

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

*Т.И. Егорова, Ю.Ф. Кокунов, С.С. Малиновский,  
М.В. Сочава, Н.Н. Чернышев*

# **Испытания трехфазных трансформаторов**

**Учебное пособие**

Санкт-Петербург

2010

УДК 621.313.322(075.8)

Коллектив авторов:

*Егорова Татьяна Ивановна*, к.т.н., доцент СПбГПУ

*Кокунов Юрий Федорович*, старший преподаватель СПбГПУ

*Малиновский Сергей Сергеевич*, доцент, к.т.н, доцент СПбГПУ

*Сочава Марианна Валерьевна*, к.т.н, доцент СПбГПУ

*Чернышев Николай Нилович*, доцент, к.т.н, доцент СПбГПУ

Испытания трехфазных трансформаторов/ *Т.И Егорова и др.*: Учеб. пособие. – СПб, 2010. 87 с.

Описываются общие методы испытаний и способы опытного определения характеристик трехфазных трансформаторов в различных режимах работы. Приведены электрические схемы учебных установок для испытания трансформаторов.

Учебное пособие предназначено для студентов электротехнических специальностей, изучающих курсы «Электромеханика» и «Электрические машины» в рамках подготовки бакалавров по направлениям 140600 «Электротехника, Электромеханика и Электротехнологии» и 140200 «Электроэнергетика».

# СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ИСПЫТАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ...	8
Учебные лабораторные испытания трансформаторов.....	8
1.2. Определение активных сопротивлений обмоток трансформатора.....	9
1.3. Способы измерения мощности в трехфазных цепях.....	11
1.4. Основные электромагнитные соотношения в трансформаторе.....	16
1.5. Методика проведения эксперимента и обработка результатов.....	20
2. ИСПЫТАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ДВУХОБМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА В КОСВЕННЫХ СИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМАХ.....	22
2.1. Описание экспериментальной установки.....	22
2.2. Опыт холостого хода.....	23
2.3. Опыт трехфазного короткого замыкания.....	29
2.4. Определение изменения напряжения трансформатора.....	34
2.5. Определение коэффициента полезного действия трансформатора.....	36
3. ИСПЫТАНИЕ ДВУХОБМОТОЧНОГО ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА В НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМАХ.....	39
3.1. Основные соображения о несимметричных режимах работы трансформаторов.....	39
3.2. Опыт двухфазного короткого замыкания.....	44
3.3. Опыт однофазного короткого замыкания.....	48
3.4. Опытное определение сопротивлений нулевой последовательности.....	52
4. ИСПЫТАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ТРЕХОБМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА.....	55
4.1. Общие соображения.....	55

4.2. Описание экспериментальной установки.....	57
4.3. Опыт холостого хода.....	60
4.4. Опыты короткого замыкания.....	62
4.5. Схема замещения трехобмоточного трансформатора и определение ее параметров.....	65
4.6. Определение изменения напряжения трехобмоточного трансформатора.....	67
4.7. Определение коэффициента полезного действия трехобмоточного трансформатора.....	69
5. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРОВ.....	71
5.1. Условия параллельной работы трансформаторов.....	71
5.2. Определение группы соединения обмоток трансформатора.....	72
5.3. Параллельная работа трансформаторов с одинаковыми коэффициентами трансформации и одинаковыми напряжениями короткого замыкания.....	79
5.4. Параллельная работа трансформаторов с неодинаковыми коэффициентами трансформации.....	83

## ВВЕДЕНИЕ

Настоящее пособие посвящено испытаниям трансформаторов в различных режимах их работы.

Основное назначение трансформаторов – преобразование электрической энергии одного напряжения в электрическую энергию другого напряжения. Такие трансформаторы называются силовыми. Они предназначены для работы в энергосистемах при передаче и распределении электроэнергии. К ним относятся трехфазные трансформаторы мощностью 6,3 кВА и более или трансформаторные группы (при больших мощностях).

Широко используются трансформаторы и для других целей. Они применяются в установках преобразования числа фаз и частоты переменного тока. В выпрямительных установках используются выпрямительные трансформаторы, для электрической сварки – электросварочные трансформаторы, для электрической тяги – электротяговые трансформаторы, для измерения высоких напряжений и больших значений токов – измерительные трансформаторы напряжения и тока и т.д.

Силовые трансформаторы выполняются трехфазными с трехстержневыми сердечниками или групповыми, составленными из трех однофазных, имеющих отдельные сердечники. Мощность силовых трансформаторов, изготавливаемых в России, достигла уровня 1250 МВА в трехфазном исполнении и 667 МВА в однофазном. Мощные силовые трансформаторы помещаются в стальной бак, заполненный трансформаторным маслом, которое одновременно является электрической изоляцией и охладителем обмоток и сердечника трансформатора. Трансформаторы мощностью до 2000 кВА класса напряжения не более 20 кВ могут изготавливаться сухими и охлаждаться только воздухом.

В учебных лабораторных испытаниях, как правило, используют сухие трансформаторы – однофазные или трехфазные трехстержневые небольшой мощности, порядка (5-10)кВА, специально изготовленные для таких испытаний.

Цели испытания трансформаторов: возможно полное усвоение студентами знаний основных физических процессов, рассматриваемых в

соответствующих разделах теоретического курса "Электромеханика"; ознакомление с методологией проведения эксперимента и обработки полученных результатов; изучение и оценка эксплуатационных свойств трансформаторов.

Лабораторные исследования трансформаторов позволяют студентам ознакомиться с техникой и методологией проведения эксперимента; способами измерения отдельных электрических величин; методикой обработки результатов эксперимента и анализа полученных результатов, т.е. развивают у них некоторые навыки исследователя-экспериментатора.

Всякому экспериментальному исследованию должна предшествовать подготовительная работа, состоящая из детального ознакомления с программой испытания, подготовки бланков протоколов, вычерчивания схем соединений и т. д. Перед тем, как приступить к сборке схемы, необходимо ознакомиться со щитковыми данными трансформатора и на основании этого произвести выбор аппаратуры управления и измерительных приборов, обязательно сообразуясь с характером предполагаемого эксперимента. Провода для схемы соединений, амперметры и ваттметры должны быть выбраны соответствующими предполагаемым во время эксперимента токам.

Класс точности приборов выбирается в зависимости от характера и цели эксперимента. Наиболее точные приборы нужно включать в цепи испытуемого трансформатора, а менее точные – в цепи вспомогательных машин и аппаратов. На вторичных зажимах регулирующего устройства до рубильника, подающего напряжение на трансформатор, необходимо установить вольтметр для того, чтобы не подать на испытуемый трансформатор чрезмерно высокое напряжение. Аппаратуру управления и измерительные приборы располагают так, чтобы было удобно проводить эксперимент небольшому числу лиц, а провода укладывают так, чтобы они не мешали работе. До начала опыта следует вычислить постоянные приборов (число вольт, ампер, ватт и т. д., соответствующих одному делению прибора) и отметить их в протоколе, не забывая фиксировать новые значения, если в процессе эксперимента происходит изменение постоянных приборов. Должны быть проверены все винтовые и болтовые соединения во избежание плохих контактов.

Во время эксперимента отсчеты показаний по всем измерительным приборам нужно делать одновременно по команде одного из экспериментаторов. Все результаты измерений заносятся в протокол, причем запись делается в делениях, а не в абсолютных величинах. Перевод делений в абсолютные величины (вольты, амперы, ватты) во время эксперимента может замедлить его проведение и привести к ошибкам, впоследствии трудноисправимым.

До разборки или изменения схемы необходимо по результатам опыта построить основные графики, чтобы убедиться в правильности результатов эксперимента.

Особо нужно остановиться на обработке опытных данных. По результатам эксперимента в большинстве случаев строятся графики. Масштабы для построения характеристик следует выбирать так, чтобы единице длины на графике (1 см) соответствовали 1; 2; 5; 10, а не 3; 7; 6,5 и т. д. единиц измеряемой величины.. Опытные точки должны быть специально обозначены. Не нужно стремиться к тому, чтобы точка, соответствующая номинальному режиму, обязательно легла точно на характеристику. Эта точка может выпасть из графика так же, как и любая другая. При построении кривых рекомендуется использовать различные обозначения (сплошные линии, пунктирные или разных цветов).

Искомые величины определяются, как правило, из графиков. Дело в том, что всякое испытание будет содержать ряд погрешностей и неточностей, обусловленных погрешностью измерительных приборов, погрешностью методики эксперимента, личными качествами экспериментатора и другими причинами. В связи с этим будет иметь место некоторый разброс точек, который корректируется графиком. Непосредственное использование опытных точек иногда ведет к большим ошибкам. При значительном отклонении отдельных точек от кривой их, следует переснять.

# 1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ИСПЫТАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

## 1.1. Учебные лабораторные испытания трансформаторов

Программа лабораторных исследований трехфазных трансформаторов предусматривает:

1. Испытание двух- и трехобмоточного трансформаторов в режимах холостого хода и короткого замыкания;
2. Испытание двухобмоточного трансформатора в несимметричных режимах;
3. Исследование параллельной работы трехобмоточных трансформаторов;

Как и во всех электрических машинах исследования трансформаторов можно проводить прямыми или косвенными методами.

Прямые методы испытаний применяются в редких случаях, главным образом, при испытании трансформатора на нагревание. Основной недостаток этих методов – их относительно низкая точность, поскольку в ряде случаев измеряются величины одного порядка. Так, например, в сверхмощных силовых трансформаторах к.п.д.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% \quad (1.1)$$

( $P_1$  и  $P_2$  – соответственно активные потребляемая и отдаваемая мощности) часто превышает 99%. При непосредственном измерении мощностей  $P_1$  и  $P_2$  с помощью ваттметров можно получить совершенно неприемлемый результат как вследствие неизбежной погрешности приборов, так и из-за возможных погрешностей при производстве отсчетов.

Методы косвенных испытаний основаны на измерении величин второго порядка по сравнению с определяемой величиной. Но при этом всегда делаются некоторые допущения, упрощающие действительную картину явлений в трансформаторе, и поэтому приводящие к некоторой неточности результата. Так, например, при определении к.п.д. трансформатора предполагается, что потери в стали сердечника и температура обмоток остаются постоянными при всех нагрузках; при



определении изменения вторичного напряжения пренебрегают током холостого хода и т.п. Такие предположения физически неправильны, но проистекающие отсюда погрешности технически допустимы. Поэтому получаемые результаты весьма близки к действительным.

Основу косвенного испытания трансформаторов составляют исследования их работы в режимах холостого хода и короткого замыкания. Опыты короткого замыкания и холостого хода очень просты, требуют немного времени для проведения испытаний и дают вполне надежные результаты. Порядок проведения этих опытов одинаков для всех типов трансформаторов и будет в дальнейшем рассмотрен на примере трехфазного двухобмоточного трансформатора.

## 1.2. Определение активных сопротивлений обмоток трансформатора

В ряде случаев (например, для определения коэффициента увеличения активного сопротивления на переменном токе) необходимо знать истинную величину активного сопротивления фаз обмоток трансформатора. Для определения этого сопротивления опытным путем обычно применяется метод амперметра и вольтметра при обтекании обмоток постоянным током. Поскольку активные сопротивления всех фаз каждой из обмоток трансформатора практически одинаковы, целесообразно соединить фазы одной обмотки последовательно. Схема проведения опыта приведена на рис. 1.1.

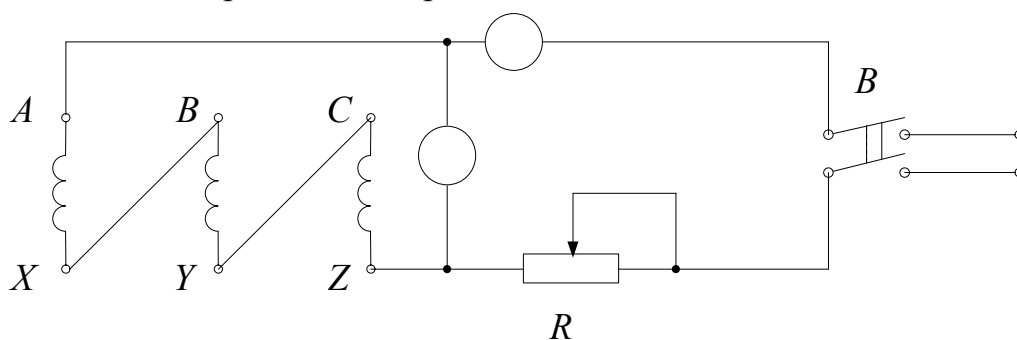


Рис.1.1. Схема для определения активного сопротивления фаз обмотки трансформатора.

При проведении опыта по схеме 1.1 применяются приборы магнитоэлектрической системы класса не ниже 0,2. Известно, что с

изменением температуры сопротивление не остаётся постоянным. Поэтому для получения точных результатов измерения проводятся в холодном состоянии до включения трансформатора, когда температура обмоток равна температуре окружающей среды, регистрируемой с помощью термометра, расположенного вблизи трансформатора. С целью снижения ошибки, возникающей вследствие нагрева обмотки в процессе проведения опыта, ограничивают величину тока, пропускаемого через обмотку. В обычных условиях он не должен превышать (10-20)% от номинального значения  $I_n$ , указанного на щитке трансформатора.

При проведении опыта по схеме 1.1 перед замыканием выключателя  $B$  необходимо установить максимальное сопротивление регулировочного реостата  $R$  и наибольшие пределы измерений амперметра  $A$  и вольтметра  $V$ . После включения  $B$  с помощью реостата  $R$  увеличить ток до его максимального значения, допустимого по условиям эксперимента – (10-20)%  $I_n$ . При этом следует установить пределы измерений амперметра и вольтметра такими, чтобы использовать более 40% шкалы приборов, после чего измерить значения тока и напряжения. Повторить подобные измерения еще 2-3 раза, снижая величину тока с интервалом (20-30)% от первоначально установленной величины. Затем снизить ток до минимального значения и отключить  $B$ .

Для каждого измерения рассчитать по закону Ома сопротивление фазы обмотки

$$r_{\theta_0} = \frac{U}{3I}, \quad (1.2)$$

а затем среднее значение по результатам всех измерений. В нормальных эксплуатационных режимах температура обмоток  $\theta$  превышает температуру окружающей среды  $\theta_0$ . Поэтому измеренное сопротивление  $r_{\theta_0}$  следует привести к рабочей температуре  $\theta$ , равной для медных обмоток и изоляции класса “В” 75 °С. Тогда

$$r_{75} = r_{\theta_0} \frac{235 + 75}{235 + \theta_0} \quad (1.3)$$

В случае выполнения обмоток из алюминия в формуле (1.3) необходимо заменить 235 на 245. Аналогичным образом определяются активные сопротивления всех обмоток трансформатора.

### 1.3. Способы измерения мощности в трехфазных цепях

В трехфазных цепях для измерения активной мощности применяются следующие способы:

1. Одного ваттметра с естественной или искусственной нулевой точкой.
2. Трех ваттметров с естественной или искусственной нулевой точкой.
3. Двух ваттметров (схема Арона).

Первый способ предназначен для заведомо симметричных схем и поэтому в лабораторной практике используется редко.

Второй способ наиболее универсален. Он пригоден как для симметричных, так и для несимметричных цепей, однако требует применения трех однотипных ваттметров, что неудобно, с точки зрения экономии аппаратуры и ее размещения на испытательных стендах.

В способе двух ваттметров, который также дает правильные результаты при любой нагрузке, достаточно иметь два прибора. Поэтому он является предпочтительным, несмотря на неперемutable дополнительное условие: отсутствие нейтрального провода в трехфазной схеме (или, иначе, ток в нейтральном проводе должен быть равен нулю)

В процессе испытаний ток в обмотках трансформатора может изменяться в широком диапазоне – от весьма малых значений при холостом ходе до близких к номинальному при коротких замыканиях. Поэтому целесообразно использовать измерительные трансформаторы тока ( $TT$ ), у которых первичная обмотка ( $L_1-L_2$ ) может иметь большое количество пределов (уставок) измерения, а вторичная измерительная обмотка ( $u_1-u_2$ ) имеет единственный предел (в  $TT$ , используемых на испытательных стендах лаборатории кафедры “Электрические машины” этот предел равен 5А). При проведении испытаний трансформатора амперметры и токовые обмотки ваттметров подключаются к обмотке  $u_1-u_2$  и должны быть рассчитаны на её предел.

При проведении опыта холостого хода трансформатора напряжение на его первичной обмотке может изменяться в очень широком диапазоне. Если предел измерения ваттметра по напряжению меньше напряжения, достигаемого на трансформаторе, то последовательно с обмоткой напряжения ваттметра должно быть включено калиброванное добавочное сопротивление  $r_{\partial}$  (на испытательных стендах лаборатории кафедры в этом нет необходимости).

На рис. 1.2 показана принципиальная схема измерения мощности и токов в фазах обмотки трансформатора. Здесь и далее не оговаривается о какой из обмоток (первичной или вторичной) идет речь, т.к. опыты холостого хода и короткого замыкания могут проводиться при питании трансформатора как со стороны обмотки высокого, так и со стороны обмотки низкого напряжения. Генераторные зажимы (\*) обмоток напряжения и тока ваттметров должны быть включены соответственно на клемму  $L_1(*)$  первичной обмотки  $TT$  и  $u_1(*)$  измерительной обмотки. Обмотки напряжения ваттметров за добавочным сопротивлением  $r_{\partial}$  подключаются к той фазе, в которой нет ваттметров.

