

В. М. Кутін, д. т. н.; В. М. Лагутін, к. т. н.

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ГРУП СПОЛУЧЕННЯ ОБМОТОК СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

В статті аналізується ефективність методів визначення групи сполучення обмоток силових трансформаторів: прямого методу, методу двох вольтметрів та постійного струму. Пропонується пристрій для визначення груп сполучення обмоток, який використовує метод постійного струму і дозволяє автоматично визначити групу сполучення з мінімальними втратами часу.

Ключові слова: силовий трансформатор, група сполучення обмоток

Для паралельної роботи трансформаторів необхідно, щоб співпадали групи сполучення обмоток. Тому на стадії виготовлення, експлуатації та ремонту силових трансформаторів виникає потреба у визначенні групи сполучення обмоток, яка залежить від кутового зсуву векторів лінійних ЕРС обмоток високої та низької напруг однакових фаз трансформаторів, а також взаємного намотування та розташуванням обмоток на трансформаторі. В тих випадках, коли обмотка з'єднана в трикутник, кутовий зсув залежить також і від послідовності з'єднання фаз при створенні трикутника (а – у або а – z). Щоб визначити напрямок намотування по зовнішньому вигляду, потрібно спочатку знати розташування початку та кінця обмотки.

За ГОСТ 11677-85 початки фаз обмоток високої напруги (ВН) позначається літерами А, В, С, кінці –Х, Y, Z, а обмотки низької напруги (НН) відповідно а, b, с та х, у, z. Знаючи початок і кінець обмотки, напрямок її намотування визначається так: якщо дивитися на обмотку з боку її початку, то при напрямку витків обмотки проти годинникової стрілки обмотка зветься лівою, а при напрямку витків за годинниковою стрілкою – правою.

Для трифазних двообмоточних трансформаторів (ГОСТ 11677-85) прийняті наступні умовні позначення схем обмоток та груп їх сполучень:

- а) У/У_н–0: обмотка ВН з'єднана в зірку, обмотка НН – в зірку з виведеною нейтраллю; група 0;
- б) У/Д–11: обмотка ВН з'єднана в зірку, обмотка НН – в трикутник; група 11;
- в) У_н/Д–11: обмотка ВН з'єднана в зірку з виведеною нейтраллю, обмотка НН – втрикутник; група 11;
- г) У/З_н–11: обмотка ВН з'єднана в зірку, обмотка НН – в зигзаг з виведеною нейтраллю; група 11;
- д) Д/У_н–11: обмотка ВН з'єднана в трикутник, обмотка НН – в зірку з виведеною нейтраллю; група 11.

Увімкнення на паралельну роботу двох трансформаторів з різними групами сполучення призводить до виникнення в трансформаторах зрівнювального струму, величина якого залежить від різниці між кутовими зсувами векторів ЕРС обох трансформаторів:

$$I_{зр} = \frac{20 \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{\frac{U_{\kappa 1}}{I_1} + \frac{U_{\kappa 2}}{I_2}}, \quad (1)$$

де α - кут зсуву між ЕРС обох трансформаторів; $U_{\kappa 1}$, $U_{\kappa 2}$ – напруга КЗ трансформаторів; I_1 , I_2 – номінальні струми, А.

Якщо виходити з того, що на паралельну роботу вмикаються два трансформатори з однаковими напругами КЗ, наприклад 5%, та однаковою потужністю і рівними струмами, то

формула (1) після перетворень приймає вид:

$$I_{zp} = 20 \cdot I \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (2)$$

З виразу (2) слідує, що якщо при заводських випробуваннях допустили помилку і випустили трансформатор зі з'єднанням по групі 6 замість групи 0, то при його увімкненні в експлуатацію паралельно з трансформатором з групою 0, зрівнювальний струм буде:

$$I_{zp} = 20 \cdot I \cdot \sin\left(\frac{180}{2}\right) = 20 \cdot I_{ном} \quad (3)$$

Таким чином, помилка у визначенні групи сполучення обмоток може привести до аварії при увімкненні трансформатора на паралельну роботу з трансформатором, який має іншу групу.

