

В. М. Кутин, д. т. н., проф.; В. М. Лагутин, к. т. н., доц.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРУПП СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В статье анализируются эффективность методов определения группы соединения обмоток силовых трансформаторов: прямой метод, метод двух вольтметров и постоянного тока. Предлагается устройство для определения группы соединения обмоток, который использует метод постоянного тока и позволяет автоматически определять группу соединения с минимальными затратами времени

Ключевые слова: силовой трансформатор, группа соединения обмоток

Для параллельной работы трансформаторов необходимо, чтобы совпадали группы соединения обмоток. Поэтому на стадии изготовления, эксплуатации и ремонта силовых трансформаторов возникает потребность в определении группы соединения обмоток, которая зависит от углового сдвига векторов линейных ЭДС обмоток высокого и низкого напряжений одноименных фаз трансформаторов, а также их взаимной намотки и расположения обмоток на трансформаторе. В тех случаях, когда обмотка соединена в треугольник, угловой сдвиг зависит также и от последовательности соединения фаз при образовании треугольника (а-у или а-з). Для определения направления обмотки по внешнему виду необходимо сначала знать расположение начала и конца обмотки.

По ГОСТ 11677-85 начала фаз обмоток высокого напряжения (ВН) обозначаются буквами А, В, С, концы – Х, Y, Z, а обмоток низкого напряжения (НН) соответственно а, b, с и х, у, z. Зная начало и конец обмотки, направление ее намотки определяется следующим образом: если смотреть на обмотку со стороны ее начала, то при направлении витков обмотки против часовой стрелки обмотка называется левой, а при направлении по часовой стрелке – правой.

Для трехфазных двухобмоточных трансформаторов (ГОСТ 11677-85) приняты следующие условия обозначения схем обмоток и групп их соединений:

- а) У/У_Н-0: обмотка ВН соединена в звезду, обмотка НН – в звезду в выведенной нейтралью; группа 0;
- б) У/Д-11: обмотка ВН соединена в звезду, обмотка НН – в треугольник; группа 11;
- в) У_Н/Д-11: обмотка ВН соединена в звезду с выведенной нейтралью, обмотка НН – в треугольник; группа 11;
- г) У/З_Н-11: обмотка ВН соединена в звезду, обмотка НН- в зигзаг с выведенной нейтралью; группа 11;
- д) Д/У_Н-11: обмотка ВН соединена в треугольник, обмотка НН – в звезду с выведенной нейтралью; группа 11.

Включение на параллельную работу двух трансформаторов с разными группами соединения приводит до возникновения в трансформаторах уравнительного тока, величина которого зависит от разницы между угловыми сдвигами векторов ЭДС обоих трансформаторов:

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

где α – угол сдвига между ЭДС трансформаторов; $U_{\kappa 1}$, $U_{\kappa 2}$ – напряжение КЗ трансформаторов; I_1 , I_2 – номинальные токи, А.

Если исходить из того, что на параллельную работу включаются два трансформатора с

одинаковыми напряжениями КЗ, например 5%, одинаковой мощностью и одинаковыми токами, то формула (1) после преобразований примет вид:

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

Из выражения (2) следует, что если при заводских испытаниях допустили ошибку и выпустили трансформатор с соединением по группе 6 вместо группы 0, то при его включении в эксплуатацию параллельно с трансформатором с группой 0, уравнильный ток будет:

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

Таким образом, ошибка в определении группы соединения обмоток может привести к аварии при включении трансформаторов на параллельную работу с трансформатором, который имеет другую группу.

Группу соединения обмоток можно проверить одним из следующих методов [1]:

- прямым методом (фазометром);
- методом двух вольтметров;
- методом моста при проверке коэффициента трансформации;
- методом постоянного трансформатора.

1 Метод фазометра

Проверку группы соединения фазометром называют прямым методом, так как он дает возможность непосредственно определить угловой сдвиг между первичной и вторичной ЭДС. Если шкалу четырехкватратного однофазного фазометра отградуировать в часовых делениях, то отклонение стрелки будет указывать группу соединения в часовом обозначении.