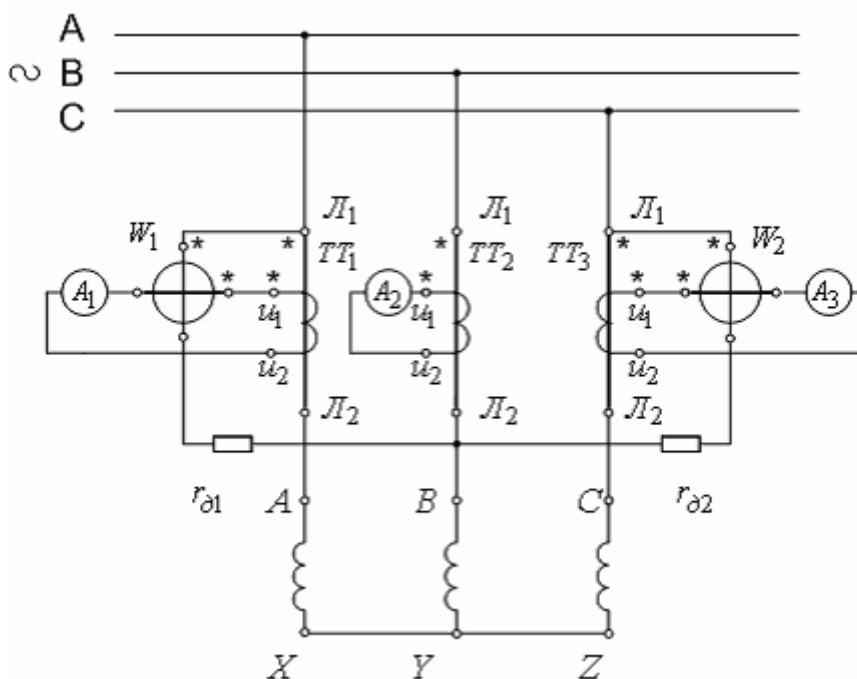


Рис.1.2. Принципиальная схема измерения мощности и токов в фазах обмотки трансформатора

Иногда с целью сокращения числа приборов вместо двух ваттметров используется схема с одним ваттметром и специальным ваттметровым переключателем ( $\Pi$ ), позволяющим включать токовую обмотку ваттметра поочередно в два линейных провода без разрыва цепи (рис. 1.3).

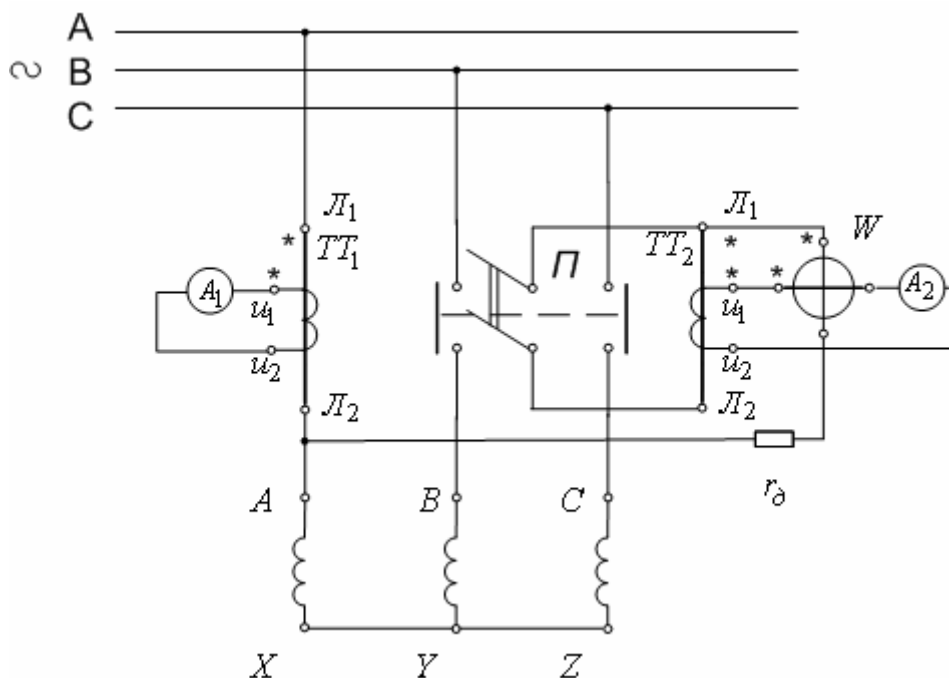


Рис. 1.3. Схема измерения мощности и токов в фазах обмотки трансформатора с использованием ваттметрового переключателя

При этом суть метода не меняется. Ваттметровый переключатель устроен таким образом, что, например, при правом его положении, когда по обмотке прибора протекает ток фазы “С”, рассечка фазы “В” шунтируется замыкателем (на рис. 1.3 показана пунктиром), за счет чего структура схемы не нарушается. Вместо замеров по двум ваттметрам (см. рис. 1.2) здесь делают в каждой точке два отсчета по одному прибору при разных положениях переключателя. Недостатком этой схемы является невозможность одновременного измерения мощности в обеих линиях, что может привести к дополнительной погрешности. Достоинством схемы, помимо экономии числа приборов, является предохранение токовых цепей ваттметров от кратковременных перегрузок (для этого в момент

включения схемы ваттметровый переключатель должен находиться в нейтральном положении).

Активная мощность трехфазной системы, измеренная по методу двух ваттметров, равна по абсолютной величине алгебраической сумме показаний приборов ( $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ ), умноженной на цену деления ваттметра  $C_W$

$$P = (\alpha_1 + \alpha_2)C_W \quad (1.4)$$

Отметим, что при определении мощности в цепях с  $\cos \varphi < 0,5$  стрелки на ваттметрах отклоняются в разные стороны. Для возможности регистрации показаний переключаются концы обмотки напряжения одного из ваттметров и знак его показаний изменяется на противоположный. Переключатель знака показаний располагается на самих ваттметрах и знак (+ или -) указывается рядом с переключателем.

Цена деления ваттметра рассчитывается как произведение пределов измерений ваттметра по току ( $I$ ) и напряжению ( $U$ ), деленное на число делений ваттметра ( $N$ ).

$$C_W = \frac{IU}{N} \quad (1.5)$$

Заметим, что предел измерения по току есть предел измерения первичной обмотки  $TT$ .

Независимо от схемы соединения обмотки трехфазного трансформатора (звезда или треугольник), если измеряются линейные напряжения  $U_L$  и токи  $I_L$ , то коэффициент мощности  $\cos \varphi$  рассчитывается по формуле

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3}U_L I_L} \quad (1.6)$$

Напомним, что соотношение фазных и линейных величин в случае соединения обмотки звездой:  $I_L = I_\phi$ ,  $U_L = \sqrt{3}U_\phi$ ; а треугольником:  $I_L = \sqrt{3}I_\phi$ ,  $U_L = U_\phi$ .

Для однофазного трансформатора  $\cos \varphi = \frac{P}{U_L I_L}$ .

В трехфазной симметричной системе  $\cos \varphi$  может быть также вычислен по отношению показаний двух ваттметров  $\alpha_1/\alpha_2$  (полагаем  $|\alpha_1| < |\alpha_2|$  и учитываем их знаки):

$$\cos \varphi = \frac{1 + \frac{\alpha_1}{\alpha_2}}{2 \sqrt{1 - \frac{\alpha_1}{\alpha_2} + \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)^2}} \quad (1.7)$$

Расчет  $\cos \varphi$  по (1.7) в случае симметричной нагрузки оказывается более точным, особенно когда приходится пользоваться обычными ваттметрами в цепях с низким  $\cos \varphi$ . Кроме того, расчет по (1.7) включает погрешность в измерении только одной величины (мощности), а по (1.6) – трех величин (мощности, тока и напряжения).

График зависимости  $\cos \varphi$  от отношения показаний двух ваттметров представлен на рис. 1.4

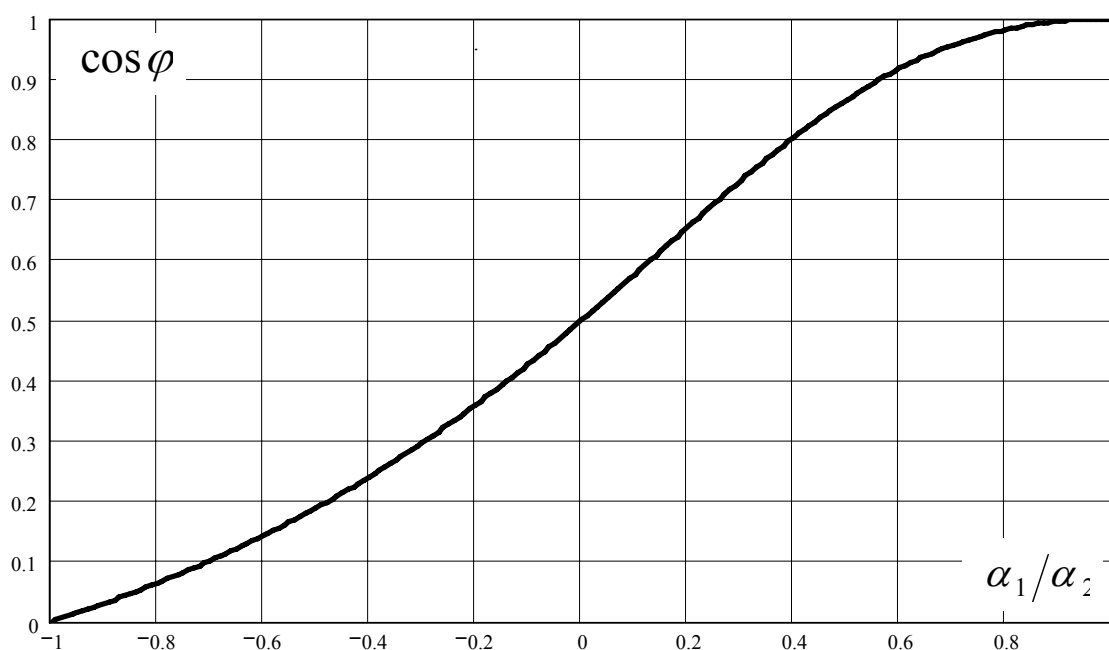


Рис. 1.4. Зависимость  $\cos \varphi$  от отношения показаний двух ваттметров

## 1.4. Основные электромагнитные соотношения в трансформаторе

Электромагнитные соотношения в двухобмоточном трансформаторе для одной фазы в комплексной форме описываются уравнениями напряжений первичной и вторичной обмоток и уравнением намагничивающих сил.

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (r_1 + jx_{\sigma_1}) \quad (\text{а})$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 (r_2 + jx_{\sigma_2}) \quad (\text{б}) \quad (1.8)$$

$$\dot{I}_0 W_1 = \dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2, \quad (\text{в})$$

где  $\dot{U}_1, \dot{U}_2$  – фазные напряжения первичных и вторичных обмоток;

$\dot{E}_1, \dot{E}_2$  – фазные э.д.с. этих обмоток;

$\dot{I}_1, \dot{I}_2$  – фазные токи в обмотках;

$\dot{I}_0$  – намагничивающий ток, необходимый для создания основного магнитного потока, замыкающегося по сердечнику трансформатора;

$Z_1, Z_2$  – полные сопротивления фаз первичной и вторичной обмоток;

$r_1, r_2$  – активные сопротивления обмоток;

$x_{\sigma_1}, x_{\sigma_2}$  – индуктивные сопротивления рассеяния первичной и вторичной обмоток, обусловленные потоками рассеяния этих обмоток;

$W_1, W_2$  – числа витков обмоток.

В общем случае  $W_2 \neq W_1$ ,  $E_2 \neq E_1$  и  $I_2 \neq I_1$ . Соответственно различаются и параметры обмоток, т.е. их активные и индуктивные сопротивления. Это затрудняет количественный учет процессов, происходящих в трансформаторе. Чтобы избежать этих затруднений пользуются способом, при котором обе обмотки трансформатора приводятся к одинаковому числу витков. Обычно приводят вторичную обмотку к первичной. Для этого пересчитывают вторичную обмотку, имеющую число витков  $W_2$ , на эквивалентную ей приведенную обмотку с



числом витков  $W_1$ , при условии сохранения энергетических соотношений в трансформаторе неизменными. Все величины, относящиеся к приведенной вторичной обмотке, называются приведенными и обозначаются теми же символами, но со штрихом сверху. Чтобы получить приведенное напряжение  $U'_2$  и приведенную э.д.с.  $E'_2$  нужно изменить напряжение  $U_2$  и э.д.с.  $E_2$  в отношении числа витков первичной и вторичной обмоток  $W_1$  и  $W_2$ , т.е. пропорционально коэффициенту трансформации

$$k = \frac{W_1}{W_2} \quad (1.9)$$

Следовательно,

$$U'_2 = \frac{W_1}{W_2} U_2 = k U_2 = U_1; \quad E'_2 = \frac{W_1}{W_2} E_2 = k E_2 = E_1. \quad (1.10)$$

При приведении вторичной обмотки к первичной ее полная мощность в реальном и приведенном трансформаторе должна остаться неизменной, т.е.  $U_2 I_2 = U'_2 I'_2$ . Отсюда

$$I'_2 = \frac{U_2}{U'_2} I_2 = \frac{I_2}{k} \quad (1.11)$$

Так как при приведении вторичной обмотки к первичной мощности не изменяются, то активные потери в реальной и приведенной обмотках должны быть равны. Следовательно,  $I_2^2 r_2 = I'^2_2 r'_2$ , откуда

$$r'_2 = \left( \frac{I_2}{I'_2} \right)^2 r_2 = k^2 r_2 \quad (1.12)$$

Индуктивное сопротивление любого контура  $x = \omega L = 2\pi f L$ , где  $L$  - индуктивность контура,  $f$  - частота переменного тока. Как известно,  $L$  определяется суммой сцеплений потока, создаваемого током в 1А, текущим по контуру, с витками контура ( $\sum W \hat{O}_{(i=1A)}$ ). Если число витков увеличивается в  $k$ - раз, то при постоянстве магнитной проницаемости  $\mu$  поток  $\hat{O}_{(i=1A)}$  тоже увеличивается в  $k$ -раз и, следовательно,  $L = W k \hat{O}_{(i=1A)}$  увеличивается в  $k^2$  раз. Тогда

$$x'_{\sigma_2} = \left( \frac{W_1}{W_2} \right)^2 x_{\sigma_2} = k^2 x_{\sigma_2} \quad (1.13)$$

Умножим уравнение (б) системы (1.8) на  $k$ , подставив в него  $\dot{I}_2 = k \dot{I}'_2$ , и поделим уравнение (в) на  $W_1$ . Тогда

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (r_1 + j x_{\sigma_1}) & \text{(а)} \\ \dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 (r'_2 + j x'_{\sigma_2}) & \text{(б)} \\ \dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 . & \text{(в)} \end{cases} \quad (1.14)$$

Система (1.14) есть система уравнений приведенного трансформатора. Поскольку теперь на первичной и вторичной обмотках трансформатора действуют одинаковые э.д.с.  $E_1 = E'_2$ , то можно перейти от реальной магнитной связи между обмотками к электрической фиктивной, т.е. составить электрическую схему замещения, реально отражающую все физические процессы в трансформаторе. Эта схема, получившая название  $T$ -образной, изображена на рис. 1.5.

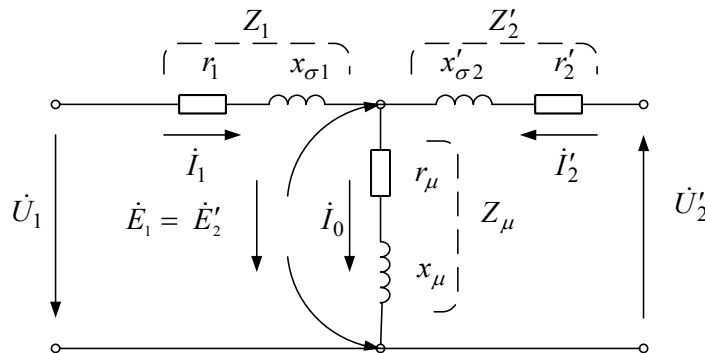


Рис.1.5.  $T$ -образная схема замещения трансформатора

В этой схеме сопротивление  $x_\mu$  намагничивающего контура определяется основным магнитным потоком  $\Phi$ , замыкающимся по сердечнику;  $r_\mu$  - активное сопротивление, эквивалентирующее магнитные потери в сердечнике трансформатора. С изменением насыщения сердечника меняется его магнитная проницаемость  $\mu_c$ , что приводит к изменению

сопротивлений  $r_\mu$  и  $x_\mu$ . В то же время, если пренебречь изменением активных сопротивлений обмоток от температуры, сопротивления  $r_1$  и  $r'_2$  остаются постоянными. Также будут постоянными и индуктивные сопротивления  $x_{\sigma_1}$  и  $x_{\sigma_2}$ , т.к. они обусловлены магнитными потоками рассеяния  $\hat{O}_{\sigma_1}$  и  $\hat{O}_{\sigma_2}$ , замыкающимися в основном по немагнитной среде с магнитной проницаемостью  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м, т.е. магнитная цепь для них оказывается ненасыщенной.