Групу сполучення обмоток можна перевірити одним з наступних методів [1]:

- прямим методом (фазометром);
- методом двох вольтметрів;
- методом містка при перевірці коефіцієнта трансформації;
- методом постійного струму.

Одночасно з перевіркою групи контролюють правильність маркування ввідів трансформатора.

1 Метод фазометра

Перевірку групи сполучення фазометром називають прямим методом, так як він дає можливість безпосередньо визначити кутовий зсув між первинною та вторинною ЕРС. Якщо шкалу чотирьох квадрантного однофазного фазометра відградувати в годинникових діленнях, то відхилення стрілки буде вказувати групу сполучення в годинниковому позначенні.

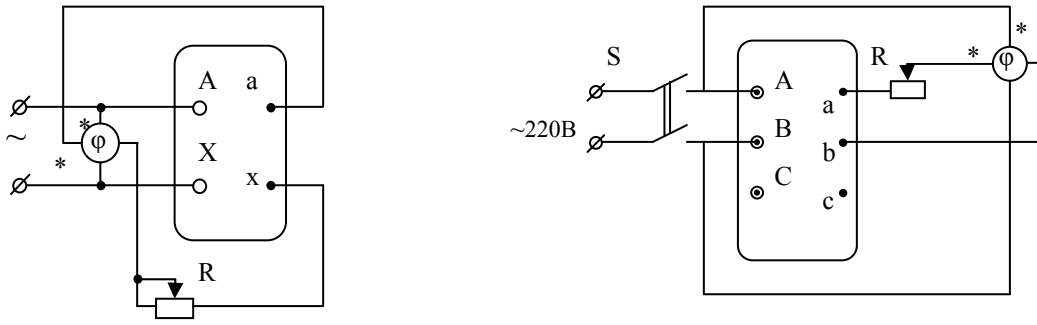
Найбільше підходить для випробувань чотирьох квадратний фазометр зі шкалою 360° типу Э-500. Паралельна обмотка фазометра вмикається на лінійну напругу зі сторони живлення НН, а послідовна – на лінійну напругу обмотки ВН. В залежності від характеристики трансформаторів паралельну обмотку фазометра можна вмикати через трансформатор напруги TV, а послідовну – завжди вмикають через резистор R [1].

Резистор R вибирають виходячи з характеристик фазометра та умов випробування так, щоб струм, який проходить в послідовній обмотці не перевищував номінального струму фазометра. Напруга, яка підводиться до паралельної обмотки фазометра також не повинна перевищувати його номінального значення.

При перевірці групи сполучення обмоток трифазних трансформаторів виконують не менше двох вимірювань (для двох пар відповідних лінійних ввідів). Повну схему фазометра перед введенням в експлуатацію періодично перевіряють при завчасно відомих групах сполучення, при чому в тій же схемі, в якій фазометр працює при випробуваннях.

При визначенні групи сполучення обмоток методом фазометра необхідно для запобігання помилок перевірити правильність чергування підведеної до обмоток трансформатора трифазної напруги.

Найбільш просто та зручно виконувати перевірку груп сполучення за допомогою спеціального фазопоказчика типу Э-500/2.



а) однофазний трансформатор; б) трифазний трансформатор;
 Рис. 1. Схема перевірки групи сполучення обмоток силового трансформатора прямим методом

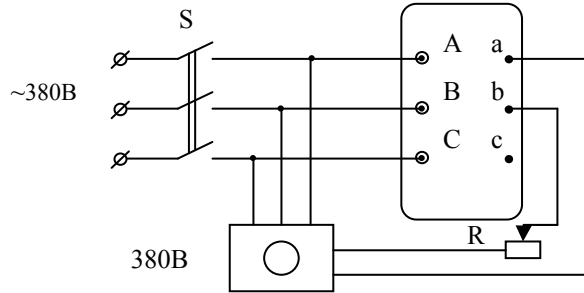


Рис. 2. Визначення групи сполучення універсальним фазопоказником типу Э-500/2

2 Метод двох вольтметрів

Метод засновано на поєднанні векторних діаграм первинної та вторинної ЕРС та вимірюванні напруг між відповідними вводами з наступним порівнянням цих напруг з розрахунковими. Прийнято поєднувати початки однакових фаз обмоток ВН та НН (на практиці поєднують вводи А і а).

