

ЛЕКЦІЯ 2

(4 години)

ВИМІРЮВАЛЬНІ ТРАНСФОРМАТОРИ СТУМУ ТА НАПРУГИ ДЛЯ СИСТЕМ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ

План лекції

1. Загальні відомості.
2. Трансформатори струму.
3. Схеми з'єднання трансформаторів струму.
4. Трансформатори напруги.
5. Схеми з'єднання трансформаторів напруги.
6. Вибір вимірювальних трансформаторів струму та напруги.

1 Загальні відомості

Щоб забезпечити високу надійність електропостачання в процесі експлуатації електроустановки (мережі), необхідно постійно контролювати електричні параметри – напругу, струм, опір, потужність, енергію і частоту.

Вимірювати та контролювати електричні величини можна при прямому, не прямому і змішаному вмиканні вимірювальних приладів та реле у електричне коло, що контролюється.

При прямому вмиканні вимірювальні прилади підключаються в коло безпосередньо. При не прямому – через спеціальні вимірювальні трансформатори струму і напруги. При змішаному – частина обмоток вимірювальних приладів вмикається в коло безпосередньо, а частина – через вимірювальні трансформатори.

На трансформаторних підстанціях найчастіше застосовують не пряме вмикання вимірювальних приладів, що забезпечує такі основні переваги:

1) можна використовувати вимірювальні прилади, що вмикаються до вторинної обмотки вимірювальних трансформаторів, із стандартними обмотками, розрахованими на напругу 100 В і струм 5 А;

- 2) вимірювальні прилади відокремлюються від напруги понад 380 В, що веде до підвищення безпеки їх обслуговування;
- 3) значно полегшується контрольна проводка;
- 4) первинні кола установки захищені від замикання в контрольних проводах та вимірювальних приладах.

Безпосереднє вмикання приладів у вимірювальне коло можливе лише при напрузі 380 В і менше та при порівняно невеликих струмах.

Для забезпечення безпеки персоналу, на випадок пробою ізоляції вимірювальних трансформаторів, одну із точок їх вторинної обмотки обов'язково заземлюють.

Контрольно-вимірювальні прилади на підстанціях розміщують на головних щитах керування. Іноді частину приладів встановлюють у приміщенні закритого розподільного пристрою (ЗРП).

Вимірювальні трансформатори струму (ТС) та трансформатори напруги (ТН) здебільшого встановлюють у закритих та відкритих розподільних пунктах.

Номенклатуру і кількість контрольно-вимірювальних приладів для встановлення в окремих електричних колах підстанції вибирають в залежності від потужності, напруги і призначення цих кіл.

На сільських трансформаторних підстанціях найчастіше використовують амперметри, вольтметри, ватметри, лічильники активної і реактивної енергії та частотоміри.

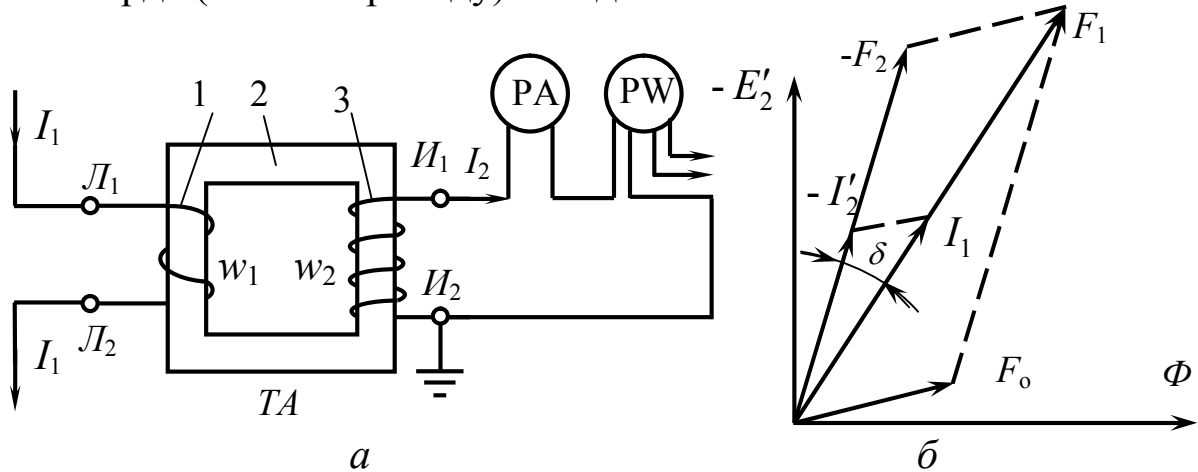
Навантаження в колах трансформаторів та ліній електропередачі контролюють за допомогою амперметрів. За показами ватметра, амперметра і вольтметра визначають коефіцієнт потужності:

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I}. \quad (1)$$

В шафах ліній розподільних мереж 6...10 кВ, що відходять від підстанції встановлюють по одному амперметру, лічильнику активної та реактивної енергії.

2 Трансформатори струму

Трансформатори струму виконують як для внутрішнього, так і для зовнішнього встановлення. Їх виготовляють на всю шкалу струмів та напруг. Трансформатор струму (рисунок 1) складається із замкненого осердя (магнітопроводу) 2 та двох обмоток 1 та 3.



а – схема під'єднання; б – векторна діаграма струмів

Рисунок 1 – Трансформатор струму

Первинну обмотку 1 трансформатора струму (рисунок 1) вмикають послідовно у коло, що контролюється, а до вторинної обмотки 3 приєднують послідовно з'єднані струмові обмотки амперметра, ватметра, лічильника, реле та інші.

На відміну від знижувальних трансформаторів напруги у знижувальних трансформаторів струму число витків вторинної обмотки w_2 є більшим (у ряді випадків у багато разів) числа витків первинної обмотки w_1 (вона часто має один виток).

Окрім того режим роботи ТС значно відрізняється від режиму роботи звичайного силового трансформатора напруги. Відмінність полягає у тому, що значення первинного струму I_1 (рисунок 1, б) не залежить від навантаження у вторинному колі (від значення вторинного струму I_2). Струм I_1 визначається лише навантаженням і параметрами первинного кола, у той час як у трансформатора напруги первинний струм залежить від зміни вторинного струму. Відповідно і магнітний потік первинної обмотки F_1 , що створюється струмом I_1 ,

не змінюється при зміні струму у вторинному колі. Опір навантаження вторинного кола (обмотки приладів, з'єднувальні проводи) дуже малий. Тому трансформатор струму працює у режимі наближеному до короткого замикання.

Трансформатор струму нормально працює при сталому навантаженні вторинного кола і змінному струмі первинної обмотки, тобто при змінному магнітному потоці.

Отже перевантаження і к.з. в колі вторинної обмотки не створюють небезпеки для трансформатора струму і тому його не захищають запобіжниками або іншими елементами захисту.

Режим розмикання вторинного кола для трансформаторів струму є небезпечним. В такому режимі зникає розмагнічувальна дія вторинної обмотки і в магнітопроводі різко підвищується магнітний потік.

Якщо при протіканні струму в первинній обмотці розімкнути вторинну обмотку, то $I_2 = 0$ та $F_2 = I_2 \cdot w_2 = 0$ (рисунок 1, б). Оскільки при цьому струм I_1 та магніторушійна сила (МРС) F_1 практично не змінюються, то результуюча МРС F_0 буде дорівнювати F_1 (збільшиться в декілька разів). Це веде до збільшення магнітного потоку Φ , різкого нагрівання (перегріву та виходу з ладу) магнітопроводу і виникнення на затискачах вторинної обмотки великої ЕРС (десятки тисяч вольт), яка є небезпечною як для персоналу, що обслуговує, так і для ізоляції трансформатора та приладів, що підключені до нього.

У зв'язку із викладеним вище, категорично забороняється при експлуатації розривати вторинну обмотку працюючого трансформатора струму. При необхідності від'єднання приладів від ТС, що працює необхідно попередньо закоротити виводи його вторинної обмотки.

