

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ "МЭИ"

М.В. ПАНИХИН  
С.В. ШИРИНСКИЙ

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

### **Лабораторные работы № 1 – 4**

Методическое пособие  
по курсу  
*«Электрические машины»*

для студентов, обучающихся по направлению  
*«Электроэнергетика и электротехника»*

УДК  
621.314  
П 162

*Утверждено учебным управлением МЭИ  
Подготовлено на кафедре Электромеханики МЭИ*

Рецензент: докт.техн.наук, профессор Беспалов В.Я.

**Панихин М.В., Ширинский С.В.**

Исследование трансформаторов. Лабораторные работы № 1–4: методическое пособие / М.В.Панихин, С.В. Ширинский. – М.: Издательство МЭИ, 2014. – 60 с.

Пособие содержит описания объектов исследования, программы лабораторных работ, порядок их проведения и обработки результатов испытаний. Включены четыре работы по исследованию трехфазных силовых трансформаторов. Работы базируются на многолетних методических разработках сотрудников кафедры Электромеханики МЭИ, среди которых следует особо выделить работы Акимовой Н.А., Баврина О.В., Горюнова М.А., Киселева В.М., Сергеенкова Б.Н., Тихомирова П.А.

Пособие предназначено для подготовки бакалавров по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника».

Продолжительность лабораторных занятий – 4 часа.

© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2014 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Все исследования в лаборатории трансформаторов кафедры электрических машин проводятся на трехфазных сухих трехобмоточных трансформаторах типа ТСТ-6,3/0,5 (трехфазный сухой трехобмоточный мощностью 6,3 кВ·А с напряжением до 0,5 кВ). Магнитопровод трансформатора собран в переплет из пластин электротехнической холоднокатаной стали и представляет собой плоскую несимметричную трехфазную стержневую магнитную систему с вертикально расположенными стержнями и горизонтальными ярами. Поперечное сечение стержня имеет четыре ступени, активное сечение стержня  $S_c=40,2 \text{ см}^2$ . Яро крестообразное, активное сечение  $S_{я} = 45,2 \text{ см}^2$ . Остальные размеры трансформатора показаны на рис. В.1.

Три обмотки трансформатора двухслойные цилиндрические расположены концентрически одна относительно другой.

Обмотка высшего напряжения (ВН) расположена непосредственно на стержне магнитной системы (рис. В.1). Обмотка намотана в два слоя из круглого алюминиевого провода сечением  $4,68 \text{ мм}^2$ . В каждом слое 85 витков, всего в обмотке каждой фазы 170 витков. Начала  $A, B, C$  и концы  $X, Y, Z$  обмотки выведены на доску зажимов (рис. В.2), что дает возможность соединять обмотку ВН в звезду или в треугольник.

Обмотка среднего напряжения (СН) расположена снаружи обмотки ВН. Обмотка намотана в два слоя из алюминиевого провода прямоугольного сечения площадью  $11,2 \text{ мм}^2$ , в каждом слое 28,5 витков, всего в обмотке каждой фазы 57 витков. Начала  $A_m, B_m, C_m$  и концы  $X_m, Y_m, Z_m$  обмотки выведены на доску зажимов.

Обмотка низшего напряжения (НН) расположена снаружи обмотки СН, имеет то же число витков и сечение провода, что и обмотка СН. Начала  $a, b, c$  и концы  $x, y, z$  обмотки НН выведены на доску зажимов.

Номинальные данные обмотки ВН: мощность 6,3 кВ·А, линейное напряжение 380 В при частоте 50 Гц, ток 9,6 А при соединении в звезду в двух- и трехобмоточном режимах.

Обмотки СН и НН каждая рассчитаны для номинальной мощности 6,3 кВ·А номинального напряжения 127 В и тока 28,8 А в двухобмоточном режиме при соединении в звезду. В трехобмоточном режиме каждая из этих обмоток может быть использована при номинальной мощности 3,15 кВ·А, напряжении 127 В и токе 14,4 А.

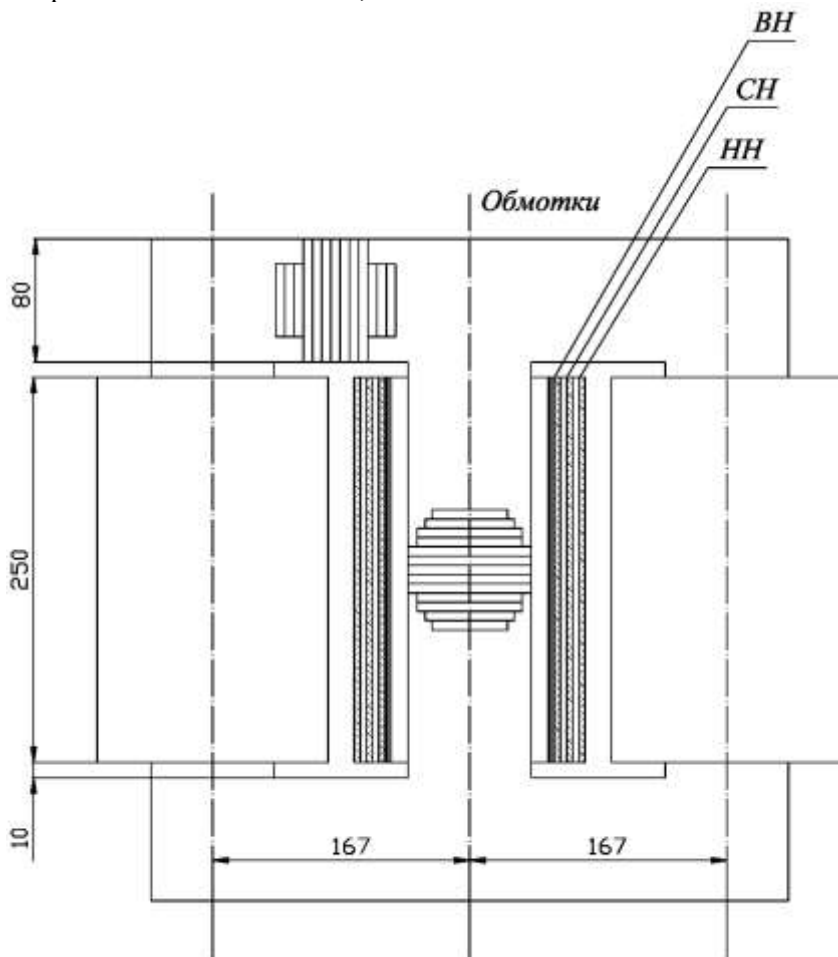


Рис. В.1. Трехфазный сухой трехобмоточный трансформатор типа ТСТ-6,3/0,5

Номинальные и другие данные трансформатора обозначены на его паспортной таблице: наименование завода-изготовителя; обозначение типа; ГОСТ; заводской номер; год выпуска; число фаз; частота, Гц; род установки (внутренняя или наружная); номинальная мощность, кВ·А; схема и группа соединения обмоток; номинальные напряжения, В; токи, А, всех обмоток; напряжение короткого замыкания, %; способ охлаждения.

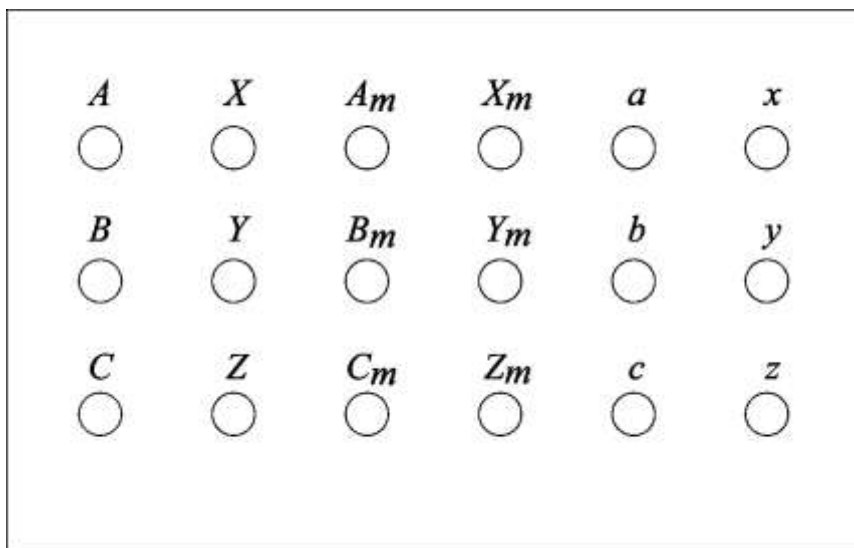


Рис. В.2. Схема расположения зажимов.

В лаборатории трансформаторов для измерения фазных напряжений, токов и мощностей используются измерительные комплекты К-505, позволяющие вести измерения этих величин при трехфазном питании и при различных пределах шкал вольтметров и ваттметров. При выполнении некоторых работ используются также отдельные амперметры, вольтметры и осциллографы.

Перед сборкой любой схемы для проведения лабораторных испытаний следует подсчитать ожидаемые предельные значения измеряемых величин тока и напряжения и подобрать приборы

(амперметры, вольтметры и ваттметры) с ближайшими пределами измерений. После выбора приборов и пределов шкал для каждого прибора следует определить цену одного деления шкалы и записать ее в протокол испытания. При проведении измерений в протокол следует записывать только показания приборов, а все пересчеты с учетом цены деления прибора производить после при обработке протокола.

### *Правила безопасной работы в лаборатории трансформаторов*

При работе в лаборатории трансформаторов необходимо соблюдать следующие правила, обеспечивающие безопасность от поражения электрическим током.

Работать только на том стенде, который указан преподавателем, и не касаться схем, собранных на других стендах.

Включать собранную схему под напряжение только после проверки ее и с разрешения преподавателя, ведущего занятия в группе.

Перед включением схемы под напряжение убедиться в том, что нет людей, находящихся в опасной близости от включаемой схемы.

Не касаться схемы, находящейся под напряжением. Все необходимые пересоединения делать только после отключения схемы от сети.

При обнаружении каких-либо неисправностей или ненормальной работы схемы (перегорание предохранителей, появление искр, вспышек и т. д.) немедленно отключить схему от сети и доложить об этом преподавателю, ведущему занятия.

## Лабораторная работа № 1

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ТРЕХФАЗНОГО ДВУХОБОМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ОПЫТНЫМ ПУТЕМ

Все характеристики трансформатора можно рассчитать по его схеме замещения, для чего необходимо знать входящие в нее параметры. Потери и ток холостого хода определяют активную и реактивную мощности, необходимые для намагничивания трансформатора. От напряжения короткого замыкания зависит ток в обмотках трансформатора при аварийном коротком замыкании, а также изменение вторичного напряжения трансформатора при нагрузке. Напряжение короткого замыкания учитывается при подборе трансформаторов для параллельной работы. Потери, измеренные при холостом ходе и коротком замыкании, позволяют определить КПД трансформатора. Для существующего трансформатора параметры схемы замещения можно определить экспериментально.

Задачей работы является проведение опытов холостого хода и короткого замыкания для исследуемого трехфазного двухобмоточного трансформатора, построение характеристик холостого хода и короткого замыкания и расчет параметров схемы замещения для номинального режима работы трансформатора.

#### Программа работы

1. Экспериментально определить коэффициент трансформации линейных напряжений для схем соединения  $Y/Y$  и  $\Delta/Y$ .

2. Провести опыт холостого хода.

3. Провести опыт короткого замыкания.

По данным опытов выполнить следующие расчеты и построения:

1. Рассчитать коэффициент трансформации линейных напряжений для схем соединения  $Y/Y$  и  $\Delta/Y$ .

2. Построить характеристики холостого хода:

$$I_x = f(U_1); \quad P_x = f(U_1); \quad \cos\varphi_x = f(U_1).$$

3. Найти значение тока холостого хода  $I_x$  его активной  $I_{xa}$  и реактивной  $I_{xp}$  составляющих,  $\cos\varphi_x$  и потерь холостого хода, рассчитать индукцию в стержне трансформатора при номинальном напряжении  $U_{ном}$  и определить параметры схемы замещения трансформатора для режима холостого хода.

4. Построить характеристики короткого замыкания:

$$U_k = f(I_k); \quad P_k = f(I_k); \quad \cos\varphi_k = f(I_k).$$

5. Определить процентные значения напряжения короткого замыкания  $u_k$  и его активной  $u_{ka}$  и реактивной  $u_{kp}$  составляющих, потери короткого замыкания  $P_k$  и  $\cos\varphi_k$ , приведенные к температуре  $75^\circ\text{C}$ , и определить параметры схемы замещения трансформатора для режима короткого замыкания.

6. Определить напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора  $U_2$  и КПД при номинальном напряжении  $U_1=U_{ном}$ , номинальном токе ( $\beta=1$ ) и  $\cos\varphi_2=0,8$ .

## Пояснения и указания к работе

### 1. Определение коэффициента трансформации

При схемах соединения Y/Y и  $\Delta/\Delta$  коэффициент трансформации линейных напряжений практически равен отношению чисел витков обмотки ВН и обмотки НН:

$$k = U_{ВН} / U_{НН} = w_{ВН} / w_{НН}.$$

При соединениях Y/ $\Delta$  или  $\Delta$ /Y

$$k = \sqrt{3}w_{ВН} / w_{НН} \text{ или } k = w_{ВН} / \sqrt{3}w_{НН}.$$

Коэффициент трансформации определяется при холостом ходе по схеме рис. 1.1. Обмотка ВН, соединенная по схеме звезда или треугольник, включается в сеть с напряжением 127 В, обмотка НН соединяется по схеме звезда и не замыкается на внешнюю цепь; обмотка СН остается полностью разомкнутой. После включения в сеть обмотки ВН производится измерение линейных напряжений на обмотках ВН и НН на зажимах  $AB, BC, AC$  и  $ab, bc, ac$  вольтметром со шкалой 150 В. Коэффициент



трансформации определяется для схем Y/Y и Δ/Y

$$k = U_{\text{ВН}} / U_{\text{НН}}.$$

Согласно ГОСТ Р 52719-2007, коэффициент трансформации не должен отличаться от отношения номинальных напряжений более чем на ±1% для трансформаторов с коэффициентом фазных напряжений 3 и менее, и более чем на ±0,5% для всех остальных трансформаторов.