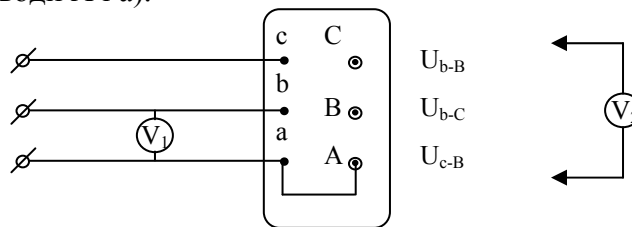


Рис. 3. Схема перевірки групи сполучення трансформатора методом двох вольтметрів

Для перевірки групи сполучення обмоток необхідно визначити напруги на вводах в – В, в – С та с – В поєднаних векторних діаграм. Ці напруги порівнюють з напругами, які визначають за допомогою формул таблиці 1. [1].

Таблиця 1

Визначення груп сполучення обмоток методом двох вольтметрів за допомогою коефіцієнтів трансформації групи

| ГСО | $\frac{U_{b-B}}{U_{HH}}$ | $\frac{U_{b-C}}{U_{HH}}$ | $\frac{U_{c-B}}{U_{HH}}$ |
|-----|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| 0 | $K - 1$ | $\sqrt{1 - K + K^2}$ | $\sqrt{1 - K + K^2}$ |
| 1 | $\sqrt{1 - \sqrt{3} \cdot K + K^2}$ | $\sqrt{1 - \sqrt{3} \cdot K + K^2}$ | $\sqrt{1 + K^2}$ |
| 2 | $\sqrt{1 - K + K^2}$ | $K - 1$ | $\sqrt{1 + K + K^2}$ |

Продовження табл. 1

| ГСО | $\frac{U_{b-B}}{U_{HH}}$ | $\frac{U_{b-C}}{U_{HH}}$ | $\frac{U_{c-B}}{U_{HH}}$ |
|-----|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 3 | $\sqrt{1+K^2}$ | $\sqrt{1-\sqrt{3}\cdot K+K^2}$ | $\sqrt{1+\sqrt{3}\cdot K+K^2}$ |
| 4 | $\sqrt{1+K+K^2}$ | $\sqrt{1-K+K^2}$ | $K+1$ |
| 5 | $\sqrt{1+\sqrt{3}\cdot K+K^2}$ | $\sqrt{1+K^2}$ | $\sqrt{1+\sqrt{3}\cdot K+K^2}$ |
| 6 | $K+1$ | $\sqrt{1+K+K^2}$ | $\sqrt{1+K+K^2}$ |
| 7 | $\sqrt{1+\sqrt{3}\cdot K+K^2}$ | $\sqrt{1+\sqrt{3}\cdot K+K^2}$ | $\sqrt{1+K^2}$ |
| 8 | $\sqrt{1+K+K^2}$ | $K+1$ | $\sqrt{1-K+K^2}$ |
| 9 | $\sqrt{1+K^2}$ | $\sqrt{1+\sqrt{3}\cdot K+K^2}$ | $\sqrt{1-\sqrt{3}\cdot K+K^2}$ |
| 10 | $\sqrt{1-K+K^2}$ | $\sqrt{1+K+K^2}$ | $K-1$ |
| 11 | $\sqrt{1-\sqrt{3}\cdot K+K^2}$ | $\sqrt{1+K^2}$ | $\sqrt{1-\sqrt{3}\cdot K+K^2}$ |

Примітка: K – коефіцієнт трансформації трансформатора

При випробуваннях на місці установки групу сполучення не визначають, а лише перевіряють її відповідність паспортним даним. Тому в цих умовах використовують більш простий метод двох вольтметрів, де живлячу напругу підводять до обмотки ВН, а не НН. Вимірювати всі напруги та перераховувати їх за формулами таблиці 1 немає необхідності; достатньо порівняти їх з підведеною лінійною напругою U_{B-C} та по таблиці 2, в залежності від того, більше, рівне або менше вони (умовно позначаємо літерами «б», «р», «м»), встановити групу сполучення обмотки. Для такого дослідження зручно використовувати схему з одним вольтметром (рисунк 4).