Трансформатор струму характеризується **номінальним коефіцієнтом трансформації** (відношення номінального первинного і номінального вторинного струмів), який наближено дорівнює оберненому відношенню числа витків обмоток трансформатора:

$$K_{ТС} = \frac{I_{1н}}{I_{2н}} \approx \frac{w_2}{w_1}. \quad (2)$$

На практиці:

$$I_1 > I_2 \frac{w_2}{w_1}. \quad (3)$$

З виразу (3) випливає, що трансформатори струму мають похибку (за струмом, кутову та повну), яка обумовлена наявністю струму намагнічування.

Похибка трансформатора струму за струмом (за коефіцієнтом трансформації):

$$\Delta I\% = \frac{\kappa_{ТС} \cdot I_2 - I_1}{I_1} \cdot 100; \quad (4)$$

де I_1 – струм у первинній обмотці ТС, А;

I_2 – струм у вторинній обмотці ТС, А;

$\kappa_{ТС}$ – номінальний коефіцієнт трансформації ТС.

Від значення цієї похибки залежить точність показань будь-яких приладів, що приєднані до вторинної обмотки трансформатора струму.

Кутова похибка визначається кутом δ (рисунок 1, б) – кутом зсуву між вектором первинного струму I_1 і повернутим на 180° вектором вторинного струму I_2 . Ця похибка впливає на показання приладів ватметрового типу (ватметри, фазометри, лічильники, реле потужності, тощо).

Похибки трансформатора струму залежать від магнітного опору магнітопроводу (від якості виконання і параметрів магнітопроводу), струму навантаження вторинного кола, співвідношення його реактивної та активної складової і від кратності первинного струму по відношенню до номінального. Із зростанням навантаження і кратності струму похибка зростає.

В залежності від значення струмової похибки $\Delta I\%$ трансформатори струму ділять за класами точності.

Трансформатори струму виготовляють наступних класів точності (цифри показують виражену у відсотках струмову похибку):

- 0,2 – для лабораторних вимірювань;
- 0,5 – для розрахункових лічильників (комерційний облік);
- 1 та 3 – для щитових вимірювальних приладів;
- 10 або Р для релейного захисту;
- Д – для диференціального захисту;
- З – для захисту від замикань на землю.

В залежності від значення вторинного навантаження трансформатор струму може працювати в різних класах точності. При цьому, кожному класу точності відповідає певне номінальне вторинне навантаження. На паспортній таблиці трансформатора вказують найвищий клас точності.

Номінальне навантаження трансформаторів струму визначається за виразом:

$$S_{2H} = I_{2H} \cdot Z_{2H}. \quad (5)$$

де I_{2H} – вторинний номінальний струм трансформатора, А;
 Z_{2H} – повний опір приладів, які приєднані до вторинної обмотки, Ом.

Номінальним навантаженням називають таке навантаження трансформатора струму, при якому він може працювати із заданим (паспортним) класом точності.

Магнітопроводи трансформаторів струму виготовляють прямокутні шихтовані або тороїдальні, навиті із сталльної стрічки.

Конструктивно трансформатори струму можуть виготовлятися із двома осердями (магнітопроводами), кожне із яких має свою вторинну обмотку. Первинна обмотка для них є спільною.

ТС із двома осердями і двома вторинними обмотками можуть мати як однаковий, так різний клас точності, наприклад: 0,5/Р; 0,5/Д.

До однієї вторинної обмотки із вищим класом точності приєднують вимірювальні прилади. До другої вторинної обмотки із нижчим класом точності приєднують обмотки реле.

Ряд трансформаторів струму на напругу 35 кВ і вище виготовляють із трьома і більше осердями та вторинними обмотками.

Виготовляють трансформатори струму на напругу від 0,5 до 750 кВ включно.

В залежності від кількості витків первинної обмотки трансформатори струму бувають одно- і багатовиткові (петлеві). Вторинні обмотки ТС завжди багатовиткові.

Трансформатори струму можуть виготовлятися з номінальним первинним струмом 10, 20, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 600, 800, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000 та 5000 А. Номінальний вторинний струм $I_{н2}$ трансформаторів струму, як правило, дорівнює 5 А. Деякі трансформатори струму виготовляються із вторинними обмотками на струм 1 А.

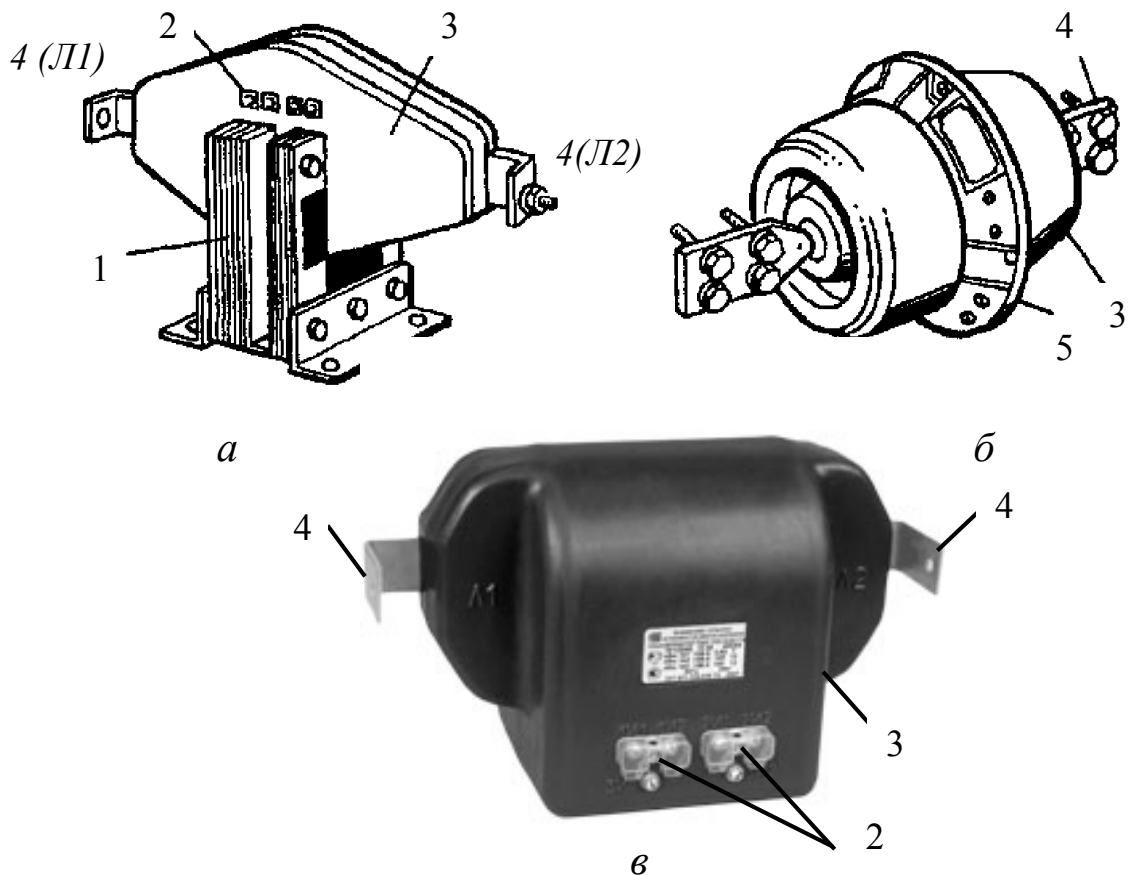
За способами встановлення розрізняють трансформатори струму: прохідні, опорні і вмонтовані (у масляний вимикач або у силовий трансформатор), для зовнішнього і внутрішнього встановлення. Прокідні трансформатори встановлюють лише у ЗРП.