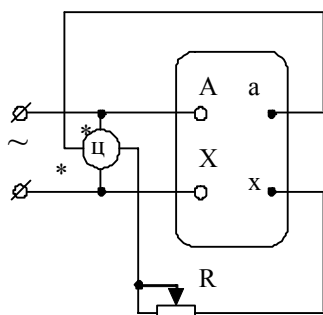
Более всего подходит для испытаний четырехкватратный фазометр с шкалой 360° типа Э-500. Параллельная обмотка фазометра включается на линейные напряжения со стороны питания НН, а последовательная – на линейное напряжение обмотки ВН. В зависимости от характеристики трансформаторов параллельную обмотку фазометра можно включать через трансформатор TV, а последовательную – всегда включают через резистор R [1].

Резистор R выбирают исходя из характеристик фазометра и целовий испытаний таким образом, чтобы ток который проходит по последовательной обмотке не был больше номинального тока фазометра. Напряжение, которое подводится к параллельной обмотке фазометра, также не должно быть больше его номинального значения.

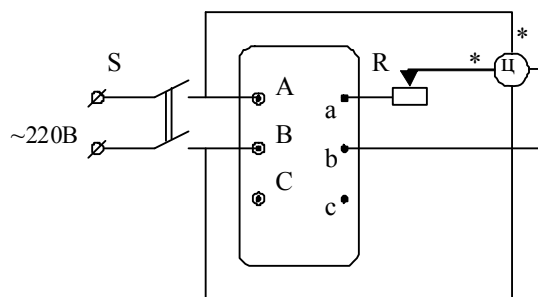
При проверке групп соединения обмоток трехфазных трансформаторов выполняют не меньше двух измерений (для двух пар соответствующих линейных вводов). Полную схему фазометра перед введением в эксплуатацию периодически проверяют по заранее известным группам соединения в той же схеме, в которой фазометр использовался при испытаниях.

При определении группы соединения обмоток методом фазометра необходимо для избежания ошибок проверить правильность чередования подведенного до обмоток трансформатора трехфазного напряжения.

Процесс всего и удобно выполнять проверку групп соединений с помощью специального фазоуказателя типа Э-500/2.



а) однофазный трансформатор;



б) трехфазный трансформатор;

Рис. 1. Схема проверки группы соединения обмоток силового трансформатора прямым методом

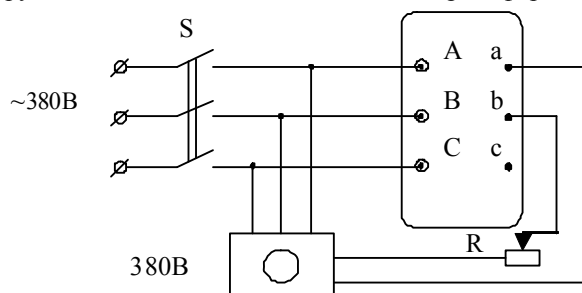


Рис. 2. Определение группы соединения универсальным фазоуказателем типа Э-500/2

2 Метод двух вольтметров

Метод основан на объединении векторных диаграмм первичной и вторичной ЭДС и измерении напряжений между соответствующими вводами с последующим сравнением этих напряжений с расчетными. Принято объединять начала одноименных фаз обмоток ВН и НН (на практике объединяют вводы А и а).

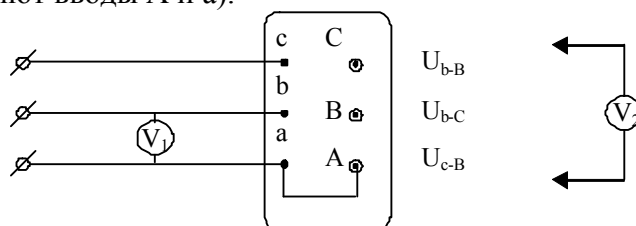


Рис. 3. Схема проверки группы соединения трансформатора методом двух вольтметров

Для проверки группы соединения обмоток необходимо определить напряжения на вводах b-B, b-C и c-C объединенных векторных диаграмм. Эти напряжения сравнивают с напряжениями, которые определяют с помощью формул таблицы 1[1].