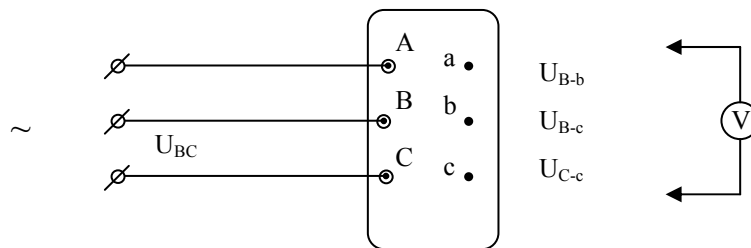


Рис. 4. Схема для перевірки групи сполучення обмоток одним вольтметром

Таблиця 2

Визначення групи сполучення обмоток одним вольтметром

| Показник | ГСО | | | | | | | | | | | | |
|---|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|--|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 0 | 11 | |
| Порівняння вимірюваної напруги з підведеною | | | | | | | | | | | | | |
| В-b | м | м | м | р | б | б | б | б | б | р | м | м | |
| В-с | м | р | б | б | б | б | б | р | м | м | м | м | |
| С-с | м | м | м | м | м | р | б | б | б | б | б | р | |

При живленні схеми двох вольтметрів від несиметричної трифазної мережі при визначенні групи сполучення можна допустити грубі помилки. Для врахування несиметрії використовують формули перерахунку (таблиця 3), в яких:

$$\left. \begin{aligned} \Delta_1 &= \frac{U_{AB}}{U_{cp}} - 1; \\ \Delta_2 &= \frac{U_{BC}}{U_{cp}} - 1; \\ \Delta_3 &= \frac{U_{CA}}{U_{cp}} - 1, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

де
$$U_{cp} = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3}, \quad (5)$$

Алгебраїчна сума $\sum \Delta$ завжди дорівнює нулю

Таблиця 3

Розрахункові формули для визначення груп сполучення обмоток при несиметричному живленні

| ГСО | Коефіцієнт групи | Розрахункова формула |
|-----|--------------------------|--|
| 0 | $\frac{U_{B-b}}{U_{HH}}$ | $(K - 1)(1 + \Delta_1)$ |
| | $\frac{U_{B-c}}{U_{HH}}$ | $\sqrt{1 - K(1 - 4\Delta_2) + K^2(1 + 2\Delta_3) + 2\Delta_1}$ |
| | $\frac{U_{C-b}}{U_{HH}}$ | $\sqrt{1 - K(1 - 4\Delta_2) + K^2(1 + 2\Delta_1) + 2\Delta_3}$ |
| 11 | $\frac{U_{B-b}}{U_{HH}}$ | $\sqrt{1 - \sqrt{3} \cdot K[1 + \frac{4}{3}(\Delta_1 - \Delta_3)] + K^2(1 + 2\Delta_1) - 2\Delta_3}$ |
| | $\frac{U_{B-c}}{U_{HH}}$ | $\sqrt{1 - 2,32 \cdot K(\Delta_2 - \Delta_1) + K^2(1 + 2\Delta_3) - 2\Delta_3}$ |
| | $\frac{U_{C-b}}{U_{HH}}$ | $\sqrt{1 - \sqrt{3} \cdot K[1 + \frac{4}{3}(\Delta_1 - \Delta_2)] + K^2(1 + 2\Delta_1) - 2\Delta_2}$ |

3 Метод постійного струму

За цим методом по черзі до затискачів АВ, ВС і АС обмотки ВН подається імпульс постійного струму, а на затискачах ab, bc і ac обмотки НН фіксують знаки наведеної ЕРС. Висновки про групу сполучення складають за результатами порівняння отриманих знаків наведеної ЕРС з таблицею показчиком групи. Недоліком цього методу є необхідність великої кількості дослідів (три) і вимірювань (дев'ять). З метою спрощення процесу визначення групи сполучення обмоток силових трансформаторів проводились дослідження, які дозволили визначити групу сполучення обмоток за допомогою одного дослідів [2, 3, 4].