Сопротивление намагничивающего контура схемы на рис. 1.5  $Z_\mu = r_\mu + jx_\mu$  во много раз превышает сопротивления  $Z_1$  и  $Z'_2$ . Для силовых трансформаторов модули этих сопротивлений в относительных единицах составляют:  $z_\mu^* = 25 - 200$ ,  $z_1^* \approx z_2'^* = 0.025 - 0.100$ . Т.к.  $Z_\mu \gg Z_1 \approx Z'_2$ , то во многих случаях можно положить  $Z_\mu = \infty$ , что означает разрыв в цепи намагничивающего контура схемы замещения, изображенной на рис. 1.5. После чего она принимает упрощенный вид, показанный на рис. 1.6. В этой схеме сопротивление  $Z_k = Z_1 + Z'_2$  - полное сопротивление короткого замыкания;  $r_k = r_1 + r'_2$  - активное сопротивление короткого замыкания;  $x_k = x_{\sigma_1} + x'_{\sigma_2}$  - индуктивное сопротивление короткого замыкания.

Обычно в силовых трансформаторах в относительных единицах модуль  $z_k^* = 0.05 - 0.15$ .

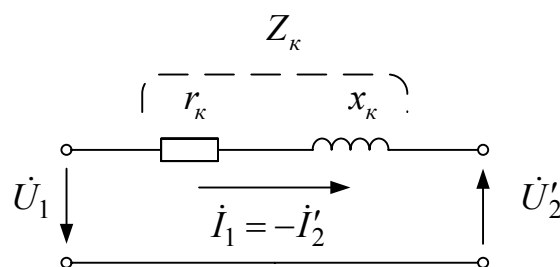


Рис. 1.6. Упрощенная схема замещения трансформатора

## 1.5. Методика проведения эксперимента и обработка результатов

Любая лабораторная работа по испытанию трансформаторов включает в себя несколько этапов: самостоятельная подготовка студента, заключающаяся в изучении соответствующей литературы; подбор измерительных приборов; проведение эксперимента с построением наиболее характерных графических зависимостей; обработка результатов и составление отчета.

Всякому экспериментальному исследованию должна предшествовать подготовительная работа, заключающаяся в детальном ознакомлении с программой испытаний, оформлении бланков протоколов, выполнении схемы соединений и т.п.

Перед тем, как приступить к сборке схемы, необходимо ознакомиться с щитковыми данными трансформатора, которые включают в себя: полную номинальную мощность  $S_n$  (в случае трехобмоточного трансформатора – номинальные мощности каждой обмотки); номинальные первичные и вторичные напряжения  $U_{1n}$ ,  $U_{2n}$  и напряжения ответвлений обмоток, если они имеются; номинальные первичные и вторичные токи  $I_{1n}$ ,  $I_{2n}$ ; номинальную частоту  $f_n$ ; ток холостого хода  $I_0(\%)$ ; напряжение короткого замыкания  $u_k(\%)$ , а также схемы соединения обмоток. По щитковым данным следует подобрать аппаратуру управления и измерительные приборы, сообразуясь с характером предполагаемого эксперимента. Так, например, в опыте холостого хода при относительно высоких напряжениях ( $U \approx 1.3U_n$ ) токи в фазах обмотки трансформатора малы, а в опыте короткого замыкания при токах в обмотках близких к номинальным значениям, напряжение, поданное на обмотку трансформатора, невелико.

Во время проведения эксперимента отсчеты показаний измерительных приборов необходимо производить одновременно по команде одного из экспериментаторов. Все результаты измерений заносятся в протокол, причем показания приборов следует фиксировать в делениях их шкалы, что уменьшает ошибки в измерениях и ускоряет проведение опыта. При этом в протоколе необходимо указывать цены делений приборов.

По результатам эксперимента в большинстве случаев строятся графические зависимости различных величин. Если на графике наносятся зависимости нескольких величин, то количество масштабных осей должно соответствовать числу наносимых на график величин. При построении характеристик следует использовать масштабы 1:1, 1:2, 1:5, 1:10 и далее кратные и дольные 10, рекомендуемые ГОСТом. ГОСТом разрешается, но в лаборатории не рекомендуется, использование масштаба 1:2.5, 1:4. При построении характеристик масштабы наносимых на график величин необходимо выбирать такими, чтобы по возможности максимально использовать все поле графика. При обработке опытных данных всегда приходится сталкиваться с неизбежным разбросом результатов, который обусловлен различного рода погрешностями и, в первую очередь, погрешностями измерений. Поэтому на графических зависимостях будет наблюдаться разброс точек. При построении такой зависимости не следует проводить ее через все точки, а нужно отбрасывать те из них, которые не ложатся на гладкую кривую аппроксимации.

## 2. ИСПЫТАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ДВУХОБОМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА В КОСВЕННЫХ СИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМАХ

### 2.1. Описание экспериментальной установки

Исследованию подлежит трехфазный трехстержневой двухобмоточный трансформатор, начала и концы первичной ( $A-X$ ,  $B-Y$ ,  $C-Z$ ) и вторичной ( $a-x$ ,  $b-y$ ,  $c-z$ ) обмоток которого выведены на испытательный стенд (рис. 2.1).

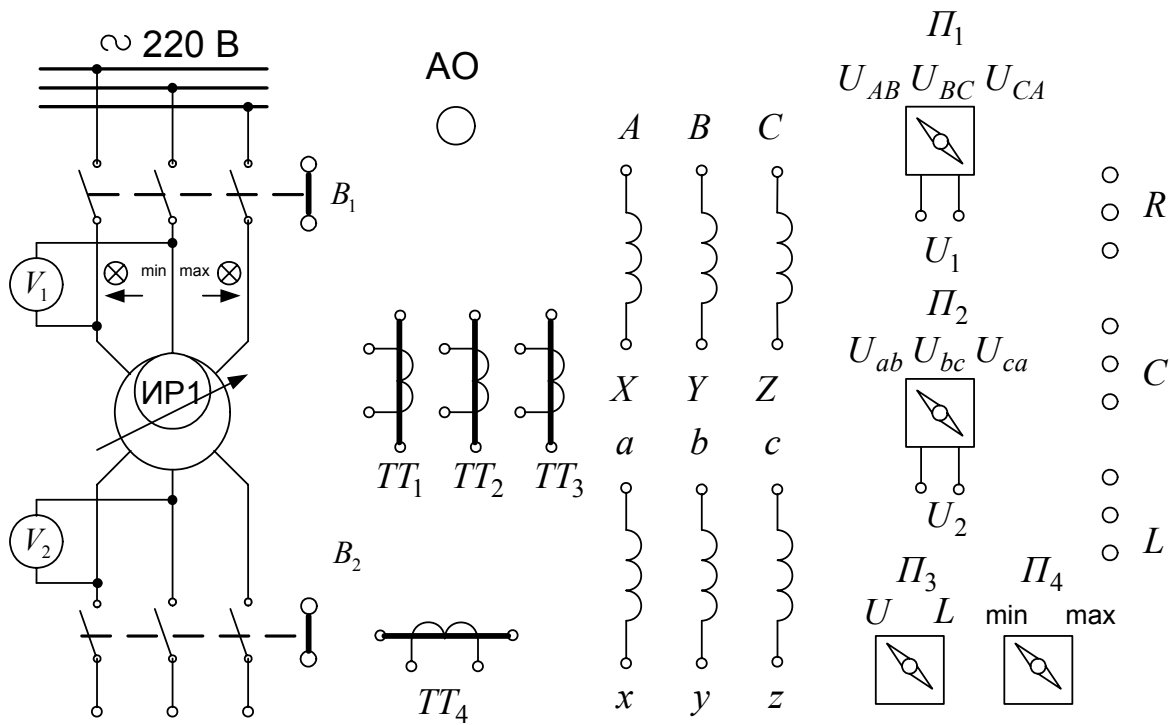


Рис. 2.1. Компоновка испытательного стенда двухобмоточного трансформатора

На этом рисунке индукционный регулятор ИР1, предназначенный для плавного регулирования подводимого к испытываемому трансформатору напряжения, подключается к сети выключателем  $B_1$  (включение – черная кнопка, отключение – красная кнопка). Контрольные вольтметры  $V_1$  и  $V_2$

измеряют напряжение на входе и выходе ИР1 соответственно. Включение выключателя  $B_2$ , через который подается напряжение к испытываемому трансформатору, возможно только, если ИР1 установлен на минимальное напряжение (в положении “меньше” светится полным накалом левая сигнальная лампочка) и трансформаторы тока  $TT_1 - TT_4$  установлены на максимальный предел измеряемого тока. ИР1 может поднять напряжение на входе только до напряжения сети, которого недостаточно при проведении опыта холостого хода, поэтому последовательно с ИР1 включен еще один индукционный регулятор ИР2 (на рис. 2.1 не показан). Включение  $B_2$  возможно, если оба ИР установлены в положение “ $U_{\min}$ ” (светится соответствующая сигнальная лампа). Повышение напряжения за  $B_2$  осуществляется сначала с помощью ИР2 до “ $U_{\max}$ ”, а затем с помощью ИР1. Снижение напряжения осуществляется в обратном порядке.

Трансформаторы тока  $TT_1 - TT_3$  предназначены для измерения токов и мощности в первичной обмотке испытываемого трансформатора. Трансформатор тока  $TT_4$  используется в цепях вторичной обмотки испытываемого трансформатора при испытании в режимах несимметричных коротких замыканий.

Переключатели  $П_1$  и  $П_2$  позволяют измерять линейные первичные и вторичные напряжения соответственно. Переключатель  $П_3$  позволяет использовать ИР2 либо как регулятор напряжения, либо как индуктивную нагрузку. Клеммы  $R$ ,  $L$ ,  $C$  предназначены для подключения к трансформатору активной, индуктивной, емкостной или смешанной нагрузки.

Большая красная кнопка АО, размещенная в середине верхней части испытательного стенда, предназначена для аварийного отключения всей установки.

## 2.2. Опыт холостого хода

Испытание трансформатора в режиме холостого хода проводится по схеме, изображенной на рис. 2.2. Первичная и вторичная обмотки трансформатора соединяются звездой. Амперметры  $A_1 - A_3$  включаются в цепь измерительных обмоток  $TT_1 - TT_3$  и поэтому должны иметь предел

измерения 5А. На такой же ток должны быть выбраны токовые обмотки ваттметров  $W_1$  и  $W_2$ , а их потенциальные обмотки должны быть

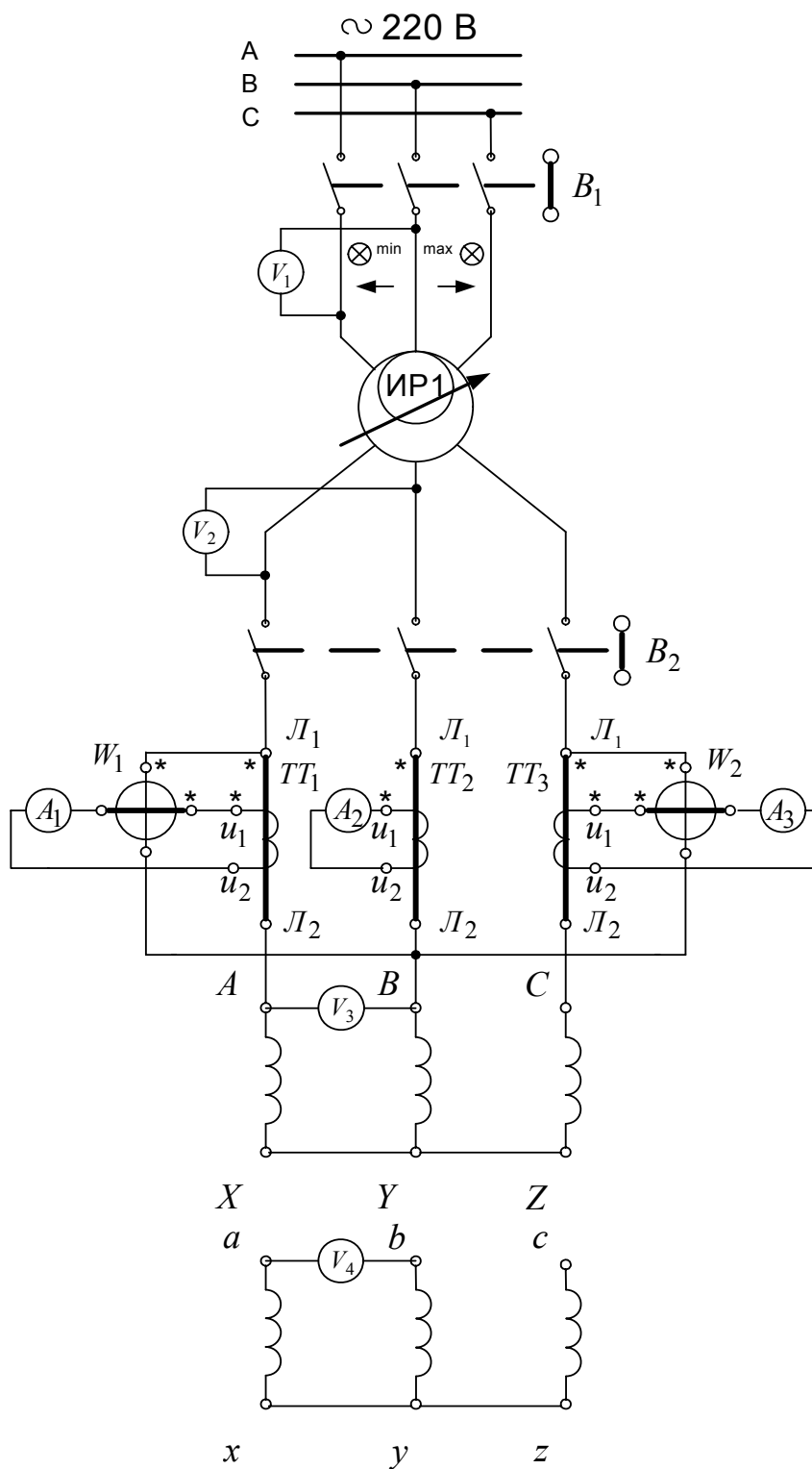


Рис. 2.2. Схема испытания трансформатора в режиме холостого хода



рассчитаны на напряжение  $U_1$  не ниже  $1,3U_{1н}$ . Вольтметры  $V_3$  и  $V_4$  должны иметь пределы измерений не ниже  $U_1 = 1,3U_{1н}$  и  $U_2 = 1,3U_{2н}$  соответственно. Эти вольтметры могут быть присоединены как показано на схеме (рис. 2.2), или подключены к клеммам  $U_1$  и  $U_2$  переключателей  $П_1$  и  $П_2$  соответственно.

После включения  $B_1$  и  $B_2$  плавно поднимают напряжение  $U_1$  до  $1,3U_{1н}$ . Включение трансформатора сразу на номинальное напряжение недопустимо, так как бросок тока включения в насыщенном трансформаторе может в 2 раза превысить номинальное значение тока и при включении повредить измерительные приборы (амперметры и ваттметры). Предварительно следует проверить симметрию линейных напряжений обмоток. Если линейные напряжения одинаковы или отличаются друг от друга не более чем на 2%, в дальнейшем можно измерять только по одному напряжению первичной и вторичной обмоток. После установления  $U_1 = 1,3U_{1н}$  измеряют напряжения  $U_{10}$  и  $U_{20}$ , все фазные токи и показания ваттметров  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , фиксируя их знаки. Затем постепенно снижают напряжение  $U_{10}$ , производя замеры этих величин в ряде точек. Снижение напряжения следует производить до значения, при котором возможны измерения токов и мощности при самом малом пределе  $ТТ_1 - ТТ_3$ .

Для получения более-менее равномерно отстоящих друг от друга точек измерения целесообразно снижать  $U_{10}$  в диапазоне от  $1,3U_{1н}$  до  $0,8U_{1н}$  приблизительно через  $0,1U_{1н}$ , а далее – через  $0,05U_{1н}$ .

Следует отметить, что в трехстержневом трансформаторе из-за магнитной несимметрии сердечника, токи  $I_0$  в линиях будут различными, а именно, они будут одинаковыми в линиях обмоток, расположенных на крайних стержнях, и меньшими в обмотке, расположенной на среднем стержне. При одинаковом магнитном потоке  $\Phi$  в стержнях намагничивающая сила, создающая этот поток, есть произведение потока на магнитное сопротивление  $R_\mu$

$$F = I_0 \cdot w_1 = \Phi \cdot R_\mu \quad (2.1)$$

### Магнитное сопротивление

$$R_{\mu} = \sum_k \frac{l_k}{\mu_k S_k}, \quad (2.2)$$

где  $l_k$  – длина участка магнитной цепи;  $S_k$  – поперечное сечение этого участка;  $\mu_k$  – магнитная проницаемость участка. Если  $S_k$  и  $\mu_k$  магнитной цепи каждого стержня одинаковы, то пути прохождения потока  $l_k$  различны.