Для маркування трансформаторів струму використовують такі основні літерні позначення: Т – трансформатор струму; П – прохідний; О – одновитковий; К – котушковий; Ф – з фарфоровою ізоляцією; Л – з литою смоляною ізоляцією; У – посилений; М – модернізований; М – з масляним заповненням; Н – для зовнішнього встановлення; Ш – шинний; В – вмонтований; Т – для силових трансформаторів; Р – для релейного захисту; Д – для диференціального релейного захисту; З – для захисту від замикань на землю.

Перша після літер цифра показує напругу в кіловольтах, на яку розрахований трансформатор, друга позначає осердя і клас точності.

Наприклад: ТПЛ-10-0,5/Р (ТПЛУ, ТПЛК) (рисунок 2, а): Т – трансформатор струму багатовитковий, П – прохідний (опорно-прохідний), Л – лита ізоляція, на напругу 10 кВ, дві вторинні обмотки із класом точності 0,5 та Р.

ТПОЛ-10-0,5/Р (ТПОЛМ) – трансформатор струму прохідний (рисунок 2, б), одновитковий, лита ізоляція (модернізований), на напругу 10 кВ, дві вторинні обмотки із класом точності 0,5 та Р.



a – типу ТПЛ-10; *б* – типу ТПЛОМ-10; *в* – ТПЛ-10М

1 – магнітопровід; 2 – виводи вторинної обмотки, 3 – литий корпус, 4 – виводи первинної обмотки

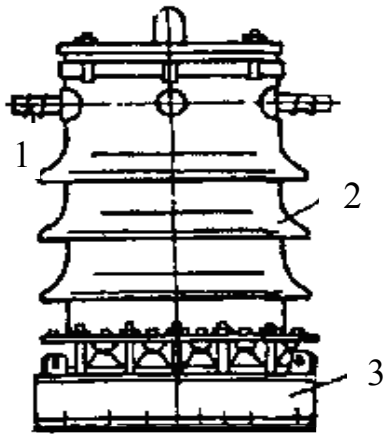
Рисунок 2 – Трансформатори струму для внутрішнього встановлення

ТПЛ-10М-0,5/10Р – трансформатор струму опорно-прохідний, багатовитковий із литою ізоляцією, на напругу 10 кВ, дві вторинні обмотки із класом точності 0,5 та 10Р, модернізований. Призначений для заміни ТС попередніх серій типу ТПЛ-10.

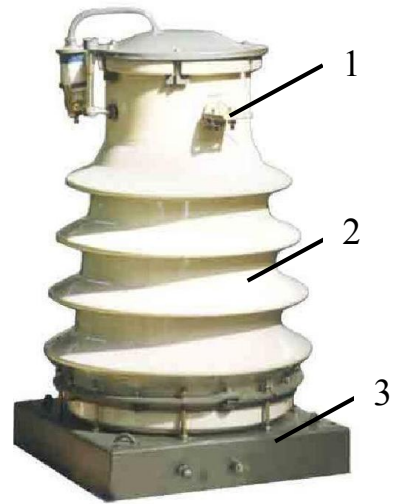
ТПФ-10-0,5/Р (ТПФУ) – трансформатор струму багатовитковий, прохідний, фарфорова ізоляція, на напругу 10 кВ, дві вторинні обмотки із класом точності 0,5 та Р.

ТФМ-35П – трансформатор струму багатовитковий, фарфоровий корпус, з масляним заповненням, на напругу 35 кВ.

ТФН-35М – трансформатор струму багатовитковий (рисунок 3, *a*), фарфоровий корпус, паперово-масляна ізоляція, зовнішнього встановлення, на напругу 35 кВ.



a



б

a – ТФН-35М; *б* – ТФ3М-35Б

1 – виводи первинної обмотки; 2 – фарфоровий корпус, 3 – цоколь

Рисунок 3 – Трансформатори струму для зовнішнього встановлення

ТФ3М-35Б-0,5/10Р/10Р – ТС багатовитковий (рисунок 3, б), фарфоровий корпус, вторинна обмотка ланкового типу (3), масляна ізоляція, зовнішнього встановлення, на напругу 35 кВ, одна вторинна обмотка із класом точності 0,5 та дві із класом точності 10Р.

3 Схеми з'єднання трансформаторів струму

При виконанні струмових захистів ліній електропередачі напругою 6...35 кВ використовують такі основні схеми з'єднання вторинних обмоток трансформаторів струму і обмоток реле: повна зірка (трифазна, три релейна), неповна зірка (двофазна, дворелейна) і включення реле на різницю струмів двох фаз (двофазна, однорелейна).

Для захисту силових трансформаторів використовують схеми із реле у зворотному проводі: повна зірка (трифазна, чотирирелейна), неповна зірка (двофазна, трирелейна). Також використовується схема з'єднання вторинних обмоток трансформаторів струму у трикутник (трифазна, дво- або трирелейна).

Для захисту трансформаторів не рекомендується використовувати схему з'єднання трансформаторів струму за схемою на різницю струмів двох фаз, так як за певних умов схема може не спрацювати взагалі.

Схеми характеризуються відношенням струму в реле I_P до вторинного струму I_2 трансформатора струму, яке називається коефіцієнтом схеми:

$$K_{cx} = \frac{I_P}{I_2}; \quad (6)$$

Схема повної зірки (рисунок 4) використовується коли є потреба контролювати силу струму в усіх трьох фазах. Схема реагує на всі види к.з. (три-, дво- та однофазні). Струм в реле дорівнює вторинному струму трансформатора струму і тому $K_{cx} = 1$. Схему доцільно використовувати в електричних мережах з глухим заземленням нейтралі, де однофазне замикання на землю є аварійним режимом (110 кВ і вище).

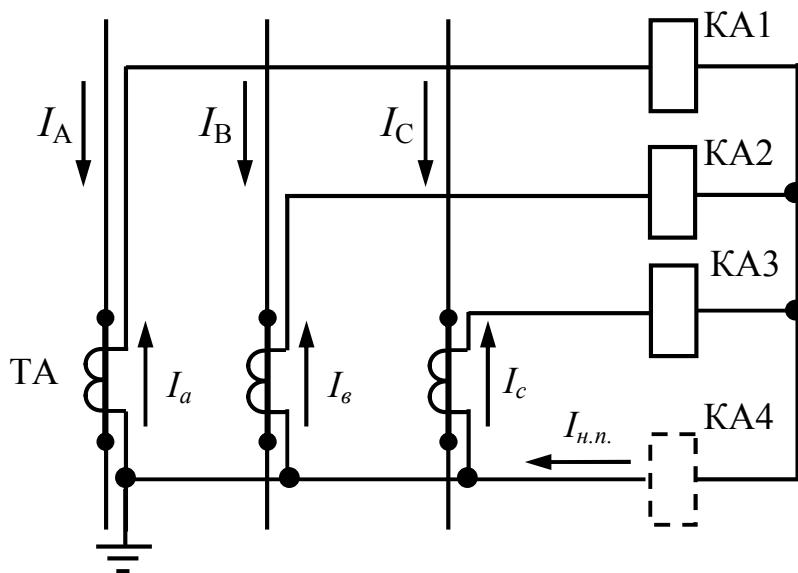
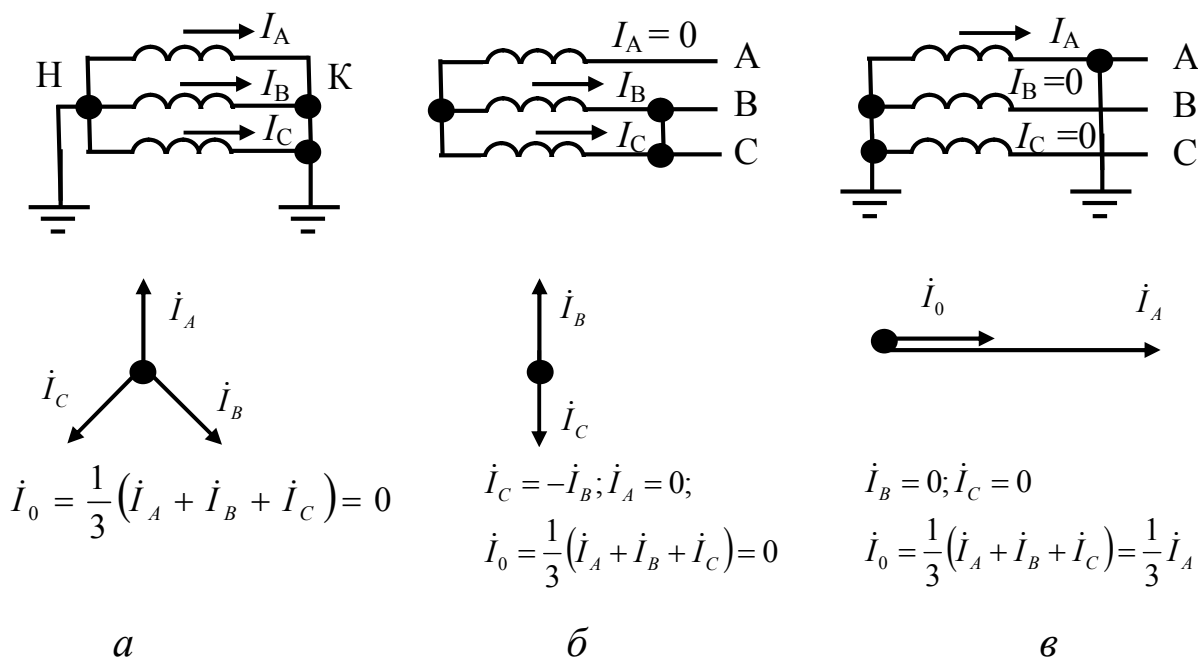