Таблиця 4

Знаки наведеної ЕРС на стороні НН при подачі живлення на сторону ВН силового трансформатора

| Група сполучення обмоток | Обмотка НН | | |
|--------------------------|------------|----|----|
| | ab | bc | ca |
| 1 | - | + | + |
| 2 | 0 | + | + |
| 3 | + | + | + |
| 4 | + | 0 | + |
| 5 | + | - | + |
| 6 | + | - | 0 |
| 7 | + | - | - |
| 8 | 0 | - | - |
| 9 | - | - | - |
| 10 | - | 0 | - |
| 11 | - | + | - |
| 0 | - | + | 0 |

Для визначення групи сполучення обмоток (ГСО) трансформатора необхідно проведення лише одного досліду, що досягається шляхом використання спеціальної схеми підключення джерела постійного струму до введів обмотки ВН силового трансформатора в залежності від схеми з'єднання його обмоток. В результаті теоретичних та експериментальних досліджень було встановлено, якщо в якості базової схеми підключення прийняти приєднання позитивного полюса джерела до вводу фази В, а негативного – до вводу фази А обмотки ВН силового трансформатора, то незалежно від схеми сполучення його обмоток при випробуваннях получують однозначну відповідність між номером ГСО та комбінацією трьох знаків наведеної ЕРС. При схемі сполучення обмоток Д/У цей варіант приєднання зберігається, при У/У (Д) – додатково встановлюється перемичка між вводами А і С, а в випадку Д/Д – між В і С. В таблиці 4 наведено знаки наведеної ЕРС при різних схемах підключення джерела постійного струму.

Використовуючи ці закономірності була розроблена та виготовлена серія пристроїв для визначення групи сполучення обмоток трансформаторів, які в порівнянні з аналогічними пристроями, мають ряд переваг:

- для визначення ГСО необхідно проведення лише одного досліду;
- повністю виключаються всі проміжні операції, які виконуються поза пристроєм;
- відпадає необхідність в використанні таблиці – показчика ГСО;
- пристрій може використовуватися для визначення ГСО при будь-яких схемах з'єднання обмоток трансформаторів.

На рисунку 5 наведена структурна схема пристрою для визначення ГСО трансформаторів, який складається з джерела постійного струму, пускової кнопки *SB*, перемикача схеми з'єднання, блока обмеження рівня напруг вхідних сигналів, оптоелектронного перетворювача рівнів ТТЛ, блока реєстрів, дешифратора та блока індикації, а також допоміжних елементів, які необхідні для забезпечення роботи пристрою в автоматичному режимі.

Пристрій працює наступним чином: його затискачі А, В, С та а, b, с приєднуються до відповідних затискачів обмоток ВН та НН силового трансформатора. Перемикач схеми сполучення встановлюється в потрібне положення. Пристрій готовий до роботи.