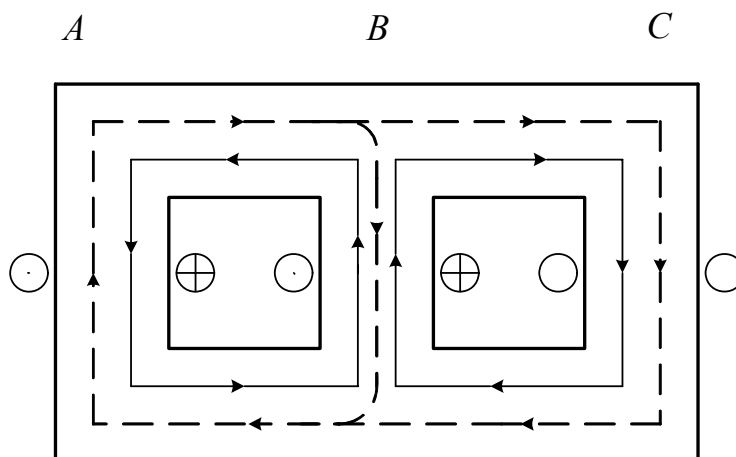


Рис.2.3. Пути замыкания магнитных потоков фазы  $B$  (—) и фазы  $A$  (---) по сердечнику трехстержневого трансформатора

Этот путь меньше для стержня средней обмотки  $B$  (сплошная линия на рис. 2.3) и больше для стержня обмотки  $A$  (пунктирная линия). Вследствие этого  $R_{\mu A} = R_{\mu C} > R_{\mu B}$ ,  $F_{\mu A} = F_{\mu C} > F_{\mu B}$  и  $I_{\mu A} = I_{\mu C} > I_{\mu B}$ .

После проведения эксперимента приступают к обработке результатов. Определяют среднее значения тока холостого хода

$$I_0 = \frac{I_{0A} + I_{0B} + I_{0C}}{3} \quad (2.3)$$

и средние значения первичного и вторичного напряжения, если они несимметричны

$$U_{10} = \frac{U_{10AB} + U_{10BC} + U_{10CA}}{3}, \quad U_{20} = \frac{U_{20av} + U_{20bc} + U_{20ca}}{3} \quad (2.4)$$

Мощность, измеренная по способу двух ваттметров (см. раздел 1.3), рассчитывается по ранее приведенной формуле (1.4).

Коэффициент мощности при холостом ходе трансформатора можно рассчитать по формуле

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_0 I_0} \quad (2.5)$$

Следует отметить, что при больших напряжениях, т.е. при насыщенной магнитной системе  $\cos \varphi_0$  получается очень малым и в измерении мощности может возникнуть существенная ошибка, т.к. обычные ваттметры дают достоверные показания при  $\cos \varphi \geq 0,3$ . Ошибка в определении  $P_0$  приведет и к ошибке в определении  $\cos \varphi_0$ , если он рассчитывается по (2.5). В этом случае целесообразно воспользоваться формулой (1.7). Еще более достоверные результаты в определении  $\cos \varphi_0$  получаются, если в схеме рис. 2.2 использовать специальные низкосинусные ваттметры.

Как следует из системы уравнений (1.8) ввиду малости тока  $\dot{I}_1 = \dot{I}_0$  и сопротивления  $Z_1$ , в режиме холостого хода  $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$ , а  $\dot{U}_2 \approx \dot{E}_2$ . Поскольку  $E_1 = 4,44\Phi f_1 w_1$ ;  $E_2 = 4,44\Phi f_1 w_2$ , то коэффициент трансформации фазных напряжений

$$\frac{U_{1\Phi}}{U_{2\Phi}} = \frac{E_{1\Phi}}{E_{2\Phi}} = \frac{4,44\Phi f_1 w_1}{4,44\Phi f_1 w_2} = \frac{w_1}{w_2} = k_\Phi. \quad (2.6)$$

Коэффициенты трансформации линейных  $k_{Л} = \frac{U_{1Л}}{U_{2Л}}$  и фазных напряжений при соединении обмоток звезда/звезда (как в данном опыте) и треугольник/треугольник равны. При схемах соединения звезда/треугольник и треугольник/звезда коэффициенты трансформации отличаются в  $\sqrt{3}$  раз.

Поскольку  $Z_1 \ll Z_\mu$  (см. схему рис. 1.5), из опыта холостого хода можно определить параметры намагничивающего контура  $z_\mu$ ,  $r_\mu$ ,  $x_\mu$ . При соединении первичной обмотки звездой, как на рис. 2.2

$$z_{\mu} = \frac{U_{10}}{\sqrt{3}I_0}, \quad r_{\mu} = \frac{P_0}{3I_0^2}, \quad x_{\mu} = \sqrt{z_{\mu}^2 - r_{\mu}^2}. \quad (2.7)$$

При соединении первичной обмотки в треугольник

$$z_{\mu} = \frac{\sqrt{3}U_{10}}{I_0}, \quad r_{\mu} = \frac{P_0}{I_0^2}, \quad x_{\mu} = \sqrt{z_{\mu}^2 - r_{\mu}^2}. \quad (2.8)$$

После проведенных расчетов на график наносятся характеристики холостого хода  $I_0, P_0, \cos \varphi_0 = f(U_{10})$ , а также зависимости  $z_{\mu}, r_{\mu}, x_{\mu} = f(U_{10})$  (рис. 2.4). По характеристикам холостого хода при  $U_{10} = U_{10H}$  определяются номинальные значения: тока холостого хода  $I_{0H}$ , мощности  $P_{0H}$  и коэффициента мощности  $\cos \varphi_{0H}$ .

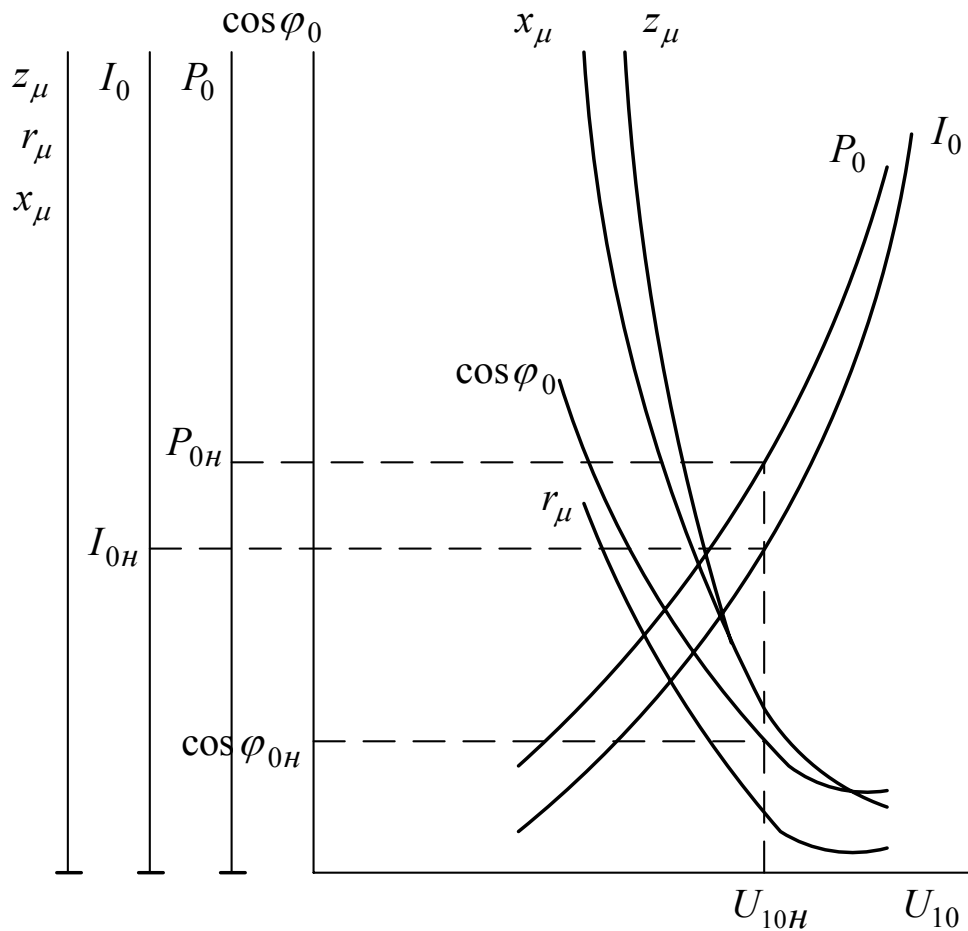


Рис. 2.4. Характеристики холостого хода трансформатора

Мощность холостого хода  $P_0$  почти целиком идет на покрытие потерь в стали сердечника трансформатора  $p_c$ , так как при холостом ходе потери в обмотках  $p_{m1} = 3I_0^2 r_1$  вследствие малости тока  $I_0$  и сопротивления  $r_1$  пренебрежимо малы по сравнению с потерями в стали. Таким образом,  $P_0 = p_c$ .

При заданной частоте  $f_1$  потери в стали

$$p_c \sim B^2 \sim \Phi^2 \sim E_1^2 \sim U_1^2, \quad (2.9)$$

т.к. в режиме холостого хода  $U_1 \approx E_1$ . Поэтому, если  $U_1 = U_{1н}$ ,  $f_1 = f_{1н}$  и форма кривой напряжения  $U_1$  практически синусоидальна, то потери холостого хода остаются постоянными при всех нагрузках в пределах до номинальной, т.е.  $P_{0н} = p_{сн} = const$ , где  $p_{сн}$  – потери в сердечнике трансформатора при  $U_1 = U_{1н}$ .

Полученные результаты целесообразно сопоставить с ГОСТом. По ГОСТу для трансформаторов с  $S_n = (5 - 10)$  кВА  $I_{0н} = (10 - 8)\% I_n$ , а  $P_{0н} = (1,2 - 1,0)\% S_n$ .

### 2.3. Опыт трехфазного короткого замыкания

Рассмотрим режим трехфазного симметричного короткого замыкания при котором вторичные обмотки трансформатора замкнуты накоротко. Поскольку, как уже отмечалось, в схеме замещения (рис. 1.5) сопротивление  $z_\mu \gg z_1 \approx z'_2$ , то можно положить  $z_\mu = \infty$  и ток  $\dot{I}_0 = 0$ , и перейти к упрощенной схеме (рис. 1.6). Таким образом, в режиме трехфазного симметричного короткого замыкания трансформатор замещается сопротивлением короткого замыкания  $z_k = r_k + jx_k$ , где  $r_k = r_1 + r'_2$ ,  $x_k = x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2}$ .

Опыт короткого замыкания проводится по схеме (рис.2.2), в которой необходимо отсоединить вольтметр  $V_4$ , а зажимы  $a, b, c$  вторичной обмотки замкнуть накоротко. Вольтметр  $V_3$  должен быть выбран на напряжение  $1,2U_{кн}$ . Здесь  $U_{кн}$  – напряжение, при котором токи в обмотках короткозамкнутого трансформатора равны номинальным при номинальной температуре обмоток ( $75^{\circ}\text{C}$ ).

Так как сопротивление  $z_{\kappa}$  трансформатора весьма мало, то к зажимам его первичной обмотки подводится пониженное напряжение  $U_{\kappa}$ . Как известно из теории трансформаторов, отношение

$$u_{\kappa} = \frac{U_{кн}}{U_n} \cdot 100\% = \frac{I_n z_{\kappa}}{U_n} \cdot 100\% \quad (2.10)$$

называется напряжением короткого замыкания.

Мощность  $P_{\kappa}$ , подводимая к трансформатору при коротком замыкании, идет в основном на покрытие потерь в трансформаторе, и поэтому ее принято называть потерями короткого замыкания  $p_{\kappa}$ . Вследствие малости напряжения  $U_{\kappa}$  потери в сердечнике  $p_c \sim U_{\kappa}^2$  ничтожно малы и, следовательно, потери  $p_{\kappa}$  являются потерями в обмотках трансформатора.

Активная ( $u_{\kappa a}$ ) и реактивная ( $u_{\kappa r}$ ) составляющие напряжения короткого замыкания вычисляются по формулам

$$u_{\kappa a} = u_{\kappa} \cos \varphi_{\kappa} = \frac{I_n r_{\kappa}}{U_n} \cdot 100 = \frac{P_{\kappa н}}{10 S_n} \%, \quad (2.11)$$

где  $P_{\kappa н}$  – номинальные потери короткого замыкания (в Вт), приведенные к номинальной температуре  $75^{\circ}\text{C}$ ,  $S_n$  – полная номинальная мощность трансформатора (в кВА).

$$u_{\kappa r} = u_{\kappa} \sin \varphi_{\kappa} = \frac{I_{1н} x_{\kappa}}{U_{1н}} \cdot 100 = \sqrt{u_{\kappa}^2 - u_{\kappa a}^2} \%. \quad (2.12)$$

$$\text{Здесь} \quad \varphi_{\kappa} = \operatorname{arctg} \frac{u_{\kappa r}}{u_{\kappa a}} = \operatorname{arctg} \frac{x_{\kappa}}{r_{\kappa}} \quad (2.13)$$

Опыт короткого замыкания проводится следующим образом. Включают  $B_1$ , затем устанавливают ИР1 в положение “меньше” (светится левая сигнальная лампа) и включают  $B_2$ . Плавно поднимают напряжение ИР1 до тех пор, пока ток в первичной обмотке испытуемого трансформатора не достигнет величины  $I_{\kappa} = (1,1 - 1,2)I_n$ . Производят замеры линейного напряжения  $U_{\kappa}$  (всех трех если они несимметричны), всех линейных токов и показаний двух ваттметров  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , фиксируя их знаки. Далее снижают напряжение до возможного минимума, определенного возможностями измерительных приборов через приблизительно равные интервалы, снимая 5-7 точек. Опыт следует проводить по возможности максимально быстро во избежание чрезмерного перегрева обмоток.

По результатам измерений рассчитывают

$$I_{\kappa} = \frac{I_{\kappa A} + I_{\kappa B} + I_{\kappa C}}{3}; \quad U_{\kappa} = \frac{U_{\kappa AB} + U_{\kappa BC} + U_{\kappa CA}}{3}; \quad P_{\kappa} = (\alpha_1 + \alpha_2)C_W;$$

$$\cos \varphi_{\kappa} = \frac{P_{\kappa}}{\sqrt{3}U_{\kappa}I_{\kappa}}; \quad z_{\kappa} = \frac{U_{\kappa}}{\sqrt{3}I_{\kappa}}, \quad r_{\kappa} = \frac{P_{\kappa}}{3I_{\kappa}^2}, \quad x_{\kappa} = \sqrt{z_{\kappa}^2 - r_{\kappa}^2}. \quad (2.14)$$

На график (рис. 2.5) наносятся характеристики короткого замыкания  $I_{\kappa}, P_{\kappa}, \cos \varphi_{\kappa} = f(U_{\kappa})$ . Так как магнитная цепь трансформатора в режиме короткого замыкания не насыщена, то зависимость  $I_{\kappa} = f(U_{\kappa})$  линейна. Поскольку мощность  $P_{\kappa}$  представляет собой потери в обмотках, то  $P_{\kappa} \sim I_{\kappa}^2$  и в силу  $I_{\kappa} \sim U_{\kappa}$ ,  $P_{\kappa} \sim U_{\kappa}^2$

В режиме короткого замыкания сопротивления  $r_{\kappa}$  и  $x_{\kappa}$ , если пренебречь зависимостью активного сопротивления от температуры, постоянны, и тогда согласно (2.13)  $\operatorname{tg} \varphi_{\kappa} = \operatorname{const}$ , т.е.  $\varphi_{\kappa} = \operatorname{const}$  и  $\cos \varphi_{\kappa} = \operatorname{const}$  при любом  $U_{\kappa}$ .

Следует отметить, что трансформаторы проектируются таким образом, что у них  $\cos \varphi_{\kappa}$  весьма близок к 0,5. Это означает, что при измерении мощности показания одного из ваттметров будут близки к нулю.

Из графика (рис.2.5) при токе  $I_{\kappa} = I_{\kappa H}$  находят значения напряжения  $U_{\kappa H}$ , мощности  $P_{\kappa H}$  и  $\cos \varphi_{\kappa H}$ . Затем определяют напряжение короткого замыкания  $u_{\kappa}$  и его составляющие  $u_{\kappa a}$  и  $u_{\kappa r}$  по формулам (2.10-2.12). Напряжение  $u_{\kappa}$  и его составляющие, а также мощность  $P_{\kappa H}$  должны быть приведены к номинальной температуре обмоток  $\theta = 75^{\circ}\text{C}$ .

