторушійна сила (МРС) $\underline{I}_2\omega_2'$. Ця МРС створює потік розсіювання Φ_{S2} , який замикається через шунт. На правому стрижні діє МРС, рівна $\underline{I}_1\omega_1 - \underline{I}_2\omega_2''$. Під дією цієї МРС виникає потік розсіювання Φ_{S1} , що також проходить через шунт 4. Вибравши відповідним чином магнітний опір шунта, можна навіть при малих первинних струмах перевести робочу точку в область з високим μ_a і понизити магнітний опір магнітопроводу. У результаті МРС, необхідна для проведення потоку $\underline{\Phi}_0$, різко падає, що призводить до зменшення як струмової, так і кутової похибки ТС. При струмах близьких до номінального і перевищуючих його відбувається насичення шунта, й компенсація перестає діяти.

Поряд з підвищенням магнітної проникності магнітопроводу позитивну роль у зниженні похибки відіграє також зменшення індуктивного опору вторинної обмотки x_2 в результаті так званого подвійного розсіювання.

Застосування високоякісних магнітних матеріалів типу сталі марки Э413, пермалою та ін. з високою магнітною проникністю й малими активними втратами дозволяє створювати малогабаритні ТС із малою похибкою і без застосування компенсації.

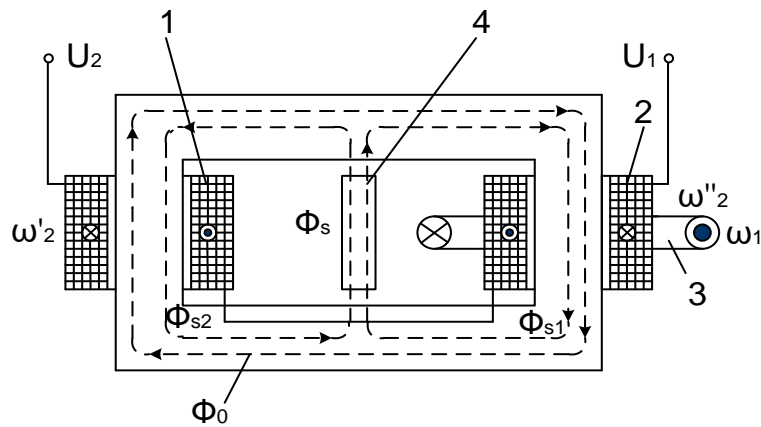


Рисунок 6 - Трансформатор струму з компенсацією похибки шляхом збільшення потоків розсіювання

Питання для самоперевірки

- 7.1. Які є методи компенсації струмової похибки ТС.
- 7.2. При яких первинних струмах (малих - більших) виткова корекція ефективніша?
- 7.3. Які є методи компенсації кутової похибки .
- 7.4. Назвіть відмінність компенсації кутової похибки методом короткозамкненого витка й методом шунта.

8. Режими роботи трансформаторів струму

8.1. Робота трансформатора струму при короткому замиканні в контрольованій мережі

ТС є одними з основних ланок вимірювального кола і релейного захисту. Тому вони повинні бути термічно і динамічно стійкими та мати похибку, яка забезпечує нормальну роботу вимірювальних і релейних кіл. При більших кратностях первинного струму магнітопровід ТС насичується, і похибка різко збільшується [14].

Практика показала, що якщо повна похибка досягла 10 %, то з подальшим зростанням первинного струму вона настільки швидко збільшується, що нормальна робота кіл стає неможливою. Тому номінальна гранична кратність ТС

повинна бути вищою відношення струму КЗ до номінального. Типова залежність номінальної граничної кратності від опору навантаження зображена на рис. 7. Зменшуючи опір навантаження, можна збільшувати й номінальну граничну кратність.

Трансформатори, призначені для диференціального захисту, вибираються з однаковою номінальною граничною кратністю. При цьому струм небалансу захисту, що дорівнює різниці вторинних струмів трансформаторів (при однаковому первинному струмі), виходить невеликим.

При КЗ внаслідок насичення магнітопроводу крива вторинного струму різко відрізняється від синусоїди.

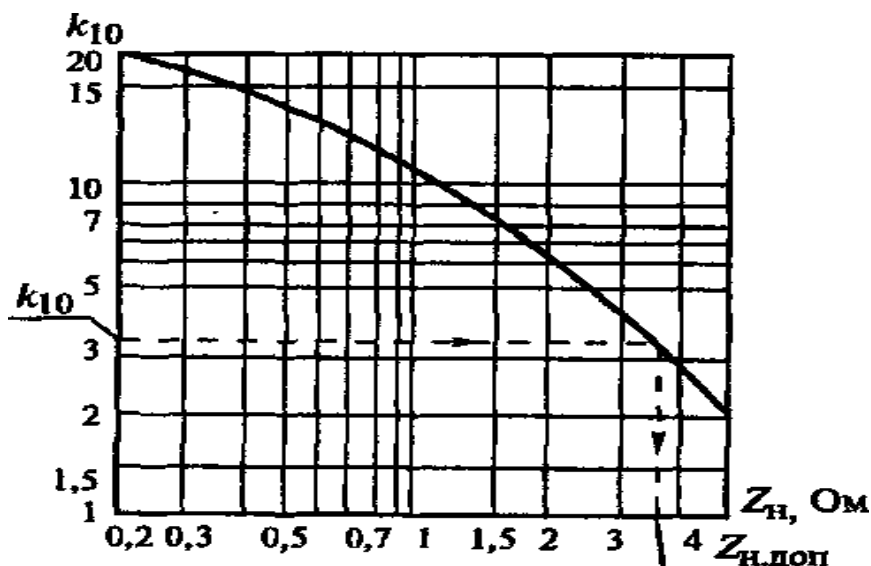


Рисунок 7 - Залежність номінальної граничної кратності від опору навантаження

Приблизно максимальну кратність вторинного струму можна знайти за формулою

$$n_{\max} = \frac{B_s}{B_{\text{ном}}} + (2 \div 3), \quad (8.1.1)$$

де B_s — індукція насичення (для електротехнічної сталі $B_s \cong 2$ Тл); $B_{\text{ном}}$ — амплітуда індукції при номінальному первинному струмі.

Трансформатори з багатовитковою первинною обмоткою при КЗ у контрольованій мережі піддаються підвищеному електричному навантаженню. Індуктивний опір такої обмотки сумірний з опором іншого короткозамкненого

кола. При цьому на обмотку може подавитись істотна частина напруги мережі, внаслідок чого можливий пробій міжвиткової ізоляції.

8.2. Робота трансформатора струму за наявності в струмі короткого замикання аперіодичної складової

Дотепер розглядався сталий режим, коли в первинній обмотці ТС протікає синусоїдальний струм незмінної амплітуди. У дійсності початок КЗ характеризується перехідним процесом за наявності аперіодичної складової струму.

Найбільш важкий випадок для ТС виникає, коли початкове значення аперіодичної складової дорівнює амплітуді змінної складової (повна аперіодична складова):

$$i_1 = -I_{1\text{пер}(m)} \cdot \cos\omega \cdot t + I_{1\text{пер}(m)} \cdot e^{-t/T_1}, \quad (8.2.1)$$

де $I_{1\text{пер}(m)}$ — амплітуда періодичної складової струму; T_1 — стала часу кола КЗ.

Прийmemo, що магнітопровід ненасичений, його магнітна проникність μ_a постійна й індуктивність кола намагнічування $L_0 = \text{const}$. Для спрощення припустимо, що навантаження чисто активне ($Z_{\text{н}} = R_{\text{н}}$), і опір обмотки $x_2 = 0$. Для схеми заміщення (рис. 2, в) можна написати:

$$L'_0 \frac{di'_0}{dt} = i_2(r_2 + R_1); i_2 = i'_1 - i'_0; \quad (8.2.2)$$

$$i'_1 = i_1 \omega_1 / \omega_2; i'_0 = i_0 \omega_1 / \omega_2; \quad (8.2.3)$$

$$i'_1 = -I'_{1\text{пер}(m)} \cdot \cos\omega \cdot t + I'_{1\text{пер}(m)} \cdot e^{-t/T_1}, \quad (8.2.4)$$

де L'_0 — індуктивність кола намагнічування, приведена до вторинної обмотки; i'_0 і i'_1 — намагнічуючий і первинний струми, приведені до вторинної обмотки; i_2 — вторинний струм; r_2 — активний опір вторинної обмотки; $R_{\text{н}}$ — опір навантаження; $I'_{1\text{пер}}$ — амплітуда змінної складової первинного струму, приведена до вторинної обмотки.

Розв'язання цієї системи дає миттєві значення струмів i_0 й i_2 . Введемо сталу часу кола намагнічування

$$T' = L'_o / (R_H + r_2). \quad (8.2.5)$$

Якщо $\omega(T') \gg 1$ й $\omega T' \gg 1/(\omega T_1)$ (що часто має місце), то намагнічуючий струм

$$i'_0 = I'_{1\text{неп}} \left[\frac{T_1}{T' - T_1} (e^{-t/T'} - e^{-t/T_1}) - \frac{1}{\omega T'} \sin \omega t \right]. \quad (8.2.6)$$

Намагнічуючий струм складається з періодичної складової

$$i'_{0\text{пер}} = -\frac{I'_{1\text{неп}}}{\omega T'} \sin \omega t, \quad (8.2.7)$$

і аперіодичної складової

$$i'_{0\text{анеп}} = I'_{1\text{неп}} \frac{T_1}{T' - T_1} (e^{-t/T'} - e^{-t/T_1}). \quad (8.2.8)$$

Під впливом цих складових створюються індукції

$$B_{\text{пер}} = \frac{i'_{0\text{пер}}}{i} \omega_2 \mu_a \quad \text{та} \quad B_{\text{анеп}} = \frac{i'_{0\text{анеп}}}{i} \omega_2 \mu_a, \quad (8.2.9)$$

де l — середня довжина магнітопроводу.

На рис. 8, а показана зміна в часі аперіодичних складових первинного струму $i'_{1\text{анеп}}$, вторинного струму $i_{2\text{анеп}}$, і намагнічуючого струму $i'_{0\text{анеп}}$. У момент $t_0 = \frac{T'T_1}{T' - T_1} \ln \frac{T'}{T_1}$, коли складова $i'_{0\text{анеп}}$ проходить через максимум, аперіодична складова вторинного струму $i_{2\text{анеп}}$ проходить через нуль. Через наявність аперіодичної складової $i'_{0\text{анеп}}$ крива $i_{2\text{анеп}}$ йде нижче кривої $i'_{1\text{анеп}}$. При цьому крива періодичної складової вторинного струму також опускається, і виникає кутова похибка δ (рис. 8,б). За кутову похибку в перехідному режимі приймається фазове зміщення в градусах (або мілісекундах) між моментами t_2 і t_1 проходження через нуль вторинного й первинного струмів. У перехідному режимі кутова (фазова) похибка буде різною при кожному проходженні струму через нуль через наявність змінної в часі складової намагнічуючого струму $i'_{0\text{анеп}}$. На рис.9 показана зміна повного намагнічуючого струму $i'_0 = i'_{0\text{пер}} + i'_{0\text{анеп}}$.

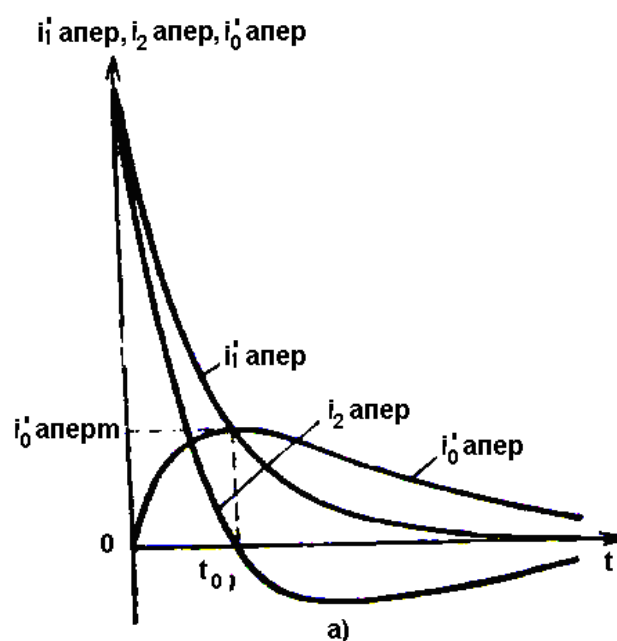
При $T_1 \geq 0,05$ с і $T' \gg T_1$, що зустрічається на практиці вкрай часто, амплітуда аперіодичної складової струму намагнічування в кілька десятків раз більша амплітуди періодичної складової, причому $V_{\text{аперм}} \gg V_{\text{перм}}$ і магнітопровід насичується під дією індукції $V_{\text{апер}}$ навіть при невеликій кратності первинного струму. В цьому випадку виникають більші похибки по струму і куту, що ускладнює роботу релейного захисту. Для зниження похибок ТС виконуються з немагнітним зазором, наявність якого запобігає насиченню магнітопроводу під впливом аперіодичної складової індукції.

На даний час є можливість створення ТС для вимірювання більших змінних струмів (100-120 кА) у перехідних режимах.

При цьому необхідно відмітити наступне.

1. ТС із тороїдальним магнітопроводом і більшим числом вторинних витків може мати велике негативне значення індуктивного опору x_2 навіть при рівномірному розподілі витків вторинної обмотки на магнітопроводі. Хоча цей опір є чисто розрахунковим параметром, його наявність погіршує роботу ТС, тому що в магнітопроводі збільшується індукція.

2. Опір $x_2 = \omega L_{2T}$ можна зменшити збільшенням числа немагнітних зазорів m (рис. 10) і збільшенням внутрішнього радіуса тороїдального магнітопроводу r_1 (рис. 11) при збереженні його перерізу.



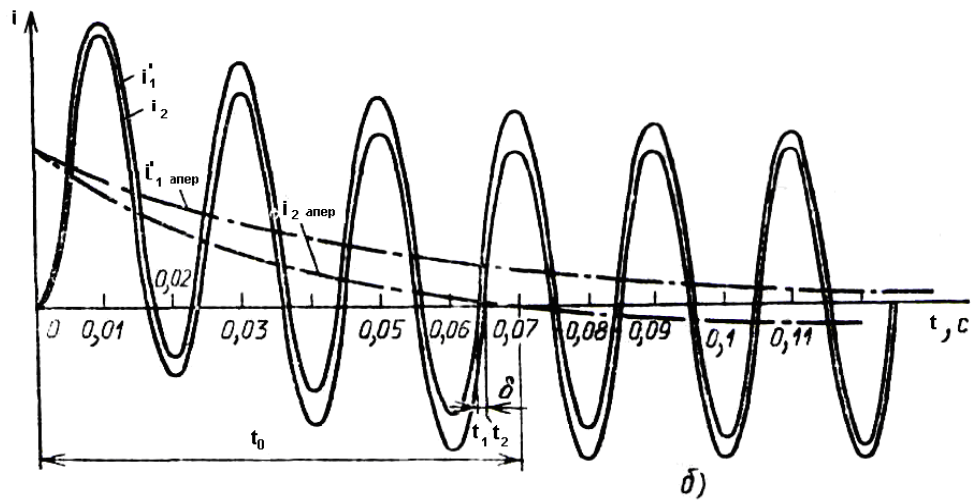


Рисунок 8 - Зміна струмів у перехідному режимі: *a*-криві аперіодичної складової первинного, вторинного струму і аперіодичної складової намагнічуючого струму; *б* - утворення фазової (кутової) похибки.

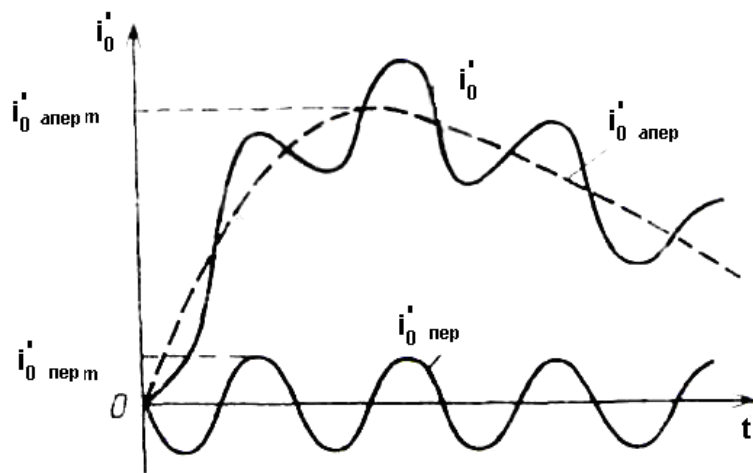


Рисунок 9 - Крива сумарного намагнічуючого струму

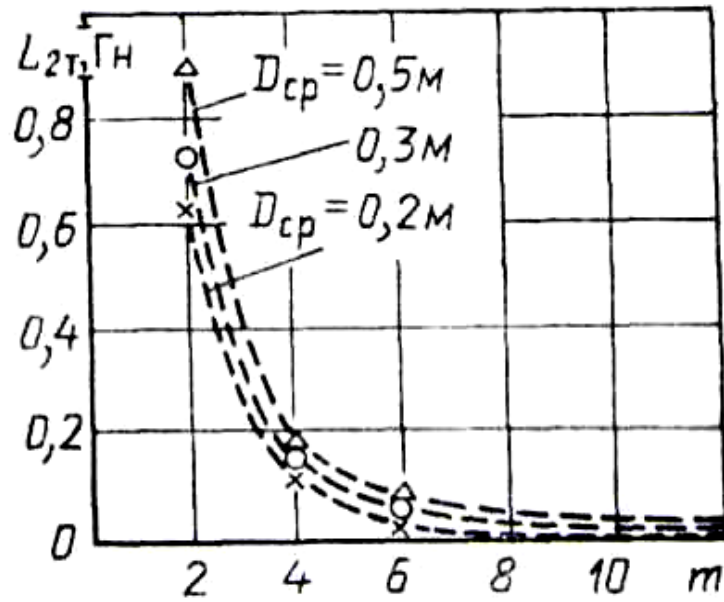


Рисунок 10 - Залежність індуктивності розсіювання вторинної обмотки $L_{2T} = \chi_2 / \omega$ від числа немагнітних зазорів і середнього діаметра D_{cp} .

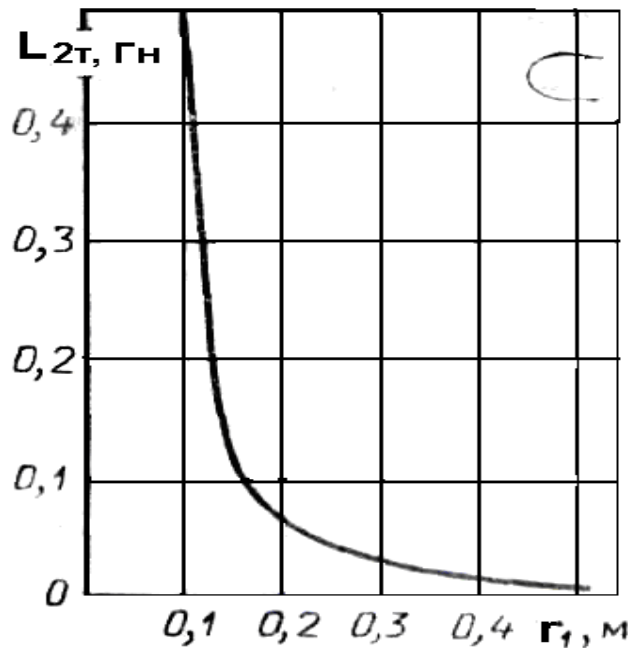


Рисунок 11 - Залежність індуктивності $L_{2T} = \chi_2 / \omega$ від внутрішнього радіуса магнітопроводу.

3. При великих первинних струмах ТС схильні до впливу зовнішнього магнітного поля, створюваного струмом у контурі первинної обмотки. Під впливом цього поля зменшується магнітна проникність магнітопроводу, й відбувається його насичення. Індукція, створювана зовнішнім магнітним полем у

магнітопроводі, може значно перевищувати індукцію, створювану намагнічуючим струмом i_0 . Для зниження впливу зовнішнього магнітного поля феромагнітні екрани є ефективнішими ніж провідні (немагнітні), однак їх застосування призводить до істотного збільшення маси й габаритів ТС. На рис. 12 наведені осцилограми, зняті для ТС при первинному струмі 116,2 кА й повної аперіодичної складової струму КЗ зі сталою часу $T_1 = 0,05$ с. Найбільша миттєва похибка по струму дорівнює $i_0' L'_{1пер}$, що не перевищує 0,64%, а індукція у магнітопроводі 0,4 Тл.

На рис.13 наведена осцилограма роботи ТС у режимі АПВ при струмі 128 кА з повною аперіодичною складовою зі сталою часу $T_1 = 0,1$ с і безструмовою паузою $t_{от} = 0,2$ с. Як еталонний вимірювальний прилад використовувався повітряний трансформатор струму (ПТС). Найбільша струмова похибка наприкінці першого циклу ввімкнення-вимкнення не перевищує 1 %, наприкінці другого 2 %. Індукція в магнітопроводі не перевищувала 1,4 Тл.