Таблица 1

Определение групп обмоток методом двух вольтметров с помощью коэффициентов трансформации группы

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	$\sqrt{1 - K + K^2}$	$K - 1$	$\sqrt{1 + K + K^2}$
3	$\sqrt{1 + K^2}$	$\sqrt{1 - \sqrt{3} \cdot K + K^2}$	$\sqrt{1 + \sqrt{3} \cdot K + K^2}$

Продолжение табл. 1

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

При испытаниях на месте установки группу соединения не определяют, а только проверяют и соответствие паспортным данным. Поэтому в этих условиях используют более простой метод двух вольтметров, где питающие напряжение подводят к обмотке ВН, а не к НН. Измерять все напряжения и пересчитывать их по формулам таблицы 1 нет необходимости: достаточно сравнить их с подведенным линейным напряжением U_{B-C} и по таблице 2, в зависимости от того больше, равно или меньше они (условно обозначаем буквами «б», «р», «м»), определить группу соединения обмотки.

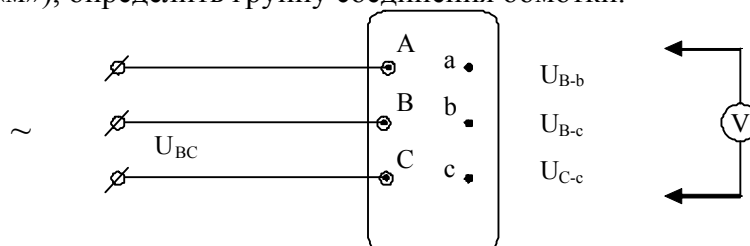


Рис. 4. Схема для проверки группы соединения обмоток одним вольтметром

Таблица 2

Определение групп соединения обмоток одним вольтметром

Показатель	ГСО											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	11
Сравнение измеренного напряжения с подведенным												
В-б	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 питании схем двух вольтметров от несимметричной трехфазной сети при определении группы соединений можно допустить грубые ошибки. Для учета несимметрии используют формулы перерасчета (таблица 3), в которых:

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

где

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

Алгебраическая сумма $\sum \Delta$ всегда равняется нулю.

Таблица 3

Расчетные формулы для групп соединения обмоток при несимметричном питании

ГСО	Коэффициент группы	Расчетная 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 постоянного тока

Согласно этому методу до зажимов АВ, ВС и АС обмотки ВН поочередно подается импульс постоянного тока, а на зажимах ab, bc и ac обмотки НН фиксируют знаки наведенной ЭДС. Выводы про группу соединения делают по результатам сравнения полученных знаков наведенной ЭДС с таблицей-указателем группы. Недостатком этого метода является необходимость проведения большого количества опытов (три) и измерений (девять). С целью упрощения процесса определения группы соединения обмоток силовых трансформаторов проводились исследования, которые позволили определять группу соединения обмоток с помощью одного опыта [2, 3, 4].

Таблица 4

Знаки наведенной ЭДС на стороне НН при подаче питания на сторону ВН силового трансформатора

Группа соединения 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 определения группы соединения обмоток (ГСО) трансформатора необходимо проведение лишь одного опыта, что достигается использованием специальной схемы подключения источника постоянного тока к вводам обмотки ВН силового трансформатора в зависимости от схемы соединения его обмоток. В результате теоретических и экспериментальных исследований было установлено, что если за базовую схему подключения принять просоединение положительного полюса источника ввод фазы В, а отрицательно – ввод фазы А обмоток ВН силового трансформатора, то независимо от схемы соединения его обмоток при испытаниях получаем однозначное соответствие между номером ГСО и комбинацией трех знаков наведенной ЭДС. При схеме соединения обмоток Д/У этот вариант присоединения сохраняется; при У/У(Д) – дополнительно устанавливается перемычка между вводами А и С, а в случае Д/Д – между В и С. В таблице 4 приведены знаки наведенной ЭДС при разных схемах подключения источника постоянного тока.

Используя эти закономерности была разработана и изготовлена серия устройств для определения группы соединения обмоток трансформаторов, которая по сравнению с аналогичными устройствами, имеет ряд преимуществ:

- для определения ГСО необходимо проведение лишь одного опыта;
- полностью исключаются все промежуточные операции, которые выполняются вне устройства;
- отпадает необходимость в использовании для определения ГСО при любых схемах соединения обмоток трансформаторов.

