

МАРКИРОВКА ВЫВОДОВ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**Кутковой И. П., Ивченков Н. В., Гома Р. С.**

В статье систематизирован алгоритм для определения маркировки выводов трехфазных трансформаторов, состоящий из шести этапов, позволяющий определить одну из двенадцати известных групп трансформаторов без наличия информационной таблички. В каждом из этапов рассмотрены наиболее известные способы, касающиеся определения разметки фаз трансформатора, предварительной маркировки выводов обмоток, проверки расположения первичных и вторичных обмоток одноименных фаз на общем стержне, определение пары крайних и средней обмотки, определены начала и концы первичных и вторичных обмоток. Предложены способы определения маркировки выводов трансформатора при наличии минимального измерительного оборудования. Все рассуждения, базирующиеся на теоретических знаниях изучаемых дисциплин высшей школы, подтверждены экспериментальными данными на примере лабораторного трехфазного трансформатора.

У статті систематизовано алгоритм для визначення маркування виводів трифазних трансформаторів, що складається з шести етапів, які дозволяють визначити одну з дванадцяти відомих груп трансформаторів без наявності інформаційної таблички. У кожному з етапів розглянуті найбільш відомі способи, що стосуються визначення розмітки фаз трансформатора, попереднього маркування виводів обмоток, перевірки розташування первинних і вторинних обмоток однойменних фаз на загальному стрижні, визначення пари крайніх і середньої обмотки, визначені початку і кінці первинних і вторинних обмоток. Запропоновано способи визначення маркування виводів трансформатора при наявності мінімального вимірювального обладнання. Всі міркування, що базуються на теоретичних знаннях дисциплін вищої школи, підтверджені експериментальними даними на прикладі лабораторного трифазного трансформатора.

In the article the algorithm for determining the labeling terminals of three-phase transformers, consisting of six stages, allowing to define one of the twelve groups known transformers without an information plate was systemized. In each of the stages the most well-known methods for the determination of the markup phase transformer, pre-marking of the main winding, check the position of the primary and secondary windings of similar phases in the general web, defining a pair of outer and secondary windings, defined beginnings and ends of the primary and secondary windings were considered. The methods of determining the labeling of the transformer terminals with the minimum measuring equipment were proposed. All the arguments, based on theoretical knowledge of disciplines of high school were confirmed by experimental data on the example of a laboratory three-phase transformer.

Кутковой И. П.

ассист. каф. ЭСА ДГМА
ket@dgma.donetsk.ua

Ивченков Н. В.

канд. техн. наук, доц. каф. ЭСА ДГМА

Гома Р. С.

магистрант ДГМА

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 621.314

Кутковой И. П., Ивченков Н. В., Гома Р. С.

МАРКИРОВКА ВЫВОДОВ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В промышленных электросетях используется большое количество разнообразного электрооборудования: трансформаторов, электродвигателей, реакторов и т.д. В ходе многолетней эксплуатации как результат аварий, перегрузок, естественного износа, природных факторов часть электрооборудования выходит из строя и требует ремонта. Это подразумевает замену или восстановление изношенных или разрушенных деталей, наладкой и регулировкой ремонтируемого оборудования с доведением их параметров до уровня и требований технических условий [1].

Одной из важнейших проверок у трансформаторов является проверка полярности обмоток и схем их соединения, что при определенном чередовании фаз подаваемого напряжения при включении его в работу, определяет группу соединения трехфазных трансформаторов [2]. Согласно требованиям, эта проверка производится в случае отсутствия паспортных или заводских данных при монтаже и после ремонтов со сменой обмоток при эксплуатации. В [1] и [2] приведена методика определения группы соединения трансформаторов, однако для определения одной из существующих групп, необходимо произвести не только разметку фаз трансформатора, но и еще целый ряд экспериментальных данных, включающий, например, определение расположения первичных и вторичных обмоток одноименных фаз на общем стержне и т.д.

Целью данной статьи является систематизация экспериментальных исследований по определению маркировки выводов трансформатора, необходимая для определения группы трехфазных трансформаторов, а также разработка способов определения начал и концов обмоток, фазировки выводов трансформатора при наличии минимального измерительного оборудования.

Известно, что трехфазный трансформатор состоит двух обмоток – первичной, начала фаз которой, например, обозначаются А, В, С, а концы X, Y, Z, и вторичной – начала а, b, с и концы x, y, z [3]. Самым простым и дешевым способом соединения обеих обмоток трансформатора, является соединение звездой – Y/Y (рис. 1).