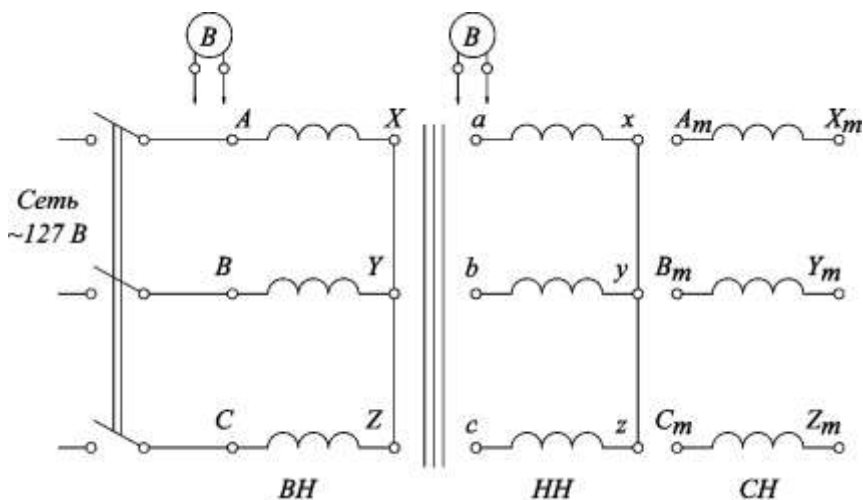


Рис. 1.1. Схема опыта определения коэффициента трансформации для схемы соединения Y/Y.

Запись опытных данных рекомендуется вести в форме табл. 1.1.

Таблица 1.1

Схемы соединения	$U_{AB}$	$U_{ab}$	$k$	$U_{BC}$	$U_{bc}$	$k$	$U_{CA}$	$U_{ca}$	$k$	$k_{\text{ср}}$
Y/Y										
Δ/Y										

## 2. Опыт холостого хода

Опыт холостого хода проводится с целью определения тока и потерь холостого хода трансформатора. Током холостого хода называется ток, который при номинальном напряжении и номинальной частоте устанавливается в одной из обмоток трансформатора при другой разомкнутой обмотке в двухобмоточном или при остальных разомкнутых обмотках в трехобмоточном трансформаторе. Предполагается, что приложенное напряжение синусоидально. Потери, возникающие в трансформаторе при этом режиме, называются потерями холостого хода. Ток холостого хода принято выражать в процентах от номинального тока обмотки.

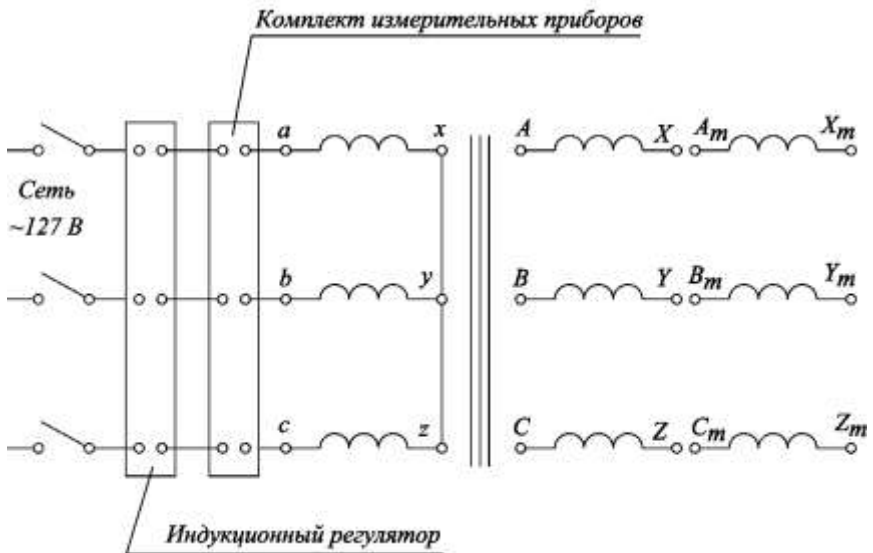


Рис. 1.2. Схема опыта холостого хода.

Опыт холостого хода проводится по схеме рис. 1.2. Первичная обмотка трансформатора присоединяется к сети с напряжением 127 В через индукционный регулятор и комплект измерительных приборов К-505. В качестве первичной

используется обмотка НН трансформатора, соединенная по схеме звезда. Вторичные обмотки ВН и СН полностью разомкнуты. Следует помнить, что при проведении опыта эти обмотки также находятся под напряжением и прикосание к ним опасно.

В этом опыте измеряются фазные напряжения, токи и мощность, потребляемая из сети. При проведении опыта следует, не ограничиваясь номинальным напряжением, снять характеристики холостого хода:

$$I_x = f(U_1); P_x = f(U_1); \cos\varphi_x = f(U_1).$$

при различных значениях напряжения  $U_1$ . Рекомендуется произвести измерения при изменении фазного напряжения, измеряемого вольтметром комплекта К-505, от 40 до 80 В через каждые 10 В, что соответствует линейным напряжениям от 68 до 136 В, а также точку 73 В, соответствующую номинальному линейному напряжению 127 В.

В качестве регулятора напряжения в лаборатории применяется трехфазный индукционный регулятор. До присоединения трансформатора к индукционному регулятору следует убедиться, что напряжение на зажимах последнего является минимальным.

Таблица 1.2

№ п/п	Напряжения, дел.			Ток, дел.			Мощность, дел.		
	$U_a$	$U_b$	$U_c$	$I_a$	$I_b$	$I_c$	$P_a$	$P_b$	$P_c$
1									
2									
...									
10									

При проведении измерений в опыте холостого хода в таблицу по форме табл. 1.2 записывают только непосредственно полученные показания приборов в делениях шкалы. После этого определяют с учетом цены деления прибора среднее арифметическое значение фазного напряжения  $U_{1cp}$ , среднее арифметическое значение фазного тока  $I_{1cp}$ , а также находят

потери холостого хода  $P_x$ . Все величины заносят в таблицу по форме табл. 1.3. Линейное напряжение рассчитывают по известному фазному напряжению для выбранной схемы соединения обмоток и используют его для дальнейших расчетов и построений.

Таблица 1.3

№ п/п	Напряжение, В		Ток, А	Мощность, Вт				$\cos\varphi_x$
	фазное	линейное		$P_a$	$P_b$	$P_c$	$P_x$	
1								
2								
...								
10								

Трансформаторы, установленные в лаборатории, так же как и большая часть современных силовых трансформаторов, имеют несимметричную магнитную систему, вследствие чего средняя фаза требует меньшей намагничивающей мощности, чем крайние фазы, и чему соответствует и меньший ток холостого хода в средней фазе. Поэтому ток холостого хода следует измерять в каждой из трех фаз и по данным измерений определять его среднее арифметическое значение  $I_{x\text{ ср}}$ .

Коэффициент мощности для трехфазного трансформатора рассчитывается по формуле

$$\cos\varphi_x = P_x / \sqrt{3}U_1 I_{x\text{ ср}}.$$

По данным табл. 1.3 следует построить характеристики холостого хода трансформатора:

$$I_x = f(U_1); \quad P_x = f(U_1); \quad \cos\varphi_x = f(U_1).$$

Примерный вид этих характеристик показан на рис. 1.3.

По характеристикам холостого хода определяются значения  $I_x$ ,  $P_x$  и  $\cos\varphi_x$  для номинального напряжения  $U_{\text{ном}}$ . По опытным данным могут быть также определены активная и реактивная составляющие тока холостого хода:

$$I_{\text{ха}} = I_x \cos\varphi_x; \quad I_{\text{хр}} = I_x \sin\varphi_x; \quad \text{обычно } I_{\text{ха}} < I_{\text{хр}}.$$

Найденные значения  $I_x$ ,  $I_{xa}$ ,  $I_{xp}$  следует выразить в процентах от номинального тока.

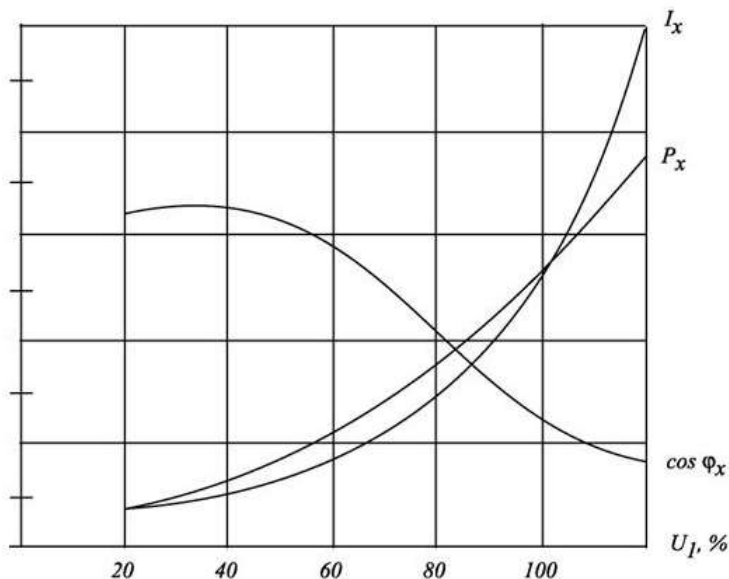


Рис. 1.3. Примерный вид характеристик холостого хода.

На рис. 1.4 приведена однофазная схема замещения трансформатора для режима холостого хода. Параметры этой схемы по данным опыта холостого хода определяются по следующим соотношениям:

$$z_x = |Z_0 + Z_1| = U_{1\phi} / I_{x\phi};$$

$$r_x = r_0 + r_1 = P_{x\phi} / I_{x\phi}^2;$$

$$x_x = x_0 + x_1 = \sqrt{z_x^2 - r_x^2},$$

где  $U_{1\phi}$ ,  $I_{x\phi}$ ,  $P_{x\phi}$  — фазные значения напряжения, тока и мощности.

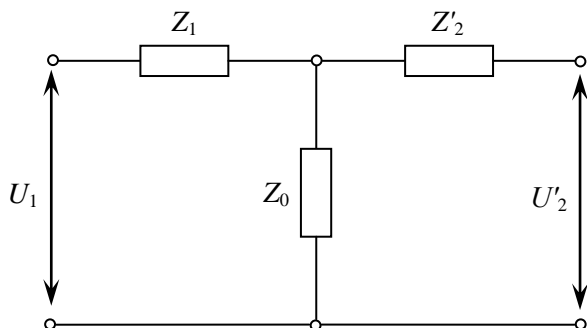


Рис. 1.4. Схема замещения трансформатора для режима ХХ.

Вследствие нелинейной зависимости между напряжением  $U_1$  и током при холостом ходе  $I_{x\phi}$  значения  $z_0$ ,  $r_0$  и  $x_0$  не являются постоянными для данного трансформатора и изменяются с изменением напряжения  $U_1$ . В практике принято рассчитывать эти величины для номинального значения напряжения трансформатора  $U_{ном}$ .

Электрические потери в обмотках и добавочные потери, обусловленные вихревыми токами, наведенными полем рассеяния в обмотках и конструктивных деталях (крепежные детали, стенки бака и т. д.) трансформатора, пропорциональны квадрату тока. Поскольку первичная обмотка трансформатора при холостом ходе обтекается очень малым током ( $I_x=0,1-0,01 I_{ном}$ ), а ток вторичной обмотки равен нулю, можно, не сделав заметной ошибки, пренебречь этими потерями и считать, что при холостом ходе трансформатора все измеренные потери являются магнитными потерями, т. е. потерями в магнитной системе. Вследствие этого можно принять

$$r_x = r_1 + r_0 \approx r_0, \quad r_0 \approx P_{x\phi} / I_{x\phi}^2.$$

Индуктивное падение напряжения в первичной обмотке при холостом ходе  $I_x x_1$  ничтожно мало по сравнению с величиной  $I_x x_0$  и им можно пренебречь. На этом основании можно считать

$$x_x = x_1 + x_0 \approx x_0.$$

Приведенные выше соображения позволяют с достаточной степенью считать

$$z_0 \approx U_{1\phi} / I_{1\phi}.$$

Магнитные потери примерно пропорциональны квадрату индукции, которая в свою очередь пропорциональна обусловленной ею ЭДС. Последняя же в пределах от холостого хода до номинальной нагрузки мало отличается от напряжения на зажимах трансформатора. Таким образом, магнитные потери практически пропорциональны квадрату напряжения. Поэтому при холостом ходе и  $U_1 = U_{1\text{ном}}$  потери трансформатора практически не отличаются от магнитных потерь трансформатора при нагрузке.

Индукция в стержне магнитопровода  $B_c$  может быть найдена из выражения

$$E = 4,44 f w B_c S_c,$$

где  $f$  – частота, Гц;  $w$  – число витков обмотки;  $S_c$  – сечение стержня, м<sup>2</sup>.

Учитывая, что  $E_{1\phi} \approx U_{1\phi}$ , получим

$$B_c = U_{1\phi} / 4,44 f w S_c.$$

Для исследуемого трансформатора  $U_{1\phi} = 127 / \sqrt{3}$ , число витков обмотки и активное сечение стержня указаны во введении.

### 3. Опыт короткого замыкания

Опыт короткого замыкания проводится по схеме рис. 1.5. Обмотка ВН, соединенная по схеме звезда, присоединяется к сети с частотой 50 Гц через индукционный регулятор и трехфазный комплект измерительных приборов К-505. Обмотка НН, соединенная по схеме звезда, закорачивается. Обмотка СН остается полностью разомкнутой. Напряжение на выходе индукционного регулятора до закорочения обмотки НН приводится к нулевому значению.

При проведении опыта следует произвести измерения при 4-5 значениях тока короткого замыкания в пределах от 0,5 до 1,0 от номинального тока.

Во время опыта следует стремиться к тому, чтобы изменение активного сопротивления обмоток, обусловленное их нагревом, было минимальным. Поэтому трансформатор должен находиться под напряжением лишь минимально необходимое для опыта время.

При проведении опыта следует измерить фазные напряжения в фазах *A*, *B* и *C*, линейные токи в этих фазах и потребляемую мощность.

Должна быть также измерена температура обмоток, равная в холодном трансформаторе температуре окружающей среды. Ее необходимо знать для приведения параметров трансформатора к температуре 75°C (см. ниже), которая называется расчетной рабочей температурой обмоток.