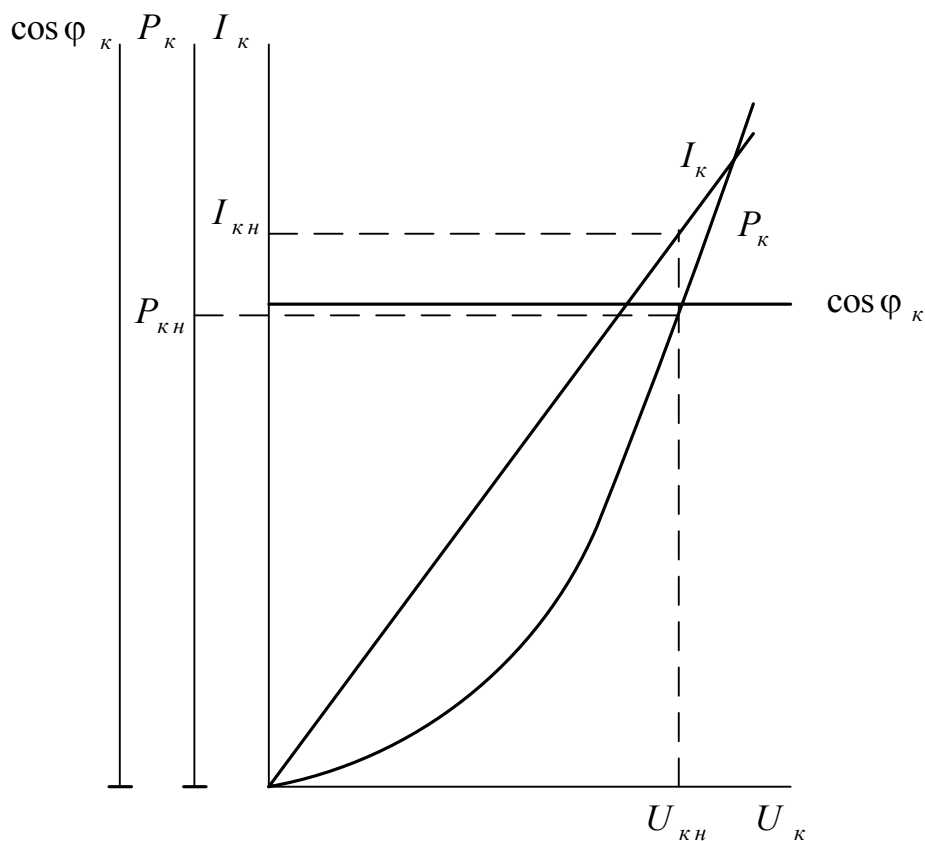


Рис. 2.5. Характеристики трехфазного короткого замыкания трансформатора



Как уже отмечалось, мощность  $P_{кн} = p_{кн}$  (номинальные потери короткого замыкания). Для медных обмоток потери  $p_{кн75}$  при температуре  $\theta = 75^{\circ}\text{C}$  будут равны

$$p_{кн75} = p_{кн} \frac{235 + 75}{235 + \theta_0}, \quad (2.15)$$

где  $\theta_0$  – температура окружающей среды, при которой проводился опыт короткого замыкания. Тогда

$$u_{ка75} = \frac{p_{кн75}}{10S_n} \%. \quad (2.16)$$

Составляющая  $u_{кр}$  не зависит от температуры и, следовательно

$$u_{к75} = \sqrt{u_{ка75}^2 + u_{кр}^2} \%. \quad (2.17)$$

В общем случае потери короткого замыкания

$$p_k = p_{ко} + p_{к\delta}, \quad (2.18)$$

где  $p_{ко}$  – основные потери короткого замыкания, зависящие от сопротивлений первичной ( $r_1$ ) и вторичной ( $r_2$ ) обмоток трансформатора, измеренные на постоянном токе;  $p_{к\delta}$  – добавочные потери, обусловленные вихревыми токами в проводниках первичной и вторичной обмоток на переменном токе.

Потери  $p_{ко75}$ , определенные при  $\theta = 75^{\circ}\text{C}$ , равны

$$p_{ко75} = 3 \left( I_{1н}^2 r_1 + I_{2н}^2 r_2 \right) \frac{235 + 75}{235 + \theta_0} \quad (2.19)$$

Тогда коэффициент добавочных потерь

$$k_{\delta} = \frac{p_{к\delta75}}{p_{ко75}} = \frac{p_{кн75} - p_{ко75}}{p_{ко75}}, \quad (2.20)$$

где  $p_{к\delta75}$  – добавочные потери короткого замыкания, соответствующие току  $I_{1к} = I_{1н}$ .

В заключение отметим, что согласно ГОСТу для трансформаторов мощностью  $S_n = (5 - 20)$ кВА, потери  $P_{кн75} = (3,7 - 3,0)\% S_n$ .

## 2.4. Определение изменения напряжения трансформатора

Если полагать  $U_1 = const$ , то при изменении нагрузки трансформатора изменяется и вторичное напряжение  $U_2$ . Изменением напряжения двухобмоточного трансформатора при заданном коэффициенте мощности называется выраженная в процентах от номинального вторичного напряжения арифметическая разность между номинальным вторичным напряжением (т.е. вторичным напряжением в режиме холостого хода) и вторичным напряжением при номинальном токе нагрузки, когда первичное напряжение и частота постоянны и равны номинальным. Согласно определению в приведенном трансформаторе имеем

$$\Delta U_2 = \frac{U'_{2н} - U'_2}{U'_{2н}} \cdot 100\% = \frac{U_{1н} - U'_2}{U_{1н}} \cdot 100\%. \quad (2.21)$$

При этом предполагается, что напряжение, подводимое к трансформатору, синусоидально и симметрично. Во всех случаях изменение напряжения приводится к  $\theta = 75^{\circ}\text{C}$ .

Изменение напряжения трансформатора при номинальном токе ( $I_{2н}$ ) определяется расчетным путем с использованием данных опыта короткого замыкания по формуле

$$\Delta U_2 = (u_{ка} \cos \varphi_2 + u_{кр} \sin \varphi_2) + \frac{1}{200} (u_{кр} \cos \varphi_2 - u_{ка} \sin \varphi_2)^2, \quad (2.22)$$

где  $u_{ка}$  и  $u_{кр}$  – активная (приведенная к температуре  $75^{\circ}\text{C}$ ) и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания (в процентах);  $\cos \varphi_2$  – коэффициент мощности вторичной цепи.

В формуле (2.22) второй член пренебрежимо мал по сравнению с первым. Например, при  $\cos \varphi_2 = 1$  ( $\varphi_2 = 0$  – чисто активная нагрузка)

$\Delta U_2 = u_{\kappa a} + 0,005u_{\kappa r}^2$ . Поэтому при практических расчетах вторым членом можно пренебречь и определять  $\Delta U_2$  по упрощенному выражению

$$\Delta U_2 = u_{\kappa a} \cos \varphi_2 + u_{\kappa r} \sin \varphi_2. \quad (2.23)$$

Отметим, что величина  $\Delta U_2$  существенно зависит от отношения  $u_{\kappa a}/u_{\kappa r}$ . Чем меньше это отношение, тем больше  $\Delta U_2$ .

Для определения изменения напряжения при токах, отличных от номинального, необходимо умножить первую скобку в правой части равенства (2.22) на коэффициент нагрузки  $k_{н2} = I_2 / I_{2н}$ , а вторую скобку – на  $k_{н2}^2$ . В этом случае формула (2.23) примет вид

$$\Delta U_2 = (u_{\kappa a} \cos \varphi_2 + u_{\kappa r} \sin \varphi_2) \cdot k_{н2}. \quad (2.24)$$

По этой формуле можно построить внешнюю характеристику трансформатора  $U_2 = f(k_{н2})$  при  $U_1 = U_{1н} = const$  и  $\cos \varphi_2 = const$  (рис. 2.6).

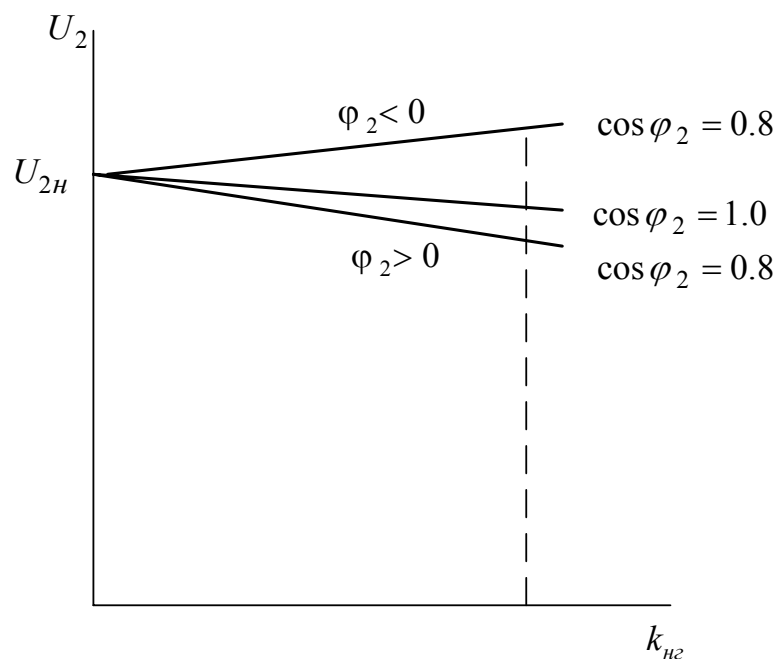


Рис. 2.6. Внешняя характеристика трансформатора при  $U_1 = U_{1н} = const$  и  $\cos \varphi_2 = const$

На рис. 2.7 построена зависимость изменения напряжения от коэффициента мощности при номинальном токе  $\Delta U_2 = f(\cos \varphi_2)$ . Видно,

что при активно-индуктивной нагрузке вторичное напряжение трансформатора падает ( $\Delta U_2 < 0$ ), а в случае активно-емкостной нагрузки при достаточно большом угле сдвига фаз оно повышается ( $\Delta U_2 > 0$ ).

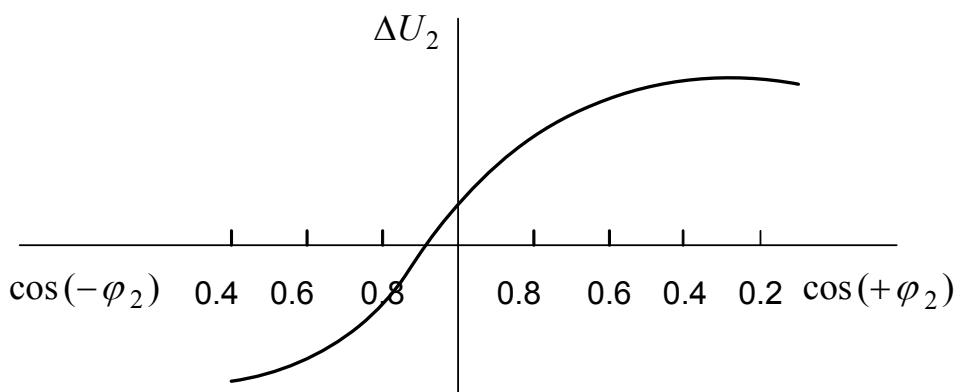


Рис.2.7.Изменение напряжения трансформатора при номинальном токе

## 2.5. Определение коэффициента полезного действия трансформатора

Под к.п.д. трансформатора понимают отношение активной мощности, отдаваемой вторичной обмоткой трансформатора ( $P_2$ ) к подведенной мощности ( $P_1$ ). В трансформаторах даже относительно небольшой мощности эти величины весьма близки друг к другу. Поэтому при определении к.п.д. путем прямого измерения мощностей можно допустить существенную ошибку. Чтобы этого избежать, к.п.д. трансформаторов определяют косвенным путем, используя данные опытов холостого хода и короткого замыкания. Мощность  $P_1$  можно выразить через мощность  $P_2$  и потери в сердечнике  $p_c$  и обмотках  $p_{об}$  трансформатора

$$P_1 = P_2 + p_c + p_{об}. \quad (2.25)$$

Тогда

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{P_2}{P_2 + p_c + p_{об}} \cdot 100 = \left( 1 - \frac{p_c + p_{об}}{P_2 + p_c + p_{об}} \right) \cdot 100\%. \quad (2.26)$$

Отдаваемая мощность

$$P_2 = k_{н2} S_n \cos \varphi_2, \quad (2.27)$$

где  $S_n$  – номинальная мощность трансформатора;  $k_{н2}$  – коэффициент нагрузки, определенный в предположении, что в пределах изменения нагрузки до номинальной вторичное напряжение остается практически постоянным, соответственно чему нагрузка трансформатора характеризуется вторичным током  $I_2$ .

Потери в сердечнике определяются из опыта холостого хода и равны  $p_{сн} = const$  – потерям при  $U_1 = U_{1н}$ . Потери в обмотках трансформатора при токе  $I_2 = I_{2н}$  принимают равными номинальным потерям короткого замыкания  $p_{кн}$ . При коэффициенте нагрузки  $k_{н2} \neq 1$ , т.е. при  $I_2 \neq I_{2н}$ , потери в обмотках  $p_{об} = k_{н2}^2 p_{кн}$ . С учетом сказанного формула (2.26) принимает вид

$$\eta = \left( 1 - \frac{p_{сн} + k_{н2}^2 p_{кн}}{k_{н2} S_n \cos \varphi_2 + p_{сн} + k_{н2}^2 p_{кн}} \right) \cdot 100\%. \quad (2.28)$$

Зависимость  $\eta = f(k_{н2})$  представлена на рис. 2.8. Как видно из приведенной кривой, к.п.д. быстро растет с ростом  $k_{н2}$ , достигая максимального значения  $\eta_{\max}$  при некотором коэффициенте нагрузки  $k_{i \tilde{a}_{\max}}$ , а затем спадает. Если взять производную  $\frac{d\eta}{dk_{н2}}$  и приравнять ее

нулю, то можно увидеть, что значение  $\eta_m$  достигается при условии  $p_{сн} = k_{н2}^2 p_{кн}$ , т.е. к.п.д. достигает максимума при такой нагрузке, при которой потери короткого замыкания (потери в обмотках) равны потерям холостого хода (потерям в стали сердечника) или, иначе говоря, переменные потери равны постоянным. Из этого условия

$$k_{н2 \max} = \sqrt{\frac{p_{сн}}{p_{кн}}}. \quad (2.29)$$

Обычно трансформаторы редко работают при номинальной нагрузке и их проектируют с таким соотношением потерь  $p_{сн}$  и  $p_{кн}$ , чтобы  $k_{н\zeta m} = 0,6 - 0,75$ .

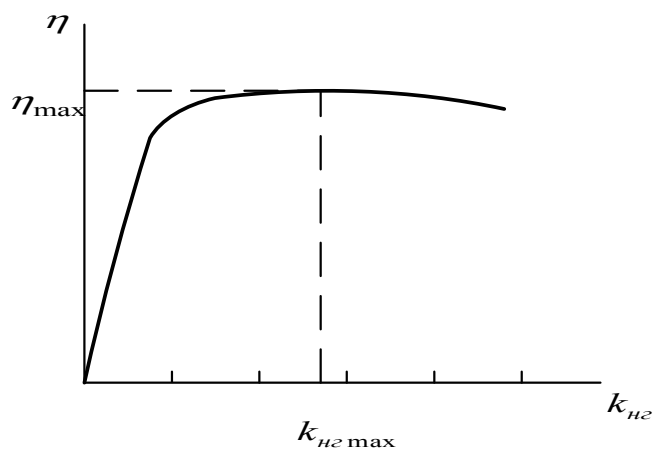


Рис.2.8. Зависимость  $\eta = f(k_{н\zeta})$

### 3. ИСПЫТАНИЕ ДВУХОБМОТОЧНОГО ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА В НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМАХ

#### 3.1. Основные соображения о несимметричных режимах работы трансформаторов

Несимметричные явления в трансформаторах вызываются несимметрией подведенных напряжений и несимметрией нагрузки. Обе причины приводят к несимметрии вторичных напряжений, т.е., в конечном итоге, к несимметрии напряжений у потребителей, что отрицательно сказывается на их работе. Так, трехфазный асинхронный двигатель, являющийся наиболее распространенным приемником электрической энергии переменного тока, при любой несимметрии подведенных напряжений снижает вращающий электромагнитный момент. Однофазные потребители при несимметрии трехфазных напряжений могут оказаться либо под повышенным, либо под пониженным напряжением, что является нежелательным. Для самого трансформатора несимметричная работа может быть опасна в отношении перегрузки отдельных обмоток, а также чрезмерных повышений фазных напряжений и насыщения сердечника.

Будем рассматривать несимметричную работу двухобмоточных трехфазных трансформаторов лишь для схем соединения обмоток, рекомендованных ГОСТом, а именно:  $Y/Y_0 - 12(0)$ ,  $Y/\Delta - 11$ ,  $\Delta/Y_0 - 11$ .

Соединение  $Y/Y_0 - 12$  применяется в распределительных трансформаторах сравнительно небольших мощностей. Эта схема при некоторых соотношениях токов и напряжений обеспечивает экономию изоляционных и проводниковых материалов и дает возможность использовать как линейные, так и фазные напряжения. Обычно на линейные напряжения включается силовая, а на фазные – осветительная нагрузка. Недостатком этой схемы является значительное искажение фазных напряжений от наличия третьей гармоники в кривой потока и от нулевой составляющей тока в несимметричных режимах, обуславливающей появление нулевой составляющей в потоке сердечника

трансформатора. Искажение напряжений, связанное с несимметрией нагрузки, тем больше, чем больше ток в нулевом проводе. Согласно ГОСТ этот ток должен быть ограничен величиной  $0,25I_n$ . Особенно значительные искажения фазных напряжений имеют место в трехфазных групповых и в трехфазных броневых трансформаторах, так как в них потоки третьей гармоники и нулевой составляющей замыкаются целиком по сердечникам, т.е. по путям с малым магнитным сопротивлением, и поэтому достигают значительной величины. В трехфазном трехстержневом трансформаторе эти потоки вытесняются за пределы сердечника и вынуждены замыкаться либо целиком по немагнитной среде (сухие трансформаторы) либо по немагнитной среде и стенкам бака (масляные трансформаторы), в результате чего потоки третьей гармоники и нулевой составляющей получаются ослабленными. В этом случае искажение фазных напряжений будет существенно меньше, чем в групповом и бревном трансформаторах. Поэтому схема  $Y/Y_0-12$  применяется исключительно в трансформаторах с трехстержневым сердечником. ГОСТ разрешает применять схему  $Y/Y_0-12$  при следующих соотношениях мощностей и напряжений:

$$S_n = (5 - 560) \text{кВА}; U_{2n} = 0,23 \text{кВ}; U_{1n} \leq 35 \text{кВ},$$

$$S_n = (5 - 1800) \text{кВА}; U_{2n} = 0,4 \text{кВ}; U_{1n} \leq 35 \text{кВ}.$$

Схема  $Y/\Delta-11$  применяется в распределительных сетях для понижающих трансформаторов там, где не требуется выведение нулевой точки на стороне низкого напряжения. Эта схема используется главным образом для питания силовой нагрузки. Область применения:

$$S_n = (5 - 1800) \text{кВА}; U_{2n} = 0,525 \text{кВ}; U_{1n} \leq 35 \text{кВ},$$

$$S_n = (135 - 5600) \text{кВА}; U_{2n} = 3,15; 6,3 \text{кВ}; U_{1n} \leq 35 \text{кВ}.$$

Схема  $\Delta/Y_0-11$  широко применяется в повышающих и понижающих трансформаторах до самых больших мощностей для передачи и распределения электрической энергии. Эта схема повсеместно используется в трансформаторах, установленных на обоих концах линий электропередач, причем обмотка высокого напряжения соединяется звездой с выведенной нейтралью. Область применения:



$$S_{н} \geq 3200 \text{ кВА}; U_{1н} \geq 35 \text{ кВ}$$

Несимметричные режимы работы трансформаторов весьма разнообразны: несимметричная нагрузка по фазам, мощная однофазная нагрузка, обрыв фаз, различного рода несимметричные короткие замыкания и т.п. В дальнейшем будут рассматриваться лишь три несимметричных режима: двухфазное короткое замыкание, однофазное короткое замыкание по схеме  $Y/Y_0$ , однофазное короткое замыкание по схеме  $\Delta/Y_0$ . Кроме того, будет рассмотрена методика экспериментального определения сопротивления нулевой последовательности трансформатора.