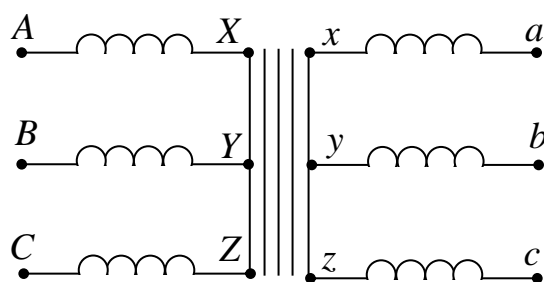


Рис. 1. Соединение обмоток трансформатора по схеме Y/Y

Для правильного соединения обмоток необходимо разметить начала и концы фаз первичной (А, В, С и X, Y, Z) и вторичной (а, b, с и x, y, z) обмоток и придерживаться этой маркировки. Ошибка в маркировке одной из фаз или ошибка в соединении фаз может привести к тому, что ЭДС, наведенные в одноименных фазах, будут не совпадать по фазе, а будут сдвинуты относительно друг друга на 180° .

Согласно [1], каждый трансформатор должен быть снабжен прикрепленной на видимом месте табличкой, на которой указывают: товарный знак предприятия-изготовителя или его наименование; наименование «трансформатор напряжения»; тип трансформатора и климатическое исполнение и т.д., а также условное обозначение схемы и группы соединения обмоток. Однако, в результате, транспортировки или других факторов, информационная табличка может отсутствовать. Как результат перечисленных выше действий, мы будем иметь только клеммную коробку с 12 выводами (рис. 2).

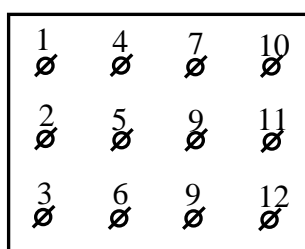


Рис. 2. Вид клеммной коробки

Рассмотрим алгоритм определения группы трансформаторов на примере трехфазного сухого водозащищенного трансформатора ТСВМ 4 740М5 380-220/230-133, применяемого для лабораторных исследований.

На первом этапе производим разметку фаз в трансформаторе. Среди наиболее известных способов определения разметки фаз в трехфазном трансформаторе, можно выделить два способа.

Первый способ заключается в поочередном подсоединении выводов омметра [4] к паре клемм обмоток, при отключенном напряжении. Если стрелка омметра не отклоняется, то данные клеммы не относятся к одной фазе. При отклонении стрелки омметра фаза найдена (размечена), и ее следует обозначить, например, фаза «1-1'». Далее аналогично находят пять других обмоток (фазы) и обозначают соответственно «2-2'», «3-3'», «4-4'», «5-5'», «6-6'». Примерный вид клеммника с размеченными фазами приведен на рис. 3.

Второй способ осуществляется с помощью источника питания и лампы накаливания (рис. 3). Горение лампы позволяет определить пару клемм, принадлежащие одной фазе.

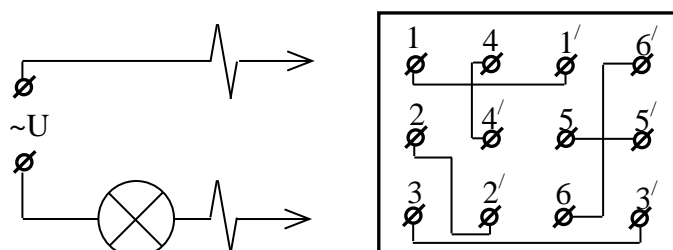


Рис. 3. Результаты предварительной разметки фаз

На втором этапе производим предварительную маркировку выводов обмоток первичных (высшего напряжения – ВН) и вторичных (низшего напряжения – НН) трехфазного трансформатора. Среди наиболее известных способов можно выделить три основных способа.

Первый способ заключается в поочередном подключении к уже размеченным фазам трансформатора омметра. Величина активного сопротивления фазы, позволяет судить о принадлежности соответствующей фазы к одной из обмоток, либо первичной либо вторичной. В табл. 1 приведены результаты исследуемого трехфазного трансформатора при подключении омметра к соответствующим фазам.