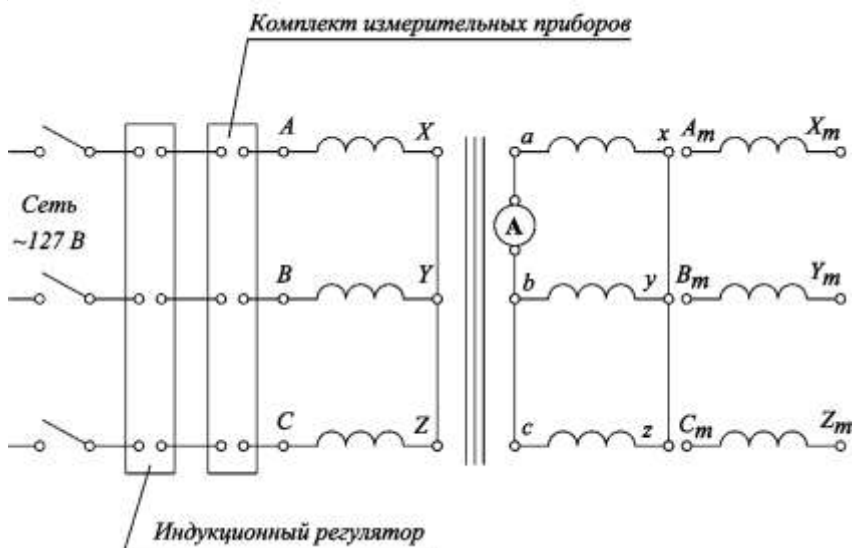


Рис. 1.5. Схема опыта короткого замыкания.

Результаты измерения заносят в таблицу по форме табл. 1.4, а обработку результатов измерений – по форме табл. 1.5.

В замкнутой накоротко вторичной обмотке установится ток, определяемый равенством  $I_{2к}/I_{1к}=w_1/w_2$ . Если ток первичной обмотки равен номинальному  $I_{1к}=I_{1ном}$ , то и во вторичной



обмотке ток будет практически равен номинальному току  $I_{2к}=I_{2ном}$ . В этом легко убедиться по показаниям амперметра, включенного между зажимами *a* и *b* обмотки НН.

Таблица 1.4

№ п/п	Напряжения, дел.			Ток $I_1$ , дел.			Ток $I_2$ , дел.	Мощность, дел.		
	$U_A$	$U_B$	$U_C$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_2$	$P_A$	$P_B$	$P_C$
1										
...										

Таблица 1.5

№ п/п	Напряжение, В		Ток $I_1$ , А	Ток $I_2$ , А	Мощность, Вт				$\cos\varphi_k$
	$U_{1ф}$	$U_1$			$P_A$	$P_B$	$P_C$	$P_k$	
1									
...									

Коэффициент мощности для трехфазного трансформатора можно рассчитать:

$$\cos\varphi_k = P_k / \sqrt{3}U_1I_{1к}.$$

По данным табл. 1.5 следует построить характеристики короткого замыкания трансформатора для температуры обмоток, равной температуре окружающей среды  $\Theta_{окр}$ :

$$U_k = f(I_k); \quad P_k = f(I_k); \quad \cos\varphi_k = f(I_k).$$

Примерный вид этих характеристик показан на рис. 1.6.

По характеристикам короткого замыкания определяются значения  $U_k$ ,  $P_k$  для номинального тока  $I_k=I_{ном}$  при температуре обмоток, равной  $\Theta_{окр}$ . Эти значения следует привести к номинальной рабочей температуре обмоток  $75^\circ\text{C}$ .

Параметры, приведенные к одной фазе, могут быть подсчитаны по найденным значениям  $U_k$  и  $P_k$ :

$$|Z_1 + Z_2| \approx z_k = U_{1ф} / I_{кф},$$

$$r_1 + r_2 \approx r_k = P_{кф} / I_{кф}^2,$$

$$x_1 + x_2' \approx x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2},$$

где  $I_{кф}$ ,  $U_{1ф}$ ,  $P_{кф}$  — фазные значения тока, напряжения и мощности.

При температуре обмоток  $75^\circ\text{C}$

$$r_{к75} = r_k [1 + \alpha(75 - \Theta)],$$

где

$$\alpha = 1/(234,5 + \Theta) \text{ и } z_{к75} = \sqrt{r_{к75}^2 + x_k^2}.$$

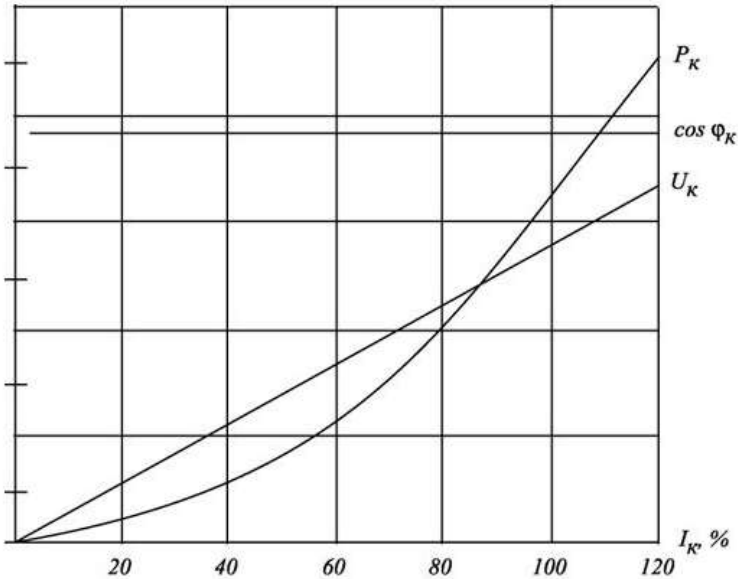


Рис. 1.6. Примерный вид характеристик короткого замыкания.

Напряжение короткого замыкания  $u_k$  и его активная  $u_{ка}$  и реактивная  $u_{кр}$  составляющие равны:

$$u_k = I_{номф} z_{к75} \cdot 100 / U_{номф},$$

$$u_{ка} = I_{номф} r_{к75} \cdot 100 / U_{номф},$$

$$u_{кр} = I_{номф} x_{к75} \cdot 100 / U_{номф}.$$

При расчете по этим формулам следует подставлять

номинальные ток и напряжение фазы той из обмоток, для которой определены  $z_{к75}$ ,  $r_{к75}$ ,  $x_{к75}$ , т. е. обмотки ВН.

Потери короткого замыкания трехфазного трансформатора, Вт:

$$P_k = 3I_{номф}^2 r_{к75}.$$

Коэффициент мощности

$$\cos\varphi_k = r_{к75} / z_{к75}.$$

При опыте короткого замыкания напряжение на зажимах трансформатора, а следовательно, и индукция в магнитной системе очень малы. Вследствие этого малы и магнитные потери, которыми в этом случае можно пренебречь. Если обмотки трансформатора при опыте короткого замыкания обтекаются номинальным током, то возникающие в них электрические потери не отличаются от электрических потерь при нагрузке трансформатора номинальным током при номинальном напряжении обмоток. Помимо электрических потерь в обмотках и отводах трансформатора, в его конструктивных деталях (ярмовые балки, стенки бака в масляных трансформаторах и т. д.), а также в самих обмотках и отводах возникают добавочные потери, обусловленные вихревыми токами, наведенными полями рассеяния обмоток и отводов. Эти потери, пропорциональные квадрату тока обмоток, также будут одинаковы как для опыта короткого замыкания, так и для режима нагрузки. Таким образом, потери короткого замыкания  $P_k$  с достаточной точностью могут быть приняты равными сумме электрических потерь и всех добавочных потерь трансформатора, вызванных полями рассеяния, при нормальной нагрузке трансформатора.

#### **4. Определение процентного изменения напряжения при нагрузке $\Delta u$ и коэффициента полезного действия**

Изменением напряжения двухобмоточного трансформатора называется арифметическая разность между номинальным вторичным напряжением при холостом ходе и напряжением на зажимах вторичной обмотки при номинальном вторичном токе,

номинальной частоте и номинальном напряжении на зажимах первичной обмотки. Изменение напряжения  $\Delta u$  выражается в процентах от номинального вторичного напряжения.

Из теории трансформатора известно, что процентное изменение вторичного напряжения трансформатора при нагрузке равно, %:

$$\Delta u = \beta(u_{ка} \cos \varphi_2 + u_{кр} \sin \varphi_2) + \frac{\beta^2(u_{кр} \cos \varphi_2 - u_{ка} \sin \varphi_2)}{200},$$

где  $\beta = I_2/I_{2ном}$ ;  $\cos \varphi_2$  – коэффициент мощности вторичной цепи.

Напряжение на зажимах вторичной обмотки

$$U_2 = U_{2ном}(1 - \Delta u/100).$$

Изменение напряжения и напряжение на зажимах вторичной обмотки следует рассчитать для активно-индуктивной нагрузки номинальным током ( $\beta=1,0$ ) с  $\cos \varphi_2=0,8$ .

По специальному указанию преподавателя должны быть выполнены расчет и построение графика зависимости  $\Delta u = f(\varphi_2)$  при изменении  $\varphi_2$  от  $-90^\circ$  до  $+90^\circ$  и  $\beta=1,0$  и графика  $\Delta u_2 = f(\beta)$  при изменении  $\beta$  от  $0,0$  до  $1,0$  при  $\cos \varphi_2=0,8$ .

Коэффициент полезного действия трансформатора равен

$$\eta = 1 - \frac{P_x + \beta^2 P_k}{\beta S_{ном} \cos \varphi_2 + P_x + \beta^2 P_k},$$

где  $P_x$  — потери холостого хода, практически равные магнитным потерям при нагрузке и не зависящие от тока нагрузки;  $P_k$  – потери короткого замыкания, при номинальном токе практически равные сумме электрических потерь в обмотках и отводах и всех добавочных потерь в трансформаторе, вызванных полями рассеяния. С изменением тока нагрузки  $P_k$  изменяются пропорционально  $\beta^2$ ;  $S_{ном}$  – номинальная мощность трансформатора, кВ·А или В·А (иногда обозначается  $P_{ном}$ ). КПД рассчитывается при  $\beta=1,0$  и  $\cos \varphi_2=0,8$ .

Результаты всех расчетов рекомендуется свести в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Холостой ход	$I_x$ , %	$I_{ха}$ , %	$I_{хр}$ , %	$P_x$ , Вт	$\cos \varphi_x$	$z_0$ , Ом	$r_0$ , Ом	$x_0$ , Ом

Короткое замыкание	$u_k$ , %	$u_{ka}$ , %	$u_{kp}$ , %	$P_k$ , Вт	$\cos\varphi_k$	$z_k$ , Ом	$r_k$ , Ом	$x_k$ , Ом
	$\Delta U$ , % =			$\eta$ , % =				

## Вопросы

1. Что такое коэффициент трансформации? Чем отличается фазный коэффициент трансформации от линейного?

2. Как определить фазный и линейный коэффициенты трансформации расчетным путем?

3. Как определить коэффициент трансформации экспериментальным путем? Схема опыта. Можно ли определять коэффициент трансформации при напряжении, отличающемся от номинального?

4. В чем заключается опыт холостого хода трансформатора? По какой схеме он проводится?

5. Что называется током холостого хода и потерями холостого хода трансформатора? В каких единицах они выражаются?

6. В каких частях трансформатора возникают потери при холостом ходе? Какие из них составляют большую часть потерь холостого хода?

7. При опыте холостого хода первичной является обмотка НН. Можно ли в качестве первичной использовать обмотку ВН? Как при этом изменяется напряжение, ток и мощность холостого хода, если в том и другом случае подвести к трансформатору соответствующее номинальное напряжение?

8. Что называется током холостого хода трансформатора?

9. Как определить ток холостого хода по показаниям трех амперметров для стержневого трансформатора с несимметричной магнитной системой? Почему могут отличаться фазные токи в этом случае?

10. Какой вид имеет схема замещения для холостого хода трансформатора? Как определить параметры схемы замещения по данным опыта холостого хода?

11. В чем заключается опыт короткого замыкания

трансформатора? По какой схеме он проводится?

12. Что называется напряжением короткого замыкания и потерями короткого замыкания трансформатора? В каких единицах они выражаются?

13. В каких частях трансформатора возникают потери при опыте короткого замыкания? Какие из них составляют большую часть потерь короткого замыкания?

14. Какой вид имеет схема замещения при коротком замыкании трансформатора? Как определить параметры схемы замещения по данным опыта короткого замыкания?

15. При проведении опыта короткого замыкания по схеме рис. 1.5 ток фазы А равен номинальному току первичной обмотки. Что покажет амперметр, включенный между точками *a* и *b* вторичной обмотки?

16. Как привести активную составляющую и полное сопротивление короткого замыкания к средней эксплуатационной температуре  $+75^{\circ}\text{C}$ ?

17. Что называется изменением напряжения двухобмоточного трансформатора? В каких единицах оно выражается?

18. Как устроен трехфазный трансформатор? Объясните устройство магнитопровода.

19. Как устроены однофазные трансформаторы стержневого и броневые типы?

20. Какие материалы используются для изготовления магнитопроводов трансформаторов?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Беспалов В.Я., Котеленец Н.Ф. Электрические машины. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Академия, 2013. (§§ 1.3; 1.4; 2.6; 2.7; 3.1; 3.2; 3.3; 3.4; 3.5; 3.6)

2. Копылов И. П. Электрические машины. Учебник для вузов. 5-е изд., стер., – М.: Высшая школа, 2006. (§§ 2.4; 2.5; 2.6; 2.10)

3. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. Том 1. – М.: Издательство МЭИ, 2004. (§§ 5.1; 5.2; 6.1; 6.2; 6.3)

## Лабораторная работа № 2

### ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Часто при эксплуатации трансформаторов возникает необходимость в параллельном включении двух или нескольких из них. При этом как первичные, так и вторичные обмотки трансформаторов соответственно присоединяются к общим сборным шинам.

Назначением работы является опытное изучение условий включения трансформаторов на параллельную работу и проверка влияния отдельных факторов на режим параллельной работы.

Для того чтобы у параллельно включенных трансформаторов нагрузка распределялась пропорционально их номинальным мощностям, необходимо соблюдение следующих трех условий:

- 1) первичные и вторичные номинальные напряжения трансформаторов должны быть соответственно равны, что практически сводится к требованию равенства коэффициентов трансформации;
- 2) трансформаторы должны иметь одну и ту же группу соединения;
- 3) напряжения короткого замыкания трансформаторов должны быть одинаковы.

Если при включении на параллельную работу не соблюдены первое и второе условия, то в обмотках трансформаторов возникают уравнивающие токи, которые в отдельных случаях особенно при несовпадении групп могут достигать величины тока короткого замыкания.

Несоблюдение третьего условия приводит к тому, что нагрузка распределяется между трансформаторами не пропорционально их номинальным мощностям. Поскольку нагрузка каждого из параллельно работающих трансформаторов не должна превышать его номинальную мощность, несоблюдение третьего условия приводит к снижению суммарной допустимой мощности параллельно работающих трансформаторов против суммы их номинальных мощностей.