Рисунок 4 – Схема з'єднання ТС та обмоток реле у повну зірку

В розглянутій схемі (рисунок 4) реле, що встановлені у фази (KA1...KA3), реагують на всі види к.з., а реле в нульовому проводі (KA4) реагує лише на однофазні к.з. (к.з. між будь-якою фазою та землею). Струм в нульовому проводі з'являється тільки при появі однофазного короткого замикання на землю (рисунок 5).



a – при трифазному к.з.; *б* – при двофазному к.з.; *в* – при однофазному к.з.

Рисунок 5 – Векторні діаграми струмів при з'єднанні трансформаторів струму і обмоток реле у повну зірку

В нормальному режимі роботи мережі або при **трифазному к.з.** (рисунок 4 та 5, *a*) через реле КА1...КА2 протікають струми фаз:

$$I_a = \frac{I_A}{K_{TC}}, I_b = \frac{I_B}{K_{TC}}, I_c = \frac{I_C}{K_{TC}},$$

а в нульовому проводі – їх геометрична сума $I_{н.н.} = (\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) = 3I_0$, яка в симетричних режимах дорівнює нулю (як при наявності, так і при відсутності заземлення в точках Н та К).

При двофазних к.з. струм проходить лише в двох пошкоджених фазах і, відповідно, в реле, що підключені до цих фаз (рисунок 5, *б*). Струм в непошкодженій фазі відсутній. Згідно із законом Кірхгофа сума струмів у вузлі дорівнює нулю, відповідно, $\dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$, звідки $\dot{I}_C = -\dot{I}_B$. Із врахуванням цього на векторній діаграмі (рисунок 5, *б*) ці струми показані зсунутими за фазою на 180° .

Струм в нульовому проводі дорівнює сумі струмів пошкоджених фаз, але так як ці струми рівні та протилежні за фазою, то струм в нульовому проводі відсутній: $I_{н.н.} = \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0$. Відповідно, реле КА4, що включається в нульовий провід, не буде реагувати на навантаження та міжфазні к.з.

В реальних умовах в нульовому проводі може протікати незначний струм небалансу $I_{н.н.} = I_{н.б.}$, обумовлений не ідентичністю характеристик трансформаторів струму.

При однофазних к.з. первинний струм протікає лише по одній пошкодженій фазі (рисунок 5, в). Відповідний йому вторинний струм протікає лише через одне реле і замикається через нульовий провід, тобто $I_{н.н.} = \dot{I}_a$.

В електричних мережах із ізольованою нейтраллю напругою 6...35 кВ, цю схему, як правило, не використовують, так як в таких мережах можливі лише міжфазні к.з. Для них доцільно застосовувати більш прості та більш економічні схеми із трансформаторами струму у двох фазах.

Схема неповної зірки (рисунок 6) реагує на всі види міжфазних к.з. Струми в реле також дорівнюють вторинним струмам трансформаторів струму. Для такої схеми $k_{сх} = 1$.

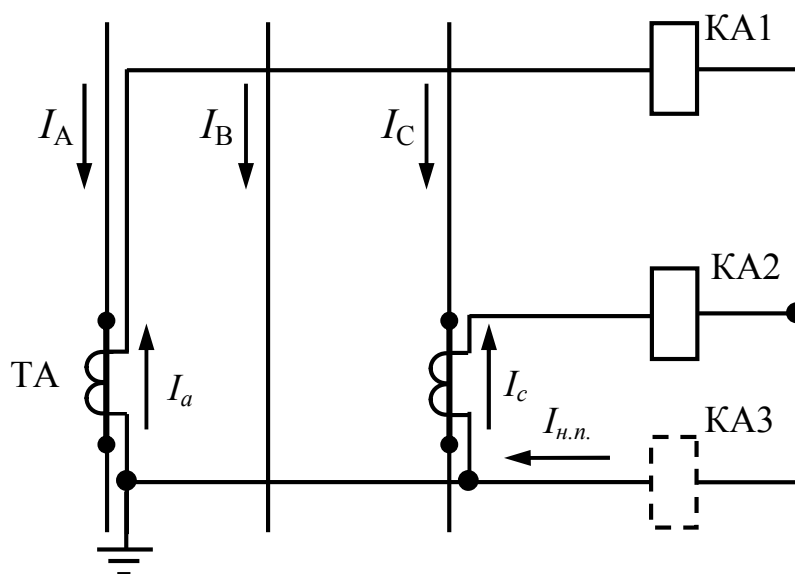
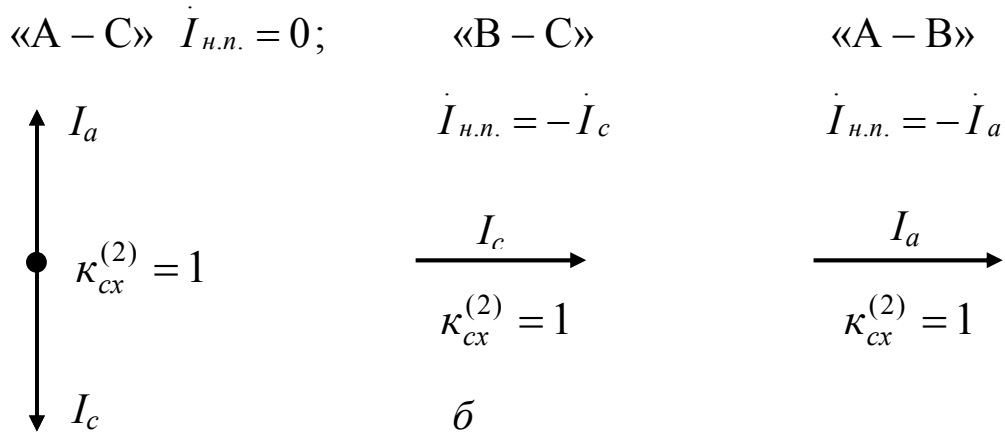
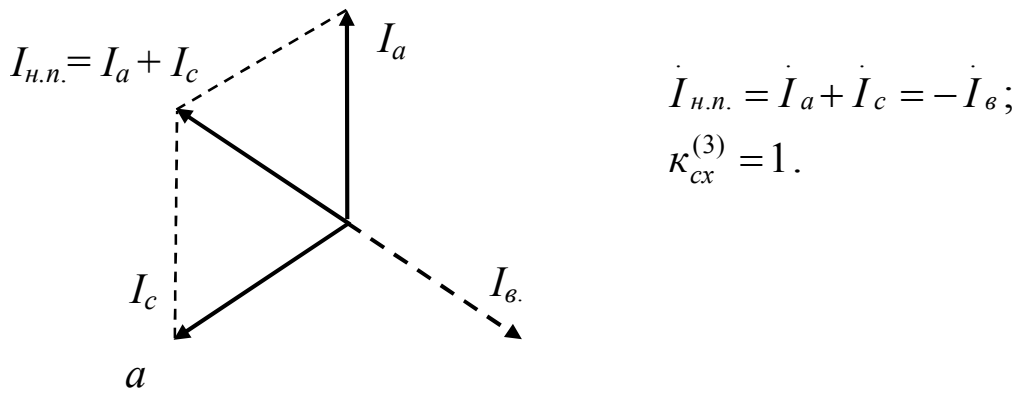


Рисунок 6 – Схема з'єднання трансформаторів струму та обмоток реле у неповну зірку

Використовують схему неповної зірки переважно для релейного захисту в мережах з ізольованою нейтраллю (6...35 кВ).