Для исследования несимметричных режимов электрических устройств вообще и электрических машин и трансформаторов в частности, широко используется метод симметричных составляющих. Подробно этот метод рассматривается в курсе ТОЭ и в общем курсе электрических машин. Здесь же отметим лишь следующее:

1. Любая несимметричная трехфазная система (токов, напряжений, магнитных потоков) может быть представлена в виде трех симметричных систем – прямой, обратной и нулевой последовательностей. При этом векторы соответствующих величин прямой и обратной последовательностей равны по модулю, сдвинуты по фазе на  $120^0$  и имеют противоположное чередование фаз. Аналогичные величины нулевой последовательности также равны по модулю и совпадают по фазе.
2. Сопротивления для этих систем токов в общем различны и называются сопротивлениями прямой, обратной и нулевой последовательности
3. Если все сопротивления известны, то можно найти напряжения всех последовательностей, а затем, пользуясь методом наложения (а именно он и положен в основу метода симметричных составляющих), подсчитать действительные напряжения и токи в рассматриваемом устройстве.

Трансформатор является статическим аппаратом. Поэтому, если у трансформатора, работающего на симметричную нагрузку, поменять местами два вывода со стороны высокого напряжения и одноименные выводы со стороны низкого напряжения, то режим работы потребителей и самого трансформатора не изменится. Однако чередование векторов

токов фаз трансформатора изменится на противоположное, т.е. будет соответствовать токам обратной последовательности. Следовательно, токи обратной последовательности трансформируются из одной обмотки в другую так же, как и токи прямой последовательности. Отсюда следует, что по отношению к токам прямой и обратной последовательности трансформатор ведет себя одинаково. Поэтому схемы замещения (рис. 1.5, рис 1.6) будут справедливы как для токов прямой, так и для токов обратной последовательностей. Следовательно, сопротивление трансформатора по отношению к токам этих последовательностей также одинаково и, если в схеме (рис 1.5) положить  $z_{\mu} = \infty$ , то в соответствии со схемой (рис.1.6.) оно будет равно  $z_{\kappa}$ . Токи нулевой последовательности, как уже отмечалось, в любой момент времени имеют одинаковую величину и совпадают по фазе, т.е. сумма их мгновенных значений в отличие от токов прямой и обратной последовательностей не равна нулю. Поэтому сопротивление нулевой последовательности может существенно отличаться от сопротивлений прямой и обратной последовательностей. Это сопротивление зависит как от схемы соединения обмоток, так и от конструкции сердечника. При соединении обмоток звездой протекание токов нулевой последовательности по ней возможно только при наличии нулевого провода или заземленной нейтрали. Если обмотки соединены треугольником, то токи нулевой последовательности замыкаются только внутри этого треугольника и не могут существовать в линейных токах. Поэтому токи нулевой последовательности в обмотке, соединенной треугольником, могут возникать только в результате индуцирования их токами в другой обмотке трансформатора.

Как известно из теории трансформаторов схемы замещения изображают для одной фазы. Будем полагать, что вторичные обмотки трансформатора приведены к первичным и для упрощения опустим индекс “штрих” у приведенных величин. Схема замещения для токов нулевой последовательности состоит из тех же сопротивлений  $z_1$ ,  $z_2$ ,  $z_{\mu}$ , что и схема замещения для симметричных режимов. Можно приближенно считать, что  $z_1$  и  $z_2$ , определяемые полями рассеяния трансформатора, здесь такие же, как и в схемах замещения для токов прямой и обратной

последовательностей, и поэтому  $z_1 = z_2 = \frac{z_k}{2}$ , где  $z_k$  – сопротивление короткого замыкания, найденное из опыта трехфазного короткого замыкания. Сопротивление намагничивающего контура, которое обозначим для токов нулевой последовательности как  $z_{\mu 0}$ , в общем отличается от  $z_{\mu}$  для токов прямой и обратной последовательностей и зависит от конструкции сердечника трансформатора. Для броневых и групповых трехфазных трансформаторов  $z_{\mu 0} \approx z_{\mu}$ , но для трехстержневого  $z_{\mu 0} \ll z_{\mu}$ , так как основной магнитный поток нулевой последовательности здесь замыкается от ярма к ярму по немагнитной среде.

Схема замещения для токов нулевой последовательности зависит от схемы соединения обмоток. Если обмотки трансформатора соединены по схеме  $Y_0/Y_0$ , то протекание токов нулевой последовательности возможно в обеих обмотках и схема замещения получается полностью аналогичной схемам для токов прямой и обратной последовательностей (рис. 3.1а).

Если обмотки соединены по схеме  $Y/Y_0$ , то ток нулевой последовательности может протекать только по вторичной обмотке, и схема замещения оказывается разомкнутой со стороны первичной обмотки (рис. 3.1б). В этом случае сопротивление нулевой последовательности

$$z_{0n} = z_2 + z_{\mu 0}. \quad (3.1)$$

Обмотка, соединенная треугольником, образует для токов нулевой последовательности короткозамкнутый контур. Схема замещения для случая соединения обмоток по схеме  $\Delta/Y_0$  показана на рис. 3.1в. Схема оказывается замкнутой со стороны первичной обмотки, и сопротивление нулевой последовательности

$$z_{0n} = z_2 + \frac{z_1 \cdot z_{\mu 0}}{z_1 + z_{\mu 0}} \approx z_2 + z_1 = z_k \quad (3.2)$$

Очевидно, что это сопротивление значительно меньше, чем рассчитанное по формуле (3.1). Схему (рис. 3.1в) обычно заменяют приближенной (рис. 3.1г) При такой замене погрешность для броневых и

групповых трансформаторов получается незначительной, но при трехстержневой конструкции сердечника ошибка может достигнуть очень большой величины.

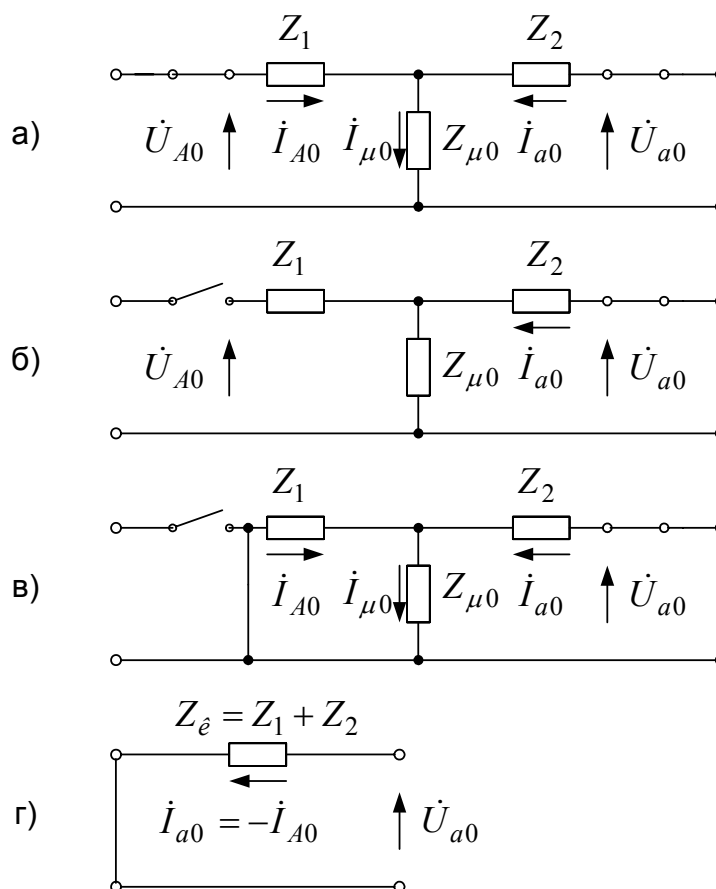


Рис. 3.1. Схемы замещения трансформатора для токов нулевой последовательности

### 3.2. Опыт двухфазного короткого замыкания

Опыт проводится при соединении обмоток трансформатора по схеме  $Y/Y$ . В этом случае в трансформаторе отсутствуют все составляющие нулевой последовательности (тока, напряжения, потока). Токораспределение в обмотках трансформатора при двухфазном коротком замыкании показано на рис. 3.2. Первичный ток двухфазного короткого замыкания трансформатора, если пренебречь намагничивающим током, равен

$$\dot{I}_B = \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_{BC}}{2z_k}, \quad (3.3)$$

т.е. определяется первичным линейным напряжением короткозамкнутых фаз и сопротивлением короткого замыкания. Во вторичной обмотке ток  $\dot{I}_a = 0$ , а ток в первичной обмотке  $\dot{I}_A$  равен намагничивающему току. В виду малости этого тока по сравнению с током короткого замыкания можно положить  $\dot{I}_A = 0$ .

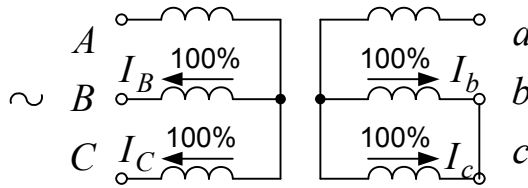


Рис.3.2. Токораспределение в обмотках трансформатора в режиме двухфазного короткого замыкания

Схема испытания трансформатора в режиме двухфазного короткого замыкания показана на рис. 3.3а. Амперметры  $A_1$ – $A_4$  выбираются на предел 5А. Вольтметром  $V_3$  измеряют несколько напряжений. Поэтому целесообразно использовать вольтметр со щупами. Следует отметить, что измеряемые напряжения могут сильно отличаться по величине, поэтому желательно использовать два вольтметра  $V_3$  – один на высокие напряжения (приблизительно 50% от  $U_n$ ), а второй на низкие, соответствующие, например, напряжениям короткого замыкания в опыте трехфазного короткого замыкания.

При проведении опыта сначала включают  $B_1$ . Затем устанавливают ИР1 на минимальное напряжение и включают  $B_2$ . Регулируя напряжение ИР1, устанавливают вторичный ток короткого замыкания, измеряемый амперметром  $A_4$ ,  $I_{к2} = I_{2н}$ . Измеряют ток  $I_{к2}$ , все первичные токи и все первичные линейные напряжения. Понижая ток  $I_{к2}$  до значения  $I_{к2} \approx 0.4I_{2н}$ , снимают 4-5 равномерно отстоящих точек. По результатам опыта определяют относительное значение напряжения двухфазного короткого замыкания  $U_{к2}^*$  (в нашем случае  $U_{к2} = U_{BC}$ ) и тока  $I_{к2}^*$  по

формулам  $U_{\kappa 2}^* = \frac{U_{\kappa 2}}{U_{1H}}$  (здесь за базисную величину принято линейное

номинальное напряжение первичной обмотки),  $I_{\kappa 2}^* = \frac{I_{\kappa 2}}{I_{2H}}$ .

По этим данным на графике (рис. 3.7) наносится характеристика двухфазного короткого замыкания.

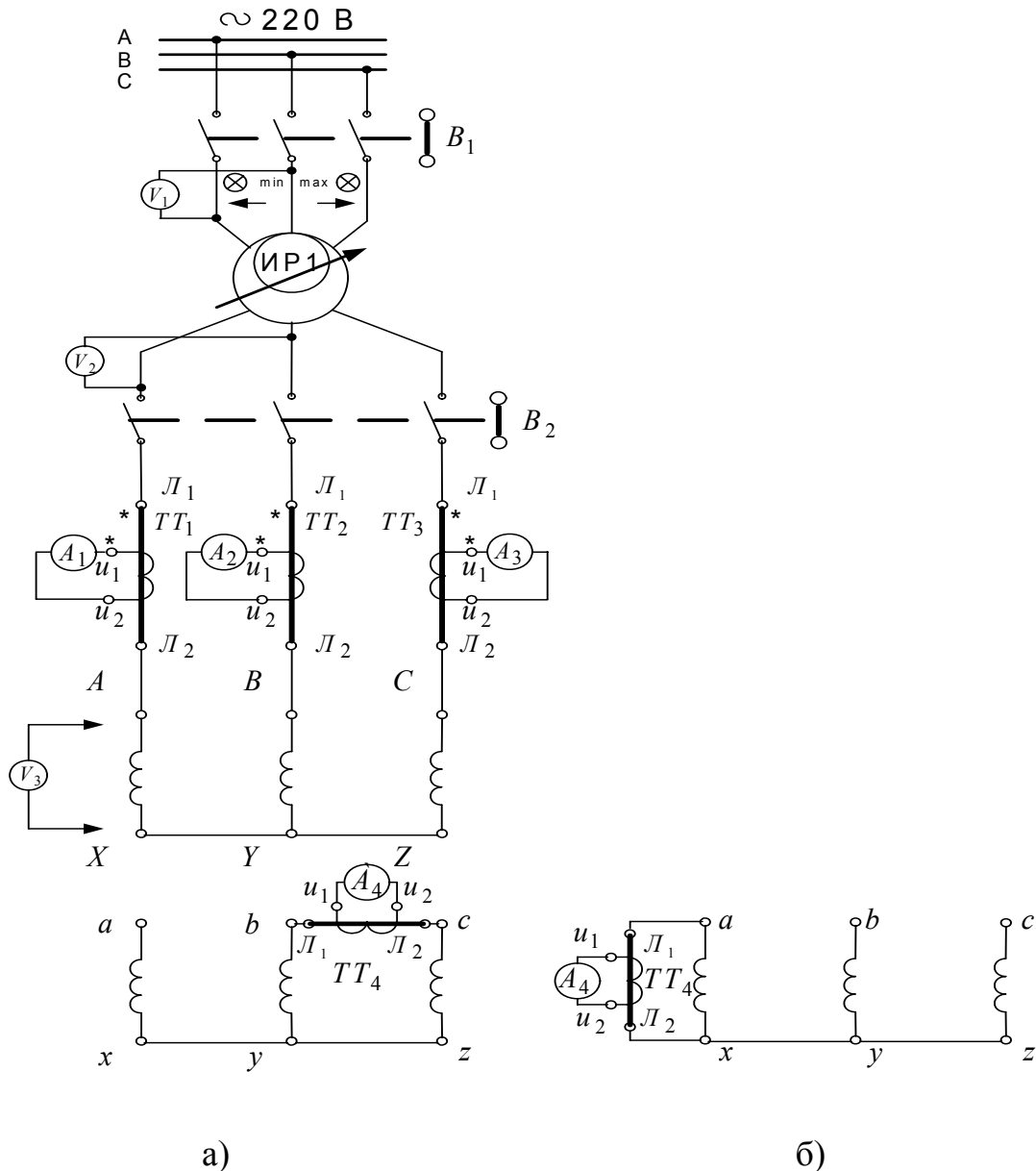


Рис.3.3. Схема испытания трансформатора в режиме двухфазного (а) и однофазного (б) короткого замыкания

По измеренным линейным напряжениям могут быть определены первичные фазные напряжения, исходя из условия, что нейтраль фазных напряжений находится в центре тяжести треугольника, образованного линейными напряжениями (в точке пересечения медиан). Аналитически рассчитывают фазные напряжения по линейным с помощью следующих формул

$$\begin{cases} U_A = \frac{1}{3} \sqrt{U_{BA}^2 + U_{AC}^2 + 2U_{BA}U_{AC} \cos \alpha}, \\ U_B = \frac{1}{3} \sqrt{U_{CB}^2 + U_{BA}^2 + 2U_{CB}U_{BA} \cos \beta}, \\ U_C = \frac{1}{3} \sqrt{U_{AC}^2 + U_{CB}^2 + 2U_{AC}U_{CB} \cos \gamma}, \end{cases} \quad (3.4)$$

где  $\alpha, \beta, \gamma$  – углы треугольника  $ABC$  на рис. 3.4. При неизвестных углах используют графическое построение. Для построения треугольника линейных напряжений следует в некотором масштабе отложить вектор одного из линейных напряжений, например  $AC = U_{AC}$ , а затем в том же масштабе из точек  $A$  и  $C$  провести окружности радиусами  $BA = U_{BA}$  и  $CB = U_{CB}$ . Точка пересечения этих окружностей и образует вершину  $B$  треугольника. Затем проводят медианы и определяют фазные напряжения  $U_A, U_B, U_C$ .