Таблица 1

Определение активного сопротивления обмоток трансформатора

	Обмотки трансформатора					
	1-1'	2-2'	3-3'	4-4'	5-5'	6-6'
Величина активного сопротивления, Ом	0,24	0,24	0,56	0,56	0,24	0,56

Таким образом, ранее размеченные фазы «1-1'» и т.д. на данном этапе проведения эксперимента можно разделить на соответствующие выводы обмоток, первичную либо вторичную, трансформатора «ах» и т.д. Принимаем, что размеченная фаза «1-1'» соответствует обмотке «ах», «2-2'» – «бу», «3-3'» – «АХ», «4-4'» – «ВУ», «5-5'» – «сз», «6-6'» – «СЗ».

Второй способ осуществляется с помощью источника питания и лампы накаливания. Яркость горения лампы позволяет определить тип обмотки – для трех обмоток горение лампы яркое (для обмотки с низким сопротивлением), для других трех обмоток – слабое (для обмотки с высоким сопротивлением).

Третий способ заключается в поочередном подключении к уже размеченным фазам трансформатора, амперметра и вольтметра [5]. Один зажим источника питания подсоединяется к одной из размеченных фаз трансформатора (рис. 4), например «1», а второй зажим через амперметр подключается к оставшемуся соответствующему концу – «1'». Величина полного сопротивления фазы

$$z = \frac{U}{I}, \quad (1)$$

где U – показания вольтметра;

I – показания амперметра.

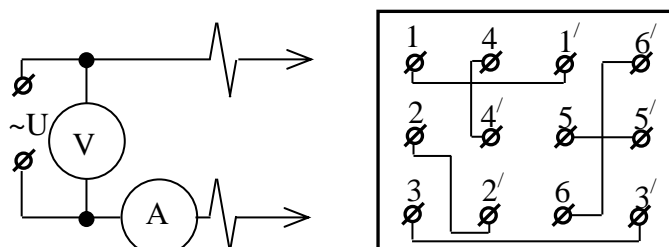


Рис. 4. Определение полного сопротивления обмоток трансформатора

Рассчитанная величина полного сопротивления позволяет судить о принадлежности соответствующей фазы к одной из обмоток, либо первичной либо вторичной. Измерение желательно производить при одном и том же напряжении источника питания. В табл. 2 приведены результаты исследуемого трехфазного трансформатора при подключении омметра к соответствующим фазам.

Таблица 2

Определение полного сопротивления обмоток трансформатора

	Обмотки трансформатора					
	1-1'	2-2'	3-3'	4-4'	5-5'	6-6'
Показания амперметра, А	0,36	0,45	0,12	0,12	0,36	0,13
Показания вольтметра, В	60	60	60	60	60	60
Величина полного сопротивления, Ом	166,7	133,3	500	500	166,7	461,5

Таким образом, после предварительной маркировки выводов первичной и вторичной обмоток трехфазного трансформатора примерный вид клеммника с размеченными обмотками приведен на рис. 5.

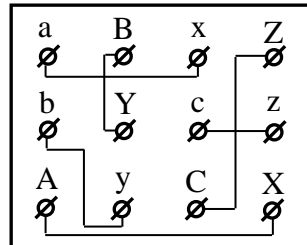


Рис. 5. Примерный вид клеммника

На третьем этапе проверяется расположение первичных и вторичных обмоток одноименных фаз на общем стержне. Данная проверка производится подачей поочередно на первичные либо вторичные обмотки напряжения. Та вторичная или первичная обмотка, на зажимах которой напряжение больше, чем на остальных, расположена на том стержне, что и первичная обмотка, на которую подано напряжение. Это объясняется тем, что через магнитопровод на котором расположена соответствующая обмотка, проходит весь магнитный поток, создаваемый обмоткой, к которой подводится напряжение. В двух других катушках также будет индуцироваться ЭДС, но его величина будет пропорциональна доле магнитного потока, проходящего через нее [3].

В табл. 3 приведены результаты исследуемого трехфазного трансформатора при подаче напряжения поочередно на обмотки.