В мережах з ізольованою нейтраллю схема неповної зірки забезпечує відключення будь-якого міжфазного к.з. (рисунок 7).



a – при трифазному к.з.; *б* – при двофазному к.з.

Рисунок 7 – Векторні діаграми струмів при з'єднанні трансформаторів струму і обмоток реле у неповну зірку

В мережах із глухозаземленою нейтраллю схема не реагує на замикання фази «В» на землю.

Для мереж з ізольованою нейтраллю схема неповної зірки використовується без реле у зворотному проводі КАЗ (дворелейна).

Схема на різницю струмів двох фаз (рисунок 8) реагує на всі міжфазні к.з. Така схема найпростіша і найдешевша але має нижчу чутливість при деяких двофазних к.з.

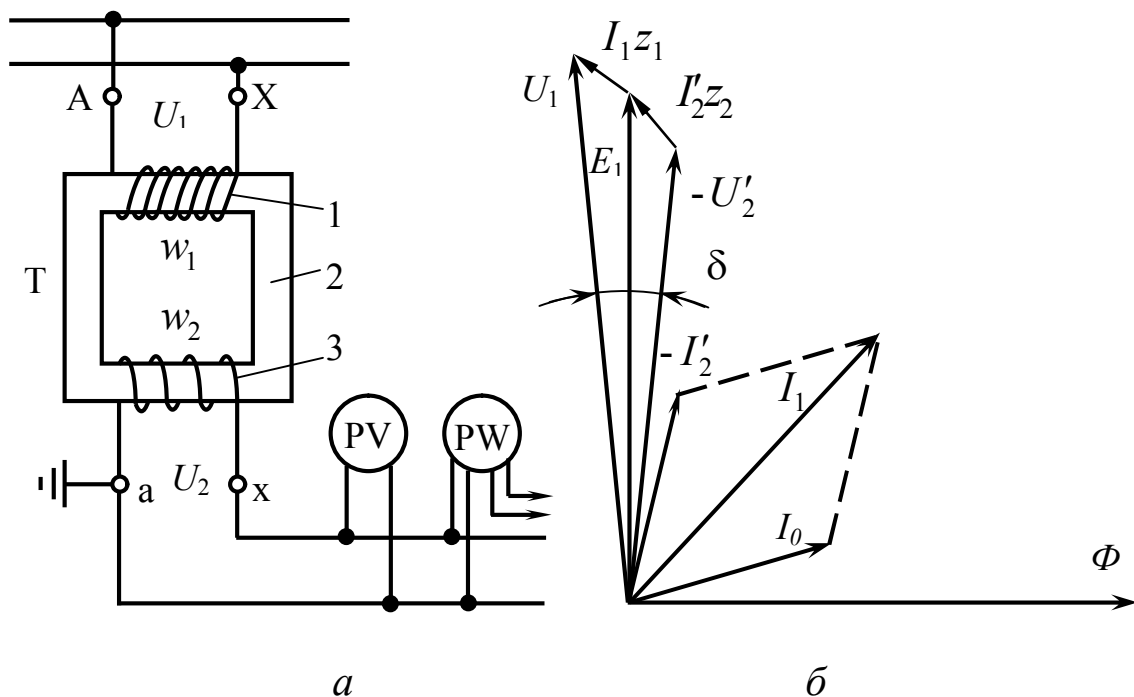
Найменший струм і найменша чутливість (рисунок 9) буде при міжфазних к.з. (А-В, В-С), при яких одна із фаз (В) не має трансформатора струму.

Із векторних діаграм (рисунок 9) видно, що дана схема має різну чутливість при різних видах к.з. в мережі. Найнижча чутливість буде при к.з. між фазами «А-В» та «В-С», із яких одна фаза (В) не має трансформатора струму.

4 Трансформатори напруги

Трансформатори напруги (ТН), як і трансформатори струму, виконують як для внутрішнього, так і для зовнішнього встановлення на всю шкалу напруг, починаючи із 380 В.

Однофазний трансформатор напруги (рисунок 10, *a*) складається із замкнутого осердя (магнітопроводу) 2 та двох обмоток 1 і 3. Первинна обмотка 1 підключається на напругу мережі U_1 , а до вторинної обмотки 3 із напругою U_2 приєднують паралельно обмотки вимірювальних приладів та реле.



a – схема під'єднання; *б* – векторна діаграма напруг
Рисунок 10 – Однофазний трансформатор напруги

Трансформатори напруги використовують для зниження напруги на приладах і реле до 100, $100/\sqrt{3}$, $100\cdot\sqrt{3}$, рідко $100/3$ В. Принцип дії вимірювальних трансформаторів напруги аналогічний принципу дії силових трансформаторів, але вони мають значно меншу потужність (до 1200 ВА).

Співвідношення номінальної первинної напруги U_1 до номінальної вторинної напруги U_2 визначається коефіцієнтом трансформації, який наближено пропорційний відношенню кількості витків первинної w_1 і вторинної w_2 обмоток:

$$\kappa_U = \frac{U_{1н}}{U_{2н}} \cong \frac{w_1}{w_2}. \quad (7)$$

Приведена вторинна напруга $U_2' = U_2 \cdot \kappa_U$ (рисунок 10, б) відризняється від первинної напруги U_1 із-за втрат потужності та розсіювання магнітного потоку. Для трансформаторів напруги властиві похибка за коефіцієнтом трансформації (за напругою) і кутова похибка.

Похибка трансформатора за напругою дорівнює:

$$\Delta U\% = \frac{\kappa_U \cdot U_2 - U_1}{U_1} \cdot 100. \quad (8)$$

де κ_U – номінальний коефіцієнт трансформації ТН.

Похибка $\Delta U\%$ впливає на точність показів усіх вимірювальних приладів, що приєднуються до вторинної обмотки трансформатора. Її також необхідно враховувати при аналізі роботи реле напруги, потужності та ін., що отримують живлення від трансформатора.

Кутова похибка визначається кутом δ між вектором U_1 і повернутим на 180° вектором U_2 (рисунок 10, б).

Кутова похибка δ впливає на роботу ватметрів, лічильників енергії, фазометрів та інших аналогічних приладів, а також на роботу реле ватметрового типу.

Похибки трансформатора напруги залежать від конструкції магнітопроводу, магнітної проникності сталі, від значення коефіцієнта потужності вторинного навантаження та від первинної напруги.

До вторинної обмотки ТН приєднують паралельно всі обмотки напруги приладів і реле. Іноді від ТН живляться сигнальні, оперативні кола і кола автоматики.

Точність роботи трансформатора напруги залежить від навантаження. Максимальне навантаження, при якому трансформатор не виходить за межі зазначеної в паспорті точності, називається його номінальним навантаженням.

Вторинне навантаження трансформатора напруги визначається потужністю зовнішнього кола, тобто потужністю, що споживається підключеними паралельними обмотками приладів та реле, ВА.