## Программа работы

1. Собрать и проверить опытным путем следующие группы соединений обмоток трехфазного трансформатора: Y/Y-0; Y/Y-6; Δ/Y-11.

2. Собрать схему для параллельной работы двух трансформаторов, проверить правильность их соединения и включить на параллельную работу в режиме холостого хода.

3. Найти распределение нагрузки между параллельно работающими трансформаторами для следующих трех случаев:  $u_{кI}=u_{кII}$  и  $k_I=k_{II}$ ;  $u_{кI} \neq u_{кII}$  и  $k_I=k_{II}$ ;  $u_{кI}=u_{кII}$  и  $k_I \neq k_{II}$ .

По данным опыта выполнить следующее:

1. Построить в масштабе совмещенные диаграммы линейных напряжений обеих обмоток для схем и групп, указанных в п. 1 программы.

2. По данным опыта п. 3 построить кривые зависимости токов каждого из трансформаторов ( $I_I$ ;  $I_{II}$ ) от общего тока нагрузки ( $I$ ), а также определить  $u_{кII}$  для случая, когда при параллельной работе у одного из трансформаторов вместо обмотки НН используется обмотка СН.

## Пояснения и указания к работе

### 1. Соединение обмоток по заданным схемам и группам

Группа соединения обмоток трансформатора характеризует угловое смещение векторов линейных ЭДС обмотки НН по отношению к векторам линейных ЭДС обмотки ВН. Группа обозначается числом, которое после умножения на  $30^\circ$  дает угол смещения в градусах. При этом угол смещения всегда отсчитывается от вектора линейной ЭДС ВН по часовой стрелке до одноименного вектора ЭДС НН. На практике для удобства обозначения групп используют циферблат часов, изображая линейную ЭДС обмотки ВН в виде минутной стрелки, установленной на 12 часов, а линейную ЭДС обмотки НН в виде часовой стрелки, которая и показывает группу соединения.



Для получения заданной схемы и группы соединения обмоток необходимо предварительно построить векторные диаграммы линейных ЭДС для обмоток ВН и НН и затем выполнить соединения обмоток в соответствии с этими диаграммами.

Проверка правильности соединения может быть произведена, например, по схеме рис. 2.1, исходя из следующих соображений: если соединить два одноименных ввода обмоток ВН и НН (в схеме рис. 2.1. соединены вводы  $A$  и  $a$ ) и включить одну из обмоток на напряжение, то обе обмотки окажутся в общей системе напряжений. Соединение двух одноименных вводов обмоток трансформатора соответствует совмещению одноименных точек диаграммы линейных напряжений ВН и НН.

По такой совмещенной диаграмме, если ее построить в масштабе, напряжение между двумя любыми точками (например,  $b$  и  $B$ ,  $b$  и  $C$ ,  $c$  и  $B$ ,  $c$  и  $C$ ) можно определить графически или аналитически.

В последнем случае при известных линейном напряжении обмотки НН –  $U_{\text{НН}}$  и линейном коэффициенте трансформации  $k$  для соответствующей схемы соединения обмоток величины напряжений  $U_{bB}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{cB}$  и  $U_{cC}$  можно определить следующим образом:

при соединении обмоток Y/Y-0

$$U_{bB} = U_{cC} = U_{\text{НН}}(k - 1),$$

$$U_{bc} = U_{cB} = U_{\text{НН}}\sqrt{1 - k + k^2};$$

при соединении обмоток Y/Y-6

$$U_{bB} = U_{cC} = U_{\text{НН}}(1 + k),$$

$$U_{Bc} = U_{cB} = U_{\text{НН}}\sqrt{1 + k + k^2};$$

при соединении обмоток  $\Delta$ /Y-11

$$U_{bB} = U_{cB} = U_{cC} = U_{\text{НН}}\sqrt{1 - k\sqrt{3} + k^2},$$

$$U_{bc} = U_{\text{НН}}\sqrt{1 + k^2}.$$

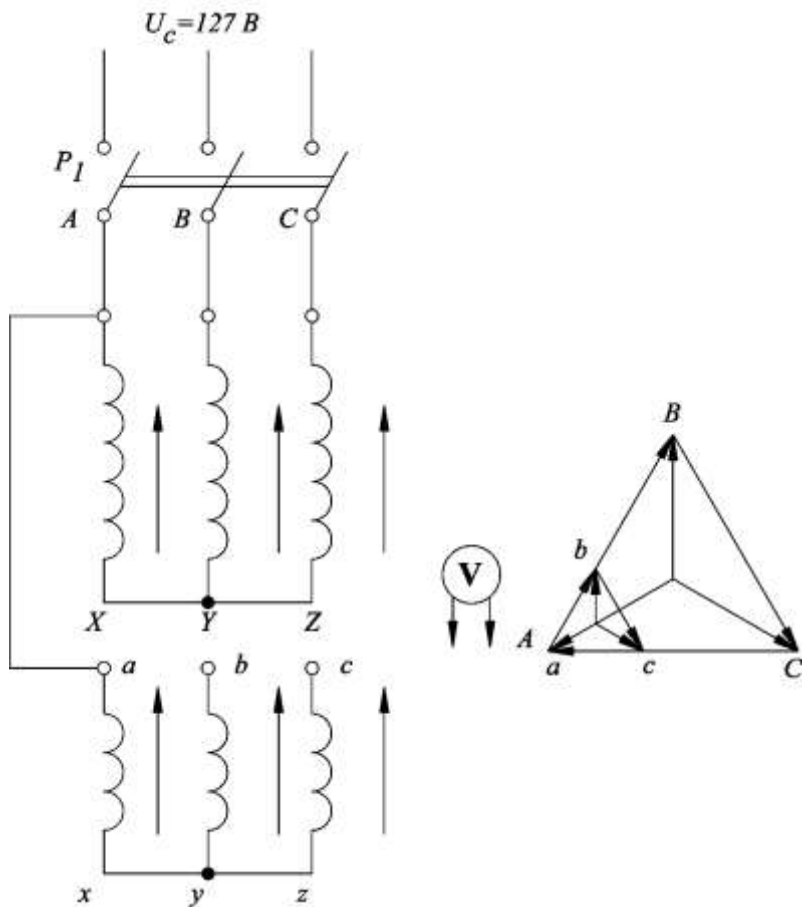


Рис. 2.1. Схема опыта для проверки групп соединений обмоток трансформатора.

Величины напряжений  $U_{bB}$ ,  $U_{Bc}$ ,  $U_{cB}$  и  $U_{cC}$ , найденные таким образом, рекомендуется занести в таблицу по типу табл. 2.1.

Таблица 2.1

Группа	$U_{AB}$	$U_{ab}$	$U_{bB}$		$U_{bC}$		$U_{cB}$		$U_{cC}$	
			по расчету	из опыта	по расчету	из опыта	по расчету	из опыта	по расчету	из опыта
Y/Y-0										
Y/Y-6										
$\Delta$ /Y-11										

Напряжения  $U_{bB}$ ,  $U_{bC}$ ,  $U_{cB}$  и  $U_{cC}$ , определенные графическим или аналитическим путем, затем измеряются вольтметром. Совпадение расчетных и измеренных значений свидетельствует о правильности соединения обмоток трансформатора по заданной схеме и группе.

Питание трансформатора рекомендуется производить со стороны обмотки ВН во избежание больших вторичных напряжений, могущих вызвать поражение током.

## 2. Включение трансформаторов на параллельную работу в режиме холостого хода

Для осуществления параллельной работы двух трансформаторов при  $u_{кI}=u_{кII}$  и  $k_I=k_{II}$  следует собрать схему, приведенную на рис. 2.2, и включить пускатель  $P_1$ . Далее, прежде чем включить трансформаторы на параллельную работу (замкнуть пускатель  $P_2$ ), необходимо проверить правильность их соединения, т. е. убедиться в том, что включаемые трансформаторы имеют одинаковые напряжения, группы соединения и одинаковый порядок чередования фаз.

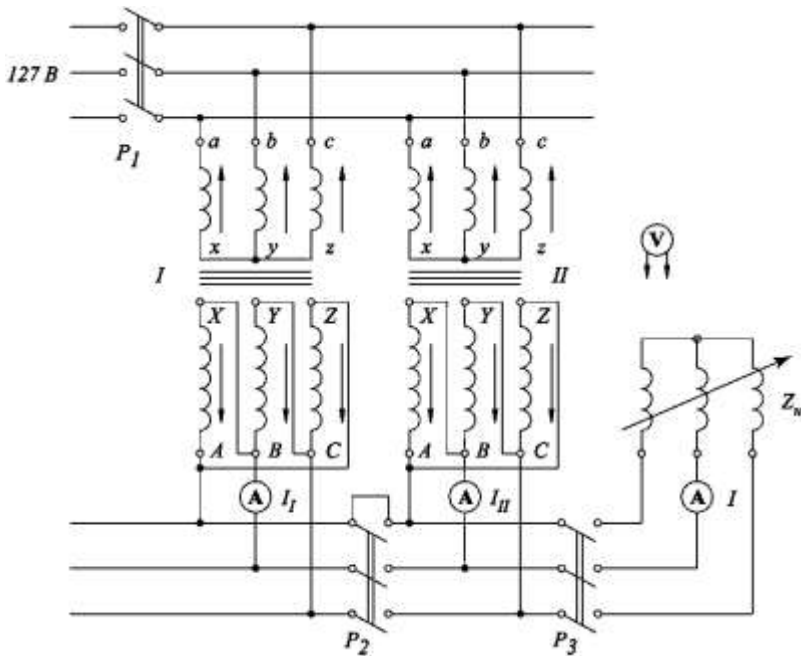


Рис. 2.2. Схема включения трансформаторов на параллельную работу при  $u_{кI}=u_{кII}$  и  $k_I=k_{II}$ .

Для этого требуется:

Измерить вторичные линейные напряжения у первого и второго трансформатора. Эти напряжения должны быть равны.

Измерить напряжения между одноименными зажимами первого и второго трансформаторов (на пускателе  $P_2$ ). Если группы соединения и чередование фаз включаемых трансформаторов одинаковы, показания вольтметра будут равны нулю. Если показания вольтметра не равны нулю, то пускатель  $P_2$  включать нельзя. В этом случае необходимо проверить идентичность групп соединений и правильность присоединения первичных и вторичных обмоток трансформаторов к пускателям  $P_1$  и  $P_2$ .

Запись измеренных величин рекомендуется вести по форме табл. 2.2.

Таблица 2.2

Трансформатор I			Трансформатор II			Между трансформаторами			
$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$	$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$	$U_{BB}$	$U_{CC}$	$U_{BI}$ CII	$U_{CI}$ BII

После включения пускателя  $P_2$  трансформаторы оказываются работающими параллельно в режиме холостого хода.

### 3. Распределение нагрузки между параллельно работающими трансформаторами

В общем случае ток нагрузки распределяется между параллельно включенными трансформаторами согласно следующим выражениям:

$$i_I = \frac{(k_I - k_{II})\dot{U}_1}{\underline{Z}_{кI} + \underline{Z}_{кII}} + i \frac{\underline{Z}_{кII}}{\underline{Z}_{кI} + \underline{Z}_{кII}};$$

$$i_{II} = -\frac{(k_I - k_{II})\dot{U}_1}{\underline{Z}_{кI} + \underline{Z}_{кII}} + i \frac{\underline{Z}_{кI}}{\underline{Z}_{кI} + \underline{Z}_{кII}}.$$

Из этих выражений видно, что ток каждого трансформатора состоит из уравнительного тока, обусловленного различием коэффициентов трансформации  $k_I$  и  $k_{II}$  и части тока нагрузки, определяемой сопротивлениями короткого замыкания трансформаторов  $Z_{кI}$  и  $Z_{кII}$ .

Уравнительный ток будет иметь место и при отсутствии нагрузки ( $I=0$ ).

При  $k_I=k_{II}$  уравнительный ток равен нулю, а ток нагрузки распределяется между трансформаторами обратно пропорционально  $Z_{кI}$  и  $Z_{кII}$ . В практических расчетах при  $k_I=k_{II}$  обычно используют выражение

$$I_I / I_{II} = u_{кII} \cdot S_{номI} / u_{кI} \cdot S_{номII},$$

которое наглядно показывает, что нагрузка распределяется

между параллельно работающими трансформаторами прямо пропорционально их номинальным мощностям и обратно пропорционально напряжениям короткого замыкания. При равенстве номинальных мощностей и напряжении короткого замыкания относительная нагрузка между параллельно включенными трансформаторами распределяется поровну (коэффициент нагрузки  $\beta$  одинаков).

Для практического выяснения распределения нагрузки между параллельно включенными трансформаторами при  $u_{кI}=u_{кII}$  включить пускатель  $P_3$  и постепенно увеличить нагрузку до  $I_{ном}$  для каждого из трансформаторов.

При этом измеряются вторичные токи отдельных трансформаторов и общий ток нагрузки. Запись опытных данных рекомендуется вести в форме табл. 2.3.

Таблица 2.3

	$U_{AB}, B$	$U_{ab}, B$	Вторичные токи, А		Ток нагрузки, А
			$I_I$	$I_{II}$	$I$
1					
2					
...					

Для выяснения распределения нагрузки между параллельно работающими трансформаторами при разных напряжениях короткого замыкания  $U_{кI} \neq U_{кII}$  следует отключить пускатель  $P_1$  и у трансформатора II вместо обмотки НН включить обмотку СН (см. схему рис. 2.3). Использование обмотки СН с тем же числом витков, но меньшего диаметра, уменьшает индуктивность обмотки и сопротивление короткого замыкания трансформатора II  $Z_{кII}$ , что приводит к пропорциональному уменьшению напряжения короткого замыкания  $u_{кII}$ . Вследствие этого при параллельной работе нагрузка трансформатора II будет больше, чем нагрузка трансформатора I.

После переключения проводов, подходивших к обмотке НН, на обмотку СН следует включить пускатель  $P_1$  и, проверив правильность соединения трансформаторов, включить

последовательно пускатель  $P_2$  и  $P_2$ . При этом нагрузку увеличивать до тех пор, пока трансформатор II не загрузится до  $I_{ном}$ . Запись опытных данных проводится в форме табл. 2.3.