Таблица 3

Величины напряжений на первичных и вторичных обмотках

Напряжение на первичной обмотке	Напряжение на вторичных обмотках		
$U_{ax} = 40 \text{ В}$	$U_{AX}, \text{ В}$	$U_{BY}, \text{ В}$	$U_{CZ}, \text{ В}$
	27,9	66,4	38,4
$U_{by} = 40 \text{ В}$	$U_{AX}, \text{ В}$	$U_{BY}, \text{ В}$	$U_{CZ}, \text{ В}$
	66,1	33,0	33,1
$U_{cz} = 40 \text{ В}$	$U_{AX}, \text{ В}$	$U_{BY}, \text{ В}$	$U_{CZ}, \text{ В}$
	27,9	38,5	66,3
Напряжение на первичной обмотке	Напряжение на вторичных обмотках		
$U_{AX} = 40 \text{ В}$	$U_{ax}, \text{ В}$	$U_{by}, \text{ В}$	$U_{cz}, \text{ В}$
	10,5	24,1	13,5
$U_{BY} = 40 \text{ В}$	$U_{ax}, \text{ В}$	$U_{by}, \text{ В}$	$U_{cz}, \text{ В}$
	24,1	11,9	12,2
$U_{CZ} = 40 \text{ В}$	$U_{ax}, \text{ В}$	$U_{by}, \text{ В}$	$U_{cz}, \text{ В}$
	10,5	13,5	24,1

Анализируя данные напряжений, приведенные в табл. 3, видно, что, например, при питании обмотки ax напряжением 40 В, наибольшее напряжение, равное 66,4 В оказалось на обмотке BY . Напряжение, подводимое к обмотке AX , равное 40 В, соответствует наибольшему из напряжений, равному 24,1 В на обмотке by . Результаты анализа экспериментальных данных позволяют проверить ранее выбранные произвольным образом буквенные обозначения первичных и вторичных обмоток. Таким образом, необходимо на клеммнике заменить буквенные обозначения «BY» на «AX» (рис. 6).

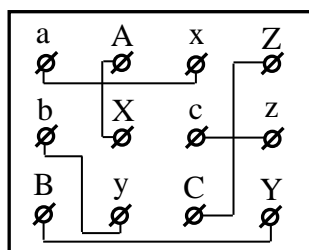


Рис. 6. Вид клеммника с указанием одноименных фаз на общем стержне

На четвертом этапе определяются пары крайних обмоток (ax и cz) и средняя обмотка (by), расположенные на одном магнитопроводе. Данная проверка заключается в поочередной подаче напряжения U на первичную обмотку. Если на двух оставшихся первичных обмотках напряжения будут равны примерно половине приложенного напряжения – $\frac{1}{2}U$, то напряжение подано на фазу by , т.е. данная обмотка расположена на среднем стержне магнитопровода. Если на одной из обмоток напряжение примерно равно $\frac{2}{3}U$, а на другой – $\frac{1}{3}U$, то напряжение подано на фазу ax или cz (один из крайних стержней магнитопровода) [6]. Обмотка, на которой напряжение равно примерно $\frac{2}{3}U$ – это фаза by . На вторичных обмотках напряжения распределяются в таких же пропорциях. Эти значения напряжения определяются распределением магнитных потоков по стержням магнитопровода при запитывании обмотки, расположенной на одном из них.

При отсутствии дополнительных данных о трансформаторе различить фазы ax и cz невозможно – одна из них принимается за ax , другая за cz .

В табл. 4 приведены результаты напряжений при подаче поочередно напряжения на первичную обмотку.

Таблица 4

Величины напряжений на первичной обмотке

Подаваемое напряжение на первичную обмотку	Напряжение на оставшихся первичных обмотках	
	$U_{ax} = 40 \text{ В}$	$U_{by}, \text{ В}$
16,6		23
$U_{by} = 40 \text{ В}$	$U_{ax}, \text{ В}$	$U_{cz}, \text{ В}$
	20,1	19,9
$U_{cz} = 40 \text{ В}$	$U_{ax}, \text{ В}$	$U_{by}, \text{ В}$
	22,8	16,8

Анализируя данные напряжений, приведенные в табл. 4, видно, что, например, при питании обмотки by напряжением 40 В, напряжение на оставшихся первичных обмотках практически одинаковы (20,1 В и 19,9 В) и равны половине приложенного напряжения. Таким образом, обмотка by расположена на среднем стержне магнитопровода.

Результаты экспериментальных данных, проведенные для различных трансформаторов и при различных напряжениях питающей сети, позволяют выделить еще один способ определения пары крайних и среднюю обмотку, который заключается в поочередном подключении к выводам первичной обмотке одного амперметра при одном и том же напряжении источника питания. По величине тока, протекающего по первичным обмоткам трансформатора, можно судить о расположении крайних и средней обмотках. По крайним обмот-

кам будут протекать практически одинаковые токи, а по средней обмотке будет протекать ток, больший по величине. На вторичных обмотках токи распределяются в таких же пропорциях (см. табл. 2).