Номінальне вторинне навантаження трансформатора напруги визначається за виразом:

$$S_2 = \sqrt{(\sum P_2)^2 + (\sum Q_2)^2} = \frac{U_{2H}^2}{z_2}, \quad (9)$$

де $\sum P_2$ – сума активних потужностей навантаження, Вт;
 $\sum Q_2$ – сума реактивних потужностей навантаження, вар.
 z_2 – повний опір зовнішнього кола, Ом.

В залежності від значення допустимої похибки трансформатори напруги виготовляють чотирьох класів точності: 0,2; 0,5; 1 і 3. Цифри вказують похибку за напругою (за коефіцієнтом трансформації), виражену у відсотках:

0,2 – для точних лабораторних вимірювань; 0,5 – для лічильників енергії (комерційний облік); 1 – для приєднання інших вимірювальних приладів; 3 – для приєднання реле.

Номінальне навантаження трансформатора напруги – це найбільше навантаження, при якому похибка не виходить за встановлені межі.

Крім цього, трансформатори напруги характеризуються ще й максимальною потужністю, яка визначає межу його навантаження за допустимим нагріванням обмоток. При навантаженні в межах від номінального до максимального ТН може тривалий час працювати без пошкодження, але при цьому він виходить із свого класу точності.

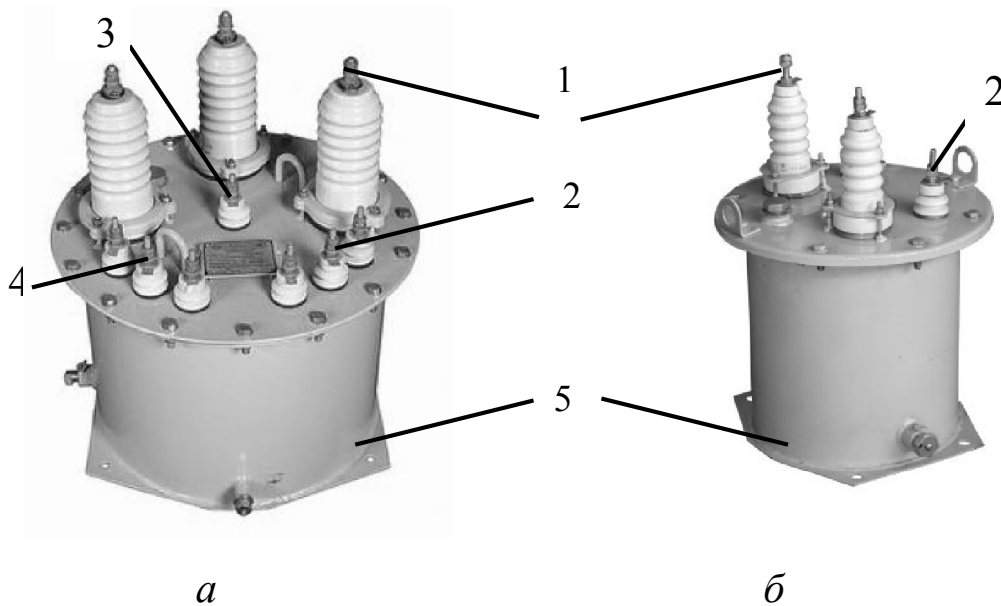
Трансформатори напруги виготовляють одно- і трифазними, із сухою або масляною ізоляцією. Обмотки сухих трансформаторів відкриті і вільно обтікаються повітрям, обмотки масляних трансформаторів розміщують у баках (або корпусах) наповненим трансформаторним маслом, яке водночас є ізоляцією і середовищем для охолодження трансформатора.

Трифазні трансформатори напруги:

НТМ-10: Н – трансформатор напруги, Т – трифазний, М – масляний, напругою 10 кВ;

НТМК-10 – трансформатор напруги, трифазний, масляний, каскадний (К), напругою 10 кВ;

НТМИ-10 – трансформатор напруги, трифазний, масляний, з контролем стану ізоляції (И), напругою 10 кВ (рисунок 11, а).



а – типу НТМИ – 10 (трифазний); *б* – типу НОМ – 10
1 – виводи первинної обмотки; 2 – виводи вторинної обмотки; 3 – заземлюючий вивід обмотки вищої напруги; 4 – виводи додаткової вторинної обмотки (для контролю ізоляції); 5 – бак

Рисунок 11 – Трансформатори напруги

Однофазні трансформатори напруги:

НОС-0,5: Н – трансформатор напруги, О – однофазний, С – сухий, напругою 0,5 кВ;

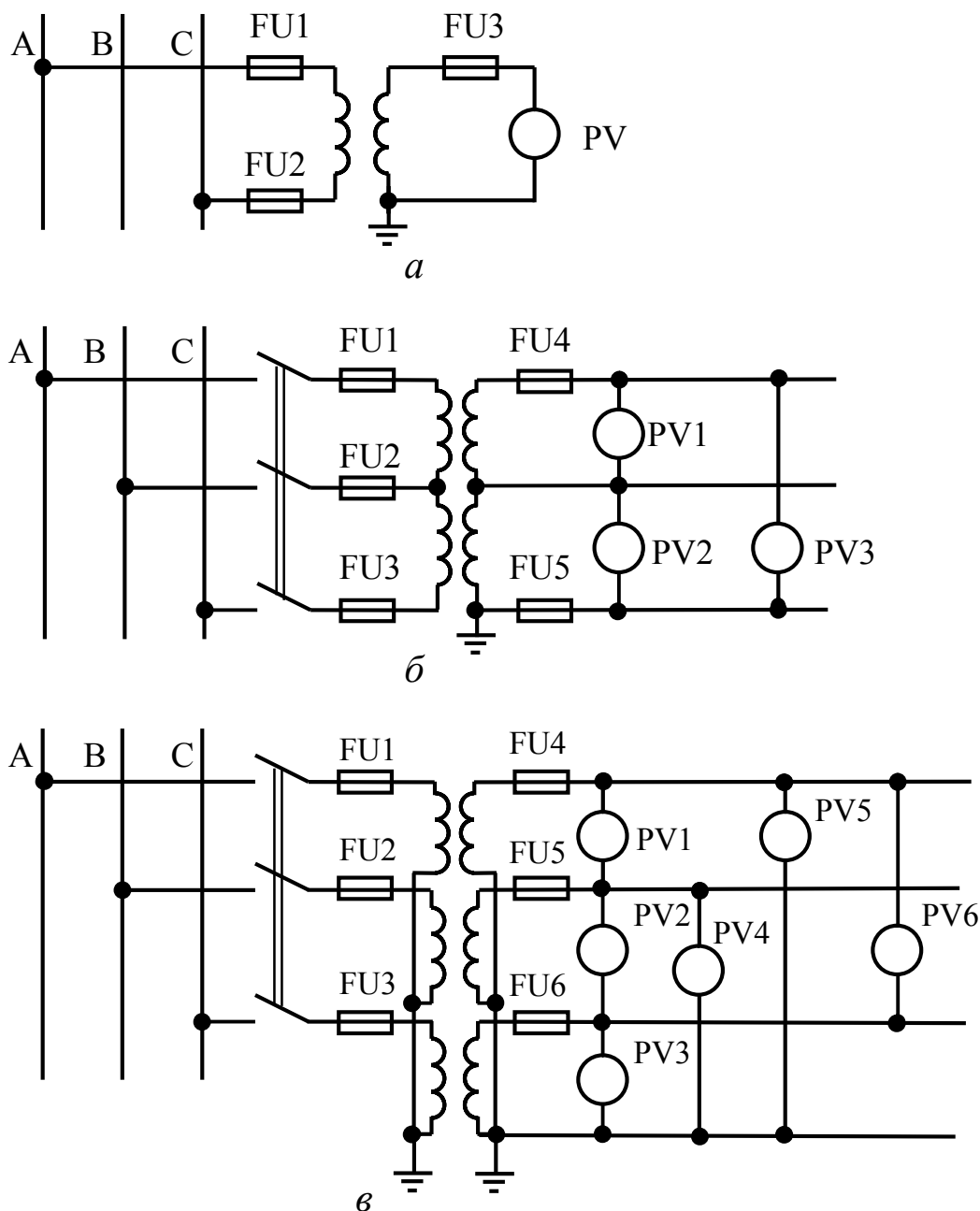
НОМ-10 – трансформатор напруги, однофазний, масляний, напругою 10 кВ (рисунок 11, б);

ЗНОМ-35 – трансформатор напруги, однофазний, масляний, напругою 35 кВ, із заземлюючим вводом обмотки вищої напруги (З).