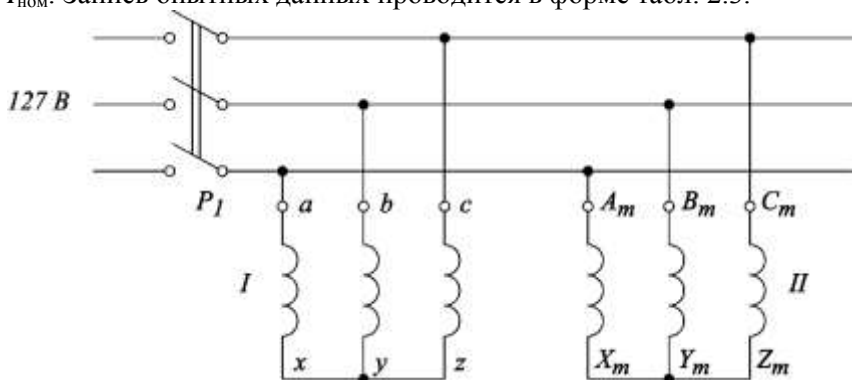


Рис. 2.3. Схема включения первичных обмоток трансформаторов для получения  $U_{кI} \neq U_{кII}$ .

Для выяснения распределения нагрузки между параллельно работающими трансформаторами при неравных коэффициентах трансформации следует вновь включить обмотку НН вместо обмотки СН (см. схему рис. 2.2), а концы обмоток ВН  $X, Y, Z$  трансформатора II переключить на  $X', Y', Z'$ , согласно рис. 2.4. В этом случае число витков обмотки ВН трансформатора II будет равно 165,  $k_I$  станет меньше  $k_{II}$  (для схемы  $Y/\Delta$   $k = w_{ВН}/w_{НН} \sqrt{3}$ ) и при параллельной работе трансформатор I будет перегружаться уравнивающим током

$$\dot{I}_{уп} = \frac{(k_I - k_{II})\dot{U}_I}{Z_{кI} + Z_{кII}}$$

а трансформатор II, наоборот, им разгружаться.

Перед включением пускателя  $P_2$  необходимо вновь проверить правильность соединения трансформаторов.

После включения пускателя  $P_2$  записать опытное значение уравнивающего тока и сравнить его с расчетным (при отключенной общей нагрузке). Далее включить пускатель  $P_3$  и осуществить опыт нагрузки с соблюдением указаний,

приведенных выше. Запись опытных данных вести в форме табл. 2.3.

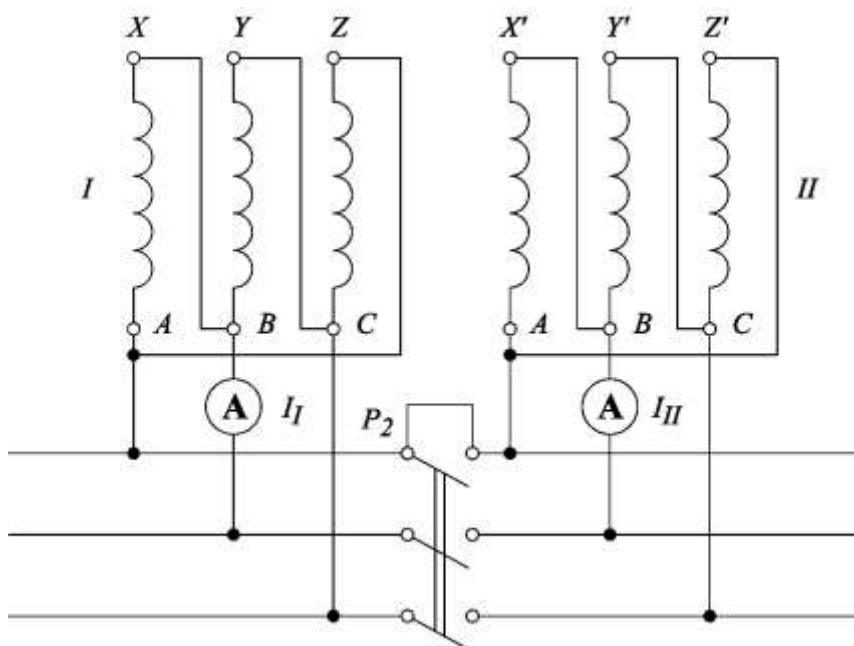


Рис. 2.4. Схема включения вторичных обмоток трансформаторов для получения  $k_I \neq k_{II}$ .

### Вопросы

1. Почему на понижающих подстанциях возникает необходимость в дроблении установленной трансформаторной мощности?
2. Какие условия должны быть соблюдены при включении трансформаторов на параллельную работу?
3. Можно ли включить на параллельную работу трансформаторы с различными коэффициентами трансформации, если остальные условия соблюдаются?
4. Будет ли иметь место уравнительный ток в режиме



холостого хода при разных коэффициентах трансформации и выполнении остальных условий у параллельно включенных трансформаторов?

5. Как будут распределяться токи нагрузки параллельно работающих трансформаторов, если напряжения короткого замыкания не одинаковы, а остальные условия включения соблюдаются?

6. Как изменится напряжение короткого замыкания испытуемого трансформатора, у которого на параллельную работу вместо обмотки НН включается обмотка СН?

7. Объясните, возможно ли включение на параллельную работу трансформаторов с различными группами соединения обмоток?

8. Какое допускается различие в величине напряжения короткого замыкания и коэффициентов трансформации трансформаторов, включенных на параллельную работу?

9. Что понимается под группой соединения обмоток трансформатора?

10. Какими способами можно изменить группу соединения обмоток?

11. Какие схемы и группы являются стандартными?

12. Как опытным путем проверить схему и группу Y/Y-0?

13. Как опытным путем проверить схему и группу Y/ $\Delta$ -11?

14. Зачем при проверке группы соединяются точки A-a (см. рис. 2.1)?

15. Как проверить выполнение условия включения на параллельную работу для исследуемых в лаборатории трансформаторов (схема рис. 2.2)?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Беспалов В.Я., Котеленец Н.Ф. Электрические машины. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Академия, 2013. (§§ 4.1; 4.2)
2. Копылов И. П. Электрические машины. Учебник для вузов. 5-е изд., стер., – М.: Высшая школа, 2006. (§ 2.11)
3. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. Том 1. – М.: Издательство МЭИ, 2004. (§§ 4.3; 12.1; 12.2; 12.3; 12.4)

### Лабораторная работа № 3

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКИ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

В эксплуатации трехфазные трансформаторы могут иметь нагрузку, при которой по отдельным фазам протекают отличные друг от друга токи, фазовый сдвиг между которыми не равен  $120^\circ$ , что связано с подключением к фазам трансформатора нагрузок различных по величине и характеру. Одним из вариантов несимметричной нагрузки является однофазная нагрузка.

Это приводит к нежелательным последствиям как для потребителей электроэнергии, так и для самого трансформатора.

При неравенстве токов в фазных обмотках трансформатора в нем возникают дополнительные явления, не имеющие место в симметричных режимах, отрицательно сказывающиеся на работе трансформатора, приводящее к искажению фазных напряжений, увеличению потерь в стали и элементах конструкции, значительные местные превышения температуры и т. д.

У потребителей электроэнергии несимметрия напряжений приводит к уменьшению пусковых и максимальных моментов асинхронных двигателей и снижению их КПД, к быстрому перегоранию ламп накаливания в случае повышения напряжения или уменьшению световой отдачи при понижении напряжения в отдельных фазах.

Задачей настоящей работы является исследование несимметричных режимов работы трехфазного трехстержневого трансформатора при различных схемах соединения его обмоток.

### Программа работы

1. Для схем соединения обмоток  $Y/Y_n-0$ ,  $Y/\Delta/Y_n-11-0$ ,  $\Delta/Y_n-11$ ,  $Y/Z_n-11$  при однофазной и двухфазной нагрузках:

- а) определить расчетным путем и сравнить с опытными данными первичные линейные и фазные токи;
- б) измерить вторичные линейные и фазные напряжения.

2. Опытным путем определить сопротивление  $z_{0n}$  схемы

замещения для токов нулевой последовательности трансформатора, имеющего схему соединения обмоток  $Y/Y_n-0$ .

### По данным опытов

1. Построить в масштабе векторные диаграммы вторичных линейных и фазных напряжений для схем соединения обмоток  $Y/Y_n-0$  и  $\Delta/Y_n-11$ .

2. По построенным векторным диаграммам найти смещение нулевых точек звезд вторичных фазных напряжений  $E_{0n}$  из центра тяжести треугольника линейных напряжений для различных нагрузок и схем соединения обмоток.

3. Рассчитать по данным п. 2 смещение нулевой точки звезды вторичных фазных напряжений и сравнить его с опытным значением, полученным из векторной диаграммы (для схемы  $Y/Y_n-0$ ). Выразить в процентах сопротивление схемы замещения для токов нулевой последовательности.

4. Сделать письменно выводы по особенностям работы трансформаторов, имеющих различные схемы соединения обмоток при несимметричной нагрузке.

### Пояснения и указания к работе

Объектом исследования является трехфазный трансформатор, описание конструкции которого дано во введении.

В качестве первичной обмотки используется обмотка ВН, которая питается от сети 127 В.

При подготовке к выполнению работы необходимо рассчитать фазные и линейные токи первичной обмотки для различных схем соединения, задавшись током нагрузки  $I_n=18$  А. Коэффициент трансформации фазных напряжений  $k_{12}=3$ . Результаты расчетов заносятся в табл. 3.1.



В качестве нагрузки при выполнении п. 1 данной лабораторной работы используется индукционный регулятор напряжения – заторможенная асинхронная машина с фазным ротором. Схема подключения нагрузки представлена на рис. 3.1. На индукционном регуляторе имеется шкала регулируемого напряжения, границы которой помечены цифрами «0» и «250». Положение «0» соответствует минимуму нагрузки, т. е. в этом случае  $I_n \approx 0$ . Увеличивают ток нагрузки вращением рукоятки регулятора, так чтобы стрелка указателя перемещалась в направлении цифры «250».

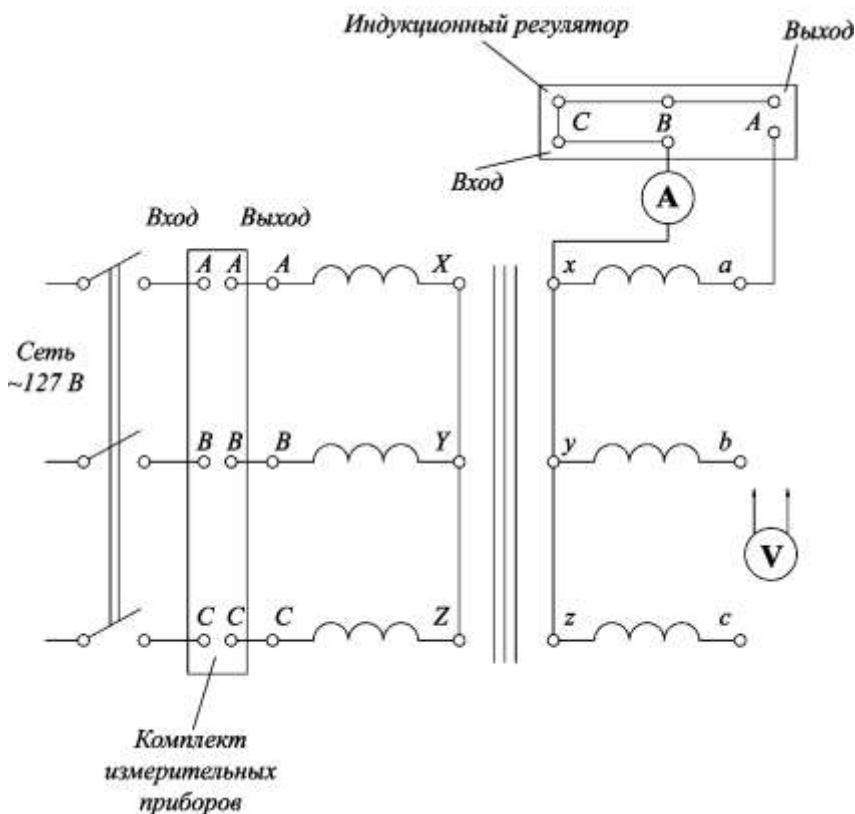


Рис. 3.1. Схема включения однофазной нагрузки.

Каждый раз перед включением сетевого напряжения необходимо вращением рукоятки индукционного регулятора установить стрелку в положение «0». В дальнейшем, вращая рукоятку регулятора, устанавливают ток нагрузки равный 18 А.

Для исследования электрических несимметричных цепей применяется метод симметричных составляющих, согласно которому ток каждой фазы можно представить как сумму токов прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Сопротивления для токов прямой и обратной последовательностей в трансформаторах одинаковы. Поэтому токи прямой и обратной последовательности можно рассматривать совместно:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} &= \dot{I}'_a; \\ \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{b2} &= \dot{I}'_b; \\ \dot{I}_{c1} + \dot{I}_{c2} &= \dot{I}'_c. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Фазные токи, учитывая равенства (3.1), можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{I}'_a + \dot{I}_{a0}, \\ \dot{I}_b &= \dot{I}'_b + \dot{I}_{b0}, \\ \dot{I}_c &= \dot{I}'_c + \dot{I}_{c0}, \end{aligned} \quad (3.2)$$

где  $\dot{I}_{a0} = \dot{I}_{b0} = \dot{I}_{c0} = \dot{I}_0$  – ток нулевой последовательности.

При несимметричной нагрузке ток нулевой последовательности появляется только в тех случаях, когда вторичная цепь трансформатора соединена с нагрузкой нулевым проводом.

В системах без нулевого провода (двухфазная нагрузка) в фазах вторичной цепи будут протекать токи прямой и обратной последовательностей, которые магнитно уравновешены токами первичной цепи в каждой фазе. Поэтому токи в этом случае будут трансформироваться пофазно, независимо от схемы соединения первичной обмотки. При однофазных нагрузках ток нулевой последовательности вторичной цепи может быть магнитно уравновешен током первичной обмотки только в том случае, если схема соединения трех фаз обмотки образует для него проводящий контур.