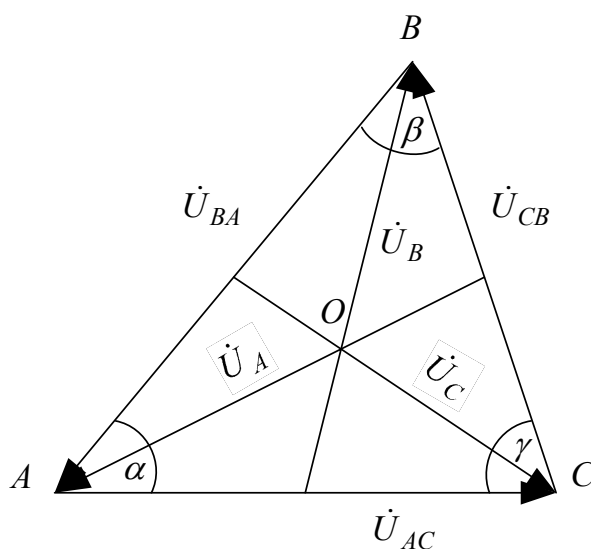


Рис. 3.4. Определение фазных напряжений по линейным напряжениям.

### 3.3. Опыт однофазного короткого замыкания

Этот опыт проводится для двух случаев:

- 1) Когда обмотки трансформатора соединены по схеме  $Y/Y_0$ .
- 2) Когда обмотки соединены по схеме  $\Delta/Y_0$ .

Из-за наличия нулевого провода во вторичной обмотке появятся токи нулевой последовательности, которые по-разному проявляются для первого и второго случаев соединения первичной обмотки. Токораспределение в обмотках трансформатора при однофазном коротком замыкании показано на рис. 3.5.

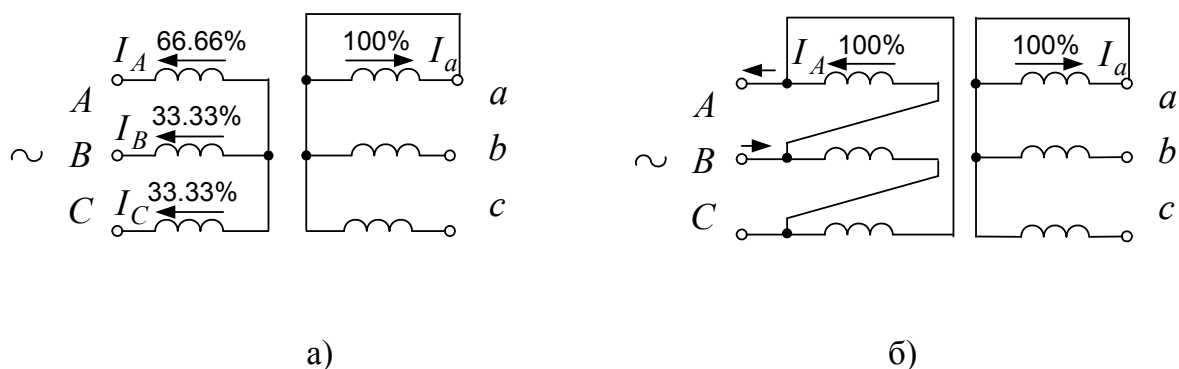


Рис. 3.5. Токораспределение в обмотках трансформатора в режиме однофазного короткого замыкания при соединении обмоток по схемам:

а)  $Y/Y_0$ ;      б)  $\Delta/Y_0$

Из рис. 3.5а следует, что в каждом из стержней остается нескомпенсированная намагничивающая сила (н.с.) равная  $\frac{1}{3}$  н.с. тока короткого замыкания  $I_a$ . Это и есть н.с. нулевой последовательности, вызывающая искажение фазных напряжений. Вычисление токов в обмотках можно произвести по формулам



$$\begin{cases} \dot{I}_a = -\frac{3\dot{U}'_A}{2z_k + z_{0n}}, \\ \dot{I}_A = -\frac{2}{3}\dot{I}_a, \\ \dot{I}_B = \dot{I}_C = \frac{1}{3}\dot{I}_a, \end{cases} \quad (3.5)$$

где  $\dot{U}'_A$  – напряжение на первичной обмотке  $A$  при отсутствии составляющих нулевой последовательности. Это напряжение не может быть измерено непосредственно в опыте, но может быть найдено из треугольника первичных линейных напряжений (рис. 3.4) или рассчитано по формулам (3.4),  $z_k$  – сопротивление короткого замыкания,  $z_{0n}$  – сопротивление нулевой последовательности, отвечающее случаю рис. 3.1б.

При однофазном коротком замыкании в трансформаторе, первичная обмотка которого соединена треугольником (рис. 3.5б), токи протекают только по обмоткам одного стержня и в сумме равны нулю (токами намагничивания пренебрегаем). Величина тока короткого замыкания  $\dot{I}_A = \frac{\dot{U}'_A}{z_k}$ , где  $\dot{U}'_A$  – первичное напряжение на короткозамкнутой фазе.

Опыт однофазного короткого замыкания трансформатора при соединении обмоток  $Y/Y_0$  проводится по испытательной схеме, представленной на рис. 3.3б. Проведение опыта аналогично опыту двухфазного короткого замыкания. Измеряются вторичный ток короткого замыкания  $I_{k1}$  (например,  $I_{k1} = I_a$ , если закорочена фаза  $a$ ), все первичные фазные токи, все первичные линейные и фазные напряжения. По данным опыта определяют относительные значения тока  $I_{k1}^* = \frac{I_{k1}}{I_{2н}} = \frac{I_a}{I_{2н}}$  и

напряжения  $U_{k1}^* = \frac{U'_A}{U_{1нФ}}$ , где  $U'_A$  – первичное напряжение обмотки при

отсутствии составляющих нулевой последовательности,  $U_{1n\phi}$  – первичное номинальное фазное напряжение. После расчета относительных значений  $I_{\kappa 1}^*$ ,  $U_{\kappa 1}^*$  на график (рис. 3.7) наносится зависимость  $I_{\kappa 1}^* = f(U_{\kappa 1}^*)$ .

Для определения напряжения  $U'_A$  необходимо построить треугольник линейных напряжений (рис. 3.6) и на пересечении медиан определить центр тяжести треугольника (точка  $O$ ). Тогда вектор  $OA = \dot{U}'_A$ . На основании дополнительного построения на этом же рисунке фазных напряжений можно определить как под действием составляющих напряжения нулевой последовательности смещается нейтраль фазных напряжений. Для такого построения необходимо из вершин  $A, B, C$  треугольника сделать засечки радиусами  $AO' = U_A$ ,  $BO' = U_B$ ,  $CO' = U_C$ . Пересечение этих засечек в точке  $O'$  и даст смещение нейтрали в виде отрезка  $OO' = U_{AO}$ .

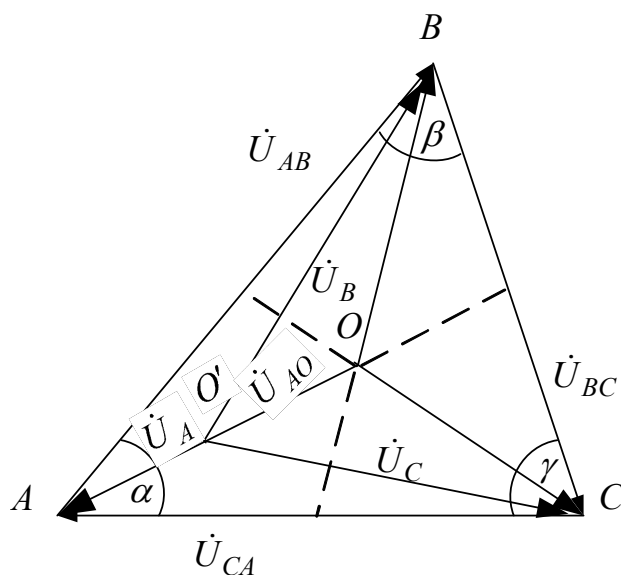


Рис. 3.6. Определение смещения нейтрали в опыте однофазного короткого замыкания трансформатора при соединении обмоток по схеме  $Y/Y_0$

Вычисление смещения нейтрали можно произвести по формуле

$$U_{AO} = \frac{I_{\kappa 1}}{3} z_{\mu 0}, \quad (3.6)$$

где  $I_{\kappa 1}$  – ток короткого замыкания, приведенный к первичной стороне,  $z_{\mu 0}$  – сопротивление намагничивающего контура для токов нулевой последовательности, модуль которого равен

$$z_{\mu 0} = \sqrt{\left(r_{0n} - \frac{r_{\kappa}}{2}\right)^2 + \left(x_{0n} - \frac{x_{\kappa}}{2}\right)^2}. \quad (3.7)$$

Здесь  $r_{0n}$  и  $x_{0n}$  – активное и индуктивное сопротивление нулевой последовательности, соответствующие случаю рис. 3.1б и найденные из опыта определения сопротивлений нулевой последовательности (см. раздел 3.4),  $r_{\kappa}$  и  $x_{\kappa}$  – активное и индуктивное сопротивление короткого замыкания трансформатора.

Опыт однофазного короткого замыкания при соединении обмоток  $\Delta/Y_0$  проводится аналогично таковому при соединении обмоток  $Y/Y_0$  по той же схеме (рис. 3.3б) с короткозамкнутой фазой  $a-x$ , только первичная обмотка трансформатора должна быть соединена в треугольник. Измеряются вторичный ток короткого замыкания  $I_{\kappa 1} = I_a$ , все первичные токи (в данном случае линейные), все первичные линейные напряжения (здесь они равны фазным). Величина первичного фазного тока короткого замыкания  $\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{z_{\kappa}}$ , где  $\dot{U}_A$  – первичное напряжение на короткозамкнутой фазе.

Во время опыта два амперметра в первичной цепи будут измерять один и тот же ток, равный току  $I_A$  короткозамкнутой фазы. Через третий амперметр будет протекать только очень малый намагничивающий ток, и так как магнитная система трансформатора во время этого опыта не насыщена, то можно принять этот ток равным нулю. Из трех линейных

напряжений одно (наименьшее) равно искомому первичному напряжению  $U_A$  короткозамкнутой фазы.

Полученные в опыте результаты пересчитываются в относительные

единицы  $I_{\kappa 1}^* = \frac{I_a}{I_{2н}}$  и напряжения  $U_{\kappa 1}^* = \frac{U_A}{U_{1нФ}}$  и затем на график (рис. 3.7)

наносится зависимость  $I_{\kappa 1}^* = f(U_{\kappa 1}^*)$ .

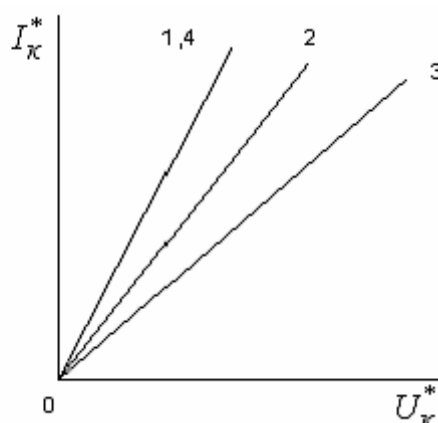


Рис. 3.7. Характеристики коротких замыканий:  
 1 – трехфазное при соединении обмоток  $Y/Y$ ;  
 2 – двухфазное при соединении обмоток  $Y/Y_0$ ;  
 3 – однофазное при соединении обмоток  $Y/Y_0$ ;  
 4 – однофазное при соединении обмоток  $\Delta/Y_0$

### 3.4. Опытное определение сопротивлений нулевой последовательности

Токи нулевой последовательности во всех трех фазах обмотки совпадают во времени. При определении сопротивлений нулевой последовательности это условие может быть обеспечено последовательным соединением фазных обмоток и подключением первичной цепи к однофазному напряжению. Схема для проведения опыта представлена на рис. 3.8.

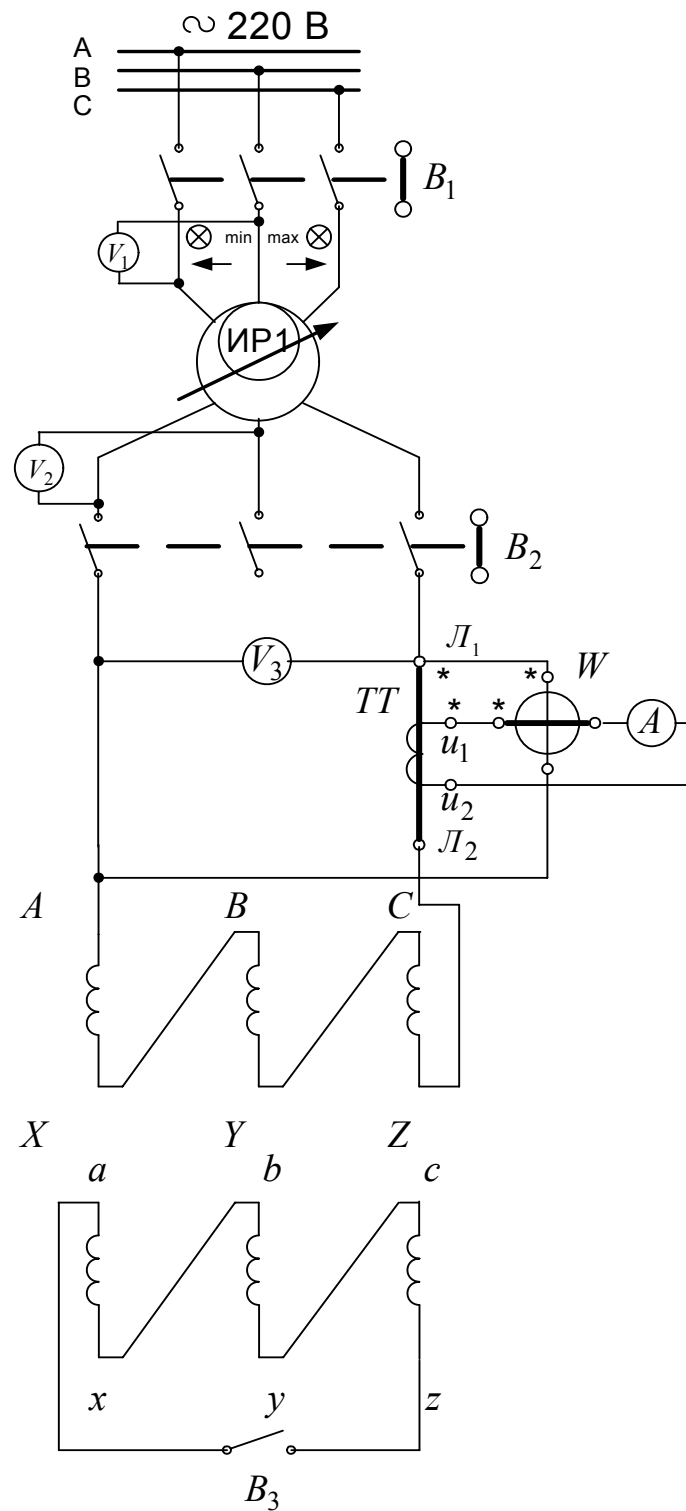


Рис.3.8. Схема для проведения опыта определения сопротивления нулевой последовательности

Если проводить измерения при разомкнутом выключателе  $B_3$ , то значение  $z_{0n}$  будет соответствовать случаю, когда ток нулевой последовательности будет чисто намагничивающим (рис. 3.1б). Если же замкнуть  $B_3$ , то полученное значение  $z_{0n}$  будет отвечать случаю работы, когда по вторичной обмотке протекают размагничивающие токи (рис. 3.1в). Сопротивление  $z_{\mu 0}$  в первом случае может быть в 6-8 раз больше, чем во втором. Поэтому не всегда удастся определить  $z_{0n}$ , измеряя напряжение, ток и мощность одними и теми же приборами. Амперметр  $A$ , как и токовая обмотка ваттметра  $W$  должны быть выбраны на ток 5А. Потенциальные обмотки ваттметра должны иметь как минимум два предела по измеряемому напряжению: один – на напряжение близкое к номинальному, а второй – на напряжение близкое напряжению короткого замыкания трансформатора. Вольтметр  $V_3$  по ходу проведения опыта приходится заменять, а именно, при разомкнутом  $B_3$  он должен быть рассчитан на большое напряжение, а при замкнутом – на малое.

Для обоих случаев производят 3-4 замера в диапазоне изменений тока  $(0,3 - 0,6)I_n$ , а затем рассчитывают сопротивления по формулам

$$z_{0n} = \frac{U}{3I}; \quad r_{0n} = \frac{P}{3I^2}; \quad x_{0n} = \sqrt{z_{0n}^2 - r_{0n}^2}. \quad (3.8)$$

## 4. ИСПЫТАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ТРЕХОБМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

### 4.1. Общие соображения

В практике эксплуатации электрических систем часто требуется передача электрической энергии в электрические сети с различным уровнем напряжения. Это можно осуществить установкой на генерирующих электростанциях двух или нескольких двухобмоточных трансформаторов (в зависимости от сетей напряжения разного уровня), либо установкой одного многообмоточного трансформатора с различными вторичными напряжениями. Последнее является более целесообразным в силу более низкой стоимости многообмоточного трансформатора по сравнению с несколькими двухобмоточными. В силовой электроэнергетике обычно используются трехобмоточные трансформаторы.