5 Схеми з'єднання трансформаторів напруги

Якщо треба вимірювати лише лінійну (міжфазну) напругу мережі, то однофазні трансформатори (НОМ) вмикають за схемою

представлено на рисунку 12, *а*, або за схемою відкритого трикутника (для мереж з ізольованою нейтраллю) (рисунок 12, *б*).



а – один трансформатор напруги; *б* – два трансформатори з'єднані за схемою «відкритого трикутника»; *в* – три трансформатори з'єднані за схемою «зірки»

Рисунок 12 – Схеми підключення вимірювальних трансформаторів напруги

Схема підключення однофазних трансформаторів напруги за схемою «зірки» (рисунок 12, *в*) використовуються в мережах з глу-

хим заземленням нейтралі. Схема дозволяє вимірювати як фазну, так і лінійну напруги. Глухе заземлення нейтралі з боку вищої напруги дає змогу контролювати стан ізоляції первинної мережі. У нормальному режимі всі вольтметри контролю ізоляції показують фазну напругу. При замиканні однієї фази на землю вольтметр пошкодженої фази покаже нуль, а інші – лінійну напругу.

Схема із трифазним тристержневим трансформатором (НТМ-10) (рисунок 13) дає змогу виміряти три лінійні напруги.

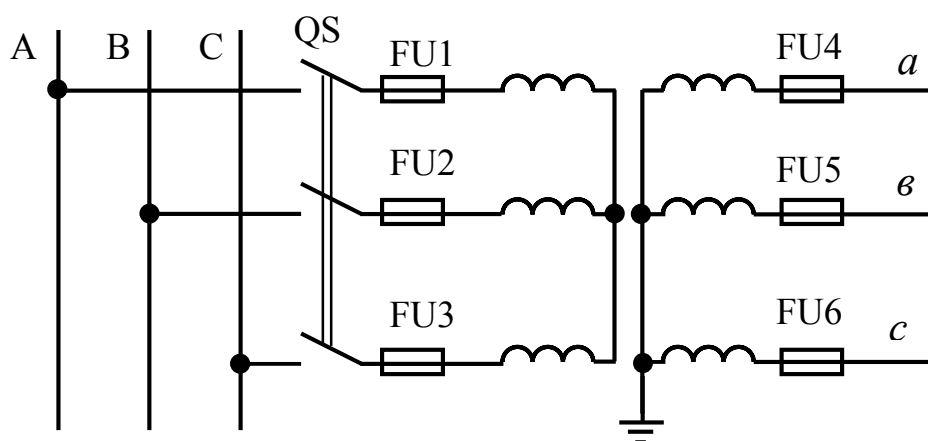


Рисунок 13 – Схема підключення обмоток тристержневого двообмоткового трансформатора напруги

В сільських електричних мережах широко використовують трифазні п'ятистержневі трансформатори НТМИ-6 та НТМИ-10 (І – контроль ізоляції).

Трансформатор НТМИ (рисунок 14) – має одну первинну (w_1) і дві вторинні обмотки (w_2 та w_3). Усі вони розміщені на трьох середніх осердях. Первинну (w_1) і основну вторинну (w_2) обмотки з'єднують зіркою, а їх нейтральну точку виводять на кришку трансформатора для заземлення. Додаткову вторинну обмотку (w_3) з'єднують у відкритий трикутник.

До основної вторинної обмотки (w_2) підключають вимірювальні прилади, а до додаткової (w_3) – реле захисту від замикання на землю і прилади сигналізації.

На виводах додаткової обмотки w_3 в нормальному режимі роботи мережі та при міжфазних к.з. напруга буде близькою до

нуля, а при однофазному замиканні на землю з'явиться потроєна напруга нульової послідовності. При цьому підключене до обмотки w_3 реле контролю ізоляції (реле напруги) KV забезпечує сигналізацію про замикання на землю в мережі.

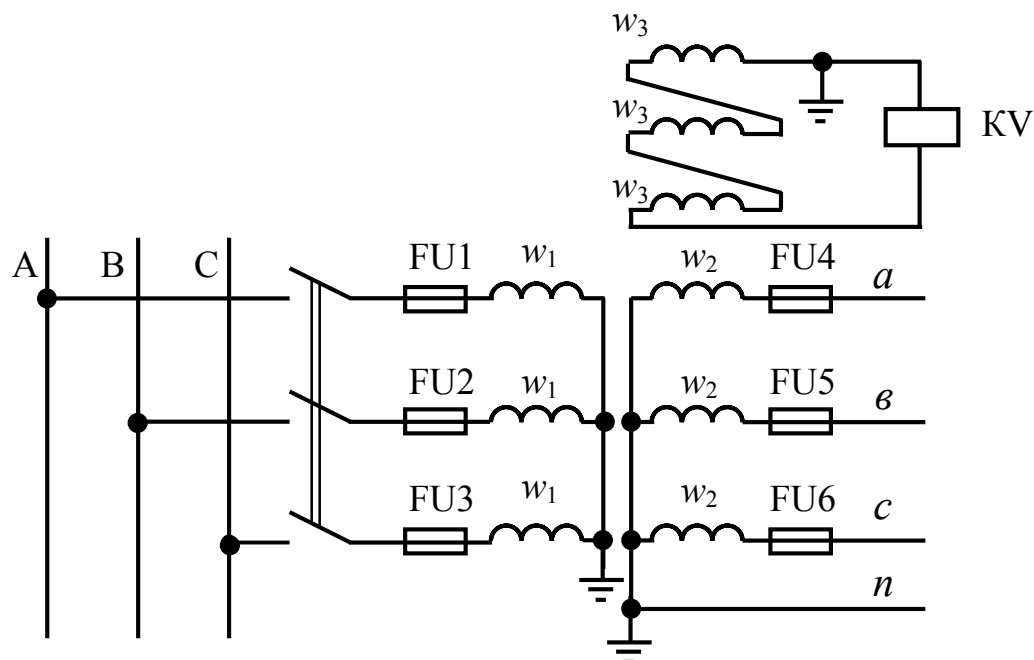


Рисунок 14 – Схема підключення обмоток п'ятистержневого триобмоткового трансформатора напруги НТМИ-10

Так як при металічному замиканні на землю напруга у пошкодженій фазі буде дорівнювати нулю, а двох інших фаз збільшиться в $\sqrt{3}$ разів, то за показами вольтметрів, що підключені на фазні напруги обмотки w_2 можна легко виявити пошкоджену фазу.

Додаткові два стержні п'ятистержневого трансформатора НТМИ призначені для замикання магнітних потоків нульової послідовності.

Заземлення нейтралі первинної обмотки w_1 трансформатора НТМИ (рисунок 14) необхідне для створення контуру струмам нульової послідовності. Заземлення вторинної обмотки w_2 необхідне для забезпечення безпеки персоналу.

Аналогічну схему можна також зібрати із трьох однофазних трансформаторів типу ЗНОМ, які мають дві вторинні обмотки і заземлений вивід нейтралі первинної обмотки.