## 1. Схема соединения Y/Y<sub>n</sub>-0 (рис. 3.1)

Для однофазной нагрузки во вторичной цепи трансформатора, поскольку она имеет нулевой провод, будут протекать токи всех трех последовательностей. По нулевому проводу протекает ток нулевой последовательности, равный сумме токов нулевой последовательности трех фаз. Значение тока нулевой последовательности любой фазы равно

$$\dot{I}_{a0} = \dot{I}_{b0} = \dot{I}_{c0} = \dot{I}_n / 3. \quad (3.3)$$

Токи в фазах вторичной цепи равны:

$$\dot{I}_a = \dot{I}_n; \quad \dot{I}_b = \dot{I}_c = 0. \quad (3.4)$$

Из равенства (3.2) – (3.4) определим составляющие токов фаз, равные сумме токов прямой и обратной последовательностей:

$$\dot{I}'_a = \dot{I}_a - \dot{I}_{a0} = \frac{2}{3} \dot{I}_n,$$

$$\dot{I}'_b = \dot{I}_b - \dot{I}_{b0} = -\frac{1}{3} \dot{I}_n,$$

$$\dot{I}'_c = \dot{I}_c - \dot{I}_{c0} = -\frac{1}{3} \dot{I}_n.$$

Ток нулевой последовательности в первичной обмотке, соединенной в звезду без нулевого провода, протекать не может, так как для него нет проводящего контура. Поэтому в первичную обмотку трансформируется только суммарная составляющая прямой и обратной последовательностей вторичных токов:

$$\dot{I}_A = -\dot{I}'_a / k_{12} = -\frac{2}{3} \dot{I}'_n / k_{12},$$

$$\dot{I}_B = -\dot{I}'_b / k_{12} = -\frac{1}{3} \dot{I}'_n / k_{12},$$

$$\dot{I}_C = -\dot{I}'_c / k_{12} = -\frac{1}{3} \dot{I}'_n / k_{12},$$

где  $\dot{I}_n$  — ток нагрузки;  $k_{12} = w_{ВН} / w_{НН}$  — коэффициент трансформации фазных напряжений.

Ток нулевой последовательности вторичной цепи магнитно

не уравнивается током первичной цепи (не трансформируется в первичную цепь) и является намагничивающим током; он создает во всех стержнях поток взаимной индукции нулевой последовательности  $\Phi_0$ , который наводит в обмотках ЭДС нулевой последовательности  $E_0$ , и поток рассеяния вторичной обмотки  $\Phi_{\sigma 20}$ , индуцирующий в ней ЭДС рассеяния  $E_{\sigma 20}$ . С учетом потерь активной мощности обе ЭДС будут уравниваться падением напряжения от тока  $I_0$  в соответствующих полных сопротивлениях вторичной обмотки:

$$\begin{aligned}\dot{E}_0 &= -\dot{I}_0 Z_{00}, \\ \dot{E}_{\sigma 20} &= -\dot{I}_0 Z_2.\end{aligned}$$

Суммируя ЭДС  $E_0$  и  $E_{\sigma 20}$ , получим

$$\dot{E}_0 + \dot{E}_{\sigma 20} = -\dot{I}_0 Z_{00} - \dot{I}_0 Z_2 = -\dot{I}_0 (Z_{00} + Z_2) = -\dot{I}_0 Z_{0п}. \quad (3.5)$$

Здесь  $Z_{0п} = Z_{00} + Z_2$  — полное сопротивление фазы вторичной обмотки току нулевой последовательности, причем:

$$\begin{aligned}Z_{00} &= r_{00} + jx_{00}; \\ Z_2 &= r_2 + jx_2,\end{aligned}$$

где  $r_{00}$  — активное сопротивление, определяемое потерями активной мощности в стальных частях трансформатора от потока нулевой последовательности;  $x_{00}$  — индуктивное сопротивление взаимной индукции току нулевой последовательности;  $r_2$  — активное сопротивление провода вторичной обмотки;  $x_2$  — индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки.

Уравнения напряжений вторичной обмотки с учетом падения напряжений, создаваемых током нулевой последовательности, и уравнений (3.2) могут быть записаны в следующем виде:

$$\begin{aligned}\dot{U}_a &= \dot{E}_a - \dot{I}_a Z_2 - \dot{I}_0 Z_{00} = \dot{E}_a - \dot{I}'_a Z_2 - \dot{I}_0 Z_2 - \dot{I}_0 Z_{00} = \dot{U}'_a - \dot{I}_0 Z_{0п}, \\ \dot{U}_b &= \dot{U}'_b - \dot{I}_0 Z_{0п}, \\ \dot{U}_c &= \dot{U}'_c - \dot{I}_0 Z_{0п}.\end{aligned} \quad (3.6)$$

Здесь  $\dot{U}'_a, \dot{U}'_b, \dot{U}'_c$  — напряжения фаз без учета падения напряжения от тока нулевой последовательности.



Центр звезды фазных напряжений  $\dot{U}'_a, \dot{U}'_b, \dot{U}'_c$  совпадает с центром тяжести треугольника линейных напряжений, центр звезды действительных фазных напряжений  $\dot{U}'_a, \dot{U}'_b, \dot{U}'_c$  в соответствии с (3.6) смещен относительно центра тяжести треугольника линейных напряжений на величину  $\dot{E}_{оп}$ .

Потоки нулевой последовательности  $\Phi_0$  в каждый момент времени равны друг другу и одинаково направлены, поэтому в трехстержневом трансформаторе магнитные силовые линии этих потоков могут замыкаться только по воздуху, а в трансформаторах, имеющих стальные баки, и по стенкам баков. В том и другом случае магнитное сопротивление потоку нулевой последовательности достаточно велико, вследствие чего поток  $\Phi_0$  и наводимая им ЭДС  $E_0$  малы. Невелика, следовательно, и величина  $E_{оп}$ , представляющая собой смещение нулевой точки звезды действительных фазных напряжений из центра тяжести треугольника линейных напряжений.

В групповом трансформаторе, состоящем из трех однофазных трансформаторов поток  $\Phi_0$  и наводимая им ЭДС  $E_0$  будут большими, так как линии потока  $\Phi_0$  замыкаются по тому же магнитопроводу, что и главный магнитный поток  $\Phi$ , имеющему малое магнитное сопротивление. В этом случае величина  $E_{оп}$  будет большой.

Для двухфазной нагрузки трансформатора в фазах вторичной обмотки протекают токи прямой и обратной последовательностей  $\dot{I}'_a = -\dot{I}'_b = \dot{I}'_н; \dot{I}'_c = 0$ , которые магнитно уравновешиваются токами первичной цепи в каждой фазе

$$\dot{I}'_A = -\dot{I}'_н / k_{12}; \quad \dot{I}'_н / k_{12}; \quad \dot{I}'_C = 0.$$

## 2. Схема соединения Y/Δ/Y<sub>н</sub>-11-0

При соединении обмоток трансформатора по схеме Y/Y<sub>н</sub>-0 и несимметричной нагрузке имеют место значительные искажения звезды фазных напряжений. Однако этого можно избежать, если трансформатор снабдить специальной компенсационной обмоткой, соединенной в треугольник (рис. 3.2). В таком трансформаторе при несимметричной нагрузке токи нулевой последовательности обмотки, соединенной в схему Y<sub>н</sub>, трансформируются в компенсационную обмотку и, замыкаясь

по контуру треугольника, магнитно уравниваются в каждой фазе.

Обычно компенсационная обмотка рассчитана только на токи нулевой последовательности, однако ее можно использовать также и для полезной нагрузки.

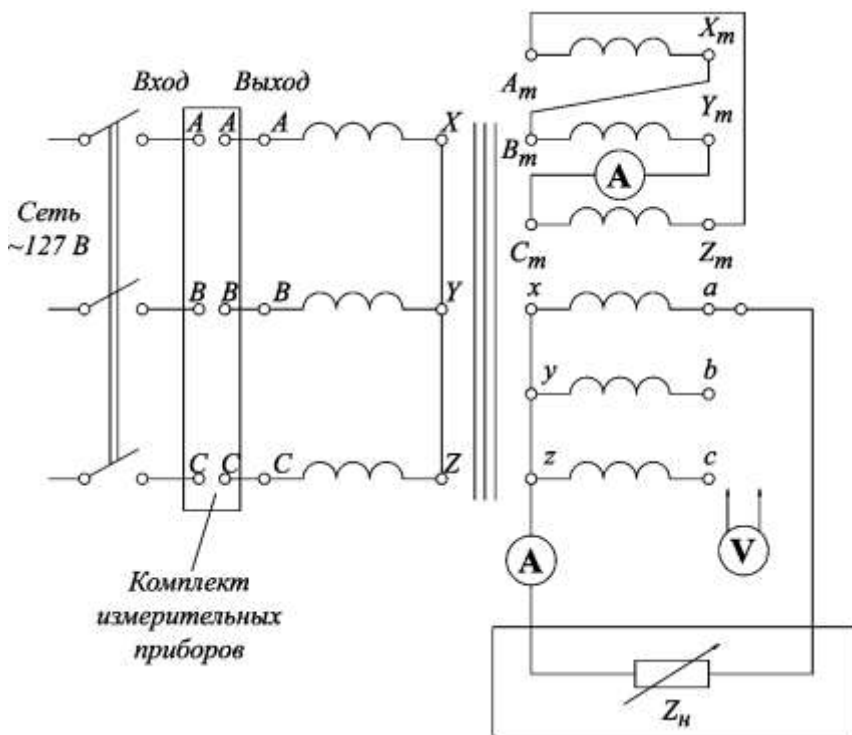


Рис. 3.2. Схема опыта при соединении Y/Δ/Y<sub>n</sub>-11-0.

В первичную обмотку трансформируется только суммарная составляющая токов прямой и обратной последовательности:

$$\dot{I}_A = -\frac{2}{3} \dot{I}_n / k_{12},$$

$$\dot{I}_B = -\frac{1}{3} \dot{I}_n / k_{12},$$

$$\dot{I}_C = \frac{1}{3} \dot{I}_H / k_{12},$$

В компенсационной обмотке протекает только ток нулевой последовательности, поэтому для этой обмотки:

$$\dot{I}_{A\Phi} = \dot{I}_{B\Phi} = \dot{I}_{C\Phi} = \dot{I}_0 / k_{32} = \frac{1}{3} \dot{I}_H / k_{31}.$$

где  $k_{32}=W_{\text{комп}}/W_{\text{НН}}$  — коэффициент трансформации фазных напряжений для компенсационной и нагрузочной обмоток.

В данной работе в качестве компенсационной обмотки используется обмотка, обозначенная  $A_m, B_m, C_m$ . Эта обмотка имеет такое же число витков как и нагрузочная обмотка НН, поэтому  $k_{32}=1$ .

### 3. Схема соединения $\Delta/Y_H-11$

При несимметричной нагрузке трансформатора, обмотка которого соединена по схеме  $\Delta/Y_H-11$  (рис. 3.3), в первичную обмотку будут трансформироваться токи всех трех последовательностей, для которых обмотка, соединенная треугольником, является проводящим контуром.

Ток вторичной обмотки

$$\dot{I}_a = \dot{I}_H; \quad \dot{I}_b = \dot{I}_c = 0.$$

Токи в фазах первичной обмотки

$$\dot{I}_{A\Phi} = -\dot{I}_H / k_{12}; \quad \dot{I}_{B\Phi} = \dot{I}_{C\Phi} = 0.$$

Линейные первичные токи

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{A\Phi} - \dot{I}_{C\Phi} = -\dot{I}_H / k_{12},$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{B\Phi} - \dot{I}_{A\Phi} = \dot{I}_H / k_{12},$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{C\Phi} - \dot{I}_{B\Phi} = 0.$$

Для двухфазной нагрузки токи вторичной обмотки  $\dot{I}_a = -\dot{I}_b = \dot{I}_H; \quad \dot{I}_c = 0$ .

Поскольку токи трансформируются и этом случае пофазно, фазные токи первичной обмотки будут равны:  $\dot{I}_{A\Phi} = -\dot{I}_H / k_{12}; \quad \dot{I}_{B\Phi} = -\dot{I}_{A\Phi}; \quad \dot{I}_{C\Phi} = 0$ , а линейные токи, определяемые как

разность фазных, равны:  $\dot{I}_A = \dot{I}_{A\phi} - \dot{I}_{C\phi} = -\dot{I}_H / k_{12}$ ;  
 $\dot{I}_B = \dot{I}_{B\phi} - \dot{I}_{A\phi} = 2\dot{I}_H / k_{12}$ ;  $\dot{I}_C = \dot{I}_{C\phi} - \dot{I}_{B\phi} = -\dot{I}_H / k_{12}$ .

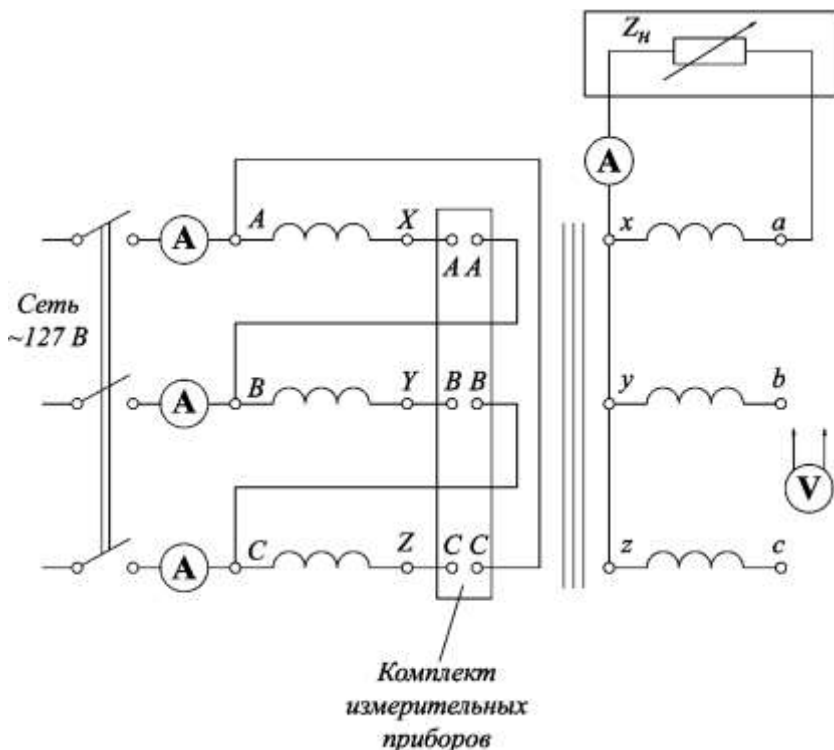


Рис. 3.3. Схема опыта при соединении  $\Delta/Y_H$ -11.

#### 4. Схема соединения $Y/Z_H$ -11

В энергетических установках находят применение трехфазные трансформаторы, обмотки которых соединены по схеме  $Y/Z_H$  (рис. 3.4), когда обмотка НН разделяется на две равные части, которые располагаются на разных стержнях и соединяются так, что вторая половина обмотки подключается по

отношению к первой встречно. По сравнению с согласным включением ЭДС фазы в этом случае будет в  $\sqrt{3}$  раз больше.