На пятом этапе определяются начала и концы первичных и вторичных обмоток. Среди наиболее известных способов определения начала и концы первичных и вторичных обмоток, можно выделить два способа. При отсутствии дополнительных данных о трансформаторе различить начала и концы первичных и вторичных невозможно – один из выводов клеммника, например «1» принимаем за начало обмотки – «а», а вывод «1'» за конец обмотки «х» и т.д. (см. рис.3 и рис. 6).

Определение начал и концов первичной либо вторичной обмотки производится в соответствии со схемой, приведенной на рис. 7.

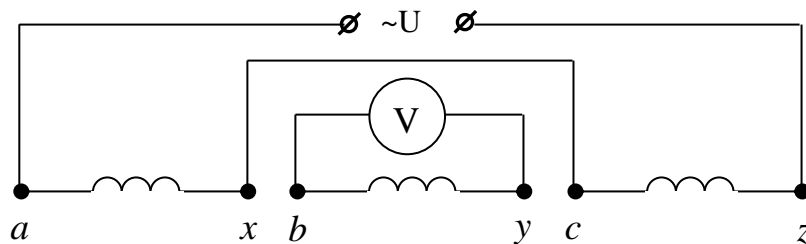


Рис. 7. Схема определения начал и концов обмоток

Алгоритм определения начал и концов обмоток следующий. Первичные обмотки ax и cz соединяются последовательно и включаются на произвольное напряжение U . Если обмотки включены согласно, то вольтметр, подключенный на зажимы by , покажет напряжение U , близкое к подаваемому напряжению. Если соединение обмоток ax и cz встречное, то вольтметр покажет значение напряжения намного меньше U (близкое к нулю). Повторив измерения для фаз ax и by , cz и by , можно определить начало и конец обмотки и by . На вторичных обмотках напряжения распределяются в таких же пропорциях.

В табл. 5 приведены результаты напряжений при подаче поочередно напряжения на две последовательно соединенные обмотки и величина напряжения на свободной обмотке.

Таблица 5

Величины подводимых напряжений и величина напряжения на свободной обмотке

Подключенные последовательно зажимы обмоток	Подводимое напряжение, В	Напряжение на свободной обмотке, В	
xaby	70	U_{cz}	6,2
xayb	70	U_{cz}	68
xazc	70	U_{yb}	68
xacz	70	U_{yb}	0,7
ybcz	70	U_{xa}	6,2
ybzc	70	U_{xa}	68
XAYB	70	U_{zC}	68,5
XABY	70	U_{zC}	5,4
XAZC	70	U_{yB}	68,5
XACZ	70	U_{yB}	0,6
YBZC	70	U_{xA}	68,5
BYCZ	70	U_{xA}	5,4

Анализируя данные напряжений, приведенные в табл. 5, видно, что, например, при питании обмотки *xaby* напряжением 70 В, напряжение на свободной обмотке U_{cz} 6,2 В, т.е. маленькое – включение встречное, а при питании обмотки *xaub* тем же напряжением, напряжение на свободной обмотке U_{cz} 68 В, т.е. близкое к подводимому напряжению – включение согласное. Таким образом, ранее принятое условно начало и конец обмотки *by*, необходимо поменять местами на клеммнике (рис. 8) – обмотка *by* оказалась вывернутая.

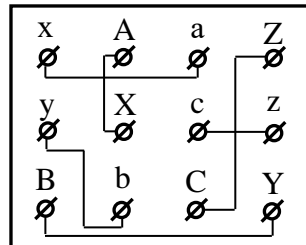


Рис. 8. Вид клеммника с указанием начал и концов обмоток

В тех случаях, когда использование приборов минимально, например, при отсутствии вольтметра, начала и концы первичных и вторичных обмоток, можно определить с помощью одного амперметра. Из курса ТОЭ [7], известно, что для определения одноименных зажимов необходим источник синусоидального напряжения и амперметр. Две первичные обмотки поочередно собирают в электрические схемы, приведенные на рис. 9, и подключают к источнику синусоидального напряжения.