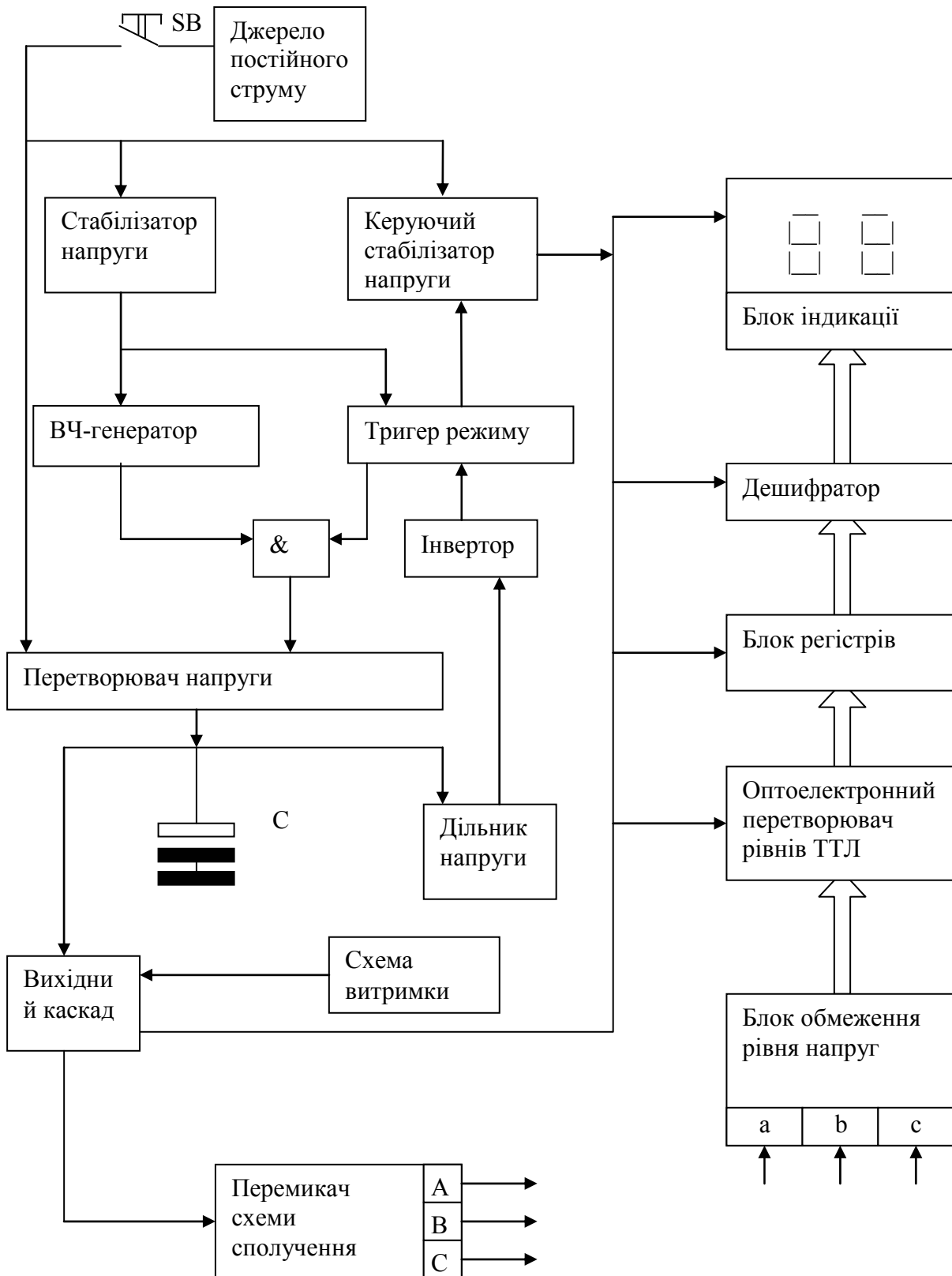


Рис. 5. Структурна схема пристрою для визначення групи сполучення обмоток трансформатора

Шляхом натискування пускової кнопки SB здійснюється запуск пристрою. При цьому постійна напруга $+9V$ від джерела постійного струму подається на входи: стабілізатора напруги, керуючого стабілізатора напруги та перетворювача напруг. З виходу стабілізатора напруги $+5V$ подається на вхід високочастотного генератора (15 кГц), запускаючи його, і на вхід \bar{R} тригера режиму, який приводиться в початковий стан. З виходу \bar{Q} тригера режиму

при цьому знімається сигнал «1», який поступає на другий вхід логічного елемента «І» та вхід керуючого стабілізатора напруги. Якщо одночасно з ним на перший вхід логічного елемента «І» поступає сигнал від високочастотного генератора, то з його виходу знімається сигнал на перетворювач напруги, дозволяючи його роботу.