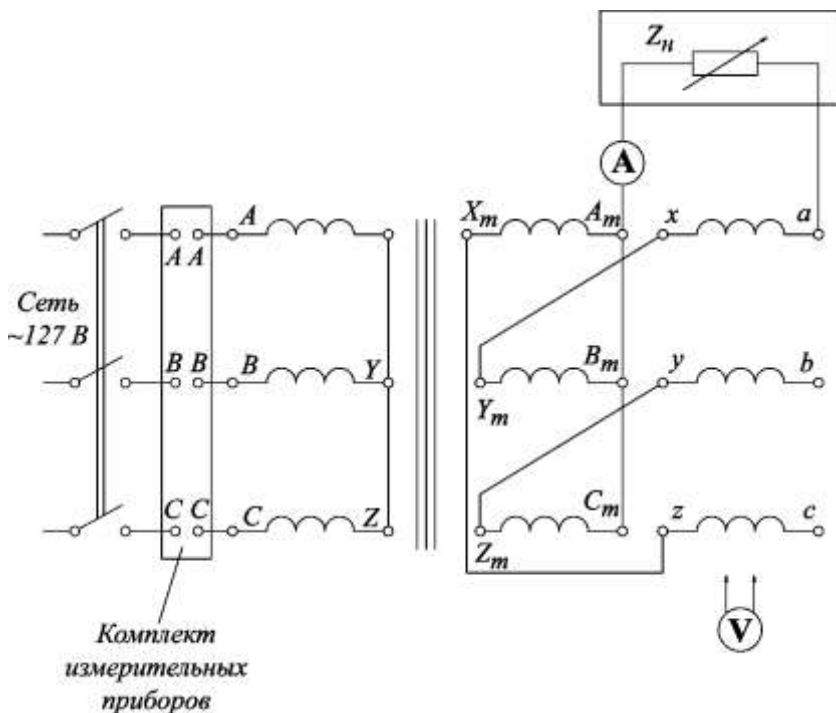


Рис. 3.4. Схема опыта при соединении Y/ $Z_n$ -11.

Трансформаторы со схемой соединения обмоток Y/ $Z_n$ -11 хорошо переносят несимметричную нагрузку. Имеющиеся на каждом стержне две половины фаз вторичной обмотки обтекаются одинаковым током нулевой последовательности и создают МДС, направленные встречно. Вследствие этого токи нулевой последовательности в пределах одной вторичной обмотки на каждом стержне уравниваются, а система фазных напряжений при несимметричной нагрузке трансформатора со схемой соединения обмоток Y/ $Z_n$  искажается незначительно.

В данной работе в зигзаг соединяются две одинаковые

обмотки  $a-x$ ,  $b-y$ ,  $c-z$  и  $A_m-X_m$ ,  $B_m-Y_m$ ,  $C_m-Z_m$ .

Токи первичной обмотки:

$$i_A = \frac{1}{3} i_n / k_{12},$$

$$i_B = \frac{1}{3} i_n / k_{12},$$

$$i_C = 0.$$

### 5. Определение сопротивлений схемы замещения для токов нулевой последовательности

При соединении обмоток трансформатора по схеме  $Y/Y_n-0$  поле, создаваемое токами нулевой последовательности, имеет сложную конфигурацию, различную для сухих и масляных трансформаторов. Рассчитать такое поле трудно, поэтому на практике сопротивление для токов нулевой последовательности  $Z_{0n}$  обычно определяют опытным путем.

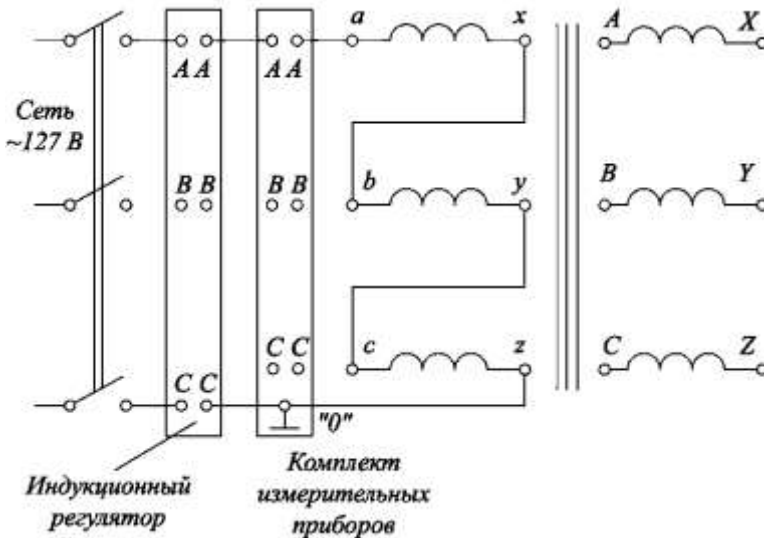


Рис. 3.5. Схема опыта для определения сопротивления для токов нулевой последовательности.

Ток нулевой последовательности протекает только по обмотке НН и одинаков для всех трех фаз. Этому условию соответствует питание однофазным током трех последовательно соединенных обмоток НН при разомкнутой обмотке ВН.

Схема установки для измерения  $Z_{0п}$  представлена на рис. 3.5. Пониженное однофазное напряжение, которое подводится к трансформатору, является напряжением нулевой последовательности  $U_0$ , а протекающий по последовательно соединенным фазам обмотки НН ток – током нулевой последовательности  $I_0$ . Схема замещения для токов нулевой последовательности показана на рис. 3.6, где  $Z_2$  – сопротивление фазы вторичной обмотки,  $Z_{00}$  – сопротивление взаимной индукции, определяемое потоком нулевой последовательности.

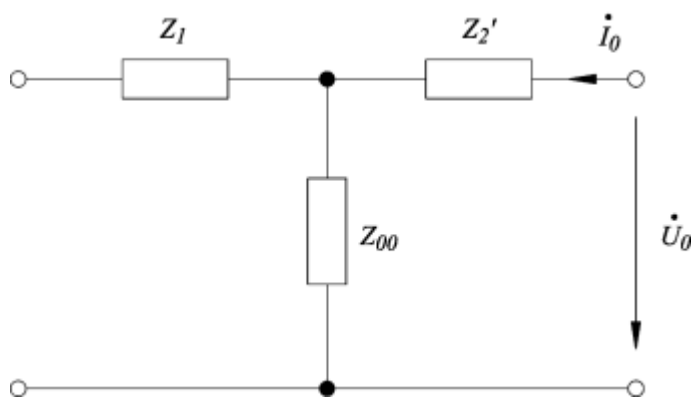


Рис. 3.6. Схема замещения для токов нулевой последовательности.

Значение тока  $I_0$  в данном опыте следует выбрать равным току нулевой последовательности из опыта п. 1, т. е.  $I_0=6$  А.

Для измерения электрических величин используется комбинированный прибор К-505, причем напряжение подается к входным клеммам «А» – «0», снимается с выходных клемм «А» – «0».

Сопротивление схемы замещения рассчитывают по

формулам:  $Z_{0п} = U_0 / 3I_0$ , Ом;  $r_{0п} = P_0 / 3I_0^2$ , Ом;  $x_{0п} = \sqrt{z_{0п}^2 - r_{0п}^2}$ , Ом.

Опытные данные и результаты расчета записывают по форме табл. 3.2.

Таблица 3.2

Опыт			Расчет			
$U_0$ , В	$I_0$ , А	$P_0$ , Вт	$Z_{0п}$ , Ом	$r_{0п}$ , Ом	$x_{0п}$ , Ом	$z_{0п}$ , %

### Обработка экспериментальных данных

1. Диаграммы вторичных линейных напряжений в опытах п. 1 представляют собой треугольники, построенные с помощью циркуля по трем имеющимся значениям линейных напряжений. Для построения диаграмм рекомендуется использовать такой масштаб, чтобы сторона треугольника линейных напряжений была не менее 80 – 100 мм.

Центр звезды фазных напряжений определяют, откладывая циркулем фазные напряжения из соответствующих вершин треугольника линейных напряжений.

Графически смещение нулевой точки  $E_{0п}$  определяют как расстояние, измеренное в масштабе напряжений между центром тяжести треугольника линейных напряжений и центром звезды фазных напряжений.

2. Смещение нулевой точки звезды вторичных фазных напряжений рассчитывается по формуле

$$E_{0п} = I_0 \cdot Z_{0п},$$

где  $I_0$  – ток нулевой последовательности из опыта п. 1 ( $I_0 = 6$  А),  $Z_{0п}$  – сопротивление фазы вторичной обмотки току нулевой последовательности из опыта п. 5.

Сопротивление  $r_{0п}$  [%] определяют как падение напряжения при протекании по нему тока нулевой последовательности



равного номинальному, выраженное в процентах от номинального фазного напряжения

$$z_{0п}, \% = I_{ном} \cdot Z_{0п} / U_{ном\phi} \cdot 100\%.$$

Причем  $I_{ном}=28,8$  А;  $U_{ном\phi}=73$ В.

3. По результатам исследований работы трансформаторов при несимметричной нагрузке следует сделать выводы по искажению вторичных фазных напряжений трансформаторов, имеющих различные схемы соединений.

### Вопросы

1. Приведите примеры несимметричной нагрузки трансформаторов.

2. К чему приводит несимметричная нагрузка трансформаторов?

3. К каким неприятным последствиям в эксплуатации приводит несимметрия фазных напряжений?

4. В каких случаях при несимметричной нагрузке появляется ток нулевой последовательности?

5. По каким путям замыкаются индукционные линии потока нулевой последовательности в трехстержневом трансформаторе, в групповом трансформаторе?

6. Каково влияние обмотки, соединенной в треугольник на смещение нулевой точки звезды фазных напряжений из центра тяжести треугольника линейных напряжений?

7. Объясните определение из опыта п. 2 сопротивления нулевой последовательности трансформатора?

8. В каких случаях ток нулевой последовательности, протекающий по вторичной обмотке, является намагничивающим током, создающим магнитный поток нулевой последовательности?

9. Какой метод применяется для исследования несимметричной нагрузки?

10. Каков принцип определения токов в первичной цепи трансформатора при разных схемах соединения обмоток, если известны токи нагрузки?

11. В каких схемах ток нулевой последовательности не

трансформируется в первичную цепь?

12. В каком трансформаторе, имеющем схему обмоток  $Y/Y_n$ , будет больше «смещение нулевой точки» при несимметричной нагрузке:

а) в трансформаторе, помещенном в стальной бак или в трансформаторе без бака?

б) в трансформаторе трехстержневом или групповом?

13. По какой схеме соединяют первичную обмотку группового трансформатора, если вторичная обмотка соединена в  $Y_n$ ? Почему?

14. Поясните, в каких случаях несимметричной нагрузки имеет место искажение звезды фазных напряжений?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Беспалов В.Я., Котеленец Н.Ф. Электрические машины. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Академия, 2013. (§ 4.3)

2. Копылов И. П. Электрические машины. Учебник для вузов. 5-е изд., стер., – М.: Высшая школа, 2006. (§ 2.16)

3. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. Том 1. – М.: Издательство МЭИ, 2004. (§§ 13.1; 13.2; 13.3; 13.4; 13.5; 13.6; 13.7)

## Лабораторная работа № 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОТРАНСФОРМАТОРА

Автотрансформатором называется такой трансформатор, в котором используется последовательное соединение первичной и вторичной обмоток. В понижающем автотрансформаторе (рис. 4.1) первичное напряжение подводится к соединенным согласно-последовательно обмоткам  $w_1$  и  $w_2$ , а нагрузка подключается к обмотке  $w_1$ . В повышающем автотрансформаторе (рис. 4.2) первичное напряжение подводится к обмотке  $w_1$ , а нагрузка подключается к соединенным согласно-последовательно обмоткам  $w_1$  и  $w_2$ .

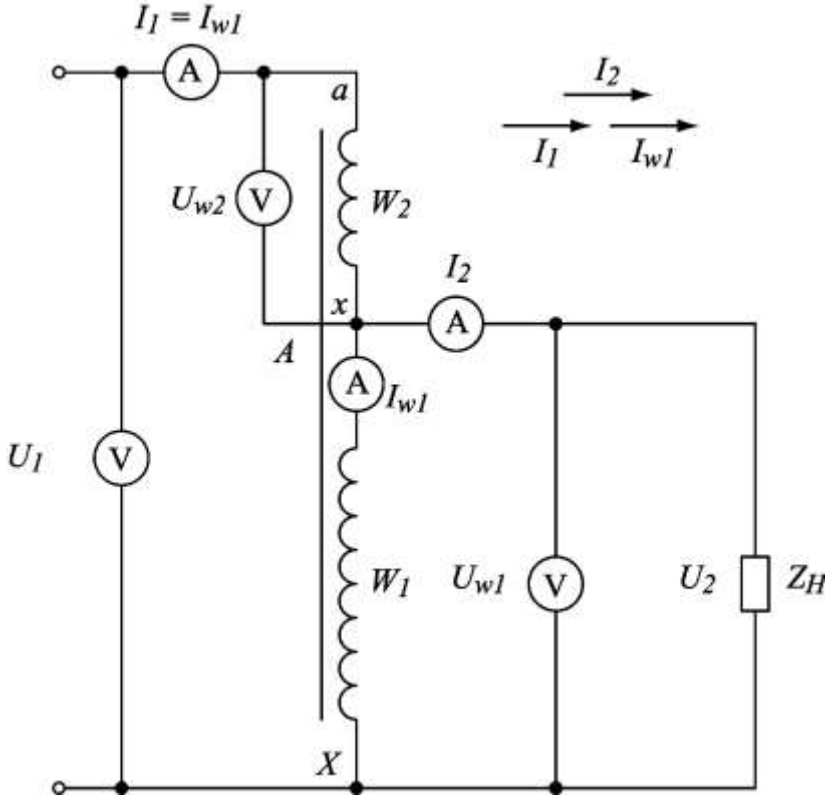


Рис. 4.1. Схема соединения понижающего автотрансформатора.