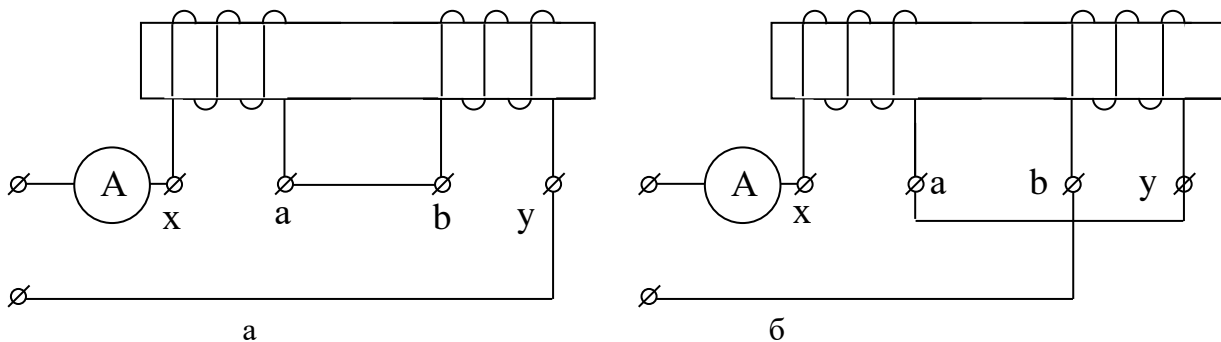


Рис. 9. Разметка начал и концов обмоток

Из рис. 9 видно, что в одном случае имеем согласное включение, а в другом – встречное. Вид соединения двух катушек определяют по показаниям амперметра. Если при одинаковых значениях источника синусоидального напряжения, амперметр на рис. 9, а показал значение больше, чем на рис. 9, б, то согласное включение приведено на рис. 9, а, встречное – на рис. 9, б.

В табл. 6 приведены результаты показаний амперметра при одинаковом значении напряжения источника питания – 70 В.

Таблица 6

Показания амперметра при определении начал и концов обмоток

	Подключенные последовательно зажимы обмоток											
	<i>xaby</i>	<i>xaub</i>	<i>xazc</i>	<i>xacz</i>	<i>ybcz</i>	<i>ybzc</i>	XAYB	XABY	XAZC	XACZ	YBZC	BYCZ
I, A	0,2	0,48	0,56	0,14	0,48	0,2	0,15	0,06	0,2	0,05	0,15	0,06

Таким образом, по результатам экспериментальных данных, приведенных в табл. 6, и приведенных выше теоретических обоснований, по показаниям амперметра, можно судить, например, о встречном или согласном включении обмоток $xazc$ или $xacz$.

На шестом этапе осуществляется окончательная маркировка зажимов первичной и вторичной обмоток [8]. Окончательная маркировка производится автотрансформаторным методом, по схеме, приведенной на рис. 10. Если конец обмотки, например, первичной, подключен к началу обмотки вторичной, то напряжение между началом первичной обмотки и концом вторичной обмотки должно быть максимальным, т.к. ЭДС, наводимые в обмотках, будут складываться. Если концы вторичной обмотки перепутаны, то ЭДС будут вычитаться, напряжение будет минимальным.

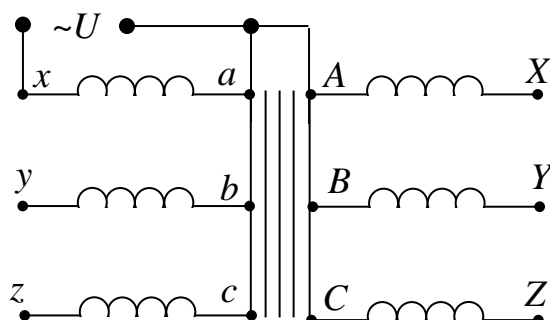


Рис.10. Метод определения окончательной маркировки

В табл. 7 приведены результаты измерений напряжений на выводах первичной и вторичной обмоток при одинаковом значении напряжении источника питания – 70 В.