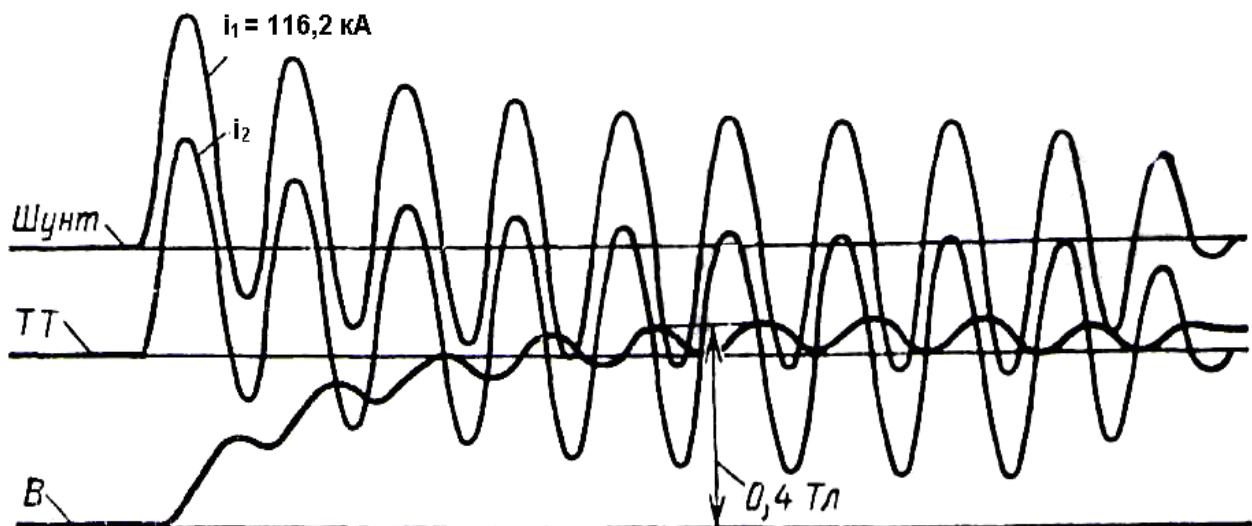
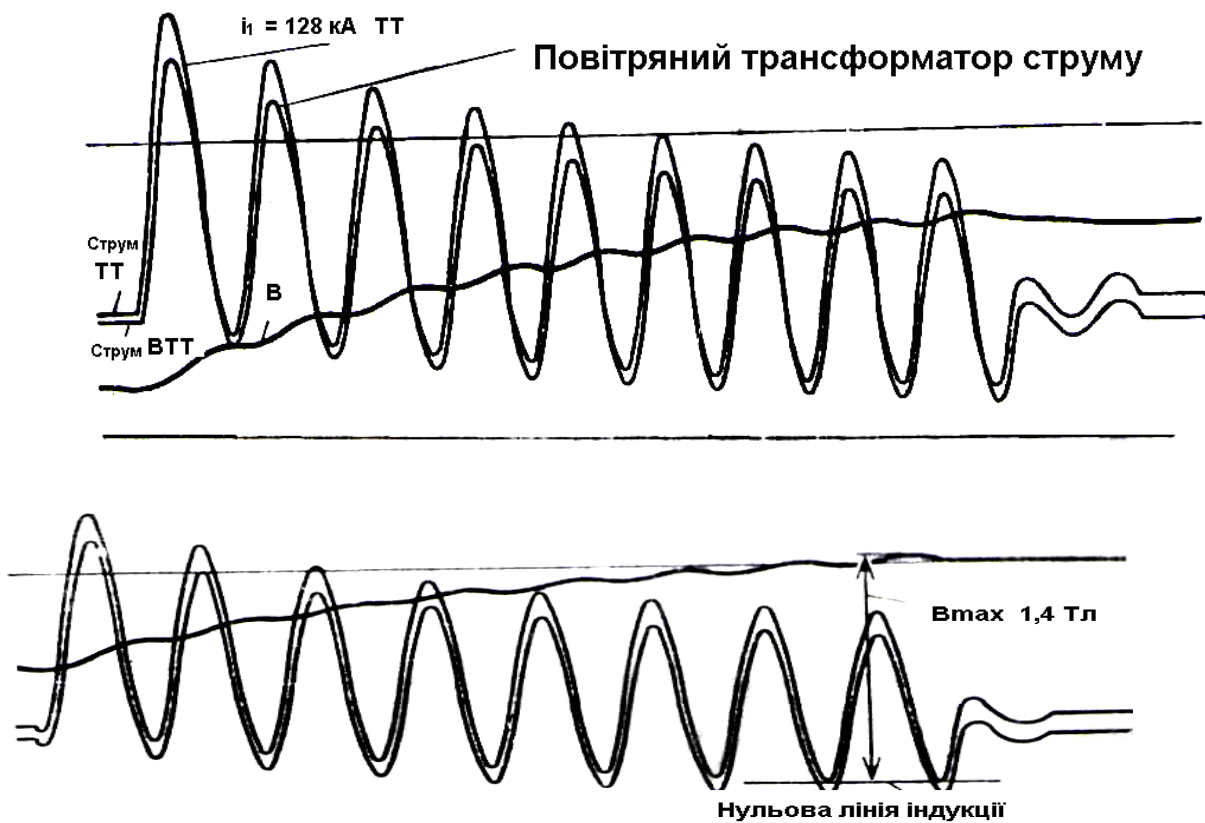


Рисунок 12 - Осцилограми роботи трансформатора струму при первинному струмі 116,2 кА



б)

Рисунок 13 - Осцилограма роботи трансформатора струму у циклі АПВ:
а — перше ввімкнення; б — друге ввімкнення

8.3. Робота трансформатора струму при розімкнутій вторинній обмотці

При експлуатації ТС можливі випадки, коли вторинна обмотка виявляється розімкнутою. У нормальному режимі МРС $i_0\omega_1$ становить відсотки або навіть частки відсотка МРС F_1 . Амплітуда магнітної індукції становить 0,06- 0,1 Тл [15].

При розмиканні вторинної обмотки $F_2 = 0$, і розмагнічуюча дія вторинної МРС припиняється. Струм у первинному колі залишається незмінним, і первинна МРС цілком іде на намагнічування магнітопроводу. Це призводить до його насичення й появи високої ЕРС на розімкнутій вторинній обмотці.

Зразкові криві зміни індукції B і вторинної ЕРС e_2 зображені на рис. 14. Чим більша первинна номінальна МРС $I_{\text{ном}}\omega_1$, тим більше амплітудне значення e_2 , яке може сягати десятка кіловольт. Така напруга небезпечна для ізоляції трансформатора й обслуговуючого персоналу.

При насиченні магнітопроводу в ньому різко зростають активні втрати, за рахунок яких температура ізоляції може істотно перевищити допустимі значення.

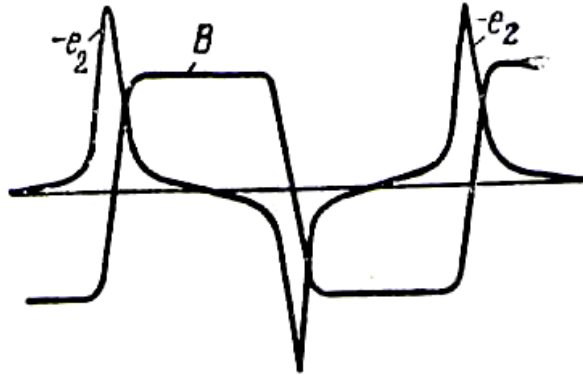


Рисунок 14 - Зміна індукції B і вторинної ЕРС e_2 при розімкнутій вторинній обмотці

Режим розімкнутої вторинної обмотки є для ТС аварійним, що необхідно передбачати при проектуванні кіл релейного захисту. Зазвичай вторинна обмотка виводиться на додаткові контакти K з перемичкою. Перед відмиканням від вторинної обмотки вимірювального приладу вона спочатку шунтується цією перемичкою.

Питання для самоперевірки

- 8.1. Яка номінальна гранична кратність ТС і її залежність від $Z_{2ном}$.
- 8.2. Поясніть роботу ТС при КЗ.
- 8.3. Поясніть перехідний процес на початку дії КЗ (наявність аперіодичної складової струму).
- 8.4. Які криві зміни струмів у перехідному режимі.
- 8.5. Який вплив зовнішнього магнітного поля, створюваного більшим первинним струмом ТС у контурі первинної обмотки.
- 8.6. Поясніть режим роботи ТС при розімкнутій вторинній обмотці.

9. Метрологічні вимоги до трансформаторів струму для обліку електричної енергії

ТС для обліку електроенергії повинні забезпечувати максимально можливу точність у межах робочих режимів.

Точність цих ТС в аварійних режимах може забезпечуватися на більш низькому рівні, ніж у ТС, які забезпечують релейний захист, оскільки аварійні режими несуттєві для обліку через їх короткочасність. Є можливим і бажаним використання вимірювальних ТС для обліку аварійних режимів, що взагалі не відтворюють струми, оскільки це знижує перепади струму через прилади, які вимірюють струм при КЗ.

1. ДСТУ EN 61869-2:2017 передбачає випуск спеціальних ТС для комерційного обліку. Ці ТС (з номінальним струмом 5 А) мають спеціальні позначення класу точності 0,5S і 0,2S і характеризуються діапазоном точної роботи, розширеним в сторону малих первинних струмів до 1% номінального значення. Стандарт допускає струмову й кутову похибки на нижньому краї діапазону, в 3...3,75 рази перевищуючі їх значення при номінальному первинному струмі.

У Додатку 1 наведена таблиця нормативів похибок для різних класів точності за 1. ДСТУ EN 61869-2:2017. Наприклад, для ТС класу точності 0,5 трикратне значення похибки по струму й куту допускається вже при струмі 5% номінального значення. Похибки при менших значеннях первинних струмів взагалі не нормуються [16].

Вибір коефіцієнта трансформації ТС при проектуванні часто доводиться робити згідно не з реальним струмом цього приєднання, а з необхідністю забезпечення умов динамічної або термічної стійкості цього апарата при струмах КЗ. При цьому нерідко номінальні струми ТС перевищують номінальні струми приєднання в п'ять-десять разів. В умовах сучасного промислового спаду реальні вторинні струми іноді опускаються до рівня 1 - 2% номінального

струму за дуже низького коефіцієнта потужності, що додатково збільшує похибку обліку.

У розділі 4 РД 34.11. 321-96 [17] серед іншого наведені граничні норми припустимих похибок вимірювань електричних параметрів для технічного й комерційного обліку й розрахунку ТЕП.

Цим РД обмежуються значення сумарних похибок каналів обліку, що включають похибки вимірювальних ТС і ТН, похибки від втрат у сполучних проводах від ТН до приладів обліку й похибки самих приладів обліку. Аналогічні норми містяться також у РД 34.11. 333-97 [17].

Межі похибок, настільки жорсткі, що ТС класу 0,5 (що в даний час складають переважну більшість серед ТС для обліку, які знаходяться в експлуатації) часто не дають можливості укластися в ці межі, тому що допустимі за ДСТУ EN 61869-2:2017 похибки ТС виявляються в деяких робочих режимах сумірними з нормативом сумарної похибки по каналу вимірювання енергії або навіть перевищують цей показник. Жорсткі норми точності при веденні комерційного обліку диктуються умовами забезпечення достатньої підсумкової точності при зведенні балансів електроенергії по енергетичних підприємствах і об'єднаннях та не можуть бути пом'якшені, тому необхідно при модернізації енергооб'єктів передбачати установлення на приєднаннях, які підлягають комерційному обліку, ТС класу не нижче 0,2S.

Похибки ТС для обліку можуть перевірятися тільки експериментально, за допомогою вимірювальних мостів (нульовими методами). Ці вимірювальні прилади коштують досить дорого, сама перевірка вимагає виведення приєднання з роботи, тому такі перевірки дотепер практикувалися тільки заводами - виготовлювачами ТС.

Експлуатаційні організації енергетичної галузі раніше таких перевірок не здійснювали. На даний час перевірку ТС для комерційного обліку на відповідність класу точності повинні проводити організації, які мають сертифікат на проведення енергоаудиту в енергетичній галузі, для чого організації, які займаються енергоаудитом, повинні придбати апаратуру для

перевірки ТС на клас точності. Імовірність втрати вимірювальним трансформатором його класу точності в процесі експлуатації невелика, але й не дорівнює нулю. Можливо, наприклад, руйнування згодом ізоляції листів набору магнітопроводу, корозія цих листів, зростання перехідного опору внутрішніх сполучень вторинної обмотки й т.ін.

Перевірка ТС для комерційного обліку експлуатаційними організаціями полягає у вимірюванні опору навантаження ТС, що повинне бути якомога меншим, але в кожному разі не повинне перевищувати номінального опору навантаження. У колі ТС для комерційного обліку повинні вмикатися лише лічильники електроенергії, вимірювальні прилади й вимірювальні перетворювачі для АСУ ТП.

Споживачі, які не належать до перерахованих, повинні бути вилучені з кіл ТС для обліку. За неможливості вивільнити існуючі ТС для обліку від сторонніх споживачів необхідно встановлювати додатковий комплект ТС з класом точності не нижче 0,2S спеціально для обліку.

Для підвищення точності ведення комерційного обліку режимні підрозділи електрозбутових організацій повинні прагнути по можливості підвищити значення $\cos \varphi$ по облікових приєднаннях. За будь-яких режимів $\cos \varphi$ приєднань, які мають комерційний облік, не повинен опускатися нижче рівня 0,5.

Питання для самоперевірки

- 9.1. Яка відмінність впливу точності ТС в аварійних режимах для обліку й релейного захисту.
- 9.2. Які позначення класів ТС використовуються для комерційного обліку електричної енергії.
- 9.3. Які норми допустимих похибок вимірювань електричних параметрів для технічного й комерційного обліку електроенергії.
- 9.4. Які припустимі похибки ТС залежно від величини відносних первинних струмів.

10. Конструкція трансформаторів струму

Розрізняють одновиткові і багатовиткові ТС. В одновитковому ТС первинна обмотка може бути виконана у вигляді стрижня, шини або пакета шин. Прикладом такого виконання є трансформатор типу ТПОЛ-10 з номінальною напругою 10 кВ (рис. 15), який використовується як прохідний ізолятор при переході лінії з одного приміщення в інше.

Застосування литої епоксидної ізоляції дозволяє значно спростити конструкцію і технологію виробництва в порівнянні зі збірними ТС, які мають порцелянову ізоляцію. Первинна обмотка-стрижень 4, магнітопроводи 1 і кріпильне кільце 3 встановлюються в спеціальну форму й заливаються рідкою сумішшю епоксидної смоли, пилоподібного кварцового піску і затверджувача. Після затвердіння й полімеризації ця суміш набуває високих електричних й механічних властивостей.

По суті справи ТС (рис. 15) має два незалежних трансформатори, параметри яких можуть бути різними. Магнітопроводи трансформатора виконуються у вигляді двох тороїдальних сердечників 1, навитих стрічкою з текстурованого матеріалу, наприклад марки Э413.

Якщо вторинна обмотка 2 рівномірно розподілена на тороїдальному магнітопроводі, то її індуктивний опір x_2 у схемі заміщення дорівнює нулю, що дозволяє знизити похибку вимірювань ТС. Конструкція допускає встановлення декількох ТС із різними параметрами на одній стрижневій первинній обмотці.

Електродинамічна стійкість одновиткових ТС досить висока, оскільки на первинну обмотку діють сили тільки від шин, що підводяться, і сусідніх фаз. При трифазному КЗ між стрижнями первинних обмоток сусідніх фаз виникає електродинамічна сила. Крім того, на кінець стрижня передаються сили, які діють на шину, що підводиться, яка одним своїм кінцем укріплена на найближчому опорному ізоляторі, а другим - на стрижні ТС.

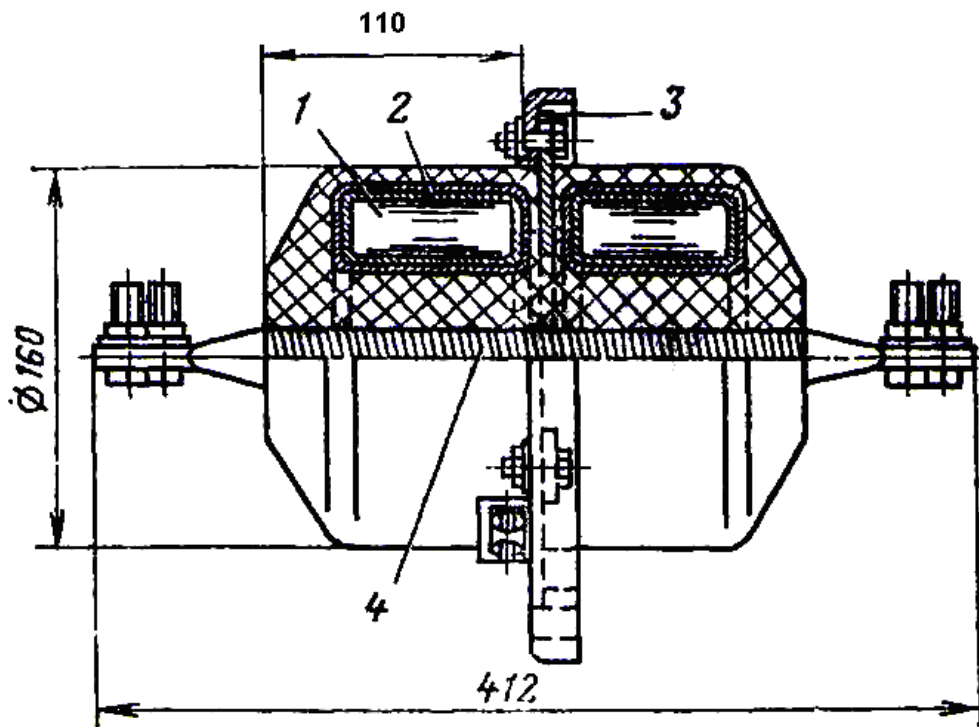


Рисунок 15 - Одновитковий трансформатор струму типу ТПОЛ-10

Електродинамічна стійкість, гарантована заводом-виготовлювачем, відноситься зазвичай до певної відстані між фазами і певної довжини шини, яка з'єднує опорний ізолятор з ТС. Недолік одновиткових ТС полягає у великій похибці при малому номінальному первинному струмі, оскільки $\omega_1 = 1$. Тому одновиткові ТС застосовуються при струмах 400 А і більше. При первинному струмі понад 2 кА застосовуються одновиткові шинні ТС. У якості первинної обмотки використовується пакет шин розподільчого пристрою, що проходить через вікно магнітопроводу. Електродинамічна стійкість такого ТС визначається механічною міцністю шин, їх кріпленням і заводом не нормується.

Одновиткові ТС можуть бути вбудованими. У цьому випадку використовуються струмопровідний стрижень та ізолятор іншого апарату або устаткування (вимикача, силового трансформатора, прохідного ізолятора та ін.). Застосування вбудованих ТС дає великий економічний ефект.

На прохідному ізоляторі вбудованих ТС, як правило, встановлюється декілька ТС, вторинні обмотки яких можна сполучати послідовно або паралельно. При послідовному сполученні вторинних обмоток коефіцієнт трансформації не змінюється, оскільки подвоюється число первинних і вторинних витків. Вторинний струм зберігається незмінним, а вторинна ЕРС подвоюється, що дозволяє збільшити вторинну потужність в 2 рази. Для вбудованих ТС це дуже важливо, тому що вони віддалені від реле і вимірювальних приладів, завдяки чому опір з'єднувальних проводів виходить більшим. При паралельному сполученні вторинних обмоток коефіцієнт трансформації зменшується, тому що первинні обмотки включаються послідовно. При цьому вторинний струм двох ТС збільшується. Це дає можливість одержати вторинний струм, який наближається до стандартного значення 5 А, наприклад при первинному струмі $I_{\text{ном}} = 200 \text{ А}$.

Вторинні обмотки мають відводи, які дозволяють у невеликому діапазоні регулювати коефіцієнт трансформації.

При малих первинних струмах (нижче 400 А) для одержання високого класу точності застосовуються багатовиткові ТС.

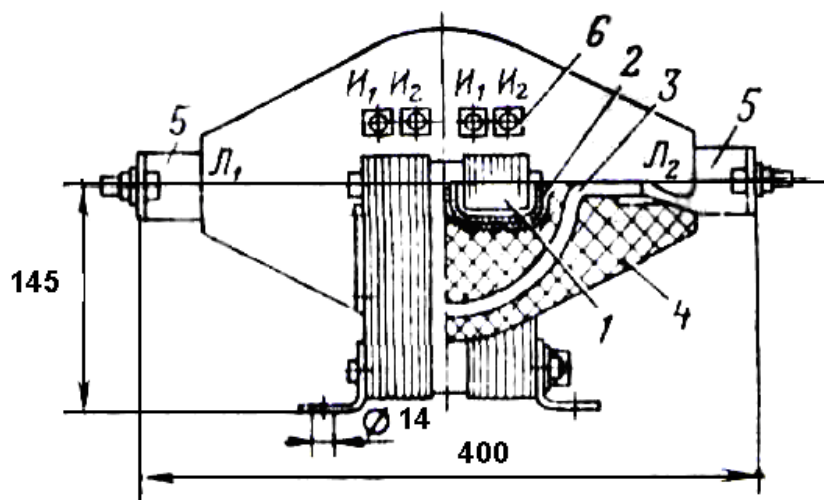


Рисунок 16 - Багатовитковий трансформатор струму

При будь-якому значенні первинного струму необхідна для даного класу точності первинна МРС F_1 отримується за рахунок збільшення числа витків первинної обмотки ω_1 . На рис. 16 показаний багатовитковий трансформатор на напругу 10 кВ. На прямокутному шихтованому магнітопроводі 1 розташована вторинна обмотка 2. Первинна обмотка 3 виконується з мідної шини. Первинна обмотка виведена на контакти 5, вторинна — на контакти 6. Всі деталі ТС залиті епоксидним компаундом 4.

При КЗ на витки первинної обмотки діють розриваючі електродинамічні сили, що знижує стійкість ТС. Крім того, на первинній обмотці через її відносно велику індуктивність може з'явитися значне просідання напруги. Це є недоліком даної конструкції ТС.

При напрузі 35 кВ і вище для відкритих установок застосовуються ТС з масляною ізоляцією. Найпоширеніші ТС так званого ланкового типу (рис. 17). Три тороїдальних магнітопроводи 1 з вторинними обмотками 2 охоплені первинною обмоткою 4, яка виконується з м'якого багатожильного дроту і звичайно має декілька паралельних віток (на рис. 17 дві вітки). При переході з паралельного з'єднання на послідовне первинний номінальний струм трансформатора зменшується в 2 рази.