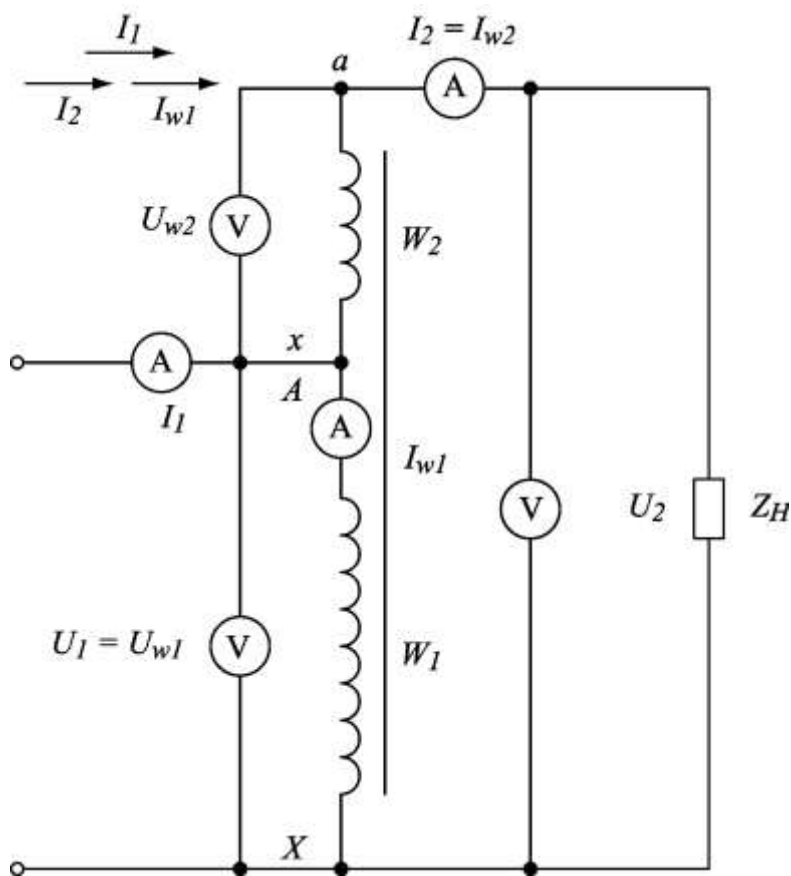


Рис. 4.2. Схема соединения повышающего автотрансформатора.

В автотрансформаторе благодаря электрической связи между первичной и вторичной сетью мощность из первичной сети во вторичную передается не только посредством электромагнитного поля, но и непосредственно электрическим путем.

Автотрансформаторы находят широкое применение для соединения высоковольтных электрических сетей, для пуска двигателей переменного тока большой мощности, в

электронных схемах, радиотехнических устройствах, схемах автоматики и т. д.

Чем бóльшая часть мощности передается электрическим путем, тем экономичнее автотрансформатор в работе и требует для изготовления меньше материалов по сравнению с обычным двухобмоточным трансформатором, имеющим ту же номинальную мощность.

Применение автотрансформатора наиболее целесообразно, когда имеет место небольшое отличие величин входного и выходного напряжений и их отношение находится в пределах 0,5-2.

Экономичность автотрансформатора по сравнению с обычным двухобмоточным трансформатором оценивается по его относительной расчетной мощности – расчетной мощности, отнесенной к полной проходной мощности, где полная мощность соответствует мощности нагрузки

$$S_{\text{п}} = U_2 I_2 \approx U_1 I_1$$

а расчетная мощность, определяющая электромагнитная мощность, передаваемую магнитным полем, соответствует напряжениям обмоток  $U_{w1}$  и  $U_{w2}$  и токам  $I_{w1}$ ,  $I_{w2}$ , реально нагружающим обмотки

$$S_{\text{р}} = S_{\text{эм}} \approx U_{w1} I_{w1} \approx U_{w2} I_{w2}$$

Практически снижение расчетной мощности в автотрансформаторе получается за счет того, что в понижающем автотрансформаторе (рис. 4.1) обмотка, обтекаемая током первичной сети, а в повышающем автотрансформаторе (рис. 4.2) обмотка, обтекаемая током вторичной сети, рассчитывается на разностное напряжение первичной и вторичной сети, а не на полное напряжение, как в обычном трансформаторе. Соответственно обмотка, к которой приложено входное или выходное напряжение, обтекается разностным током первичной и вторичной сети, а не полным током, как в обычном трансформаторе.

Для понижающего автотрансформатора (рис. 4.1) справедливы соотношения

$$S_p^* = \frac{S_p}{S_n} = \frac{U_{w2} I_{w2}}{U_1 I_1} = \frac{U_{w2}}{U_1} = \frac{w_2}{w_2 + w_1} = \frac{1}{1 + k_{12}}.$$

Для повышающего автотрансформатора (рис. 4.2) справедливы соотношения

$$S_p^* = \frac{S_p}{S_n} = \frac{U_{w2} I_{w2}}{U_2 I_2} = -\frac{U_{w2}}{U_2} = \frac{w_2}{w_2 + w_1} = \frac{1}{1 + k_{12}}.$$

где  $k_{12} = w_1/w_2$ ,

т. е. формулы относительной расчетной мощности одинаковы для понижающего и повышающего автотрансформаторов при согласном включении первичной и вторичной обмоток.

### Программа работы

Задачей данной работы является исследование соотношений токов, и напряжений обмоток автотрансформатора при различных схемах и сравнение опытных величин с расчетными.

#### *Однофазный автотрансформатор*

1. Для понижающего автотрансформатора (рис. 4.1):
  - а) определить опытным путем коэффициент трансформации;
  - б) провести опыт нагрузки и найти распределение токов в обмотках.
2. Для повышающего автотрансформатора (рис. 4.2) определить коэффициент трансформации и провести опыт нагрузки аналогично п. 1.

#### *Трехфазный автотрансформатор*

3. Определить коэффициент трансформации линейных напряжений для повышающих автотрансформаторов:
  - а) со схемой Y/Y (рис. 4.3);
  - б) со схемой Δ/Y (рис. 4.4а).

По результатам опытов необходимо:

1. Рассчитать для повышающего и понижающего однофазных автотрансформаторов токи в обмотках и сравнить с экспериментальными значениями. Определить относительную

расчетную мощность.

2. Для трехфазного автотрансформатора со схемой  $\Delta/Y$  построить векторную диаграмму напряжений и сравнить полученные графическим путем величины напряжений с экспериментальными значениями.

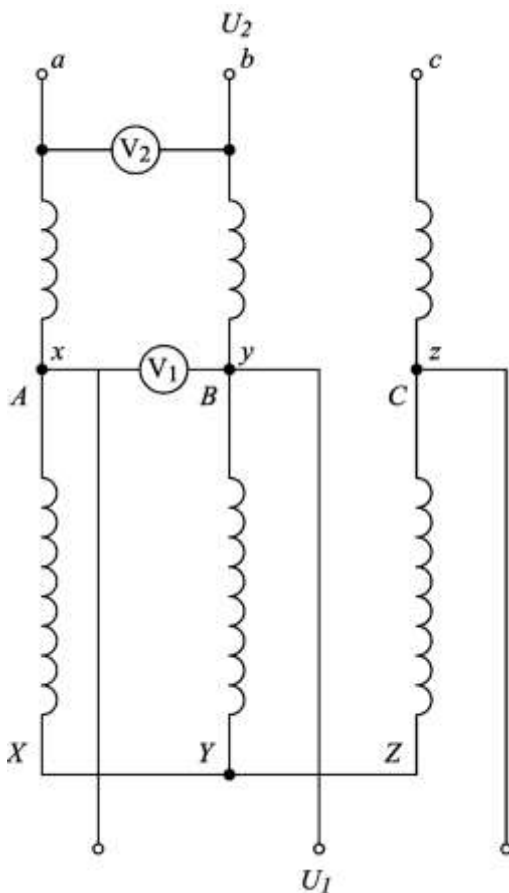


Рис. 4.3. Схема соединения обмоток трехфазного повышающего трансформатора со схемой Y/Y.

## Пояснения и указания к работе

В качестве автотрансформатора в лаборатории электрических машин применяется трехфазный трансформатор с естественным воздушным охлаждением, описание конструкции которого дано во введении.

При исследовании однофазного автотрансформатора рекомендуется использовать обмотки ВН и НН любого стержня трансформатора (например, фазы *A*).

В качестве первичной (параллельной) обмотки выбрать обмотку ВН и вторичной (последовательной) – обмотку НН.

Питание всех автотрансформаторных схем можно осуществить непосредственно от сети 127 В. При проведении опыта нагрузки в одной из обмоток (*AX* или *ax*) следует установить номинальный ток и произвести измерение напряжений и токов обеих обмоток и нагрузки.

Векторная диаграмма для трехфазного автотрансформатора должна быть построена в масштабе по расчетным данным (рис. 4.4б).

Однофазный автотрансформатор (рис. 4.2), если его зажимы *AX* присоединить к сети с напряжением *U* и нагрузку *Z* включить на зажимах *ax*, будет работать как повышающий ( $U_2 > U_1$ ).

Если зажимы присоединить к сети, а нагрузку включить на зажимы *AX*, автотрансформатор будет работать как понижающий (рис. 4.1) ( $U_2 > U_1$ ).

В автотрансформаторе процесс намагничивания протекает несколько отлично в, зависимости от того, работает ли он в качестве повышающего или понижающего. В повышающем автотрансформаторе намагничивающий ток будет протекать только по параллельной обмотке и она питается от напряжения сети  $U_1$ . В понижающем автотрансформаторе намагничивающий ток протекает по параллельной и последовательной обмоткам, а первичная обмотка находится под напряжением  $U_2$ .

До проведения измерений следует рассчитать все токи и напряжения исходя из следующих соотношений:

$$I_{w1} / I_{w2} = w_2 / w_1; \quad U_{w1} / U_{w2} = w_1 / w_2,$$



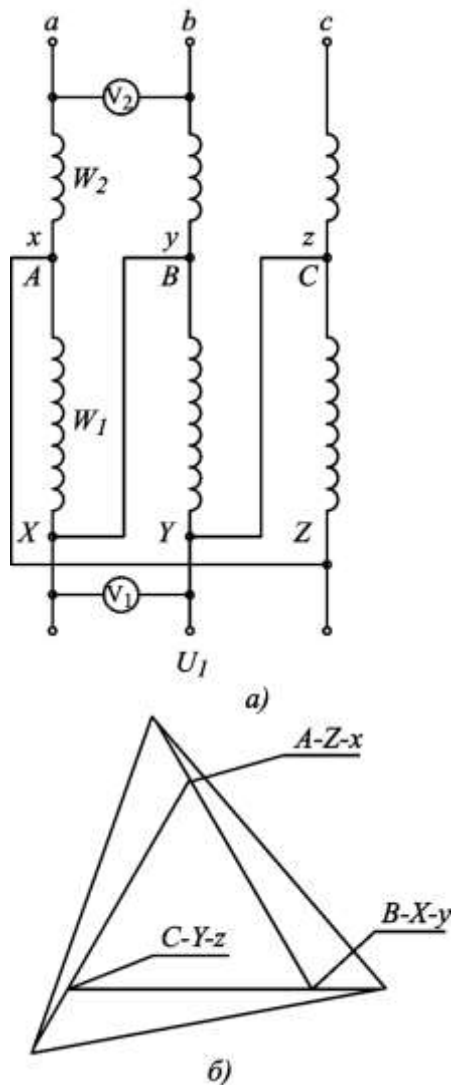


Рис. 4.4. Схема соединения обмоток трехфазного повышающего трансформатора со схемой  $\Delta/Y$  (а); векторная диаграмма напряжений (б).

где  $w_1$  – число витков первичной обмотки, включаемой параллельно с первичной сетью у повышающего и параллельно со вторичной сетью (с нагрузкой) у понижающего автотрансформатора;  $w_2$  – число витков вторичной обмотки, включаемой последовательно с вторичной сетью (с нагрузкой) у повышающего и последовательно с первичной сетью у понижающего автотрансформатора.

Соотношения токов при работе автотрансформатора будут различными в зависимости от того, работает он повышающим или понижающим. Они показаны на рис. 4.1 и 4.2, на которых вместе со схемами изображены упрощенные векторные диаграммы токов.

Обозначим

$$k_{21} = \frac{w_2}{w_1}; \quad k_{12} = \frac{w_1}{w_2}.$$

Тогда коэффициент трансформации автотрансформатора будет равен (при холостом ходе):

для повышающего автотрансформатора

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_1 + w_2} = \frac{1}{1 + k_{21}};$$

для понижающего автотрансформатора

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1 + w_2}{w_1} = 1 + k_{21}.$$

Трехфазные автотрансформаторы выполняются обычно со схемой соединения обмоток в звезду (рис. 4.3) или по схеме рис. 4.4.

## Вопросы

1. Чем отличается по устройству и конструкции автотрансформатор от двухобмоточного трансформатора?
2. Каким путем в автотрансформаторе происходит передача мощности из первичной сети во вторичную?
3. Какие преимущества имеет автотрансформатор по сравнению двухобмоточным трансформатором?

4. Какие недостатки имеет автотрансформатор по сравнению с двухобмоточным трансформатором?
5. От чего зависит большая или меньшая выгодность применения автотрансформатора?
6. Чем отличается процесс намагничивания понижающего и повышающего автотрансформатора?
7. Запишите уравнения токов для понижающего автотрансформатора пренебрегая током холостого хода. Постройте по ним векторную диаграмму.
8. Запишите уравнения токов для повышающего автотрансформатора, пренебрегая током холостого хода. Постройте по ним векторную диаграмму.
9. Чему равна «относительная» расчетная мощность автотрансформатора: а) понижающего, б) повышающего?
10. Какой мощностью определяются размеры и масса автотрансформатора? Почему?
11. При каких коэффициентах трансформации выгодно применение автотрансформатора и почему?

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Беспалов В.Я., Котеленец Н.Ф. Электрические машины. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Академия, 2013. (§ 5.2)
2. Копылов И. П. Электрические машины. Учебник для вузов. 5-е изд., стер., – М.: Высшая школа, 2006. (§ 2.13)
3. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. Том 1. – М.: Издательство МЭИ, 2004. (§§ 11.1; 11.2)

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
Лабораторная работа № 1. Определение параметров схемы замещения трехфазного двухобмоточного трансформатора опытным путем .....	7
Лабораторная работа № 2. Параллельная работа трехфазных трансформаторов .....	23
Лабораторная работа № 3. Исследование несимметричной нагрузки трехфазного трансформатора .....	34
Лабораторная работа № 4. Исследование автотрансформатора .....	51

### *Учебное издание*

**Панихин** Михаил Викторович  
**Ширинский** Сергей Владимирович

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Лабораторные работы № 1-4  
Методическое пособие  
по курсу  
«*Электрические машины*»  
для студентов, обучающихся по направлению  
«*Электроэнергетика и электротехника*»

Редактор издательства \_\_\_\_\_

Темплан издания МЭИ 2013 (II), метод. \_\_\_\_\_ Подписано в печать \_

Печать офсетная Формат \_\_\_\_ Физ.печ.л. \_\_\_\_ Тираж \_\_\_\_

Изд.№ \_\_\_\_ Заказ \_\_\_\_

Издательство МЭИ, 111250, Москва, Красноказарменная ул., д.14

Отпечатано в

PDF: <http://elmech.mpei.ac.ru/books/lab/transf-2014>