Перетворювач напруги заряджає розрядний конденсатор C до напруги 120В. Як тільки конденсатор C буде заряджений, то з його позитивній обкладинці через дільник напруги та інвертор подається сигнал на вхід \bar{S} тригера режиму. Тригер перекидається в інший стан, а з його \bar{Q} виходу знімається сигнал «0», що призводить до зупинки роботи перетворювача напруги.

З виходу керуючого стабілізатора напруги живлення +5В подається на блок індикації, дешифратор, схему витримки та оптодіодний вихідного каскаду. В блоці реєстрів живлення поступає на входи S всіх тригерів та вхід R , який керує станом блока реєстрів, тригера. В результаті інші три пари тригерів блока переходять в початковий стан. Схема витримки видає живлення на базу транзистора вихідного каскаду з деякою витримкою часу, яка достатня для приведення в початковий стан тригерів блоку реєстрів. Після чого транзистор відкривається, що призводить до відкриття оптодіодного вихідного каскаду. В результаті розрядний конденсатор C через вхідний каскад та перемикач схеми сполучення розряджається на обмотку ВН силового трансформатора. ЕРС, які наводяться на стороні НН, поступають в блок обмеження рівнів напруг вхідних сигналів та в оптоелектронний перетворювач рівнів напруг вхідних сигналів та в оптоелектронний перетворювач рівнів ТТЛ, який складається з шести оптронів з підсилювачами. З його виходів сигнали поступають в блок реєстрів, де знаки ЕРС фіксуються за допомогою тригерів. З блоку реєстрів сигнали поступають в дешифратор, який являє собою програмуючий запам'ятовуючий пристрій (ПЗП), в пам'яті якого зберігається інформація про ГСО (дивись таблицю 4). З дешифратора після порівняння вхідного сигналу з інформацією в ПЗП видається команда на блок індикації, який складається з двох світлодіодних матриць, тобто на ньому висвітлюється номер ГСО силового трансформатора.

Таким чином, використання даного пристрою дозволяє надійно та оперативно визначити номер групи сполучення обмоток трансформаторів, що підвищує ефективність роботи персоналу.

4 Метод містка

Цей метод визначення не набув широкого розповсюдження в експлуатації і використовується при перевірці коефіцієнтів трансформації силових трансформаторів на заводах, де їх виготовляють.

Висновки

1. Прямий метод для визначення ГСО трансформаторів є незручним тому, що при користуванні ним потрібно підбирати резистор, який вмикається в послідовну обмотку фазометра.
2. Метод двох вольтметрів потребує проведення вимірювань та багатьох обчислень для визначення ГСО і контролю симетрії напруги живлення.
3. Метод постійного струму дозволяє визначити ГСО трансформаторів шляхом проведення одного досліду для будь-яких схем з мінімальними витратами часу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Каганович Е. А., Райхлин И. М. Испытания трансформаторов мощностью до 6300 кВ·А и напряжением до 35 кВ. – М.: Энергия, 1980. – 312 с.
 2. Сахновский Н. Л. Испытание и проверка электрического оборудования. – М.: Энергия, 1975. – 104 с.
 3. Кутин В. М., Лагутин В. М., Коваль О. Л. Устройство для определения группы соединения обмоток
- Наукові праці ВНТУ, 2008, № 2

трансформаторов (УКГ-3)//Электрические станции. – 1988. - № 4 – с. 11-12.

4. Кутин В. М., Лагутин В. М. Визначення груп з'єднання обмоток силових трансформаторів // Электричество и электрификация. – 2003. - № 8. – с. 31-33.

Кутін Василь Михайлович – д.т.н., професор кафедри електричних станцій та систем;

Лагутін Валерій Михайлович – к.т.н., доцент кафедри електричних станцій та систем,

Вінницький національний технічний університет.