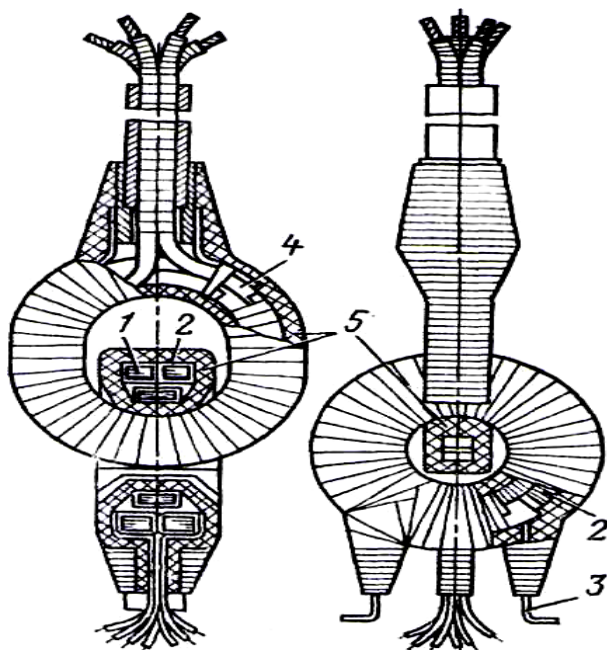


Рисунок 17 - Трансформатор струму ланкового типу

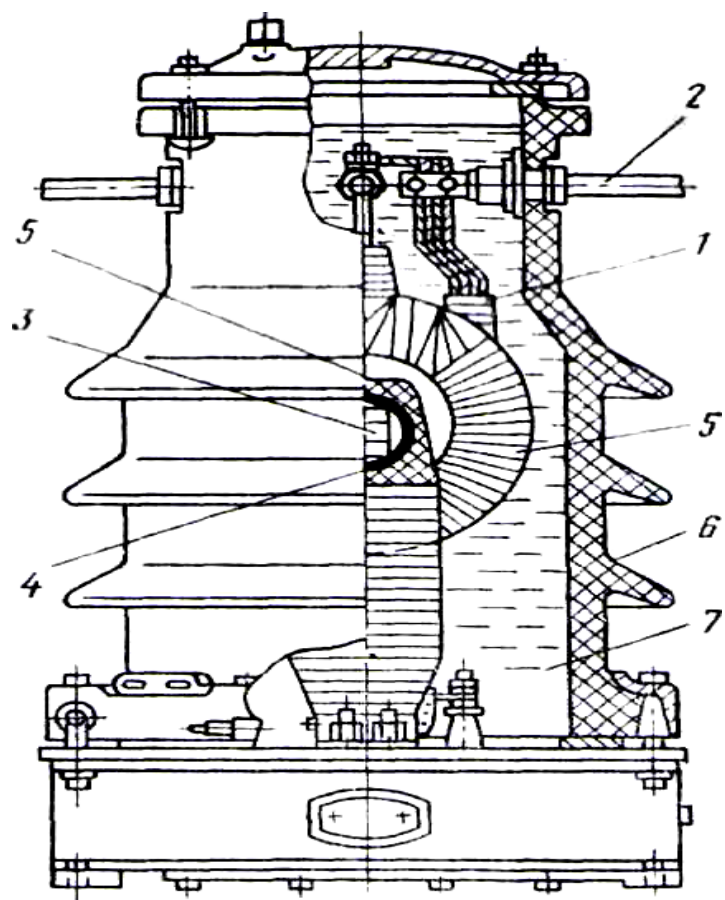


Рисунок 18 - Трансформатор струму типу ТФН-35

Первинна і вторинна обмотки ізолюються кабельним папером 5 товщиною 0,12 мм.

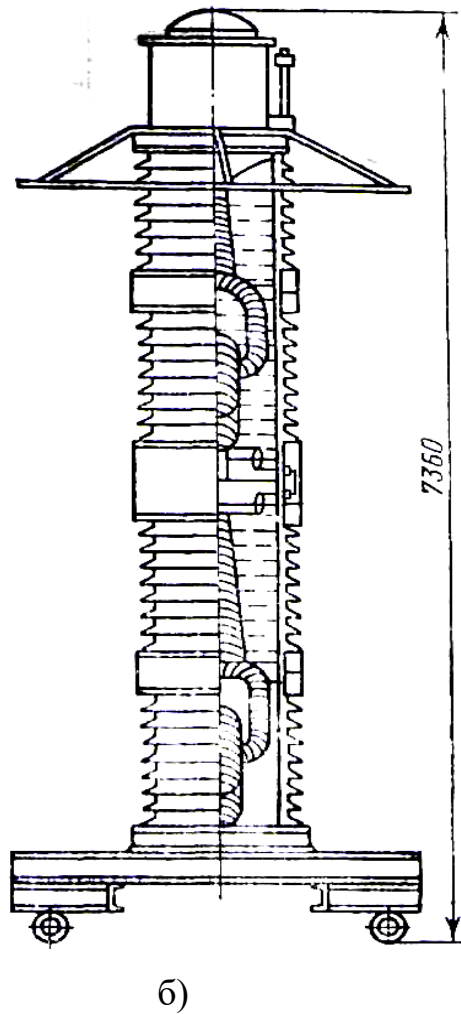
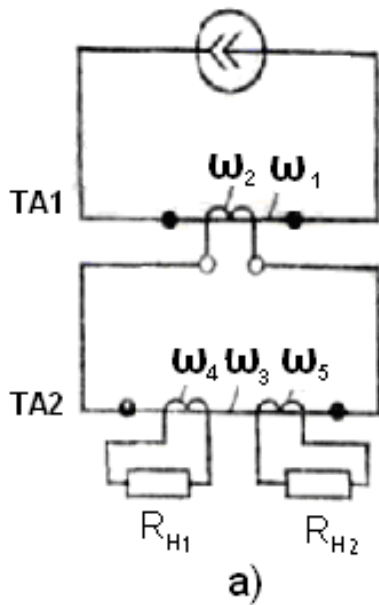


Рисунок 19 - Двоступінчастий каскадний трансформатор струму
 а — принципова схема; б — загальне компонування

Після накладення ізоляції магнітопровід з обмотками кріпиться до основи ТС за допомогою лап 3. До цієї ж основи кріпиться порцеляновий кожух, який захищає обмотки від впливу навколишнього середовища. Внутрішня порожнина ТС після вакуумного сушіння заповнюється трансформаторною оливою. Олива просочує кабельний папір і заповнює всі порожнини. Такі ТС виконуються на напругу до 220 кВ. Загальний вигляд ТС типу ТФН-35 на напругу ($U_{ном} = 35$ кВ наведено на рис. 18. Тут 1 — вивід віток первинної обмотки; 2 — вивід первинної обмотки; 3 — магнітопровід; 4 — вторинна обмотка; 5 — ізоляція з кабельного паперу; 6 — порцелянова покривка; 7 — трансформаторна олива.

З ростом номінальної напруги вартість ТС зростає приблизно пропорційно квадрату напруги, в основному за рахунок ізоляції. Тому при напрузі $U_{\text{ном}} > 220$ кВ застосовують каскадні ТС. На рис. 19,б показаний двоступінчастий каскадний ТС на напругу 500 кВ. Схема ввімкнення обмоток наведена на рис. 19, а. Тут ω_1 — первинна обмотка верхнього ступеню; ω_2 — вторинна обмотка верхнього ступеню; ω_3 — первинна обмотка нижнього ступеню; ω_4, ω_5 — вторинні обмотки нижнього ступеню; R_H — навантаження ТС. Загальне компонування показано на рис. 19,б. Кожна ступінь являє собою ТС на напругу $250/\sqrt{3}$ кВ, аналогічний показаному на рис. 17. Вторинна обмотка першого ступеню живить первинну обмотку другого ступеню. Під час перевезення кожна ступінь, залита оливою, доставляється до місця встановлення окремо. Вартість двоступінчастого трансформатора приблизно в 2 рази менша, ніж одноступінчастого. Недоліком каскадного ТС є збільшення похибки за рахунок збільшення опору обмоток.

У зв'язку зі збільшенням номінальної напруги до 1150 кВ і вище вважається за доцільне перехід на ТС з оптико-електронною системою. Датчик струму може перебувати під високим потенціалом і модулювати світловий потік, який подається із землі по волоконному світловоду (зовнішня модуляція). В іншому варіанті датчик струму сам виробляє модульований світловий потік, який по світловоду передається на потенціал землі (внутрішня модуляція). Однак внаслідок складності такі системи на даний час широкого застосування не одержали.

Питання для самоперевірки

- 10.1. Які види ізоляції застосовуються в ТС.
- 10.2. При яких значеннях номінального первинного струму застосовуються одновиткові ТС?
- 10.3. Як змінюється коефіцієнт трансформації ТС при послідовному сполученні вторинних обмоток декількох ТС?
- 10.4. Як змінюється коефіцієнт трансформації ТС при паралельному сполученні вторинних обмоток декількох ТС?
- 10.5. Назвіть переваги і недоліки ТС.

11. Перевірки трансформаторів струму

11.1. Обсяг і види перевірок трансформаторів струму

При новому ввімкненні ТС та їх вторинні кола перевіряються в наступному обсязі й такій послідовності:

- а) підбір документації й ознайомлення з нею;
- б) зовнішній огляд ТС і їх кіл;
- в) попередня перевірка вторинних кіл «продзвонюванням»;
- г) перевірка опору й електричної міцності ізоляції вторинних обмоток ТС та їх вторинних кіл;
- д) визначення полярності виводів первинної та вторинної обмоток;
- е) зняття вольт-амперної характеристики (ВАХ);
- ж) перевірка омичних опорів вторинних обмоток ТС;
- з) перевірка встановлених коефіцієнтів трансформації ТС;
- і) перевірка встановлених відгалуджень обмоток ТС;
- к) визначення опору вторинного навантаження ТС;
- л) перевірка перехідних омичних опорів обмоток ТС із перемиканням первинних обмоток для ТС на 110 кВ і вище (виконується службою ремонтів);
- м) перевірка правильності складання вторинних обмоток і кіл навантаження ТС;
- н) експериментальна перевірка похибок ТС;
- о) урахування похибки ТС при настроюванні уставок захисту;
- п) оформлення результатів перевірки.

Необхідність проведення при цьому робіт з пунктів "ж", "з", "і", "д", "л", "н" визначається центральною службою релейного захисту (енергосистеми, РЕМ або іншого об'єднання). Центральна служба релейного захисту має право призначення додаткових перевірок, загальних або місцевих, які можуть знадобитися в процесі експлуатації.

При планових перевірках виконуються пункти "а", "б", "г", "е", "ж", "л", "п".

Якщо для ремонтних робіт розбиралися вторинні кола, то додатково перевіряється правильність їх подальшого складання по пункту "м".

Після заміни ТС перевірка проводиться по пунктах "б", "г", "д", "е", "з", "і", "л", "м", "п".

11.2. Підбір документації й ознайомлення з нею

Перед будь-якою перевіркою ТС необхідно підготувати:

- а) принципів й монтажні схеми включення вторинних кіл ТС;
- б) розрахунок опору вторинного навантаження ТС;
- в) дані про значення струмів КЗ;
- г) дані про значення уставок захистів, що обслуговуються даним ТС, і інструкцію з перевірки пристроїв захисту й автоматики, підімкнених до перевіряючих ТС (для довідок);
- д) бланки паспортів-протоколів;
- е) діючу інструкцію;
- ж) дослідницьку апаратуру, вимірювальні прилади й інструмент.

11.3. Зовнішній огляд трансформаторів струму і їх кіл

Огляд виконується згідно РД 153-34.0-35.617-2001 [13].

Особливу увагу варто звернути на деякі особливості конструкцій ТС і виконання їхніх вторинних кіл.

Виводи вторинних обмоток ТС, особливо вбудованих, повинні бути надійно захищені від потрапляння в них мастила й вологи. Кабельні розділки не повинні пропускати просочувальну масу з кабелів з паперовою ізоляцією.

Кабелі у вторинних колах ТС повинні бути ввімкнені так, щоб струми кожної вторинної обмотки замикалися тільки через призначене для цієї обмотки навантаження.

Контрольні кабелі й проводи, прокладені по корпусах силового обладнання (масляних вимикачів, силових трансформаторів), повинні бути надійно захищені від механічних ушкоджень при роботах на силовому обладнанні.

Вбудовані ТС повинні встановлюватися відповідно до заводських написів "вгору" і "вниз". Якщо написи відсутні, то необхідно до установки на місце визначити початковий вивід А вторинної обмотки, по ньому визначити однополюсну з ним сторону ТС "вгору" і відновити написи. Якщо відсутні позначення виводів вторинних обмоток, то необхідно до установки ТС визначити й надійно позначити всі виводи.

Розпірні клини встановлюються тільки в тих місцях, де є заводські написи "клин".

Рекомендується для всіх вбудованих ТС перед установленням перевірити їхню справність, знявши ВАХ. Після установки на місце, до заливання оливи, рекомендується повторно зняти ВАХ і перевірити полярність, щоб переконатися у відсутності ушкодження обмоток і в правильності установки. Корисно також експериментально визначити коефіцієнт трансформації ТС до його встановлення в апарат.

ТС ТВ-35, які вбудовуються у вимикачі ВМ-35 і ВМД-35 з номінальним вторинним струмом 2,5 А, призначені тільки для одержання результуючого коефіцієнта трансформації у фазі 50/5, 75/5, 100/5 шляхом паралельного ввімкнення двох ТС на фазу.

Деякі ТС (наприклад, ТВТ-100, ТВТ-200) можуть поставлятися з номінальним вторинним струмом 5 або 1 А. Перед їх установленням необхідно перевірити відповідність номінального вторинного струму проектним значенням.

У всіх пристроях з випробовувальними блоками перевіряється надійність роботи блоків. Для цього у вторинне коло, між блоком і реле, вмикають амперметр (ВАФ-85 або аналогічний). На вхідні затискачі блоків подається струм 5 - 10 А від стороннього джерела. Знімні деталі блоків ставляться в різні положення, і за показниками амперметра перевіряється правильність і надійність перемикання струмових кіл.

У всіх ТС типу ТФН, ТФНК і подібних їм необхідно розкрити коробку виводів. Перевіряється справність різьби штирів прохідних ізоляторів виводів, ввідів і гайок, надійність контактів перемички між вводами й виводами,

наявність пристосувань від самовідгвинчування гайок, якість ущільнення прохідних ізоляторів.

Конструкції, на яких встановлюються ТС, повинні забезпечувати можливість доступу у внутрішню частину цоколя в процесі експлуатації.

Для одержання заданого коефіцієнта трансформації необхідно розкрити верхню кришку ТС і виконати пересполучення секцій первинної обмотки, користуючись заводськими схемами й позначеннями, розміщеними під кришкою.

У деяких типів ТС провід, призначений для заземлення магнітопроводів, виведений у кабельну коробку на затискач, позначений буквою З. Цей затискач завжди повинен бути надійно сполучити із цоколем і заземлений.

У ТС ТФНК-330 ізоляція первинної обмотки виконана з декількох шарів, розділених металевими прокладками, що утворюють ємнісний подільник фазової напруги. Остання зовнішня обкладка виводиться на затискач у кабельній коробці, позначений буквою З, і завжди повинна бути з'єднана із цоколем. Передостання вимірювальна обкладка виводиться на вивід И (не плутати з виводами И1 і И2) і використовується для відбору напруги приладами ПНН. Якщо вимірювальна обкладка не використовується, то вивід И необхідно з'єднати із затискачем З и заземлити.

ТС ТФНК-400 і ТФНК-500 складаються із двох частин на місці монтажу. Особливу увагу слід звернути на надійність сполучення виводів вторинної обмотки верхнього магнітопроводу з вводами первинної обмотки нижніх магнітопроводів і сполучення магнітопроводів та екранів верхньої частини з її цоколем. Для зручності роботи рекомендується зняти ВАХ всіх магнітопроводів цих ТС до їхнього складання.

У всіх ТС місце заземлення вторинних обмоток повинно бути доступне для персоналу без зняття високої напруги. Всі електрично з'єднані вторинні кола ТС повинні бути заземлені тільки в одній точці. Рекомендується виконувати заземлення або на збірці затискачів панелі захисту, або на проміжній збірці затискачів, найближчій до ТС.

Як відомо, однополюсними виводами ТС є виводи Л1-И1 і Л2-И2. Залежно від різних причин первинна обмотка ТС може включатися виводом Л1 до шин (Л2 - до лінії) або навпаки, але у всіх випадках провід вторинного кола, приєднаний до виводу вторинної обмотки однакової полярності з виводом первинної обмотки, приєднаним до фази шин, вважається початковим. Ці проводи вторинного ланцюга маркуються за назвою фази, у якій стоїть ТС.

11.4. Перевірка вторинних кіл трансформаторів струму

Ця перевірка повинна виконуватись один раз на три роки, у випадку заміни лічильника електричної енергії, а також у випадку підозри на наявність розкрадань електричної енергії.

11.4.1. Перевірка обриву кола

Обрив у колі ТС може бути викликаний наступними діями:

- розрив у колі ТС (випадковий або з наміром);
- розрив жил трифазного кабелю за умови збереження цілісності ізоляції.

Для виявлення обриву кола необхідно провести вимірювання фазних струмів за допомогою струмових кліщів.

11.4.2. Перевірка правильності ввімкнення вторинних кіл

Перевірка правильності ввімкнення вторинних кіл ТС за допомогою подачі в його первинні обмотки струму від стороннього джерела й вимірюванням струму у фазах і нульовому проводі вторинних кіл ТС може бути здійснена за допомогою приладу «Потенциал-ТВ-М» (ТН-М), «Потенциал-Ц2К» або подібним [9].

Підімкнення пристрою до ТС здійснюється двома провідниками на рис. 20.

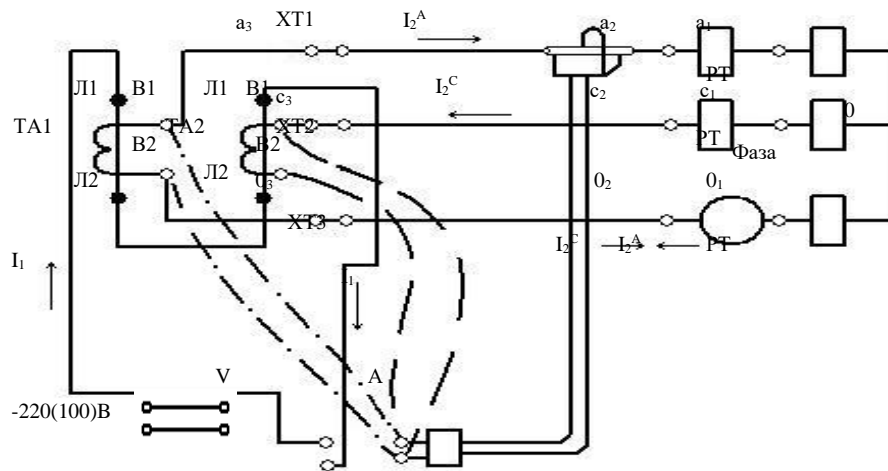


Рисунок 20 - Схема перевірки правильності включення вторинних ланцюгів ТС за допомогою стороннього джерела

Виводи ТС Л2 фаз А і С з'єднують. Прилад має малогабаритний навантажувальний трансформатор, який залежно від довжини й перерізу з'єднаних провідників може видавати струм до 6А. Первинною стороною трансформатора є затискачі.

У випадку подачі на прилад будь-якої фазної напруги 220В для ТН-М або будь-якої лінійної напруги 100В для ТВ-М, за умови постійного підключення струмовимірювальних кліщів і правильного складання кіл струму кут для фаз А и С буде відповідно дорівнювати 0 ± 180^0 . Для визначення в нульовому провіднику струмів відповідних фаз необхідно закортити по черзі на ТС вторинні обмотки фаз А и С. При цьому кут буде відповідно змінюватися від 0^0 до 180^0 . Прилад працює з коефіцієнтами трансформації ТС

$$n = 800/5 \text{ і нижче.}$$

Для визначення стану елементів вторинних кіл ТС необхідно виводи приладу А з'єднати провідниками з виводами ТС В1 і В2 відповідно рис. 20. (штрихові й штрих пунктирні лінії).

У випадку розходження кутів ϕ для фаз А и С фаза з дефектними елементами визначається по найменшому куті. Ушкоджений елемент визначається послідовним вимірюванням кута ϕ у струмах a_1-O_1 , c_1-O_1 , a_2-O_2 , c_2-

O_2 і далі. Визначення кута φ між струмом і падінням напруги на елементах вторинних кіл ТС дозволяє визначити стан кіл струму контрольованого елемента-лічильника.

11.5. Визначення однополюсних виводів первинної та вторинної обмоток

Принципова схема для визначення однополюсних виводів обмоток наведена на рис. 21.

Вимикач В може бути будь-якого типу. Джерелом постійного струму B може служити батарея сухих елементів на 4,5В (наприклад, та що використовується для кишенькових ліхтарів) або акумуляторна батарея на 6В з відомою полярністю виводів. Додатковий опір R_d обмежує струм до значення, безпечного для акумуляторів.

Як вимірювальний прилад A повинен застосовуватися магнітоелектричний міліамперметр або вольтметр із позначеною полярністю виводів, бажано з нулем посередині шкали. Якщо невідомі полярність виводів приладу або джерела струму, то їх необхідно звірити. Межа вимірювань міліамперметра 5-10 мА, вольтметра - 1,5-3 В. Якщо відхилення стрілки приладу виявляться недостатніми для чіткого визначення напрямку, то необхідно застосувати прилад з меншими межами вимірювань або збільшити напругу джерела постійного струму.

При короткочасному замиканні первинного кола вимикачем В стрілка приладу короткочасно відхиляється в яку-небудь сторону. Підбирається таке підімкнення приладу, щоб при замиканні первинного кола стрілка приладу відхилилася вправо.

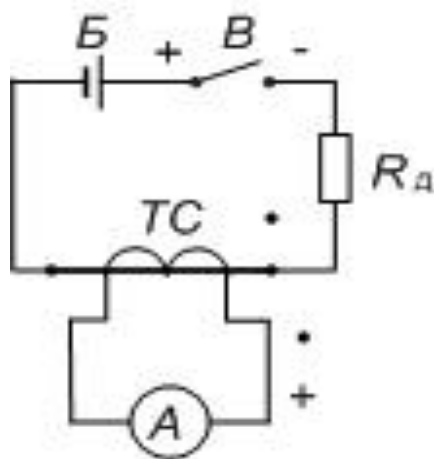


Рисунок 21 - Схема визначення однополюсних виводів трансформаторів струму.

Тоді однополюсними будуть виводи первинної й вторинної обмоток, приєднані до плюса батареї і плюса приладу. У цьому випадку при розмиканні первинного ланцюга можливо використовувати прилад з однобічним відхиленням стрілки. При цьому необхідно враховувати, що при відхиленні стрілки такого приладу вліво вона буде вдарятися в упор і відкидатися вправо.