На рисунке 5 приведена структурная схема устройства для определения ГСО трансформаторов, которое состоит из источника постоянного тока, пусковой кнопки SB, переключателя схемы соединения, блока ограничения уровня напряжений входных сигналов, оптоэлектронного преобразователя уровней ТТЛ, блока регистров, дешифратора и блока индикации, а также дополнительных элементов, которые необходимы для обеспечения работы устройства в автоматическом режиме.

Устройство работает следующим образом: его зажимы А, В, С и а, б, с присоединяются до соответствующих зажимов обмоток ВН и НН силового трансформатора. Переключатель схемы соединений устанавливается в соответствующее положение. Устройство готово к работе.

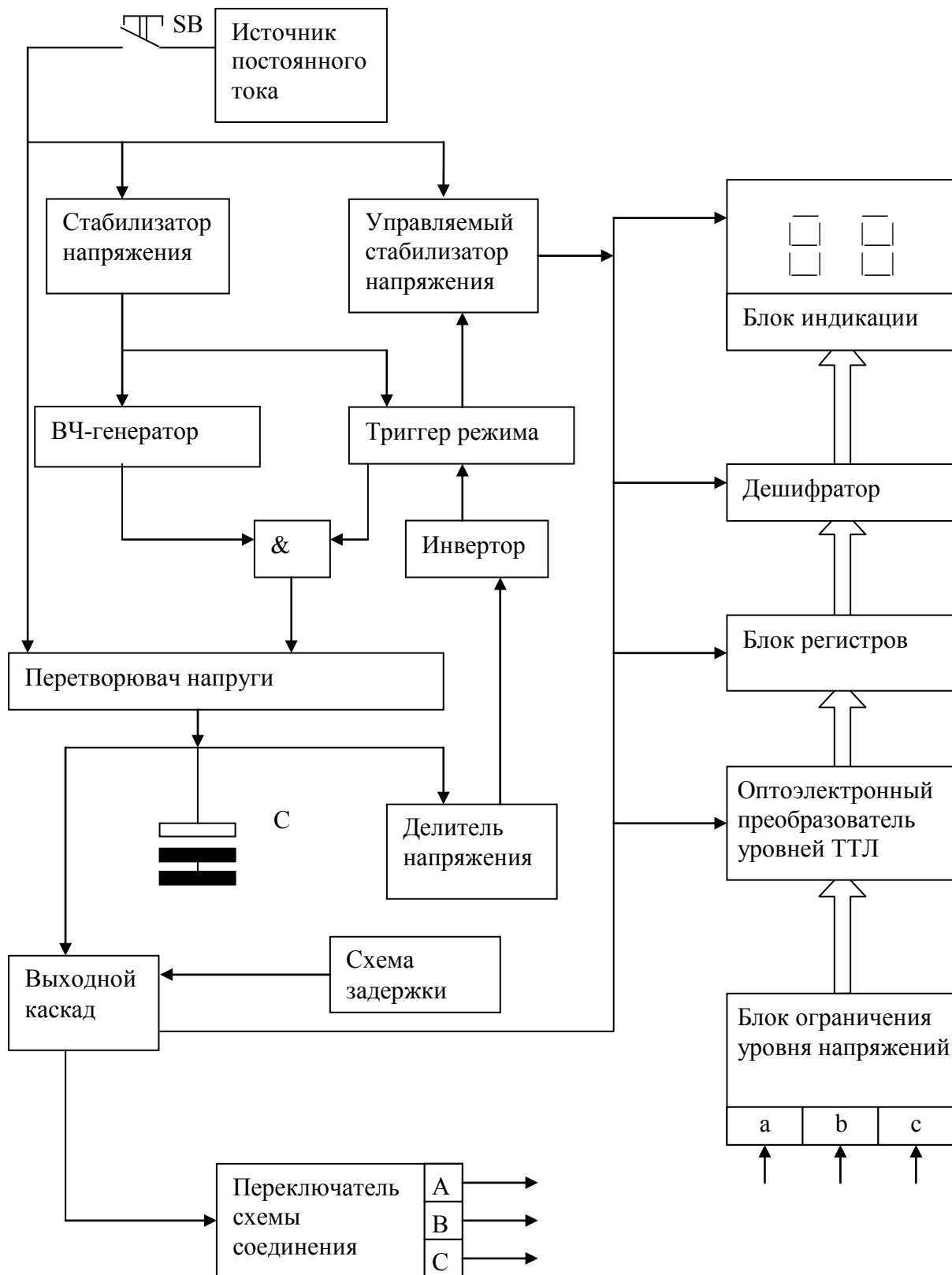


Рис. 5. Структурная схема устройства для определения соединения обмоток трансформатора