6 Вибір вимірювальних трансформаторів

Трансформатори струму вибирають за конструктивним виконанням, родом встановлення, номінальною напругою, номінальним первинним струмом, номінальним вторинним струмом, класом точності та номінальною потужністю вторинного кола. В режимі короткого замикання необхідно перевірити трансформатор струму на динамічну і термічну стійкість. Умови вибору трансформаторів струму наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Умови вибору трансформаторів струму

Параметри трансформатора струму	Умови вибору
Номінальна напруга	$U_{н.тр} \geq U_{нм}$
Номінальний первинний струм	$I_{н.тр} \geq I_{роб\ max}$
Номінальний вторинний струм	в залежності від довжини вторинного кола
Клас точності	згідно із ПБЕ
Номінальна вторинна потужність	$S_{2\ розр} < S_{2н}$
Кратність струму динамічної стійкості	$i_y^{(3)} \leq k_\partial \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1н}$
Кратність односекундного струму термічної стійкості	$(I_k^{(3)})^2 \cdot t_{пр} \leq (k_t \cdot I_{1н})^2 \cdot t$

Трансформатори струму, призначені для релейного захисту додатково перевіряють на 10% похибку.

Силкові трансформатори і багатооб'ємні масляні вимикачі на напругу 35 кВ і вище мають вбудовані трансформатори струму, які необхідно використовувати для приєднання релейного захисту. ТВ – трансформатори струму вбудовані у масляні вимикачі, ТВТ – вбудовані в силкові трансформатори.

Розрахункова потужність вторинного кола трансформатора $S_{2\ розр}$, В·А, визначається за виразом:

$$S_{2\ розр} = \sum_{i=1}^n S_{прил.i} + I_{2н}^2 R_{пров} + I_{2н}^2 R_k, \quad (10)$$

де $\sum_{i=1}^n S_{\text{прил.}i}$ – сумарна потужність усіх приладів, підключених до трансформатора струму, В·А (довідкові дані);

I_{2H}^2 – номінальний струм вторинної обмотки трансформатора струму, А;

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

R_{κ} – активний опір контактів, Ом (приймається для всього кола рівним 0,1 Ом).

Допустимий опір з'єднувальних проводів можна знайти з виразу (10), якщо припустити що $S_{2 \text{ розр}} = S_{2H}$:

$$R_{\text{д.пров}} = \frac{S_{2H} - \left(\sum_{i=1}^n S_{\text{прил.}i} + I_{2H}^2 R_{\kappa} \right)}{I_{2H}^2} = z_{2H} - \left(\sum_{i=1}^n z_{\text{прил}} + R_{\kappa} \right), \quad (11)$$

де z_{2H} – номінальний опір вторинного кола трансформатора струму, Ом;

$\sum_{i=1}^n z_{\text{прил}}$ – сумарний повний опір підключених до трансформатора приладів, Ом.

Мінімально допустимий переріз з'єднувальних проводів:

$$F_{\text{д.пров}} = \frac{\rho \cdot l \cdot k_{\text{сх}}}{R_{\text{д.пров}}}, \quad (12)$$

де ρ – питомий опір матеріалу проводів, Ом·мм²/м;

l – довжина з'єднувальних проводів в один кінець (від ТС до вимірювального приладу), м;

$k_{\text{сх}}$ – коефіцієнт, що залежить від схеми включення вимірювальних приладів або реле.

За результатами розрахунку обирається стандартний переріз проводу $F_{\text{пров}}$ згідно умови:

$$F_{\text{пров}} \geq F_{\text{д.пров}}. \quad (13)$$

При цьому необхідно враховувати, що мінімальний переріз проводів приймається: для міді – 2,5 мм², для алюмінію – 4 мм².

Перевірку трансформатора струму на динамічну і термічну стійкість (таблиця 1) проводять з урахуванням коефіцієнта кратності струму динамічної стійкості k_d і односекундного струму термічної стійкості k_t (k_d, k_t – каталожні дані трансформатора).

$$k_d = \frac{i_{\max}}{\sqrt{2}I_{1H}}; \quad k_t = \frac{I_t}{I_{1H}}, \quad (14)$$

де i_{\max} – амплітуда максимально допустимого струму обраного трансформатора, А;

I_t – номінальний струм термічної стійкості, А;

I_{1H} – номінальний струм первинної обмотки трансформатора, А;

t – допустимий час протікання струму термічної стійкості, с.

Клас точності трансформаторів струму обирають в залежності від типу і класу точності приладів, які приєднуються до трансформаторів.

Вибір трансформаторів напруги.

Трансформатори напруги для живлення вимірювальних приладів і реле вибирають за конструктивним виконанням, родом встановлення, номінальною напругою первинної обмотки, класом точності, схемою з'єднання обмоток і.

Вибір трансформаторів за номінальною напругою проводиться за умовою:

$$U_{1H} \geq U_{нм}, \quad (15)$$

де U_{1H} – номінальна напруга первинної обмотки трансформатора, В.

$U_{нм}$ – номінальна напруга мережі, В.

Усі навантаження, які включаються на міжфазні напруги, приводяться до напруги $100/\sqrt{3}$ В.

Класи точності характеризуються найбільшими допустимими похибкою за напругою і кутовою похибкою за умови, що вторинне навантаження може змінюватися у межах $(0,25 \dots 1,0) S_{2тр.н}$ при $\cos \varphi = 0,8$ і при відхиленнях первинної напруги у межах $\delta U_{тн} = \pm 10\%$. Якщо від трансформатора живляться прилади різного класу точно-

сті вимірювання, то клас точності вибирають за найвищим класом точності приєднаних приладів.

Трансформатори напруги за вторинним навантаженням перевіряють за умовою:

$$S_{2_{тр.н}} \geq S_{2_{розр}}, \quad (16)$$

де $S_{2_{тр.н}}$ – номінальна потужність трансформатора напруги у прийнятому класі точності, В·А;

$S_{2_{розр}}$ – вторинна розрахункова потужність трансформатора напруги, В·А.

Якщо схема з'єднань обмоток трансформатора напруги відповідає схемі з'єднання паралельних котушок вимірювальних приладів (наприклад, ватметрів і лічильника до двох однофазних трансформаторів напруги, з'єднаних за схемою «відкритого трикутника»), то вторинне навантаження ТН визначається за виразом:

$$S_{2_{розр}} = \sqrt{(\sum P_{прил})^2 + (\sum Q_{прил})^2}, \quad (17)$$

де $\sum P_{прил}$, $\sum Q_{прил}$ – відповідно, сумарна активна і реактивна потужність приєднаних приладів (реле), Вт; вар.

Якщо схеми з'єднань обмоток трансформатора напруги і котушок напруги приладів різні (наприклад, приєднання ватметра і лічильників до трифазного трансформатора із з'єднанням обмоток «зірка-зірка»), то навантаження на кожну фазу точно визначити неможливо. У цьому випадку підраховують повне трифазне навантаження від усіх вимірювальних приладів і порівнюють його з трифазною номінальною потужністю трансформатора напруги або групи трьох однофазних трансформаторів у даному класі точності.

На електродинамічну термічну стійкість трансформатори напруги не перевіряють.

Запитання для самоконтролю

1. Які існують способи вмикання вимірювальних приладів та реле в мережу?
2. Які переваги не прямого вмикання вимірювальних приладів?
3. Призначення вимірювальних трансформаторів струму та напруги?
4. Що таке клас точності вимірювальних трансформаторів?
5. Що впливає на клас точності трансформаторів струму?
6. Що впливає на клас точності трансформаторів напруги?
7. Як обчислюється похибка вимірювальних трансформаторів струму?
8. Як обчислюється похибка вимірювальних трансформаторів напруги?
9. Які класи точності встановлені для вимірювальних трансформаторів струму?
10. Які класи точності встановлені для вимірювальних трансформаторів напруги?
11. Як класифікуються трансформатори струму та трансформатори напруги за способом встановлення?
12. Які є схеми вмикання трансформаторів струму?
13. Які є схеми вмикання трансформаторів напруги?
14. Що таке коефіцієнт схеми?
15. Чому категорично забороняється робота трансформаторів струму із розімкнутою вторинною обмоткою?
16. Як здійснюється контроль стану ізоляції в мережах із ізолюваною нейтраллю?
17. За якими параметрами вибирають трансформатори струму?
18. За якими параметрами вибирають трансформатори напруги?