Якщо у приладі з однобічним відхиленням є пристрій для встановлення стрілки на нуль, можна цим пристроєм зрушити стрілку вправо так, щоб було чітко видно, у яку сторону вона буде відхилятися.

При визначенні однополюсних виводів ТС, вбудованих у вводи вимикача, батарея повинна приєднуватися до штирів втулок однієї й тієї само фази включеного вимикача (рис. 22).

Вбудовані ТС на всіх виводах встановлюються однаково за заводськими написами «верх» і «вниз». Тому постійний струм від батареї буде спрямований у первинній обмотці ТС, встановленої на тому ввіді, до якого підімкнений плюс батареї, від «верху» до «низу», а в ТС, установленому на іншому ввіді, - навпаки, від «низу» до «верху». Стрілка приладу, підімкненого до вторинних обмоток однаково (наприклад, затискачем «плюс» до виводу А), буде відхилятися в різні сторони: у першого ТС - вправо, у другого - вліво. Цю особливість необхідно враховувати при визначенні однополюсних виводів вбудованих ТС.

Для визначення однополюсних виводів ТС, вбудованих у високовольтні вводи трансформатора (автотрансформатора), при сполученні обмоток у зірку, батарея підмикається до його виводів (рис. 23).

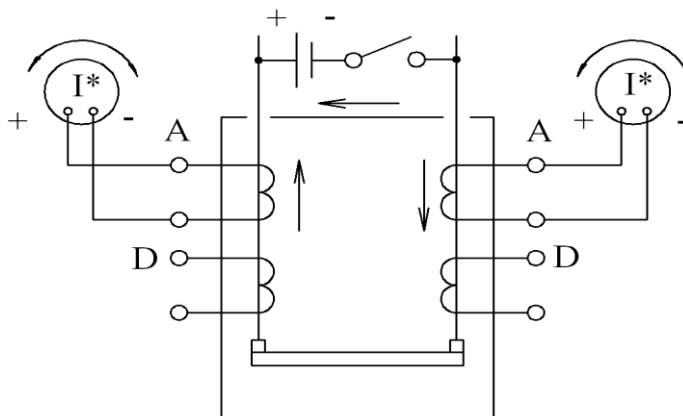


Рисунок 22 - Схема визначення однополюсних виводів трансформаторів струму, вбудованих у вимикач

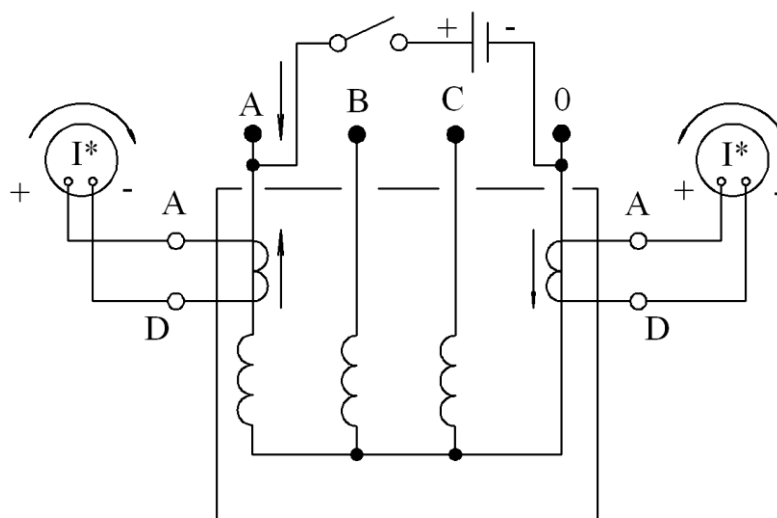


Рисунок 23 - Схема перевірки однополюсних виводів трансформаторів струму, вбудованих у високовольтні вводи трансформатора, при сполученні обмоток у зірку

Якщо обмотки трансформатора сполучені в зірку з виведеним нулем, то плюс батареї доцільно підмикати по черзі до виводів фаз *A*, *B*, *C* трансформатора (автотрансформатора), а мінус - до вводу нейтралі. Оскільки обмотки трансформатора мають великий опір у порівнянні з первинною обмоткою ТС, для

одержання чітких відхилень приладу необхідно підвищити напругу батареї або застосувати прилад з меншими межами вимірювань.

При визначенні однополюсних виводів ТС, вбудованих у вводи силових трансформаторів, які не мають виведеної нульової точки або обмоток, які мають сполучення у трикутник усередині бака, батарея підмикається по черзі до кожної пари фазних виводів трансформатора з дотриманням певної послідовності й полярності (рис. 24). Так, якщо при включенні на фази *A* і *B* плюс підмикається до фази *A*, то на другій парі фаз *B* і *C* плюс повинен підмикається до фази *B*, на третій парі фаз *C* і *A* - до фази *C*.

Однополюсний вивід вторинної обмотки в цьому випадку доцільно визначати у ТС, встановленого на тій фазі, до якої підімкнений плюс батареї. При включенні приладу на ТС тієї фази, до якої підімкнений мінус батареї, стрілки приладу будуть відхилятися у зворотну сторону - вліво.

Для визначення «верху» і «низу» у вбудованих ТС перед їх встановленням на місце по позначеннях виводів вторинної обмотки плюс приладу підмикається до виводу *A*. У вікно ТС просмикується провід, що з'єднує плюс і мінус батареї через вимикач і резистор.

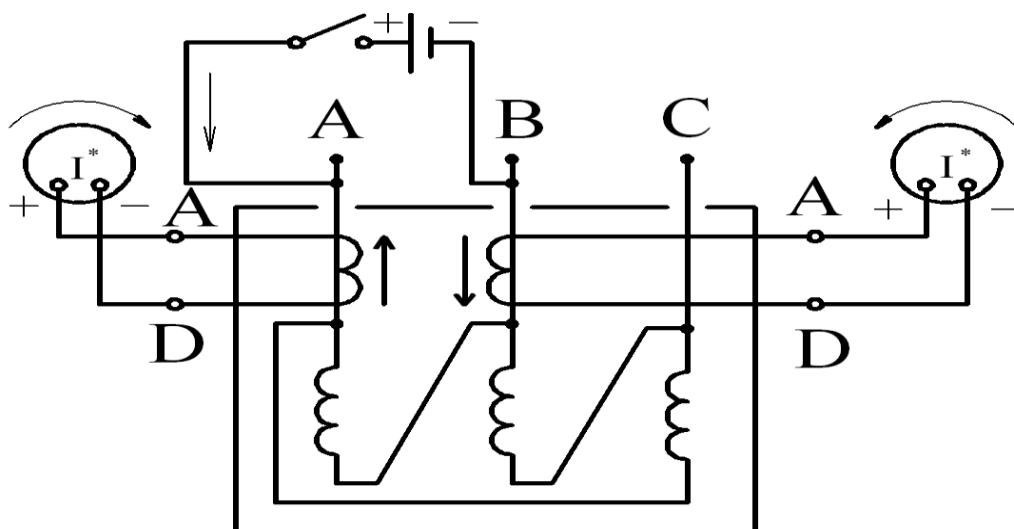


Рисунок 24 - Схема перевірки однополюсних виводів трансформаторів струму, вбудованих у високовольтні вводи трансформатора, при сполученні обмоток у трикутник

Батарея включається так, щоб при замиканні кола стрілка приладу відхилялася вправо. Сторона ТС, звернена до плюса батареї, буде «верхом», сторона, звернена до мінуса батареї, - «низом».

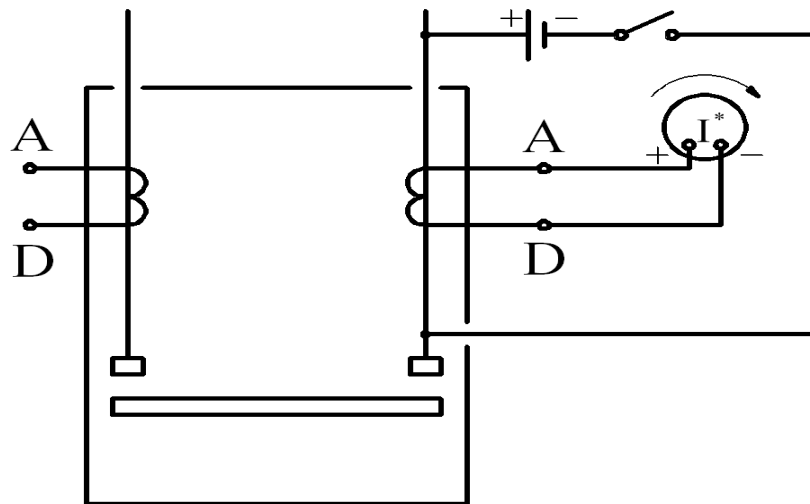


Рисунок 25 - Схема перевірки правильності монтажу трансформаторів струму, вбудованих у вводи вимикача

Визначення однополюсних виводів повністю змонтованого ТС є обов'язковим для всіх ТС, які не мають власної первинної обмотки і встановлюваних на втулки вимикачів і трансформаторів або на шини в місці монтажу.

У ТС, які надходять із заводу повністю складеними, із власними первинними обмотками (наприклад, ГПФ, ТПЛ, ТФН і т.п.), однополюсні виводи визначаються лише при непевності в правильності заводських позначень (відсутні або неясно виконані), якщо були ушкоджені й замінялися виводи вторинних обмоток і т.п. При цьому обов'язкова перевірка правильності схеми з'єднань вторинних кіл.

У вбудованих ТС, встановлюваних по місцю на заводі-виготовлювачі (наприклад, у вимикачі ВМ-35), однополюсні виводи визначаються тільки при сумніві в правильності заводських позначень, після зняття й установки ТС (наприклад, для сушіння) та в інших аналогічних випадках.

Після встановлення вбудованих ТС у вимикач (до заливання оливи) рекомендується перевірити правильність їх установки й монтажу виводів

вторинних обмоток. Для цього плюс батареї підмикається до штиря вводу вимикача, зверненого у бік шин, а мінус - до нерухомого контакту тієї само втулки через лаз у баку. Прилад підключається до виводів обмоток трансформаторів, установлених на цьому вході (рис. 25). За показами приладу перевіряється правильність установки ТС за написами «верх» і «низ» і правильність позначень (маркування) виводів вторинної обмотки. Якщо вимикач залитий оливою, то використовувати лаз у баку неможливо. У цьому випадку рекомендується провід від батареї приєднувати до металевого стрижня, що через отвір у баку для доливання оливи вводиться в бак для створення контакту з нижнім кінцем втулки або траверсою ввімкненого вимикача. Необхідно відмітити, що при цьому створюється можливість забруднення масла, ушкодження екранів і додаткових опорів вимикача. Крім того, у сучасних конструкціях нижня частина штиря втулки закрита дугогасильними камерами, і приєднати стрижень до кінця штиря дуже важко. Тому такий спосіб застосовується лише в крайньому випадку, а всі перевірки доцільно виконувати до заливання оливи.

При визначенні однополюсних виводів ТС на більші номінальні струми, особливо зі вторинним струмом 1 A , на затискачах вимірювального приладу Γ (рис. 21), включеного у вторинну обмотку, може короткочасно з'являтися висока напруга. Тому необхідно припинити всі інші роботи у вторинних колах трансформаторів, які перевіряються, а працівникам слід уникати дотику до струмопровідних частин вторинних кіл і приладу.

11.6. Перевірка вольт-амперних характеристик

ВАХ являє собою залежність напруги вторинної обмотки U_2 від струму намагнічування $I'_{\text{на}}$ при розімкненому колі вторинного навантаження. Вона є основною при оцінці справності ТС. Крім того, ВАХ в ряді випадків можуть бути використані при визначенні похибок ТС.

Найпоширеніша несправність ТС - виткове замикання - виявляється за різким зниженням ВАХ й зміною її крутизни. На рис.26, як приклад, показані ВАХ ТС ТВ-35 справного і при виткових замиканнях у вторинній обмотці.

Зниження ВАХ при витковому замиканні відбувається тому, що ТС з режимі холостого ходу (ХХ) переходить у режим КЗ. При цьому витки, що замкнули, є вторинною обмоткою, і її опір шунтує гілку намагнічування, що призводить до значного зменшення опору ТС. Відмітимо, що виткові замикання при інших перевірках (наприклад, коефіцієнта трансформації) зазвичай не виявляються.

ВАХ повинні перевірятися при новому включенні й повних планових перевірках ТС.

Справність ТС при новому включенні варто оцінювати порівнянням ВАХ з типовою характеристикою намагнічування, або, за відсутності останньої, з ВАХ інших ТС тих само типів, класу й коефіцієнта трансформації.

Типова характеристика намагнічування будується з умови однакової магнітної індукції на всіх ділянках сердечника, тому для створення більш близьких умов роботи сердечника при перевірці ВАХ струм намагнічування повинен подаватися у вторинну обмотку. При цьому різниця величин U_2 і E_2 несуттєва й може не враховуватися.

ВАХ за відсутності несправностей (виткових замикань) не повинна бути, як правило, нижче типової характеристики намагнічування з урахуванням допустимих відхилень, зазначених в інформації заводів-виробників.

Необхідно враховувати великий вплив методики перевірки ВАХ на результати вимірювань, тому що залежно від форми кривої напруги й струму намагнічування, а також типів використовуваних вимірювальних приладів можуть бути отримані різні характеристики для того самого ТС. На рис.26 показані ВАХ ТС типу ТВ-35. Верхня характеристика відповідає струму намагнічування, близькому до синусоїди й несинусоїдальної напруги, а нижня - синусоїдальній напрузі й несинусоїдальному струму намагнічування. При застосуванні схеми з потенціометром форма кривої напруги спотворюється

менше, ніж при регулюванні струму реостатом, і ВАХ розташовується трохи нижче.

ВАХ доцільно знімати при синусоїдальній напрузі. Однак, як показує досвід, одержати синусоїдальну напругу від звичайно застосовуваних схем з автотрансформаторами в багатьох випадках не вдається, і при знятті ВАХ в області насичення синусоїда напруги U_2 помітно спотворюється. При цьому змінюється й форма кривої струму намагнічування, яка починає наближатися до синусоїди. У результаті цих змін форми кривих напруги U_2 і $I'_{\text{нам}}$ ВАХ виявляється завищеною.

Вплив форми кривої напруги U_2 і струму $I_{\text{нам}}$ на результати перевірки ВАХ повністю виключається, якщо застосовувати для вимірювання напруги вольтметр, який реагує на середнє значення напруги, а для вимірювання струму - амперметр, який реагує на амплітудне значення струму. При цьому для побудови ВАХ слід використовувати відповідним показанням цих приладів діючі значення синусоїдальних струму і напруги

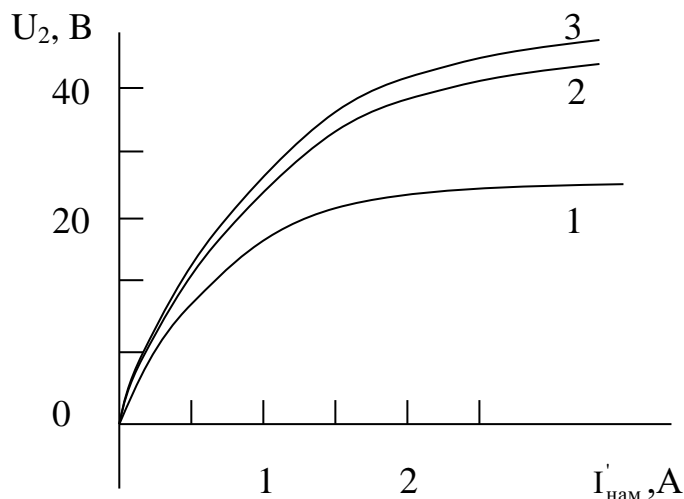


Рисунок 2 - Вольт-амперні характеристики трансформатора струму ТВ-35, 150/5 при перевірці різними способами - схеми: 1 - з автотрансформатором; 2 - з потенціометром; 3 - з реостатом.

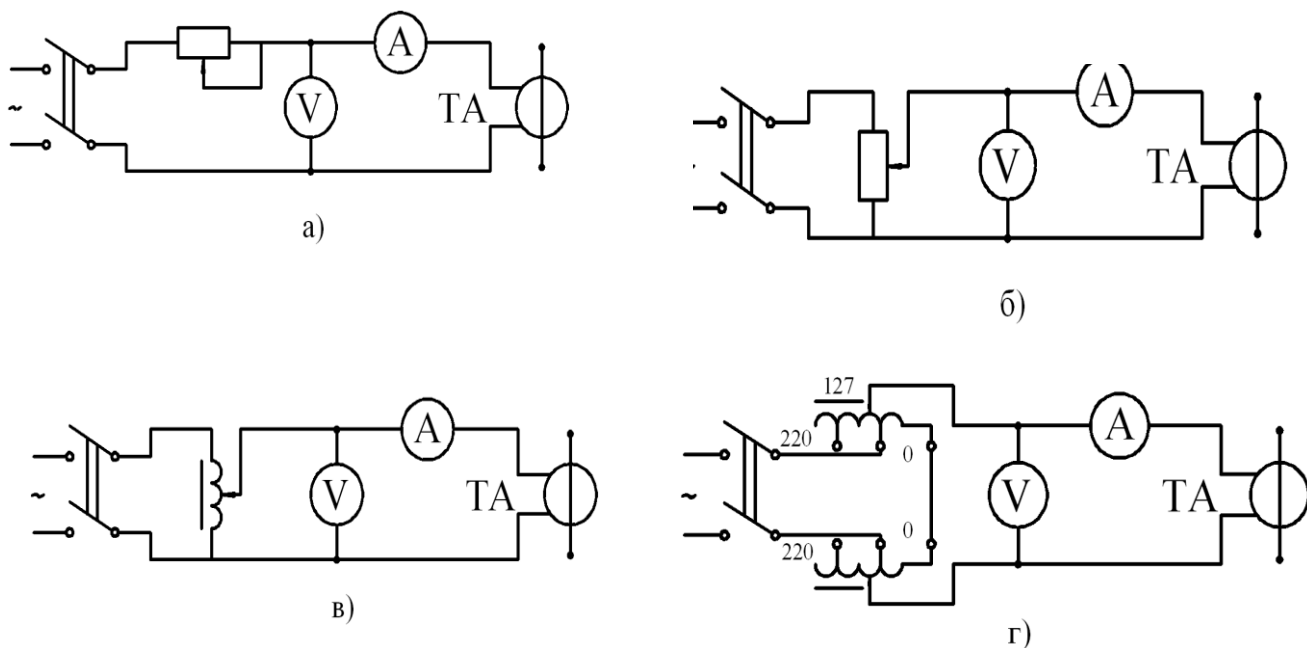


Рисунок 27 - Схеми перевірки вольт-амперних характеристик:

а - з реостатом; б - з потенціометром; в - з автотрансформатором; г - з двома автотрансформаторами ЛАТР-2.

Однак отримана при такому способі визначення U_2 і $I_{\text{нам}}$ ВАХ розташовується трохи нижче характеристики, знятої при синусоїдальній напрузі й вимірюванні діючих значень струму і напруги. Тому її рекомендується використовувати тільки для оцінки справності ТС при планових перевірках.

Для складання ВАХ з типовою характеристикою намагнічування при новому включенні, а також для її використання при розрахунку похибок варто було б знімати ВАХ, яка відповідає одержуваній при синусоїдальній напрузі U_2 і вимірюванні $I_{\text{нам}}$ і U_2 приладами, які реагують на діючі значення струму й напруги.

Така вольт-амперна характеристика може бути знята вольтметром, який реагує на середнє значення напруги, і амперметром, який фіксує діюче значення струму. При цьому допускається деяке спотворення форми кривої напруги, оскільки воно не впливає помітно на результати перевірки. Однак все-таки необхідно застосовувати випробувальну схему, що забезпечує максимально можливе наближення форми кривої напруги до синусоїди.

При планових перевірках є доцільним знімати ВАХ з боку вторинної обмотки, користуючись вольтметром, який реагує на U_{cp} , і амплітудним амперметром. Ця характеристика повинна порівнюватися з аналогічною, знятою при новому ввімкненні.

При новому ввімкненні застосовується випробувальна схема з автотрансформатором (рис.27, *в* або *г*) як забезпечуюча найменше спотворення синусоїди напруги. Схеми з реостатом і потенціометром (рис.27, *а* і *б*) застосовувати не рекомендується.

При складанні випробувальної схеми для перевірки вольт-амперної характеристики слід завжди вмикати вольтметр так, щоб його струм не вимірювався разом зі струмом $I_{нам}$. Це особливо важливо при знятті початкової частини характеристики намагнічування до значення струму 0,2-0,3 А. Для цього вольтметр потрібно вмикати, як показано на схемах рис.27.

При новому ввімкненні вольт-амперну характеристику слід знімати при робочому коефіцієнті трансформації до значення струму $I_{нам}$, яка дорівнює

$$I_{нам} = 0,1 K_{10} I_{2ном},$$

де K_{10} - гранична кратність при фактичному вторинному навантаженні ТС (може бути знайдена по кривій граничних кратностей).

При цьому у всіх випадках бажано охоплювати хоча б частково область насичення, де характеристика більш полого й тому менші похибки у вимірюванні напруги. У ряді випадків при $I_{2ном} = 1A$ не можливо зняти характеристику до зазначеного значення $I_{нам}$, тому що гранична кратність K_{10} звичайно відповідає початковій частині області насичення, де напруга може виявитися дуже високою. Так, на рис.28 показані характеристики намагнічування ТС типу ТФД і ТФНК, у яких область насичення починається при $E_2 = 1-1,5$ кВ, а на рис. 29, *а* і *б* - вбудованих ТС 35-500 кВ, у яких E_2 на початку області насичення на відгалуженнях з найбільшим K_1 становить 7-22 кВ, а на відгалуженнях з мінімальним K_1 - 1, 2-11 кВ. Подавати такі напруги на вторинні обмотки ТС неприпустимо.