Путем нажатия пусковой кнопки *SB* осуществляется запуск устройства. При этом постоянное напряжение +9В от источника постоянного тока подается на входы: стабилизатора напряжения, управляемого стабилизатора напряжения и преобразователя напряжения. С выхода стабилизатора напряжения +5В подается на вход высокочастотного

генератора (15 кГц), запуская его, и на вход $\bar{R}$ триггера режима, приводя его в начальное состояние. С выхода $\bar{Q}$ триггера режима при этом снимается сигнал «1», который поступает на второй вход логического элемента «И» и вход управляемого стабилизатора напряжения. Если одновременно с ним на первый вход логического элемента «И» поступает сигнал от высокочастотного генератора, то с его выхода снимается сигнал на преобразователь напряжения, разрешая работу последнему. Преобразователь напряжения заряжает разрядный конденсатор C до напряжения 120В. Как только разрядный конденсатор C зарядится, то с его положительной обкладки через делитель напряжения и инвертор подается сигнал на вход $\bar{S}$ триггера режима.

Триггер перебрасывается в другое состояние. С его выхода $\bar{Q}$ снимается сигнал «0», что приводит к прекращению работы преобразователя напряжения.

С выхода управляемого стабилизатора напряжения питание +5В подается на блок индикации, дешифратор, схему задержки и оптотиристор выходного каскада. В блоке регистров питание поступает на входы S всех триггеров и на вход R , управляемого состоянием блока регистров, триггера. В результате остальные три пары триггеров блока приходят в исходное состояние. Схема задержки, получив питание, выдает его на базу транзистора выходного каскада с некоторой выдержкой времени, достаточной для приведения в исходное состояние триггеров блока регистров. После чего транзистор открывается, что приводит к открытию оптотиристора входного каскада. В результате разрядный конденсатор C через выходной каскад и переключатель схемы соединения разряжается на обмотку ВН силового трансформатора. Наведения на стороне НН ЭДС поступают в блок ограничения уровней напряжения входных сигналов и в оптоэлектронный преобразователь уровней ТТЛ, состоящий из шести оптронов с усилителями. С его выхода сигналы поступают в блок регистров, где знаки ЭДС фиксируются с помощью триггеров.

Из блока регистров сигналы поступают в дешифратор, представляющий собой программируемое запоминающее устройство (ПЗУ), в памяти которого записана информация о ГСО (смотри таблицу 4). С дешифратора после сравнения входного сигнала с информацией в ПЗУ, выдается команда на блок индикации, который состоит из двух светодиодных матриц, т. е. на нем высвечивается номер ГСО силового трансформатора.

Таким образом, использования данного устройства позволяют надежно и оперативно определить номер группы соединения обмоток трансформатора, что повышает эффективность работы персонала.

4 Метод моста

Этот метод определения не получил широкого распространения в эксплуатации и используется при проверке коэффициента трансформации силовых трансформаторов на заводах, где их изготавливают.

Выводы

1. Прямой метод для определения ГСО трансформаторов является неудобным потому, что при его использовании необходимо подбирать резистор, который включается в последовательную обмотку фазометра.
2. Метод двух вольтметров требует проведения измерений, множества вычислений для определения ГСО и контроля симметрии напряжения питания.
3. Метод постоянного тока позволяет определять ГСО трансформаторов путем проведения одного опыта для любых схем с минимальными затратами времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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 трансформаторов (УКГ-3)//Электрические станции. – 1988. - № 4 – с. 11-12.
4. Кутин В. М., Лагутин В. М. Визначення груп з'єднання обмоток силових трансформаторів // Електричество и электрификация. – 2003. - № 8. – с. 31-33.

Кутин Василий Михайлович – д.т.н., профессор кафедры электрических станций и систем;

Лагутин Валерий Михайлович – к.т.н., доцент кафедры электрических станций и систем, Винницкий национальный технический университет.