Таблица 7

Величины напряжений на выводах первичной и вторичной обмоток

Соединены зажимы	Измерено напряжение, В					
	U_{xX}	U_{xA}	U_{yY}	U_{yB}	U_{zZ}	U_{zC}
a-A	50	70	-	-	-	-
a-X	70	190	-	-	-	-
b-B	-	-	50	70	-	-
b-Y	-	-	70	190	-	-
c-C	-	-	-	-	50	70
c-Z	-	-	-	-	70	190

Таким образом, по результатам экспериментальных данных, приведенных в табл. 7, видно, что при замыкании конца первичной обмотки и начала вторичной обмотки (согласное включение обмоток), во вторичной обмотке наводится ЭДС, повышающая напряжение между началом первичной обмотки и концом вторичной обмотки в силу сложения с ЭДС в первичной обмотке. При замыкании концов первичной и вторичной обмоток наводимая ЭДС противодействует ЭДС в первой обмотке, следовательно, напряжение между началами первичной и вторичной обмоток будет минимальным. Напряжение «начало первичной обмотки – точка присоединения вторичной обмотки» всегда будет равно напряжению, приложенному к первичной обмотке.

Окончательную маркировку зажимов первичной и вторичной обмотки можно также осуществить по рассмотренной выше методике с применением одного амперметра. С этой целью собирается две схемы, приведенные на рис. 9, вывод «b» меняется на вывод «A», а вы-

вод «у» на вывод «X». Рассуждения о согласном и встречном включении первичной и вторичной обмоток аналогичны вышеизложенным.

В табл. 8 приведены результаты показаний амперметра при одинаковом значении напряжении источника питания – 70 В.

Таблица 8

Показания амперметра при определении начал и концов первичной и вторичной обмоток

	Подключенные последовательно зажимы обмоток					
	<i>xaAX</i>	<i>xaXA</i>	<i>ybBY</i>	<i>ybYB</i>	<i>zcCZ</i>	<i>zcZC</i>
I, A	0,91	0,06	1	0,08	0,91	0,06

Таким образом, результаты экспериментальных данных, приведенные в табл. 8 и приведенные выше теоретические обоснования, позволяют осуществить окончательную маркировку зажимов первичной и вторичной обмоток.

На последнем (седьмом) этапе, после маркировки выводов первичной и вторичной обмоток трансформатора, осуществляется определение одной из двенадцати известных групп трансформаторов, которые подробно рассмотрены в [1, 2, 9].

Таким образом, для того чтобы определить группу трансформатора, без наличия информации таблички, необходимо произвести все шесть этапов экспериментальных исследований, рассмотренных выше.

ВЫВОДЫ

Систематизирован алгоритм для определения маркировки выводов трехфазных трансформаторов, состоящий из шести этапов, позволяющий определить группу трансформатора. На первом этапе определена разметка фаз трансформатора. На втором этапе произведена предварительная маркировка выводов первичных и вторичных обмоток трансформатора. На третьем этапе выполнена проверка расположения первичных и вторичных обмоток одноименных фаз на общем стержне. На четвертом этапе определены пары крайних и средняя обмотка, расположенные на одном магнитопроводе. На пятом этапе определены начала и концы первичных и вторичных обмоток. На шестом этапе произведена окончательная маркировка зажимов первичной и вторичной обмоток. Для некоторых этапов, по результатам экспериментальных данных, предложены способы определения маркировки выводов трансформатора при наличии минимального измерительного оборудования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 1983-2001 Трансформаторы напряжение. Общие технические условия. – Введ. 01.01.2001. – М.: Изд-во стандартов, 2006. – 36 с.
2. ГОСТ 11677-85 Трансформаторы силовые. Общие технические условия. – Введ. 30.06.1986. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 39 с.
3. Кацман М.М. Электрические машины / М. М. Кацман. – М.: Высшая школа, 1990. – 464 с.
4. Справочник электрика / Под ред. Э.А. Киреевой. – М.: Колос, 2007. – 464 с. – ISBN 978-5-10-003969-3.
5. Пустовая О.А. Электрические измерения / О. А. Пустовая. – М.: Феникс, 2010. – 247 с. – ISBN 978-5-222-16097-8.
6. Гольдберг О.Д. Испытание электрических машин / О. Д. Гольдберг. – М.: Высшая школа, 1990. – 255 с. – ISBN 5-06-000715-4.
7. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: электрические цепи: Учебник. – Гардарикит, 2007. – 701с. – ISBN 5-8297-0159-6.
8. Лабораторные работы №1-3 по курсу «Электрические машины»: Исследование трансформаторов / Под ред. М.А. Горюнов. – М.: Изд-во МЭИ, 1990. – 48 с.
9. Кацман В.В. Лабораторные работы по электрическим машинам и электрическому приводу. – М.: «Академия», 2011. – 256 с. – ISBN 978-5-7695-8195-3.

Статья поступила в редакцию 22.09.2016 г.