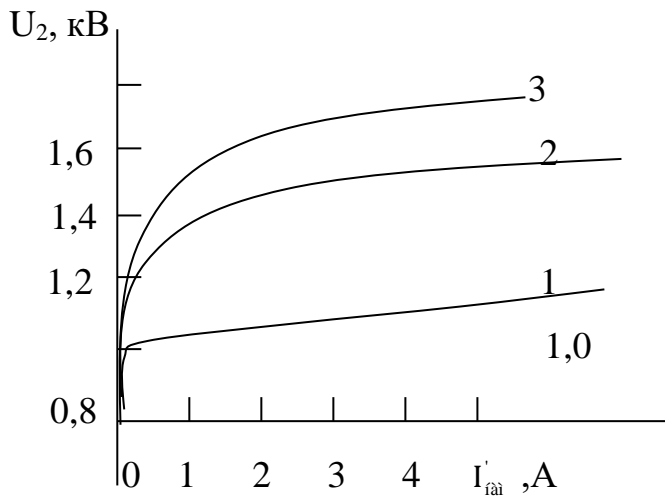


Рисунок 28 - Характеристики намагнічування багатовиткових трансформаторів струму з найбільш високими значеннями $E_2:1$ – ТФНК-200, 300-600-1200/1; 2 – ТФК-400, кл.1; 3 – ТФНК-500, кл.0,5.

При перевірці ВАХ напруга на вторинній обмотці не повинна перевищувати 1 кВ.

Для вбудованих та інших ТС, що мають відгалудження у вторинній обмотці, найбільша допустима напруга $U_{2роб\ max}$ для робочого відгалудження визначається за виразом

$$U_{2роб\ max} = 1000 K_{Iроб}/K_{Imax}$$

Так, при перевірці вбудованого ТС з $K_I = 1000-1500-2000/1$ на робочому відгалудженні 500/1 напругу не можна підвищувати понад

$$U_{2роб\ max} = 1000 (500/1)/(2000/1)=250В.$$

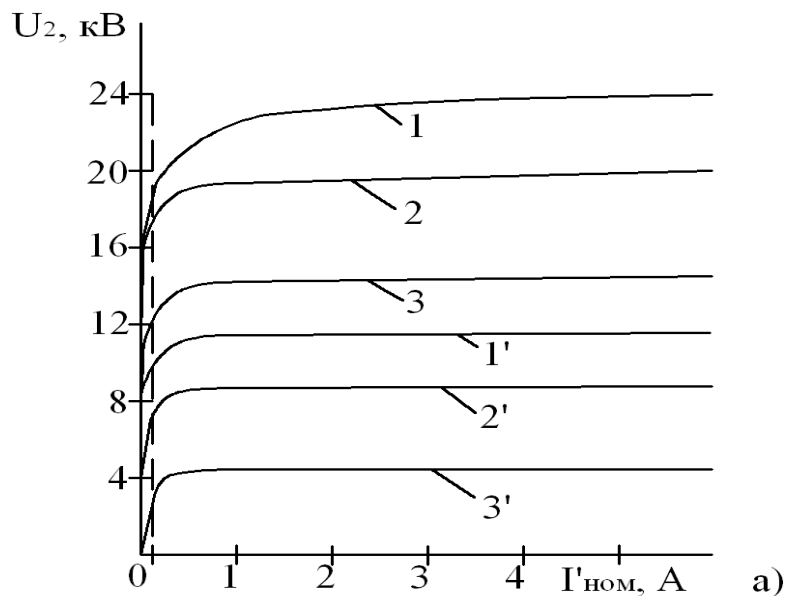
При перевірці ТС з високими значеннями E_2 може бути отримана лише початкова частина ВАХ. Однак цього досить для оцінки справності ТС. При перевірці таких ТС варто користуватися підвищувальним автотрансформатором.

При вимірюванні U_2 вольтметром, який реагує на середнє значення напруги, цілком прийнятні межі регулювання напруги (до 430-450 В) забезпечуються при перевірці за схемою рис. 27, з. За цією схемою напруга джерела живлення 220 В подається на затискачі автотрансформаторів 127 В, а при 380 В – на затискачі 220 В. Перевірка ВАХ каскадних ТС, які складаються із двох ступенів (рис.30) з номінальним вторинним струмом 1 А і високими

характеристиками намагнічування нижньої (другої) ступені, має додаткові особливості.

При новому ввімкненні ВАХ таких ТС (наприклад, ТФНК-400, ТФНК-500) повинні перевірятися окремо для кожного ступеня, для чого вторинну обмотку верхньої й первинну обмотку нижніх ступенів необхідно роз'єднати. При планових перевірках ВАХ можна перевіряти тільки для ТС нижнього ступеня без від'єднання верхньої. При цьому, коли перевіряється ВАХ кожного із ТС нижнього ступеня, вторинні обмотки інших трьох ТС того самого нижнього ступеня повинні бути замкнуті на своє навантаження [9].

При справному ТС верхнього ступеня його струм намагнічування не перевищує 2-3 % струму намагнічування будь-якого ТС нижнього ступеня, тому він майже не впливає на ВАХ ТС нижнього ступеня. У той же час виникнення несправності в ТС верхнього ступеня може бути виявлене при плановій перевірці за зміною ВАХ відразу у всіх ТС нижнього ступеня



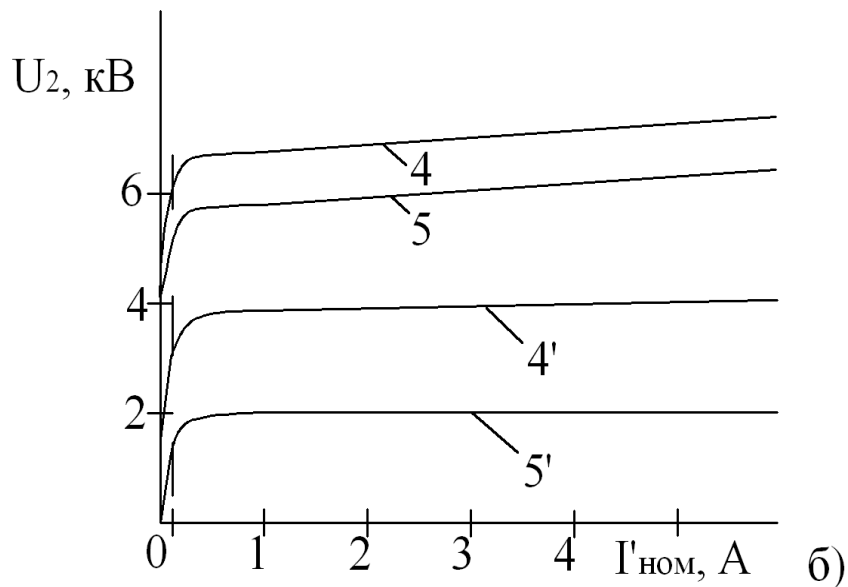


Рисунок 29 - Характеристики намагнічування вбудованих трансформаторів струму ТВД-500, 2000/1(1) і 1000/1(1'); ТДУ/5002000/1(2) і 1000/1(2'); ТВТ-35, 3000/1(3) і 1000/1(3'); ТДУ-110,2000/1(4) і 1000/1(4'); ТДУ-220, 2000/1(5) і 500/1(5') з найбільш високими значеннями E_2 при максимальних і мінімальних n_T :
а-500 і 35 кВ; б-110 і 220 кВ

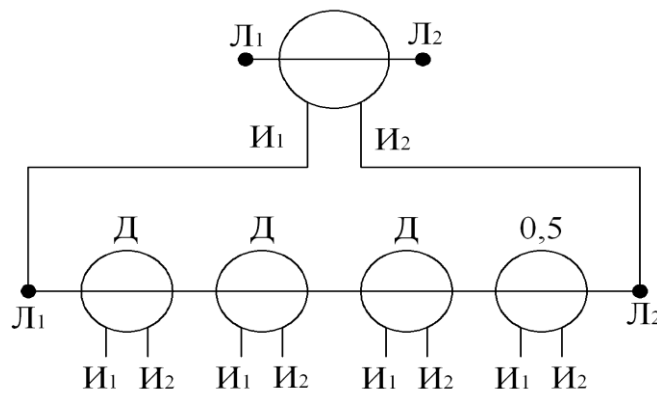


Рисунок 30 - Схема двоступінчастого трансформатора струму ТФНКД-500.

При планових перевірках ВАХ каскадних ТС рекомендується вимірювати струм намагнічування амперметром, який реагує на амплітудне значення струму, при обов'язковому вимірюванні напруги вольтметром, який реагує на середнє значення напруги. Якщо при перевірці буде помічено хоча б незначне зниження характеристики проти знятої при новому включенні, то слід окремо перевірити ВАХ ТС верхнього ступеня.

Необхідно відзначити, що для переважної більшості ТС забезпечується можливість перевірки ВАХ навіть в області глибокого насичення, тому що при цьому не потрібні напруга вище 250-400 В і струм більше 10-20 А.

Перевіряти ВАХ допускається з панелей захисту, якщо падіння напруги в опорі жил кабелів не внесе помітної похибки (більше 1 %) у вимір напруги U_2 . Як правило, такі перевірки можливі при номінальному вторинному струмі 1 А. При перевірці ВАХ ТС повинні бути повністю від'єднанні від пристроїв захисту й автоматики і заземлені.

11.7. Вимірювання омичних опорів вторинних обмоток

Знання омичних опорів вторинних обмоток іноді потрібно для проведення розрахунків по ТС. Крім того, це додаткова перевірка перехідних опорів самої обмотки. Вимірювання може проводитися одинарним вимірювальним мостом або методом вольтметра й амперметра. Похибка приладів повинна бути не вище 2%. Випробування не належить до числа обов'язкових.

11.8. Перевірка встановлених коефіцієнтів трансформації

Перевіркою коефіцієнта трансформації визначається його відповідність номінальному коефіцієнту трансформації. Ця перевірка обов'язкова для всіх ТС, які мають пристрої для зміни коефіцієнта трансформації - відгалудження від вторинної обмотки, секціонування первинної обмотки й т.п.

Залежно від призначення ТС перевірка коефіцієнта трансформації може здійснюватися первинним струмом від навантажувального пристрою або первинним струмом навантаження (останнє, якщо є можливість визначати значення первинного струму незалежно від ТС, що перевіряються).

Можлива також перевірка первинною або вторинною напругою від стороннього джерела. При цьому рекомендується застосовувати прилади

детекторної системи або електронні. Клас точності вимірювальних приладів до 2,5.

Перевірка може бути сумісною з іншими перевірками - перевіркою схеми вторинних з'єднань, перевіркою дії захисту на вимикач первинним струмом від навантажувального пристрою або перевіркою захисту первинним струмом навантаження. Навантажувальний пристрій може бути будь-якого типу й конструкції. Плавне регулювання значення первинного струму не обов'язкове.

Основна принципова схема перевірки первинним струмом від навантажувального пристрою наведена на рис. 31.

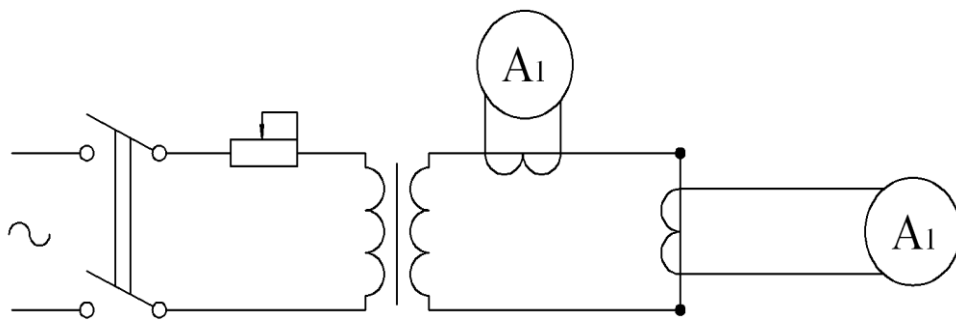


Рисунок 31 - Схема перевірки коефіцієнта трансформації

Значення первинного струму встановлюється достатнім для зручного й точного відліку показань вимірювальних приладів, зазвичай не менш 25% номінального струму, який перевіряється ТС, де гарантується його клас точності.

Відношення вимірних величин первинного й вторинного струмів дає приблизне значення коефіцієнта трансформації

$$n_{\text{ном}} = \frac{I_1}{I_2} \quad (11.8.1)$$

За цією схемою рекомендується перевіряти ТС з пристосуваннями для зміни коефіцієнта трансформації, наприклад вбудовані, й ТС на напругу 110 кВ і більше.

Коефіцієнт трансформації ТС, уже вбудованих у силові трансформатори, неможливо перевірити первинним струмом від навантажувального пристрою. У таких випадках рекомендується проводити перевірку методом КЗ. На виводах

однієї з обмоток силового трансформатора встановлюється трифазна закоротка, у три фази іншої обмотки через амперметри подається одночасно або по черзі напруга 220 В або 380 В від трансформатора власних потреб. У такий спосіб створюється первинний струм ТС, іншим приладом вимірюється значення вторинного струму ТС. За вимірними значеннями визначається коефіцієнт трансформації ТС.

Попередньо за паспортним даними визначається опір обмоток силового трансформатора. Вибирається короткозамкнена обмотка й обмотка, у яку подається напруга так, щоб одержати зручний для вимірювань первинний струм.

Первинні й вторинні струми звичайно виходять дуже малими, тому необхідно по опору розсіювання обмоток трансформатора й коефіцієнта трансформації ТС заздалегідь визначити значення первинного й вторинного струмів і підібрати підходящі межі вимірювань приладів. Для збільшення струму є доцільним встановити перемикачі регулювання напруги трансформатора в положення, яке відповідає мінімальній напрузі. Можливо й замикання накоротко одночасно двох обмоток триобмоткового трансформатора. При проведенні цих дослідів слід мати на увазі, що дуже малі струми можуть бути помітно спотворені самим ТС, що перебуває поза діапазоном точної роботи. Тому такий метод варто застосовувати, якщо не можна скористатися іншими способами.

Залежно від схеми сполучення трансформатора й місць устанавлення вбудованих ТС напруга власних потреб подається однофазна або трифазна, на фазу-нуль або на всі три фази трансформатора.

Одночасно з перевіркою коефіцієнта трансформації ТС можна зняти векторні діаграми, перевірити захист трансформатора, наприклад диференціальний, або перевірити правильність складання вторинних кіл.

При таких випробуваннях необхідно вжити спеціальних заходів щодо забезпечення безпеки робіт, оскільки при випадковому розмиканні замкненої обмотки на її виводах, а також на виводах третьої обмотки триобмоткового

трансформатора може з'явитися висока напруга, небезпечна для життя. З цих міркувань не рекомендується подача напруги в обмотку нижчої напруги трансформатора.

Принципово замість напруги власних потреб 380 В може бути використана напруга 6 або 10 кВ. Але для цього потрібен надійний монтаж тимчасової підводки високої напруги, підвищується небезпека для персоналу й потрібна значна потужність джерела напруги. Тому такий спосіб може застосовуватися лише в якихось особливих випадках, наприклад при сполученні перевірки ТС із перевіркою захистів трансформатора під навантаженням.

Якщо перевірка на закоротку чомусь неможлива, є доцільним перевіряти ТС первинним струмом навантаження. При перевірці струмом навантаження значення первинного струму варто визначати за показниками приладів, увімкнених на інші ТС, наприклад на ТС живильної лінії, ТС із боку нижчої напруги цього ж трансформатора з урахуванням його дійсного коефіцієнта трансформації і схеми сполучень. У крайньому випадку допускається порівнювати показання приладів, які вмикаються на всі вбудовані в ТС (звичайно вони встановлюються по двох на кожен фазу трансформатора). Якщо прилади вмикаються на різні фази по черзі, то необхідно забезпечити постійне значення навантаження.

Перевірка може бути оєднана з перевіркою захистів струмом навантаження. Так само перевіряється коефіцієнт трансформації ТС, що живлять захисти з реле, убудованими в привод вимикача, максимальні струмові й інші захисти, які вимагають перевірки відключення первинним струмом.

Перевірка коефіцієнта трансформації від навантажувального пристрою обов'язкова для ТС за відсутності заводських паспортів, позначень відгалуджень або секцій обмоток і т.п.

Для економії часу й зменшення можливості помилок при вимірюванні первинного й вторинного струмів рекомендується застосування приладів з вимірювальними кліщами. Обов'язкове застосування таких приладів для

вимірювання вторинного струму при перевірці дії захисту на відключення вимикача первинним струмом.

Можна визначати коефіцієнт трансформації методом вимірювання не струмів, а напруг. Вимірювання проводиться за принциповою схемою (рис. 32). Його можна поєднати зі зняттям ВАХ.

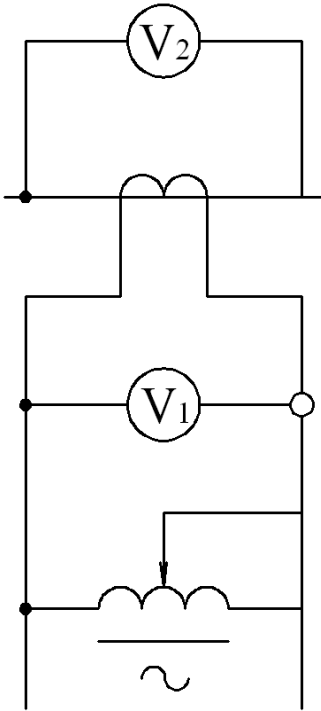


Рисунок 32 - Схема перевірки коефіцієнта трансформації вимірюванням напруг

У вторинну обмотку подається регульована змінна напруга, вимірювана вольтметром V_1 на первинну обмотку включається вольтметр V_2 , коефіцієнт трансформації $n_{\text{ном}}$

$$n_{\text{ном}} = \frac{U_1}{U_2}. \quad (11.8.2)$$

Можливий і зворотний варіант - з подачею напруги в первинну обмотку через понижувальний трансформатор. Він вимагає уважності від

експериментатора, щоб не одержати на вторинній стороні занадто великої напруги, і не дає ніяких переваг, оскільки однаково потрібний вольтметр із малою межею вимірювання. Вимірювання напруги U_1 може проводитися будь-яким приладом, напруга U_2 зазвичай дуже мала (менше 1 В), відповідно до цього слід підібрати шкалу вольтметра. Опір вольтметра V_2 повинен бути якомога більшим, щоб результати вимірювань не спотворювалися за рахунок падіння напруги в первинній обмотці від струму, споживаного вольтметром V_2 . Опір вольтметра V_2 повинен бути не менше 20 кОм/В. Для таких вимірювань потрібно використовувати електронні прилади або прилади детекторної системи із класом точності до 2,5. Щоб не було спотворень від насичення магнітопроводу трансформатора, напруга, яка подається у вторинну обмотку, повинна бути меншою напруги, при якій починається насичення магнітопроводу. Ця напруга визначається по ВАХ.

Таким способом легко визначити коефіцієнт трансформації в опорних ТС. Для вбудованих ТС після установки користуватися цим методом не можна - результати вимірювань будуть значно спотворені за рахунок втрати напруги U_2 в обмотках силового трансформатора.

Для вимірювання коефіцієнта трансформації вбудованих ТС, ще не встановлених на своє місце, необхідно виготовляти тимчасову первинну обмотку із проводу, установлюваного точно по осі отвору магнітопроводу. Відхилення первинної обмотки від центра може викликати спотворення за рахунок полів розсіювання вторинної обмотки, особливо якщо вимірювання проводяться на проміжних відпайках.

Спотворення результатів вимірювань можуть бути й за рахунок сторонніх магнітних полів, наприклад при роботі в діючому розподільному пристрої 6 - 10 кВ із великими струмами навантаження.

11.9. Перевірка встановлених відгалуджень обмоток

У ряді випадків доводиться визначати або перевіряти позначення відгалуджень від вторинної обмотки ТС, головним чином вбудованих. Рекомендуються два основних способи: по розподілі напруги в обмотці і по полярності відгалуджень.

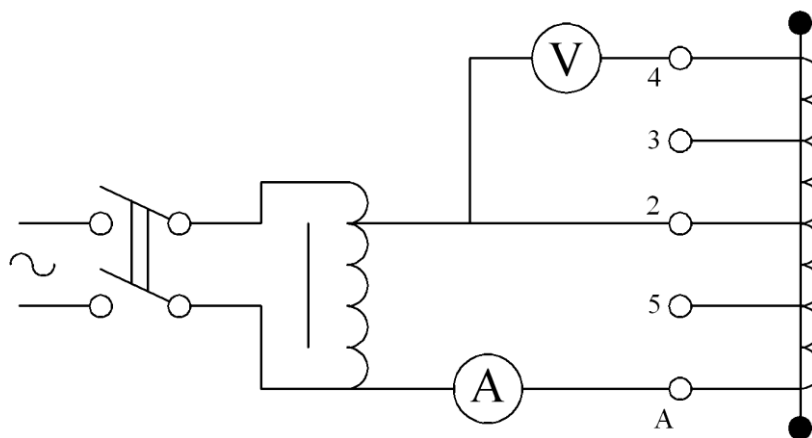


Рисунок 33 - Схема визначення відгалуджень по розподілі напруги

Схема перевірки за першим способом показана на рис. 33. Регульована напруга подається від автотрансформатора на будь-які два відгалудження

вторинної обмотки. Значення струму в обмотці контролюється амперметром й не повинно перевищувати номінального вторинного струму ТС.

Цей метод заснований на тому, що відмотування витків для компенсації похибок завжди проводиться від початкового виводу А. При визначенні відгалужень цим методом необхідно враховувати основні умови:

а) первинна обмотка ТС, що перевіряється, повинна бути розімкнута;

б) цим методом можна визначити тільки порядок відгалуджень і позначити їх прийнятим способом;

в) якщо відомий номінальний первинний струм ТС і його виконання, то можна визначити коефіцієнт трансформації на кожному відгалудженні за заводськими даними про число витків. Визначити коефіцієнт трансформації, не знаючи числа вторинних витків або номінального струму ТС, цим методом неможливо;

г) для правильного визначення виводів є доцільним скористатись заводськими даними про число витків обмотки. Якщо таких даних немає, а відомий найбільший номінальний коефіцієнт трансформації, то для одновиткових ТС повне число витків можна прийняти приблизно рівним коефіцієнту трансформації.

Один вивід вольтметра приєднується до виводу автотрансформатора, інший - по черзі до всіх інших відгалуджень обмотки. У цьому випадку вторинна обмотка ТС із відгалудженнями є автотрансформатором, і напруга на ній розподіляється пропорційно числу витків. Максимальній напрузі відповідають початок і кінець обмотки. Живлення від автотрансформатора перемикається на ці відгалуження. Для зручності роботи напруга встановлюється пропорційно числу витків обмотки, наприклад 1 В на 1 виток.

Вольтметром вимірюється напруга між кожним із цих відгалуджень і всіма іншими. Показання вольтметра будуть пропорційні (рівні при подачі напруги 1 В на 1 виток) кількості витків вторинної обмотки між відгалудженнями.

За числом витків вторинної обмотки визначаються позначення виводів і коефіцієнт трансформації на цьому відгалуженні. Необхідно враховувати, що у вбудованих ТС число витків вторинної обмотки зазвичай менше числа витків, визначених за теоретичним коефіцієнтом трансформації. Число витків зменшується для зниження похибки за коефіцієнтом трансформації. Відмотування витків для компенсації похибок завжди проводиться від початкового виводу А. Наприклад, в вбудованого ТС ТВД-220 з коефіцієнтом трансформації 400/5 теоретичне число витків вторинної обмотки повинне бути 80, у дійсності ж воно становить 78. Ця обставина використовується для визначення умовного "початку" обмотки, позначуваного буквою А.

Приклад. ТС, що перевіряється, має первинний струм 600 А, повне число витків 119 і п'ять виводів вторинної обмотки. Виводи в довільному порядку позначаються цифрами 1, 2, 3, 4, 5.

На виводи 2 і 4 подається напруга 50 В; вольтметр підмикається до виводу 2 і всіх інших, результати вимірювань записуються в таблицю 11.1.

Таблиця 11.1. Перевірка ТС

Номери виводів	Показання вольтметра, В
2-1	47
2-2	0
2-3	17
2-4	50
2-5	15

Найбільшу суму показань вольтметра одержуємо при вимірюванні напруг з виводів 2-1 і 2-4. Отже, 1 і 4 є виводами від повного числа витків.

Живлення перемикається на виводи 1-4, автотрансформатором встановлюється напруга 119 В (число витків всієї обмотки за даними заводу).

Результати вимірювань записуються в таблицю 11.2.

Таблиця 11.2. Перевірка ТС

Номери виводів	Показання вольтметра, В
1-2	58
1-3	79
1-4	119
1-5	39
4-1	119
4-2	61
4-3	40
4-5	80

З таблиці 11.2 видно (по зростанню напруги), що відгалуження, починаючи від виводу 1, йдуть по слідуєчому порядку 1, 5, 2, 3, 4.

Для визначення виводу А порівнюються показання вольтметра на відгалуженнях 1-5 і 4-3. Показання вольтметра на відгалуженні 1-5 були менше, ніж на відгалуженні 4-3. Отже, вивід 1 доцільно позначити А, вивід 5 - Б, вивід 2 - В, вивід 3 - Г и вивід 4 - Д.

Схема визначення відгалуджень за їх взаємними полярностями показана на рис. 34.

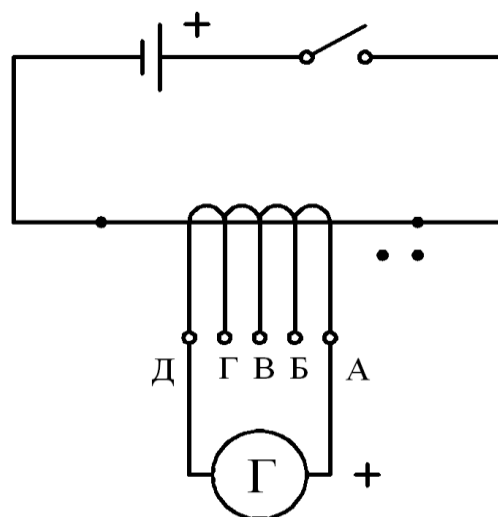


Рисунок 34 - Схема визначення відгалуджень за полярностями

Якщо відомі "верх" і "низ" вбудованого ТС, то можна визначити невідомі відгалудження його вторинної обмотки з їх полярністю. Виводи

вторинної обмотки позначаються довільно, наприклад цифрами 1, 2, 3, 4, 5. Плюс вимірювального приладу підмикають до виводу 1, другий вивід - по черзі до інших виводів, і визначається знак відхилення стрілки приладу при замиканні ключа в первинному колі. Потім плюс приладу підмикається до виводу 2 і визначається знак показання приладу при підімкненні другого виводу й замиканні первинного кола, і так далі до виводу 5.

За числом позитивних і негативних відхилень приладу визначаються відгалудження. Відгалудження, що дає всі позитивні відхилення приладу, буде виводом А, а всі негативні - виводом Д. Відгалудження, яке дає три позитивних і одне негативне відхилення, буде Б і ін.

У прикладі, наведеному в таблиці 11.3, відгалудження доцільно позначити:

$$3 \rightarrow A, 4 \rightarrow D, 1 \rightarrow B, 5 \rightarrow B, 2 \rightarrow G.$$

Результати вимірювань, знаки відхилення приладу заносяться в таблицю 11.3.

Таблиця 11.3. Визначення відгалуджень

		Мінус приладу підімкнений до виводів номер				
		1	2	3	4	5
Плюс приладу підімкнений до виводів номер	1		+	-	+	+
	2	-		-	+	-
	3	+	+		+	+
	4	-	-	-		-
	5	-	+	-	+	

11.10. Визначення навантаження на трансформатор струму

Дійсні навантаження на трансформатори найчастіше відрізняються від прийнятих в проекті, що пояснюється неточністю проектних даних про довжини кабелів, невизначеністю розрахункового значення перехідних опорів у контактах, приблизною оцінкою значення опору лічильника й проводів і т.п.

Крім того, часто в процесі монтажу змінюються довжина, перетин і матеріал кабелів; монтажні схеми, розподілення навантаження по обмотках ТС і т.ін. А оскільки похибки ТС залежать від величини вторинного навантаження, то визначення реального навантаження на ТС є складовою частиною розрахункової перевірки ТС.

Навантаження ТС складається з наступних елементів: опору проводів і кабелів, що пов'язують реле й прилади із ТС; опору реле й приладів, увімкннутих у коло ТС; перехідного опору в контактних сполученнях; внутрішнього опору - опору вторинної обмотки ТС.

Зовнішнє навантаження на ТС може бути визначене або безпосереднім вимірюванням з перерахуванням, що враховує схему сполучення ТС, або розрахунком з використанням даних каталогів на релейну й вимірювальну апаратуру й даних кабельних журналів.

При розрахунку зовнішнього навантаження ТС для спрощення приймається, що всі повні опори мають однакові кути, тобто можуть додаватися арифметично. Зазначене допущення прийнятно, оскільки внесена цим помилка зазвичай невелика і спрямована у бік додаткового запасу.

При значному розрахунковому навантаженні, коли необхідне застосування трансформатора іншого типу або кабелю більшого перетину, доцільно враховувати розходження кутів повних опорів (повні опори складаються геометрично). При розрахунковому визначенні зовнішнього навантаження опори окремих його елементів розглянутих ділянок проводів або кабелів, Ом на фазу, визначають за формулою

$$R_{\text{пр}} = l/\gamma s, \quad (11.10.1)$$

де l - довжина проводу або кабелю, м; γ - питома провідність, м/(Ом·мм²); s - перетин проводу або жили кабелю, мм².

Опір реле й приладів, Ом, визначається з каталогу на відповідну апаратуру безпосередньо або перерахуванням за наявними у каталозі даними про споживану потужність і струм по формулі

$$Z_p = S/I_2^2, \quad (11.10.2)$$

де S — потужність, $V \cdot A$, споживана реле або приладом при струмі I_2 , A .

Перехідний опір у контактах $R_{пер}$ приймається рівним 0,05-0,1 Ом.

Навантаження ТС в схемі залежать не тільки від опорів окремих ділянок їх вторинного кола, але й від схеми сполучення ТС й вигляду КЗ. Навантаження ТС підраховується для фази, найбільш завантаженої в розрахункових умовах, за формулою

$$Z_n = U_{тс}/I_2, \quad (11.10.3)$$

де $U_{тс}$ - напруга на виводах вторинної обмотки ТС при струмі в його вторинній обмотці I_2 .

Вирази для визначення зовнішнього навантаження ТС, виведені відповідно до цієї формули для різних найчастіше застосованих в експлуатації схем сполучення ТС й різних видів КЗ, наведені в табл. 11.4.

Таблиця 11.4. Розрахункові формули для визначення вторинного навантаження ТС.

Схема сполучення трансформаторів струму й навантаження	Вид КЗ	Зовнішнє навантаження на виводах вторинної обмотки трансформаторів струму
1. Зірка	Три- і двофазне	$Z_n = R_{пр} + Z_{р.ф.} + R_{пер}$
	Однофазне	$Z_n = 2R_{пр} + Z_{р.ф.} + Z_{р0} + Z_{пер}$
2. Трикутник	Три- і двофазне	$Z_n = 3R_{пр} + 3Z_{р.ф.} + R_{пер}$
	Однофазне	$Z_n = 2R_{пр} + 2Z_{р.ф.} + R_{пер}$
3. Неповна зірка	Трифазне	$Z_n = \sqrt{3} R_{пр} + Z_{р.ф.} + R_{пер}$
	Дво- (АВ або ВР) і однофазне	$Z_n = 2R_{пр} + Z_{р.ф.} + R_{пер}$
	Двофазне* за трансформатором λ/Δ	$Z_{нА} = 3R_{пр} + Z_{р.ф.} + R_{пер}$
4. На різницю струмів	Трифазне	$Z_n = \sqrt{3} (2R_{пр} + Z_{р.ф.}) + R_{пер}$
	Двофазне А С	$Z_n = 4R_{пр} + 2Z_{р.ф.} + R_{пер}$
	Одно- і двофазне АВ і ВС	$Z_n = 2R_{пр} + Z_{р.ф.} + R_{пер}$
	Двофазне** за трансформатором λ/Δ	$Z_{нА} = 3R_{пр} + 1,5Z_{р.ф.} + R_{пер}$ $Z_{нС} = 6R_{пр} + 3Z_{р.ф.} + R_{пер}$
5. Послідовна	Будь-який	$Z_n = 0,5 Z_{н.д.}$
6. Паралельна	Будь-який	$Z_n = 2 Z_{н.д.}$
7. Диференціальна Z	Трифазне***	$Z_{н\lambda} = R_{1пр.} + R_{пер}$

8,9. Урахування проміжних автотрансформаторів струму при підрахунку навантаження в диференціальній схемі	Трифазне***	Схема 8 $Z_H = R_{пр} + Z_{ат} + \frac{R'_{пр}}{n_{ат}^2} + R_{пер}$ Схема 9 $Z_H = 3(R_{пр} + Z_{ат} + \frac{R'_{пр}}{n_{ат}^2}) + R_{пер}$
--	-------------	--

* Струми у фазах А і С дорівнюють один одному й збігаються по фазі.

** Струм у фазі А дорівнює подвійному струму фази С и протилежний по фазі.

*** ТС диференціального захисту перевіряються в умовах наскрізного КЗ.

Примітка. У таблиці прийняті наступні позначення:

Z_H - зовнішнє навантаження, приведене до виводів вторинної обмотки ТС;

$Z_{ат}$ - опір автотрансформатора.

$R_{пр}, R_{лпр}, R'_{пр}$ - опір проводів і кабелів ($R_{лпр} = \frac{R'_{пр}}{n_{ат}^2}$);

$Z_{р.ф}$ - опір реле й приладів, включених у фазний провід струмових кіл;

$Z_{р0}$ - опір реле й приладів, включених у нульовий провід струмових кіл;

$R_{пер}$ - перехідний опір контактів;

$Z_{н.д.}$ - навантаження, визначене за відповідними виразами;

$Z_{нА}, Z_{нС}$ - навантаження ТС фаз А и С;

$Z_{нλ}, Z_{нΔ}$ - навантаження на ТС диференціальної схеми з боку зірки й з боку трикутника ТС;

$n_{ам} = \frac{I_2}{I_1}$ - коефіцієнт трансформації автотрансформатора.

З огляду на невизначене значення перехідних опорів контактів $R_{пер}$, при виведенні виразів навантаження, наведених у табл. 11.4, його додають до остаточного виразу.

Визначення опору навантаження розглянемо на прикладі ТС, сполучених у трикутник, при трифазному КЗ (див. табл.11.4, схема 2).

З рис. 35,а й б видно, що напруга на виводах вторинної обмотки ТС фази А складається із падіння напруги в опорах навантаження фази А від струму $(I_{A2} - I_{B2})$ і падіння напруги в опорах навантаження фази С від струму $(I_{C2} - I_{A2})$.

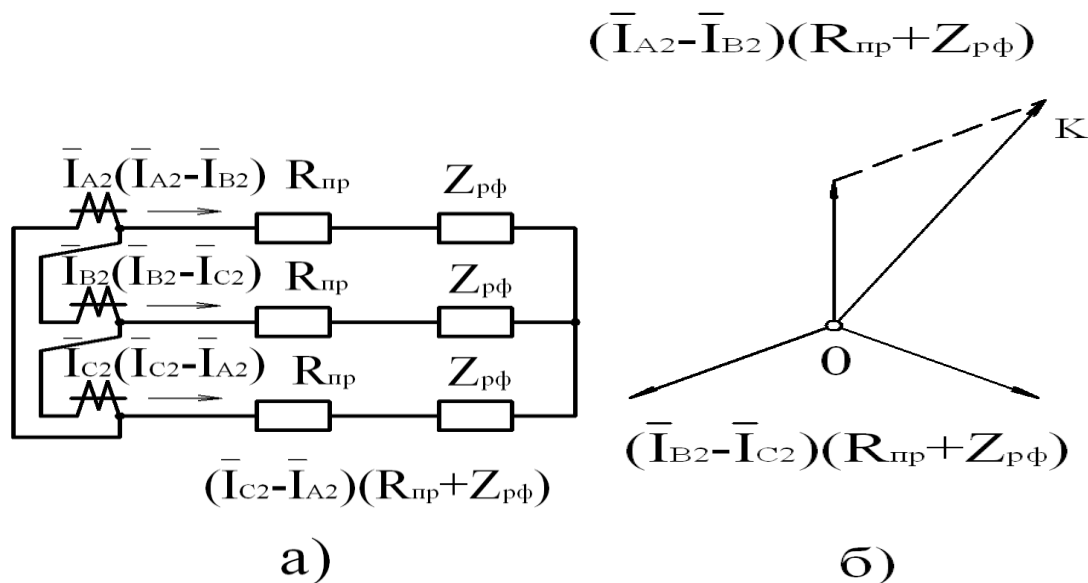


Рисунок 35 - Визначення навантаження на вторинну обмотку трансформаторів струму, сполучених у трикутник: а - схема сполучення; б- векторна діаграма напруг

Струми $(I_{A2} - I_{B2})$ і $(I_{C2} - I_{A2})$ рівні й зміщені один відносно одного на 120° . У таких же фазних співвідношеннях будуть знаходитись і падіння напруг від цих струмів у фазних опорах, як це показано на рис. 35, б. Враховувати фазовий зсув падінь напруги доцільно у всіх випадках, тому що це дає значно більший ефект, ніж враховувати розходження в кутах повних опорів.

Відповідно до прийнятого позитивного напрямку струмів напруга на виводах вторинної обмотки ТС буде виражатися вектором ОК, що у $\sqrt{3}$ раз більше вектора падіння напруги у фазних опорах $(R_{np} + Z_{p.\phi})$. Використовуючи попередню формулу, маємо для фази А

$$Z_p = U_{T.TA}/I_{A2} = ((I_{A2} - I_{B2})(R_{np} + Z_{p\phi}) - (I_{C2} - I_{A2})(R_{np} + Z_{p\phi}))/I_{A2}. \quad (11.10.4)$$

Переходячи до кількісних співвідношень і з огляду на зазначений вище вектор ОК, а також те, що за абсолютним значенням одержимо

$$|I_{A2} - I_{B2}| = |I_{C2} - I_{A2}| = \sqrt{3} \cdot I_{A2},$$

$$Z_a = \frac{\sqrt{3}(I_{A2} - I_{B2})(R_{np} + Z_{p\phi})}{I_{A2}} = \frac{\sqrt{3}\sqrt{3}I_{A2}(R_{np} + Z_{p\phi})}{I_{A2}}, \quad (11.10.5)$$

спростивши й додавши $R_{пер}$, остаточно одержимо

$$Z_a = 3R_{np} + 3Z_{p.\phi} + R_{пер}. \quad (11.10.6)$$

Навантаження ТС інших фаз визначається цією само формулою. Вивід виразів для визначення навантаження на ТС в інших випадках аналогічний.

11.11. Визначення номінального опору насичення

Визначення $Z_{нас}$ повинно проводитися при новому ввімкненні для тих ТС, при розрахунку яких необхідний цей параметр. За наявності декількох ТС того самого виконання, що мають мало відмінні ВАХ, досить визначити $Z_{нас}$ для такого ж трансформатора з аналогічною ВАХ.

Знята характеристика порівнюється з характеристиками справних ТС, однотипних з перевіреним. Відмінності не повинні перевищувати 10%.

11.12. Перевірка перехідних омичних опорів струмових кіл

Спосіб перевірки полягає у визначенні кута між вектором струму й вектором падіння напруги у вторинних колах ТС і, якщо цей кут порівняний з кутом відповідної фази, попередньо визначеної після налагодження або експлуатаційної перевірки струмом навантаження, встановлюють справність вторинних кіл ТС.

Випробування під навантаженням здійснюють після налагодження або експлуатаційної перевірки, а також за необхідності в процесі експлуатації. Знімається векторна діаграма вторинних кіл ТС, потім на першій клемі після ТС знімається фаза падіння напруги на струмових колах фаз А, В, С відносно напруг U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} .

У випадку будь-яких порушень у колах струму (крім обриву) положення вектора вторинного струму практично не змінює свого положення щодо первинного струму навантаження. Одночасно вектор падіння напруги щодо первинного струму навантаження в цьому випадку завжди змінює своє положення внаслідок порушення співвідношення активного й індуктивного опорів. У процесі експлуатації періодично перевіряються кути падіння напруги.

За відсутності порушень кут між падінням напруги й струмом навантаження не повинен змінюватися незалежно від зміни кута струму навантаження.

У процесі експлуатації найчастішим ушкодженням є збільшення перехідних опорів контактів вторинних кіл ТС у середині струмових затискачів і контактів алюмінієвих жил кабелю, ушкодження яких пов'язане із текучістю даного металу.

11.13. Перевірка повторного замикання на землю

Для фіксації повторного замикання на землю в колах струму необхідно за допомогою струмовимірювальних кліщів визначити наявність струму в провіднику, що використовується для заземлення вторинних кіл ТС. За умови малих струмів (менш 20 мА) або замиканні на значній відстані від ТС неможливо визначити наявність струму приладами. У цьому випадку знімаються векторні діаграми для малих струмів навантаження, використовуючи резервну жилу контрольного кабелю.

До потенціального затискача приладу підключається резервна жила, а до непотенціального (нульового) - жила кабелю, яка випробується. На протилежній стороні кабелю встановлюється перемичка між резервною й випробуваною жилою. Вектор падіння напруги на жилі кабелю (активний опір) буде збігатися з вектором вторинного струму жили, яка випробується. Наведені напруги в резервній і випробувальній жилі кабелю будуть взаємно компенсуватися.

Питання для самоперевірки

- 11.1. Які існують види перевірок ТС?
- 11.2. Які перевірки ТС проводяться один раз на три роки?
- 11.3. Навіщо необхідна перевірка обриву кола ТС?
- 11.4. Навіщо проводиться визначення однополюсних виводів первинної й вторинної обмоток ТС?
- 11.5. Який вигляд має ВАХ ТС при витковому замиканні?
- 11.6. Як проводиться оцінювання справності ТС порівнянням ВАХ з типовою характеристикою намагнічування?

- 11.7. Як впливає методика перевірки ВАХ на результати вимірювань?
- 11.8. Як впливає призначення ТС на перевірку коефіцієнта трансформації?
- 11.9. Навіщо проводиться перевірка відгалуджень обмоток ТС?
- 11.10. Як впливає навантаження ТС на його похибку?
- 11.11. Навіщо проводиться перевірка номінального опору насичення?

12. Оптичні трансформатори струму

Більше ста років в електроенергетиці для високовольтного вимірювання змінного струму застосовують електромагнітні вимірювальні трансформатори струму (ТС). Принцип роботи, яких заснований на відкритому Фарадеєм законі електромагнітної індукції. Іншим відкритим явищем Фарадеєм є поворот площини поляризації лінійно поляризованого світла в постійному магнітному полі [21]. Це явище стало першим доказом прямого зв'язку електромагнітних та оптичних явищ.

Роботи зі створення оптичних датчиків струму на основі ефекту Фарадея проводилися ще на початку 70-х років минулого століття. Тоді ж у світі створили промислове оптичне волокно (ОВ), яке намагалися застосовувати не лише для дистанційної передачі оптичних сигналів, але, і в якості чутливого елемента волоконно - оптичних датчиків струму, які використовують ефект Фарадея. Але тоді технологія ще не дозріла для створення конкурентоспроможних промислових зразків вимірювальних трансформаторів струму (ОТС).

В нас час розробкою оптичних датчиків займається ряд компаній, серед яких виділимо канадську компанію NxtPhase Corporation, шведську фірму PowerSense, американські фірми Airak, OptiSenseNetwork та FieldMetrics.

Основні переваги ОТС в порівнянні з їх електромагнітними аналогами полягають в наступному:

- можливість масштабного вимірювання та перетворення змінного (до 100 кА) та постійного або імпульсного (до 600 кА) струму різних рівнів напруги (до 800 кВ);

- оптико-електронне малоінерційне перетворення світлових сигналів із відсутністю явищ гістерезису, залишкового намагнічування та магнітного насичення, які є характерними для електромагнітних аналогів і обмежують їх динамічний діапазон і точність вимірювань;

- великий динамічний діапазон ($0,1-200 \% I_{\text{ном}}$) і висока точність ($0,1-0,2 \%$) для вимірювань та захисту струмових ланцюгів, що досягається за допомогою використання поляризованих світлових сигналів та їх цифрової обробки;

- широка смуга пропускання сигналів (не менше 6 кГц), що дозволяє виконувати повний аналіз не лише кількості, але і якості електроенергії в частині гармонік (до 100 гармонік) та перехідних процесів (для захисту);

- можливість інтеграції в вимірювальні та інформаційні системи з використанням різних інтерфейсів - аналогових, дискретних та цифрових;

- висока стійкість до електромагнітних перешкод, що дозволяє встановлювати вироби в складній електромагнітній обстановці без її попереднього аналізу і корекції;

- довговічність, довготривала стабільність та висока повторюваність метрологічних параметрів виробів;

- низька чутливість до вібрацій і змін температури;

- малі масо-габаритні параметри.

Застосовувати ОТС найбільш ефективно в середньо та високовольтних електричних мережах. Це пояснюється тим, що найбільш складні питання забезпечення ізоляції вирішуються автоматично за рахунок фізичної природи перетворювача, так як елементи оптичного волокна являються діелектриками. Тому легко забезпечується гальванічна розв'язка вимірювального та високовольтного кола, підвищується безпека при експлуатації даних приборів.

Конструкція і характеристики ОТС. Типова схема ОТС містить чутливий елемент у вигляді декількох витків оптичного волокна, поміщених в жорстку захисну оболонку із немагнітного матеріалу - струмову головку, і електронно - оптичний блок (ЕОБ), що сполучається з чутливим елементом безпосередньо або через оптичний крос (рис. 36) [21].

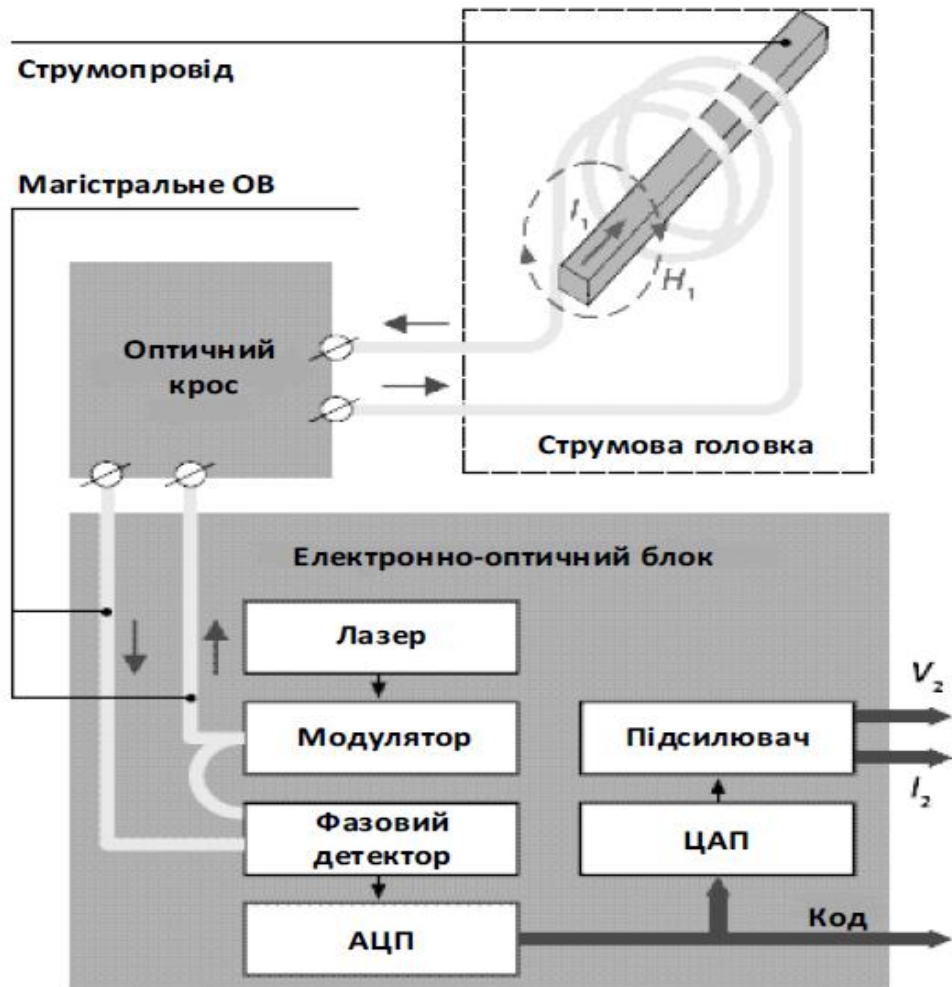


Рисунок 36 - Спрощена структурна схема оптичного ТС

ЕОБ генерує за допомогою вбудованого лазера і модулятора на своєму оптичному виході монохроматичний циркулярно поляризований світловий сигнал, що направляється по ОВ, який підтримує поляризацію, на вхід чутливого елемента. В чутливому елементі площина поляризації сигналу піддається під впливом магнітного поля H_1 струму I_1 відповідного повороту на кут Фарадея, і з виходу чутливого елемента світловий сигнал надходить на оптичний вхід ЕОБ, де на фазовому детекторі з нього формується електричний вимірювальний сигнал.

Далі цей сигнал через аналого-цифровий перетворювач (АЦП) надходить у вигляді цифрового коду певної розрядності на дискретний інтерфейсний вихід ЕОБ і через цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) на підсилювач, де формуються нормовані аналогові вихідні сигнали у вигляді напруги або струму

для видачі на аналоговий інтерфейс ЕОБ. Таким чином, вимірювальна інформація може бути отримана на виході ЕОБ для подальшого використання.

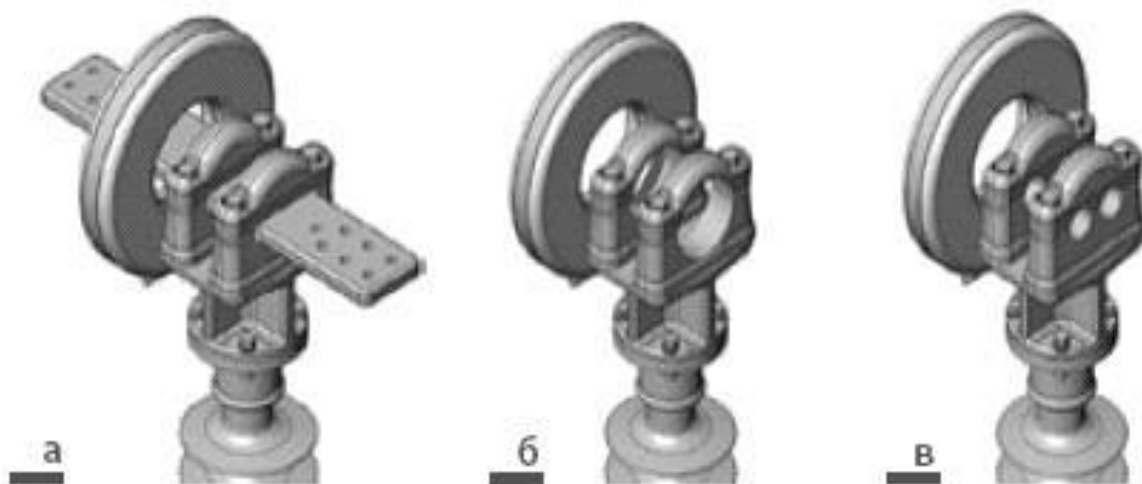
У тому випадку, коли чутливий елемент за технологічними вимогами, наприклад, на високовольтних підстанціях, повинен бути дистанційно (до 1 км) віддалений від ЕОБ, для підключення чутливого елемента додатково використовується магістральний ОВ, що зберігає поляризацію, і кросовий блок (кабельний бокс), що включає його до ОВ чутливого елемента.

Склад обладнання і функції, які повинен виконувати ЕОБ, залежать від виробника і карти замовлення виробу. Зокрема, ЕОБ, що містить вбудований годинник, мікропроцесор і пам'ять, здатний перетворювати в реальному часі поточні цифрові коди АЦП в іменовані цифрові результати вимірювань основної та похідної гармоніки вимірюваного струму, накопичувати їх в пам'яті за різні інтервали часу і видавати результати вимірювань через цифровий інтерфейс в цифрову обчислювальну мережу об'єкта або суб'єкта обліку. Тим самим ОТС або ОПС, на відміну від їх електромагнітних аналогів, легко можна включати в ті чи інші цифрові системи (наприклад, цифрові підстанції відповідно до стандарту [22]), минаючи проміжне використання вимірювальних приладів.

Конструкція струмових головок для ОТС залежить від конструкції високовольтних шин на об'єкті обліку, з якими ці головки повинні сполучатися. На рис. 37 наведені три варіанти струмових головок одного з провідних світових виробників ОТС / ОПС (NxtPhase Corporation) для шин різного виду.

У ОТС струмові головки встановлюються на вершині ізоляційних колон (рис. 37) , які виконують одночасно функції опори шини з головкою, захисту ОВ від впливів зовнішнього середовища (ОВ проходить всередині колони від головки до кросовому блоку, розміщеному, як правило, в основі колони) і додаткової електричної ізоляції кросового блоку і персоналу, що працює з ОВ біля основи колони. Для забезпечення опорної функції колона виготовляється у вигляді спіралеподібного циліндра необхідної висоти, а для забезпечення його

захисної і ізоляційної функцій використовують композитний матеріал (склопластик) з високими ізоляційними і антикорозійними властивостями.



а) для плоскої шини; б) для одиначної круглої шини; в) для спарених круглих шин

Рисунок 37 - Конструкція струмових головок ОТС виробництва NxtPhase Corporation

В ОПС замість стандартної струмової головки використовується вимірювальна петля, форма і розмір якої підбираються під ту струмоведучу шину, в якій необхідно виміряти струм. ОПС з такою змінною петлею називають трансформованим.

На відміну від ОТС, що застосовуються на високовольтних підстанціях для вимірювань змінного струму промислової частоти, ОПС використовують, як правило, при вимірюванні великих змінних або постійних струмів в різних технологічних процесах на енергоємних виробництвах, наприклад, в електрометалургійній або електрохімічній промисловості. Приклад підключення ОТС показаний на рис. 38.

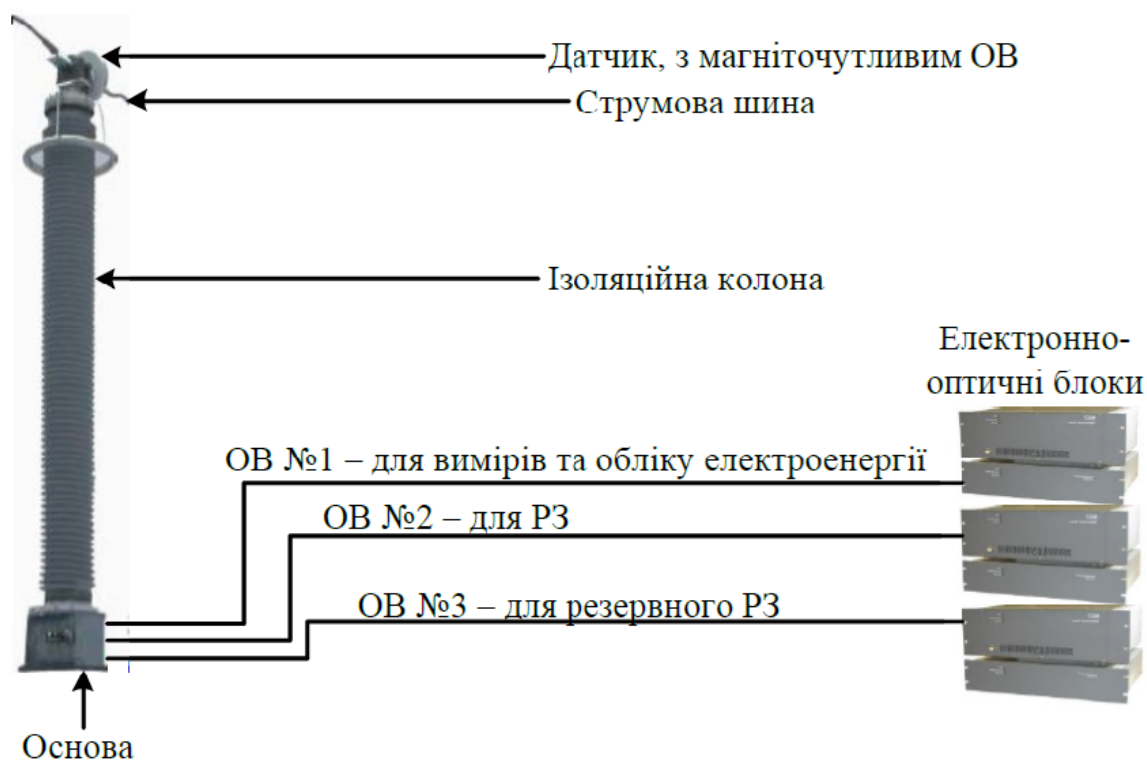


Рисунок 38 - Конструкція ізоляційної колони з пристроєм ОТС

Загальні технічні та метрологічні характеристики ОТС і ОПС нормуються тим же стандартом, що і для електромагнітних ТС. Специфічні характеристики ОТС і ОПС, включаючи вимоги до їх конструкції, тестування, точності вимірювання гармоніки (для систем вимірювання, захисту і контролю якості електроенергії), аналогового і цифрового інтерфейсу, нормуються стандартом МЕК [22].

Розглянемо детальніше деякі характерні особливості ОТС та ОПС, які випускаються серійно.

Компанія NxtPhase Corporation випускає:

- високовольтні вимірювальні оптичні перетворювачі струму NXST для вимірювання струму до 4 кА з класом точності 0,5 в мережах 60-750 кВ;
- високовольтні вимірювальні оптичні перетворювачі напруги NXVT для вимірювання в діапазоні 138-500 кВ з класом точності 0,25;
- вимірювальні оптичні перетворювачі, які трансформують NXST-F3, призначені для вимірювання струмів до 100 кА в колах змінного струму і до

600 кА в колах постійного струму, що дає можливість їх використовувати в металургійній та хімічній промисловості.

Компанія FieldMetrics, Inc. заснована в 2001 р. та спеціалізується на розробці та виробництві трьох ліній оптоволоконних датчиків для енергетичних мереж змінного струму напругою 11-36 кВ: MetPod, FiberMetPod, MetPodLite класу точності 0,2. В лінійку MetPod входять комбіновані датчики струму та напруги, які можуть встановлюватися безпосередньо на опорі. Електронний блок з автономним блоком живлення виконаний в єдиній конструкції з датчиками. Зв'язок з пунктом збору та обробки інформації виконується по радіоканалу потужністю до 1 Вт.

FiberMetPod передбачає інтегроване виконання датчика струму та електронного перетворювача оптичного сигналу в цифровий код, розміщені в легкому міцному корпусі. Безпосередньо на корпусі монтується радіопередавач, який забезпечує безпроводний зв'язок з диспетчерським пунктом.

MetPodLite – датчик струму класу 0,3, полегшеної конструкції, монтується на ізольованій штанзі, підключеній між активним проводом та нейтраллю. Датчики мають більш низьку вартість порівняно з MetPod.

Крім обладнання для контролю параметрів середньовольтних мереж, фірма активно розробляє та впроваджує датчики класу 0,3 для високовольтних мереж. В основі цих датчиків лежить модульний принцип побудови з використанням опорних модулів на 15 кВ, із яких можливо зібрати датчики для мереж до 750 кВ.

Компанія PowerSenseA/S, заснована в 2006 р., запропонувала споживачам лінійку вимірювального обладнання Discos, в яку входять оптоволоконні датчики струму та напруги та комбіновані датчики струму/напруги, призначені для роботи в мережах 36 кВ. Діапазон вимірювання струмів – від 5 А до 20 кА з похибкою 2%, похибка при вимірюванні напруги – 1%. Самі датчики встановлюються на штанзі та оптоволоконному з'єднанні з оптичним модулем, розміщеному на опорі.

Компанія OptisenseNetwork, заснована в 2001 р., спеціалізується на виробництві компактних датчиків струму та напруги, які використовуються в мережах з напругою 35 кВ.

Компанія Airak, Inc. випускає оптоволоконні датчики, які відрізняються найменшими масо-габаритними показниками. Оптоволоконні датчики напруги цієї фірми разом з п'ятиметровими виводами мають масу всього 170 г. Датчик напруги розміщений на спеціальній платформі, яка розміщена на опорі. Стандартний діапазон вимірювання напруги – 5 кВ (із змінною комірки Поккельса діапазон може бути збільшений до 13,8 кВ). Максимальна приведена похибка складає 5%, типова – 1%.

Недоліками датчиків напруги фірми Airak, Inc являються низька точність вимірювання та малий діапазон вимірювання напруги. Істотним недоліком для його застосування являється також температурний діапазон – 0...50°C.

Кращі показники мають датчики струму цієї фірми. Струмовий діапазон для повітряних ліній дозволяє вимірювати струми в діапазоні від 3 А до 1 кА (можливі версії до 15 кА) з похибкою, яка не перевищує 1%. Він працює в діапазоні температур -40...+85°C. Маса цих датчиків не перевищує 570 г, що дозволяє легко змонтувати їх прямо на проводах, не виконуючи роз'єднання лінії.

Компактність та мала маса останнього датчика привертає увагу розробників систем контролю та управління енергетичними системами на неземному, морському та повітряному транспорті. В США в рамках програми по модернізації морського флоту розробляється так звана «повністю електричні» кораблі. Для забезпечення моніторингу та управління усіма системами корабля потрібно близько 10000 електричних датчиків. Таку задачу неможливо вирішити з використанням традиційних датчиків, включаючи датчики Холла. В зв'язку з цим фірма Airak, Inc спеціально для цього розробила надмініатюрні оптоволоконні датчики струму та напруги з похибкою вимірювання 1%.

Представляє інтерес датчик, призначений для вимірювання струму та напруженості магнітного поля при застосуванні в стаціонарному обладнанні. Датчик має масу 28 г та встановлюється на шину. Струми вимірюються в діапазоні від 3 А до 3 кА з похибкою 1%.

Компанія АВВ, Inc. відома, перш за все струмовими датчиками, що використовуються в колах постійного струму, робота яких заснована на ефекті Холла. Перетворювачі такого типу надійні, але дуже складні, а їх маса може досягати 2000 кг. При їх установці також необхідні складні процедури настройки для виключення впливу асиметричного поля та перехресних наводок з розміщених поряд шин. Для рішення цих та других проблем компанія АВВ розробила новий оптоволоконний датчик струму (FiberOpticCurrentSensor, FOCS). Порівняно з датчиками Холла нові датчики мають наступні переваги:

- тривалість встановлення та вводу в експлуатацію вимірюється годинами, а не днями;
- різко знижується складність системи;
- прилади не схильні впливу магнітних полів складних конфігурацій та перехресним наводкам від сусідніх шин;
- збільшується точність (до 10-кратного зменшення похибки);
- широка полоса пропускання забезпечує швидку реакцію на пульсації та нестиковки струмів;
- датчики забезпечують вимірювання постійних струмів як в одному, так і в двох напрямках. Датчик дозволяє вимірювати струми від 0 до ± 500 кА з похибкою 0,1% в діапазоні частот від 0 до 4 кГц. Маса однієї секції – 5 кг.

Застосування таких датчиків в металургійній та хімічній промисловості може суттєво підвищити ефективність виробництва та дати значний економічний ефект. У виробництві алюмінію, міді, марганцю, цинку, сталі та хлору потрібні дуже великі об'єми електроенергії. Електронні ванни для виробництва алюмінію звичайно живляться постійною напругою 1000 В та споживають струм до декількох сотень кілоампер. Необхідно врахувати, що

помилка на 0,1% у вимірюванні струму 500 кА приводить до помилки обліку потужності на 0,5 МВт.

Компанія АВВ, Inc рахується одним із лідерів в розробці і оптоволоконних датчиків для високовольтних електроенергетичних мереж. Магнітооптичні датчики струму (Magneto-OpticCurrentTransformer, МОСТ) цієї компанії може використовуватися в мережах з напругою від 75,5 до 800 кВ для вимірювання струмів до 3,5 кА.

Як слідує із запропонованого огляду, клас оптичних датчиків струму може зайняти суттєве місце в системах моніторингу, контролю та управління в енергетиці, металургійній, хімічній, суднобудівельній та оборонній промисловості.

Приклад реалізації схеми вимірювання.

Як приклад можна обрати вимірювальний оптичний перетворювач типу NXCT-F3.

Перетворювач NXCT-F3 складається з наступних частин:

- від одного до трьох (залежно від специфікації замовлення) оптичних датчиків струму з оптичною петлею, що розмикається;
 - датчика температури;
 - електронного блоку, що містить модуль управління, оптико-електронні модулі, мікропроцесорні модулі цифрової обробки сигналів, дискретні, аналогові та цифрові виходи;
 - блоку живлення та підсилювача струму (залежно від специфікації замовлення).

Вихідні сигнали для вимірювання та захисту формуються на низькорівневому аналоговому виході (LEA) та високорівневому аналоговому виході (HEA), а також на цифровому інтерфейсі відповідно до технічної документації заводу-виробника.

Оптичні датчики струму з'єднані з електронним блоком за допомогою магістральних та фідерних кабелів.

Перетворювачі NXCT-F3 випускаються у двох варіантах виконання, що відрізняються рядом технічних характеристик - перетворювачі без зворотнього зв'язку (виконання А) і перетворювачі зі зворотним струмовим зв'язком, що компенсує вимірюваний струм вимірювальної оптичної петлі (виконання СL).

У перетворювачах NXCT-F3 забезпечена можливість заміни блока живлення, підсилювача струму та електронного блоку за умови введення індивідуальних даних оптичних датчиків струму, що записуються в електронний блок (файл, що поставляється виробником), без додаткового калібрування (повірки).

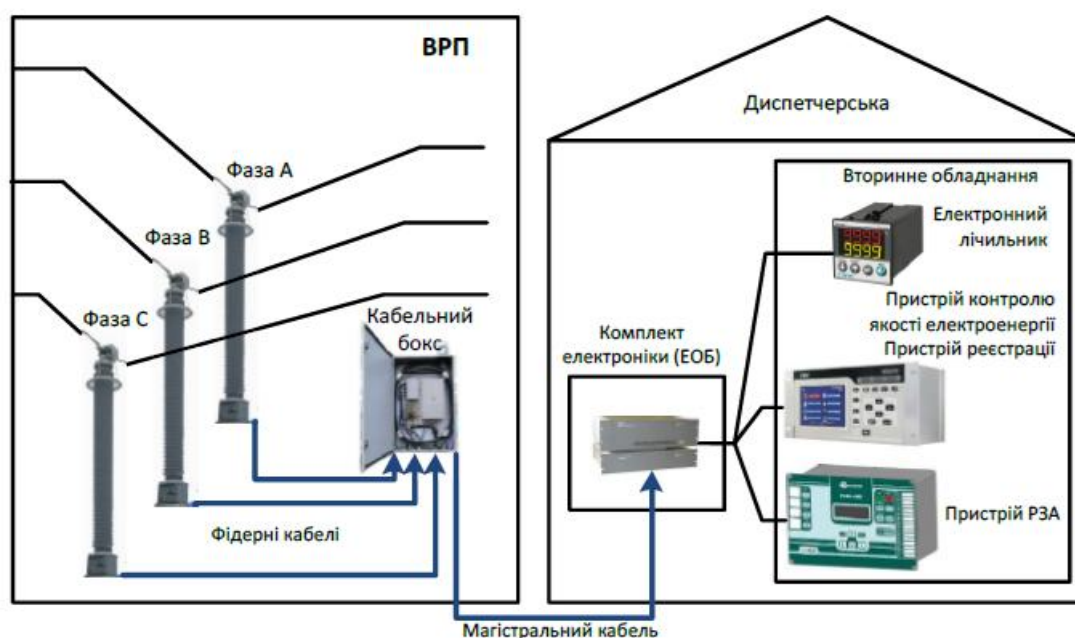


Рисунок 39 - Схема підключення оптичного трансформатора до трифазної мережі

Переваги та недоліки ОТС/ВОС.

Основні переваги ВОТ/ВОП:

- Здатність масштабувати та вимірювати як змінний (до 100 кА), так і постійний або імпульсний (до 600 кА) струм різних рівнів напруг (до 800 кВ).

– Оптико-електронне малоінерційне перетворення світлових сигналів без гістерезису, магнітних втрат, магнітного насичення і залишкового намагнічування, що характерно для електромагнітних пристроїв, і забезпечення високої точності вимірювань.

– Великий динамічний діапазон (0,1-120% від номінального струму) і висока точність (похибка не більше 0,1 - 0,2%) для вимірювання та захисту струмових ланцюгів; при цьому один і той же виріб може використовуватися при 10-кратно різних первинних номінальних струмах за рахунок електронного перенастроювання коефіцієнтів перетворення.

– Можливість інтеграції у різні цифрові системи з можливим використанням великої кількості різних інтерфейсів: аналогових (за напругою, струмом, уніфікованим струмовим сигналом), дискретних (за частотою, кодом) та цифрових (з передачею цифрових результатів вимірювань) з виключенням впливу вторинного навантаження на процеси вимірювання, що є характерним для електромагнітних пристроїв.

– Повна еколого-, пожежо-, вибухо- та електробезпека завдяки відсутності шкідливих речовин та електропровідних матеріалів у виробках, а також використанню малопотужних світлових сигналів, що унеможливають іскріння та загоряння в непередбачених ситуаціях (наприклад, при обриві ліній живлення).

– Вироби володіють високою надійністю в умовах електромагнітних перешкод, що дозволяє їх встановлювати в складних електромагнітних середовищах без потреби в попередньому аналізі та корекції.

– Довговічність, стабільність та повторюваність метрологічних та технічних параметрів виробів; низька вразливість до механічних впливів та змін температури, які зазвичай впливають на метрологічні характеристики.

– Малі розміри та маса, що спрощують монтаж і дозволяють встановлювати вироби в обмеженому просторі у будь-якому положенні, з використанням кріплення на опорі або підвішування до шини.

– Простота та надійність конструкції ОТС, висока надійність та самодіагностика електронно-оптичних блоків, що зменшує вимоги до технічного обслуговування та перевірки виробів.

Всі ці переваги є наслідком застосування в výroбах малопотужних поляризованих світлових сигналів, що поширюються в ОВ, поміщеному в магнітне поле вимірюваного струму, безконтактного впливу поля на дані сигнали через ефект Фарадея і електронної цифрової обробки результатів вимірювань.

Обмеженням застосування ОТС на даний момент є:

– висока вартість, яка враховуючи науково-технічний прогрес, буде неухильно знижуватися;

– відсутність норм проектування подібних систем з урахуванням досвід експлуатації даних пристроїв, які будуть створюватися з часом;

У зв'язку з описаними вище перевагами, а також відсутністю критичних недоліків ОТС поступово витіснятимуть електромагнітні трансформатори.

**Припустимі похибки трансформаторів струму
для різних відносних первинних струмів за ДСТ 7746-89**

Таблиця А.1

Клас точності	Первинний струм, % номінального струму ТС	Межа припустимої похибки			Межа вторинного навантаження, % номінальної
		струмової	кутової		
			%	Кутові хвилини	
0,1	5	±0,40	±15	±0,45	25-100
	20	±0,20	±8	±0,24	
	100-120	±0,10	±5	±0,15	
0,2	5	±0,75	±30	±90	25-100
	20	±0,35	±15	±45	
	100-120	±0,20	±10	±30	
0,2S	1	±0,75	±30	±90	25-100
	5	±0,35	±15	±45	
	20	±0,20	±10	±30	
	100	±0,20	±10	±30	
	120	±0,20	±10	±30	
0,5	5	±1,5	±90	±2,70	25-100
	20	±0,75	±45	±1,35	
	100-120	±0,50	±30	±0,90	
0,5S	1	±1,50	±90	±2,70	25-100
	5	±0,75	±45	±1,35	
	20	±0,50	±30	±0,90	
	100	±0,50	±30	±0,90	
	120	±0,50	±30	±0,90	
1	5	±3,00	±180	±5,40	25-100
	20	±1,50	±90	±2,70	
	100-120	±1,00	±60	±1,80	
3	50-120	±3,00	Не нормують	Не нормують	50-100
5	50-120	±5,00	Не нормують	Не нормують	50-100
10	50-120	±10,00	Не нормують	Не нормують	50-100

**Порядок визначення
індивідуальних метрологічних характеристик
трансформаторів струму (ГІД 34.09. 101-2003).**

1. Вимоги щодо методики проведення вимірювань (МПВ); норм похибок вимірювань; засобів виконання вимірювань і додаткового устаткування; методів вимірювання; вимог безпеки; вимог до кваліфікації операторів; умов вимірювань; підготовки до виконання вимірювань; виконання вимірювань; розрахунок результатів вимірювань; оформлення результатів вимірювань; контролю похибки МПВ регламентуються СОУ-Н ЕЕ 11.315:2008, ДСТУ 8.009:2008, ДСТУ-Н РМГ 62:2006, ДСТУ 6097:2009, 1. ДСТУ EN 61869-2:2017 і ДНАОП 1.1. 10-1.01-97.

2. Метрологічні характеристики ТС визначаються за результатами їх перевірки в умовах навантаження вторинних обмоток, які відповідають реальним умовам їх використання.

3. Результати перевірки порівнюються із встановленнями ДСТУ EN 61869-2:2017 вимогами для даного класу точності ТС, після чого встановлюється відповідність ТС класу точності. На підставі протоколу складається свідоцтво про перевірку.

4. Функція впливу для струмової похибки конкретного $\Psi_{\Delta f}(I)$ ТС визначається за методом найменших квадратів (МНК) на підставі протоколу його перевірки у вигляді рівняння регресії

$$\Psi_{\Delta f}(I) = a_{\text{fl}} e^{b_{\text{fl}} \cdot I} + c_{\text{fl}}, \quad (\text{Б.1})$$

де $a_{\text{fl}}, b_{\text{fl}}, c_{\text{fl}}$ - коефіцієнти регресії; I - первинний струм, % від номінального.

5. Наближені значення коефіцієнтів рівняння регресії $a_{\text{fl}}, b_{\text{fl}}, c_{\text{fl}}$ визначаються на підставі протоколу перевірки ТС за формулами:

$$b_{\text{fl}} = \frac{1}{15} \ln \left(\frac{\Delta_{\text{fl}}(100\%) - \Delta_{\text{fl}}(20\%)}{\Delta_{\text{fl}}(100\%) - \Delta_{\text{fl}}(5\%)} \right) \quad (\text{Б.2})$$

$$\hat{a}_{\text{fl}} = \frac{\Delta_{\text{fl}}(5\%) - \Delta_{\text{fl}}(100\%)}{e^{5 \cdot b_{\text{fl}}}}, \quad (\text{Б.3})$$

$$c_{\text{fl}} = \Delta_{\text{fl}}(100\%). \quad (\text{Б.4})$$

6. Функція впливу для кутової похибки конкретного ТС $\Psi_{\Delta\delta I}(I)$ визначається за МНК на підставі протоколу його перевірки у вигляді рівняння регресії

$$\Psi_{\Delta\delta I}(I) = a_{\delta I} e^{b_{\delta I} \cdot I} + c_{\delta I}, \quad (\text{Б.5})$$

де $\hat{a}_{\text{fl}}, b_{\text{fl}}, c_{\text{fl}}$ - коефіцієнти регресії;

I - первинний струм, % від номінального.

7. Наближені значення коефіцієнтів рівняння регресії $a_{\text{fl}}, b_{\text{fl}}, c_{\text{fl}}$ визначаються на підставі протоколу перевірки ТС за формулами:

$$b_{\text{fl}} = \frac{1}{15} \ln \left(\frac{\Delta_{\delta I}(100\%) - \Delta_{\delta I}(20\%)}{\Delta_{\delta I}(100\%) - \Delta_{\delta I}(5\%)} \right), \quad (\text{Б.6})$$

$$\hat{a}_{\text{fl}} = \frac{\Delta_{\delta I}(5\%) - \Delta_{\delta I}(100\%)}{e^{5 \cdot b_{\text{fl}}}}, \quad (\text{Б.7})$$

$$c_{\text{fl}} = \Delta_{\delta I}(100\%). \quad (\text{Б.8})$$

8. Номінальна функція впливу для струмової похибки ТС певного класу точності встановлюється у вигляді рівняння регресії

$$\Psi_{\text{sfll}}(I) = a_{\text{sfll}} e^{b_{\text{sfll}} \cdot I} + c_{\text{sfll}}. \quad (\text{Б.9})$$

9. Коефіцієнти рівняння регресії $a_{\text{sfll}}, b_{\text{sfll}}, c_{\text{sfll}}$ можна обчислювати за формулами:

$$b_{\text{sfll}} = \frac{1}{15} \ln \left(\frac{\Delta_{\text{опfl}}(100\%) - \Delta_{\text{опfl}}(20\%)}{\Delta_{\text{опfl}}(100\%) - \Delta_{\text{опfl}}(5\%)} \right), \quad (\text{Б.10})$$

$$\hat{a}_{\text{sfll}} = \frac{\Delta_{\text{опfl}}(5\%) - \Delta_{\text{опfl}}(100\%)}{e^{5 \cdot b_{\text{sfll}}}}, \quad (\text{Б.11})$$

$$c_{\text{sfll}} = 0, \quad (\text{Б.12})$$

де $\Delta_{\text{опfl}}(5\%), \Delta_{\text{опfl}}(20\%), \Delta_{\text{опfl}}(100\%)$ - відповідно границі припустимих струмових похибок ТС відповідно до ДСТУ EN 61869-1:2017.

10. Границі припустимих відхилень для номінальної функції впливу струмової похибки (нормовані граничні функції впливу, нижня і верхня відповідно) визначаються за формулами:

$$\Psi_{*II} (I) = \Psi_{sfII} (I) - \Delta_{opII} (100\%) \quad (B.13)$$

$$\Psi_{*II}^* (I) = \Psi_{sfII} (I) + \Delta_{opII} (100\%) . \quad (B.14)$$

11. Номінальна функція впливу для кутової похибки ТС певного класу точності встановлюється у вигляді рівняння регресії

$$\Psi_{sf\delta I} (I) = \dot{a}_{sf\delta I} e^{b_{sf\delta I} \cdot I} + c_{sf\delta I} . \quad (B.15)$$

12. Наближені значення коефіцієнтів рівняння регресії $b_{sf\delta I}, \dot{a}_{sf\delta I}, c_{sf\delta I}$ визначаються за формулами:

$$b_{sf\delta I} = \frac{1}{15} \ln \left(\frac{\Delta_{op\delta I} (100\%) - \Delta_{op\delta I} (20\%)}{\Delta_{op\delta I} (100\%) - \Delta_{op\delta I} (5\%)} \right) \quad (B.16)$$

$$\dot{a}_{sf\delta I} = \frac{\Delta_{op\delta I} (5\%) - \Delta_{op\delta I} (100\%)}{e^{5 \cdot b_{sf\delta I}}} \quad (B.17)$$

$$c_{sf\delta I} = 0, \quad (B.18)$$

де $\Delta_{op\delta I} (5\%)$, $\Delta_{op\delta I} (20\%)$, $\Delta_{op\delta I} (100\%)$ - відповідно границі припустимих кутових похибок ТС відповідно до 1. ДСТУ EN 61869-2:2017.

13. Границі припустимих відхилень для номінальної функції впливу кутової похибки (нормовані граничні функції впливу, нижня і верхня відповідно) визначаються у вигляді рівнянь регресії

$$\Psi_{*I} (I) = \Psi_{sf\delta I} (I) - \Delta_{op\delta I} (100\%) \quad (B.19)$$

$$\Psi_{*I}^* (I) = \Psi_{sf\delta I} (I) + \Delta_{op\delta I} (100\%) . \quad (B.20)$$

Паспорт-протокол трансформатора струму

енергосистема _____

електростанція, мережевий район, підстанція _____

об'єкт, що захищається _____

місце встановлення _____

I. Паспорт-протокол трансформаторів струму

I. Паспортні дані _____

Тип ТС _____

Коефіцієнт трансформації _____

Рік випуску _____

Позначення обмотки	Клас точності	Номінальний режим навантаження		Номінальна гранична кратність $K_{10ном}$
		Ом	В·А	

Схема з'єднань і полярність трансформаторів струму		Маркування	Завантаження трансформаторів струму
Фаза Сторона Полярність		Маркування	
Позначення обмоток			<p>Показати повністю схему завантаження. У прямокутниках вказати позначення завантаження. Наприклад: РТ, А, ВУ-25 і т.п.</p>
Показати повну схему з'єднання з заземленнями. У прямокутниках вказати полярність і позначення виводів вторинних обмоток.		Показати повністю схему завантаження. У прямокутниках вказати позначення завантаження. Наприклад: РТ, А, ВУ-25 і т.п.	

Основні кабелі

№ п/п	Найменування	Маркування	Марка	Перетин, мм ²	Довжина, м	Опір жил, Ом
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						

Сполучні муфти

№ п/п	Позначення кабелю	Відстань по довжині кабелю від трансформатора струму до муфти
1		
2		
3		
4		

Дата _____ Склав _____ Перевірив _____

II. Перевірка при новому ввімкненні

1. Зовнішній огляд

Елементи схеми	Стан
Виводи Зборки виводів Заземлення Ущільнення Кабельні розділки Кабелі й сполучні муфти	

2. Перевірка схеми з'єднання струмових кіл.

Схема й маркування відповідають монтажній схемі № _____

3. Перевірка опору ізоляції ТС і їх кіл по елементах мегомметром на __ В

Позначення трансформаторів струму																			
Опір ізоляції між обмотками, МОм																			
Опір ізоляції на землю, МОм																			
Позначення кабелю																			
Опір ізоляції на землю, МОм																			
Мінімальний опір ізоляції між жилами, МОм																			
Опір ізоляції на землю в повній схемі, МОм																			

4. Перевірка електричної міцності ізоляції кіл струму на землю.

Ізоляція кіл струму випробувана напругою _____ В протягом ___ хв.

Ізоляція випробувана мегомметром на _____ В

Опір ізоляції _____ Ом (Мом)

5. Перевірка полярності й схеми з'єднань ТС

Однополюсні затискачі _____.

6. Зняття характеристики намагнічування $U_2 = f(I'_{\text{нам}})$

Позначення обмотки																				
Клас трансформаторів струму																				
Фаза	А	В	С		А	В	С		А	В	С		А	В	С					
Навантаження трансформаторів струму, Ом																				
К _{ТС} при знятті характеристики намагнічування																				
Результати вимірювання	I' _{нам}	U ₂			I' _{нам}	U ₂			I' _{нам}	U ₂			I' _{нам}	U ₂						

Вольт-амперна характеристика для робочого коефіцієнта трансформації



Прилади _____

Спосіб і схема перевірки _____

7. Перевірка коефіцієнта трансформації первинним струмом _____ А

Фази	Вторинний струм _____ А при відгалудженнях вторинної обмотки									Встановлений коефіцієнт трансформації
А										
В										
С										
А										
В										
С										
А										
В										
С										
А										
В										
С										

8. Перевірка схеми сполучення ТС вторинним струмом

Фаза	Номер ТС	I ₁ , А	I ₂ , А	Схема з'єднання ТС	Номер ТС	I ₁ , А	I ₂ , А	Схема з'єднання ТС	Номер ТС	I ₁ , А	I ₂ , А	Схема з'єднання ТС
А												
В												
С												
0												

9. Вимірювання навантажень вторинних обмоток ТС при різних значеннях струму

Сполучення фаз	Значення навантаження вторинних обмоток при струмі								
	...А			...А			...А		
	U,В	z,Ом	Z,Ом/фаза	U,В	Z,Ом	Z,Ом/фаза	U,В	Z,Ом	Z,Ом/фаза
А-В									
В-С									
С-А									
А-0									
В-0									
С-0									

10. Додаткові перевірки

Начальник _____

Перевірку робив _____

III. Результати експлуатаційних перевірок

Дата	Найменування й обсяг перевірки. Виявлене відхилення характеристик. Виявлені дефекти	Опір ізоляції кіл струму на землю обмотки				Підпис	
		I	II	III	IV	перевіряючого	контролюючого

Зміна схеми сполучень і навантаження ТС.

Дата	Зроблені	Підпис	
		перевіряючого	начальника

Література

1. Правила улаштування електроустановок. Затверджено Наказом Міненерговугілля України від 21.07.2017 № 476. - 617 с.
2. ДСТУ EN 61869-1:2017 Трансформатори вимірювальні. Частина 1. Загальні вимоги (EN 61869-1:2009, IDT; IEC 61869-1:2007, MOD). https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=73382.
3. ДСТУ EN 61869-2:2017 Трансформатори вимірювальні. Частина 2. Додаткові вимоги до трансформаторів струму (EN 61869-2:2012, IDT; IEC 61869-2:2012, IDT). https://budstandart.ua/normative-document.html?id_doc=73344.
4. ДСТУ EN 61869-3:2017 Трансформатори вимірювальні. Частина 3. Додаткові вимоги до індуктивних трансформаторів напруги (EN 61869-3:2011, IDT; IEC 61869-3:2011, IDT). https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=73384.
5. ДСТУ 8216:2015 Вироби електронної техніки. Класифікація за умовами застосування та вимоги стійкості до зовнішніх впливових чинників. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=81315
6. ДСТУ IEC 61238-1-3:2019 Опресовані та механічні з'єднувачі для силових кабелів. Частина 1-3. Методи випробування та вимоги до опресованих та механічних з'єднувачів для силових кабелів для номінальних напруг від 1 кВ ($U_m = 1,2$ кВ) до 30 кВ ($U_m = 36$ кВ), випробуваних на неізольованих провідниках (IEC 61238-1-3:2018, IDT). https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=88018..
7. ДСТУ 2817-94 Система стандартів безпеки праці. Апарати електричні комутаційні на напругу до 1000 В. Вимоги безпеки. <https://ukrmts.com/docsdbs/1243.html>.
8. ДСТУ EN 61010-1:2014 Вимоги щодо безпечності контрольно-вимірювального та лабораторного електричного устаткування. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=96048.

9. ДСТУ 8.009:2008 Державна система забезпечення єдності вимірювань. Нормовані метрологічні характеристики засобів вимірювань. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=50659
10. СОУ-Н ЕЕ 40.1-21677681-90:2013 Експлуатація вимірювальних трансформаторів. Настанова. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=70931.
11. ГІД 34.09.101-2003 Методичні рекомендації щодо визначення обсягів споживання електричної енергії при її обліку з використанням вимірювальних трансформаторів. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=60915.
12. ДСТУ 6097:2009 Метрологія. Трансформатори струму. Методика повірки. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=84234.
13. РД 153-34.0-35.617-2001. Правила технічного обслуговування пристроїв релейного захисту, електроавтоматики, дистанційного керування та сигналізації електростанцій та підстанцій 110-750 кВ. <https://k.twirpx.link/file/62461/>.
14. Експлуатація та технічне обслуговування трансформатора струму та трансформатора напруги. <https://ua.liouct.com/info/operation-and-maintenance-of-current-transform-86107950.html>.
15. Посібник для працівників енергопостачальних компаній і енергонагляду щодо роботи зі споживачами електроенергії та запобігання крадіжкам електроенергії / Під.ред. Андрійчука Ю.Н. ОЕП, Київ, 2003.
16. ГІД 34.09.101-2003. “Методичні рекомендації щодо визначення обсягів споживання електричної енергії при її обліку з використанням вимірювальних трансформаторів”. Київ, 2003.
17. РД 34.11.321-88 Норми точності вимірювань технологічних параметрів теплових електростанцій. https://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page.html?id_doc=61949.

- 18.СОУ-Н ЕЕ 11.315:2008 (МВУ 031/08-2007) Метрологія. Кількість електричної енергії та електрична потужність. Типова методика виконання вимірювань. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=63830.
- 19.ДСТУ-Н РМГ 62:2006 Метрологія. Забезпечення ефективності вимірювань під час керування технологічними процесами. Оцінення похибки вимірів у разі обмеженої вихідної інформації (РМГ 62-2003, IDT). https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=53611.
- 20.ДНАОП 11. ДНАОП 1.1.10-1.01-97. Правила безпечної експлуатації електроустановок (43827).
- 21.Буйновський В.В., Кирик В.В. Оптичні трансформатори струму.- «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики».. - Київ.- 2020.- с.122-127.
- 22.ІЕС 60044-8. Вимірювальні трансформатори. Частина 8. Електронні трансформатори струму. - ІЕС, 2002.