Трехобмоточные трансформаторы конструктивно отличаются от двухобмоточных только тем, что на каждом стержне магнитопровода вместо двух имеются три обмотки, которые, в зависимости от того подводится к ним или отводится от них энергия, называются первичными или вторичными. В трехобмоточном трансформаторе обычно имеется одна первичная и две вторичных обмотки. Крайне редко применяются трансформаторы с двумя первичными и одной вторичной обмоткой (например, для связи на электростанции генераторов с различными номинальными напряжениями, или передачи энергии с сетей разного уровня напряжения). В дальнейшем будем предполагать, что в рассматриваемом трехобмоточном трансформаторе имеется одна первичная и две вторичных обмотки. В зависимости от относительной величины номинальных напряжений различают обмотки высшего (ВН), среднего (СН) и низшего (НН) напряжений.

За номинальную мощность трехобмоточного трансформатора принимается мощность наиболее мощной его обмотки (обычно обмотки ВН). Перераспределение номинальных мощностей между обмотками трехобмоточного трансформатора в процентах может быть осуществлено по одному из четырех вариантов, приводимых в таблице 4.1.

Таблица 4.1

№	ВН	СН	НН
1	100	100	100
2	100	100	66.7
3	100	66.7	100
4	100	66.7	66.7

Согласно ГОСТ номинальные мощности трехфазных трехобмоточных трансформаторов находятся в пределах от 5600 кВА до 31500 кВА, соответственно трехфазных трехобмоточных групповых трансформаторов от 3 x 5600 кВА до 3 x 40000 кВА.

Номинальные напряжения обмоток составляют:

обмотки ВН – (110; 121) кВ;

обмотки СН – (6.6; 11; 38.5) кВ;

обмотки НН – (6.3; 10.5; 15.75) кВ.

Выпускаемые ныне в России трехобмоточные трансформаторы имеют мощности до 124000 кВА в единице, напряжение обмотки ВН до 525 кВ и напряжение обмотки СН до 220 кВ.

Обмотки трехфазных трехобмоточных трансформаторов соединяются по схеме  $Y_0/Y_0/\Delta - 12 - 11$  или  $Y_0/\Delta/\Delta - 11 - 11$ .

Напряжения короткого замыкания между каждой парой обмоток трехобмоточных трансформаторов приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2

1	ВН - СН	ВН - НН	НН - СН
	17%	10.5%	6%
2	ВН - СН	ВН - НН	СН - НН
	10.5%	17%	6%

Вариант 1 таблицы 4.2 соответствует расположению обмоток ВН – НН – СН, считая от наружной обмотки к стержню сердечника; вариант 2 – расположению обмоток ВН – СН – НН.

В дальнейшем исследованию подлежит трехфазный трехстержневой трехобмоточный трансформатор с соединением обмоток ВН – СН – НН по схеме  $Y/\Delta/Y - 11 - 12$ . Обмотку ВН будем обозначать цифрой 1, а обмотки СН и НН - цифрами 2 и 3 соответственно.



## 4.2. Описание экспериментальной установки

Для испытания трехфазных трехобмоточных трансформаторов установлены два стенда (рис. 4.1 и рис.4.2).

Испытательный стенд №1 (рис.4.1) для регулирования испытательного напряжения имеет индукционный регулятор ИР, выходное напряжение которого выведено на клеммы «ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ». Регулирование напряжения производят вращением штурвала ИР. Контроль этого напряжения осуществляют вольтметром  $V_{\dot{E}}$ , который подбирают в соответствии с требованиями проводимого эксперимента (холостого хода или короткого замыкания).

На испытательном стенде №2 для регулирования напряжения установлен автотрансформатор (АТР), позволяющий с помощью тумблера (ТБ), установленного на лицевой панели, регулировать испытательное напряжение от 0 до максимального значения. Контроль величины испытательного напряжения проводится вольтметром  $V_{\dot{E}}$  на стенде №2.

На передние панели стендов выведены начала всех обмоток трансформаторов: высокого (ВН), среднего (СН) и низкого (НН) напряжений. Необходимый вид соединений производят непосредственно на самих трансформаторах, предварительно сняв защитное укрытие, которое необходимо установить на место по окончании лабораторной работы.

Для измерения тока в фазе предусмотрено включение трансформатора тока. Три трансформатора тока размещены на столе каждого стенда. Первичные обмотки трансформаторов тока выведены на лицевую панель. Три верхних клеммы соответствуют зажимам  $L_1$ , три нижних -  $L_2$ . К вторичным обмоткам трансформаторов тока подключены амперметры на предел измерения 5А. Амперметры ( $A_1, A_2, A_3$ ) размещены в верхней части стендов на съемных щитках.

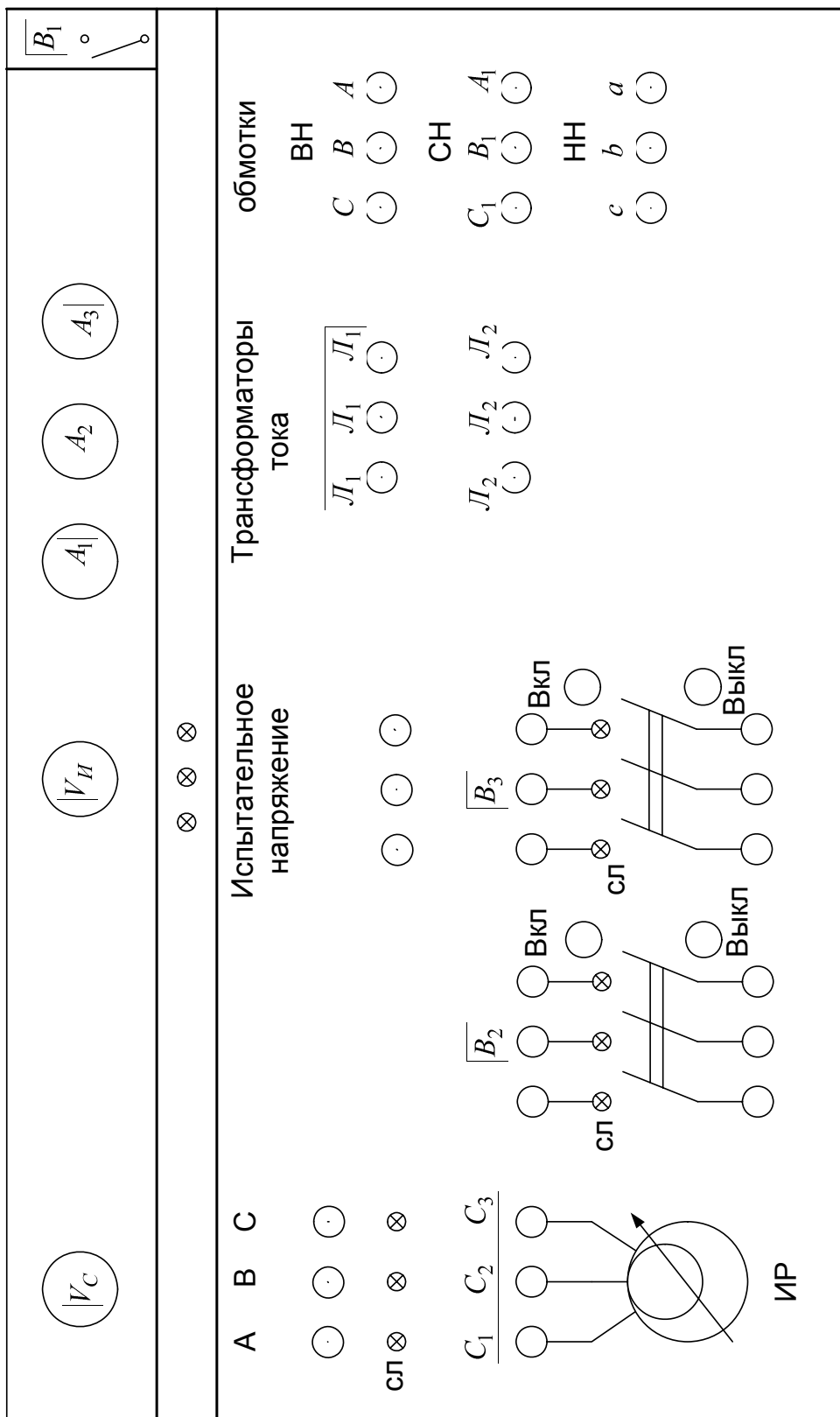


Рис.4.1. Вид панели испытательного стенда № 1 трехфазного трехобмоточного трансформатора

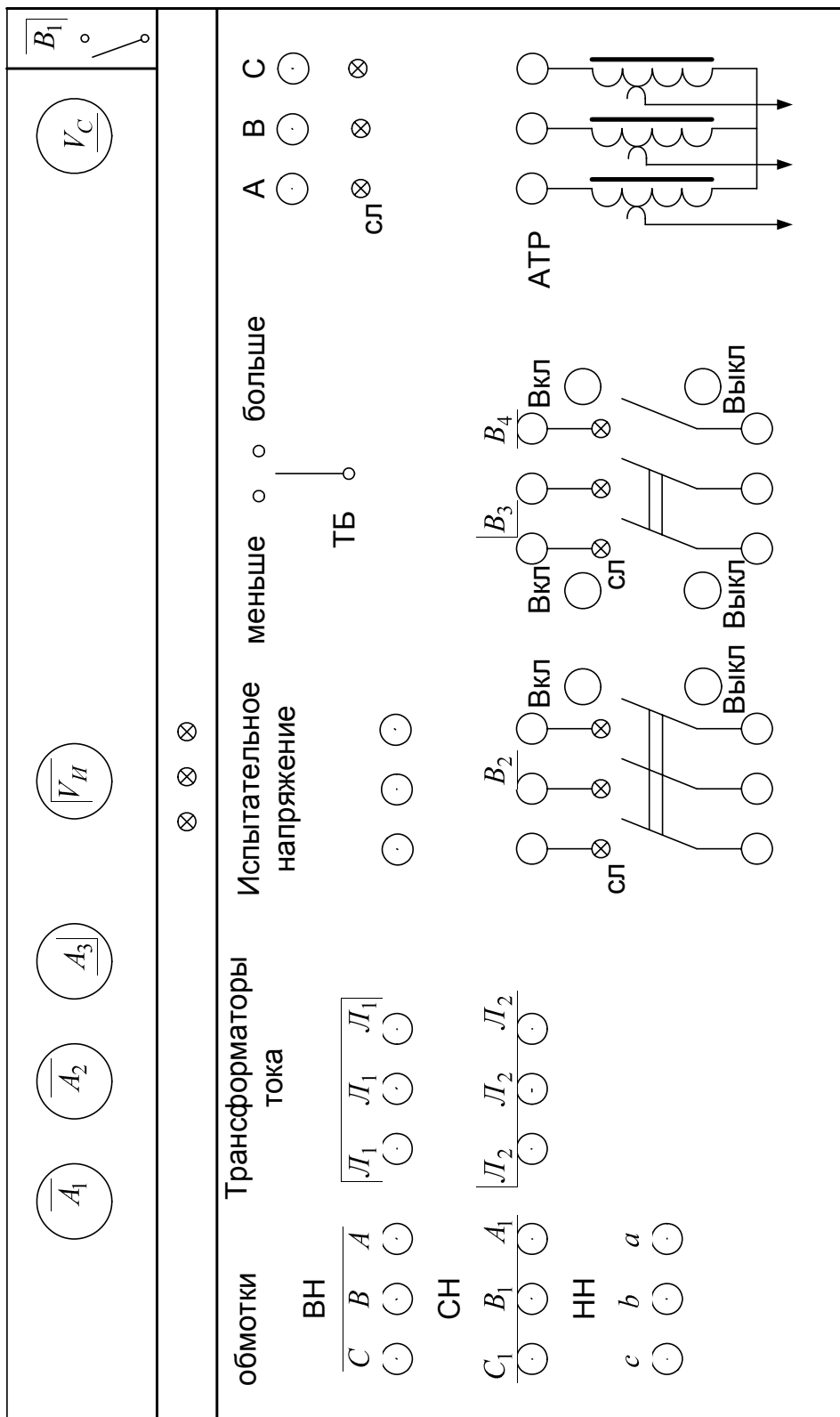


Рис.4.2. Вид панели испытательного стенда № 2 трехфазного трехобмоточного трансформатора

Трехфазное напряжение от распределительного щита подается на выключатель  $B_1$  и передается на клеммы А, В, С лицевой панели. В зависимости от требований выполняемых исследований напряжение с клемм А, В, С может быть передано на зажимы индукционного регулятора (стенд №1) или автотрансформатора (стенд №2) с помощью трех вспомогательных шин. Если ИР и АТР не используют в эксперименте, то шинки снимают.

На стендах установлена защита по максимальному току линии. При достижении тока в линии более (1.1 – 1.2) номинального тока обмотки ВН, срабатывает защита, отключая установку от напряжения на клеммах А, В, С.

#### 4.3. Опыт холостого хода

Опыт холостого хода трехобмоточного трансформатора дает такую же информацию о свойствах сердечника, как и для двухобмоточного трансформатора. Совместно с опытами короткого замыкания опыт холостого хода позволяет определить все характеристики трехобмоточного трансформатора, работающего под нагрузкой. Опыт холостого хода проводится так же, как и у двухобмоточного трансформатора (см. раздел 2.2) по схеме рис.2.2. Регулируемое напряжение подводится к одной из обмоток трансформатора (например ВН), в то время как остальные обмотки остаются разомкнутыми. При сборке схемы следует обратить внимание на подключение ваттметров. Как и в схеме рис.2.2, измерение мощности производится по схеме двух ваттметров, токовые обмотки которых включены в измерительные цепи трансформаторов тока (ТТ) крайних фаз. Но на данных испытательных стендах в измерительные цепи ТТ уже включены амперметры. Поэтому для подключения токовых обмоток ваттметров необходимо отсоединить один из проводов, соединенных с амперметром, от клеммы измерительной обмотки ТТ и подсоединить токовую обмотку ваттметра между этим проводом и отключенной клеммой измерительной обмотки ТТ, строго соблюдая правильность соединения генераторных зажимов обмоток ваттметра и ТТ (зажимы \*). То же самое относится и к генераторным зажимам обмотки напряжения ваттметров и линейных зажимов ТТ.

Как и в случае двухобмоточного трансформатора измеряют токи во всех линиях, показания ваттметров, фиксируя их знаки, линейные напряжения всех трех обмоток (три, если они несимметричны, и одно, если симметричны). Поскольку приходится измерять напряжение на трех обмотках, то целесообразно пользоваться вольтметром со щупами.

Все расчеты, при условии, что фазы подключенной к питающему напряжению обмотки соединены звездой, как в рассматриваемом случае, производятся полностью аналогично разделу 2.2. По результатам обработки экспериментальных данных на график наносятся зависимости, как на рис. 2.4.

При определении коэффициентов трансформации следует иметь в виду, что фазы обмоток 1 и 3 соединены звездой и для них  $U_{1Л} = \sqrt{3}U_{1Ф}$ ;  $U_{3Л} = \sqrt{3}U_{3Ф}$ , т.е. линейный  $k_{13Л}$  и фазный  $k_{13Ф}$  коэффициенты трансформации между обмотками 1 и 3 будут одинаковыми и равными:

$$k_{13} = \frac{U_{1Л}}{U_{3Л}} = \frac{U_{1Ф}}{U_{3Ф}} \quad (4.1)$$

Фазы обмотки 2 соединены треугольником и для нее  $U_{2Л} = U_{2Ф}$ .

Тогда

$$k_{12Л} = \frac{U_{1Л}}{U_{2Л}}; \quad k_{12Ф} = \frac{U_{1Ф}}{U_{2Ф}} = \frac{U_{1Л}}{U_{2Л}} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{k_{12Л}}{\sqrt{3}}, \quad (4.2)$$

$$k_{23Л} = \frac{U_{2Л}}{U_{3Л}}; \quad k_{23Ф} = \frac{U_{2Ф}}{U_{3Ф}} = \frac{U_{2Л}}{U_{3Л}} \cdot \sqrt{3} = \sqrt{3} k_{23Л}. \quad (4.3)$$

Ток холостого хода обмотки выражается в процентах от ее номинального тока. Если номинальные мощности обмоток трансформатора различны, то и процентные значения тока холостого хода будут различными, в зависимости от того, какая из обмоток трансформатора подключена к сети. Для внесения определенности ГОСТ рекомендует выражать ток холостого хода в процентах от номинального тока обмотки, подключенной к сети, приведенного к номинальной мощности трансформатора. Обозначим величины, относящиеся к обмотке, подключенной к сети, индексом 1 и номинальную мощность

трансформатора через  $S_n$ . Тогда приведенный номинальный ток обмотки будет

$$I'_{1n} = I_{1n} \frac{S_n}{S_{1n}} = I_{1n} \frac{U_n I_n}{U_{1n} I_{1n}} = I_n \frac{U_n}{U_{1n}}, \quad (4.4)$$

а ток холостого хода

$$I'_{10} = \frac{I_{10}}{I'_{1n}} 100 = \frac{I_{10}}{I_{1n} \frac{S_n}{S_{1n}}} 100\%. \quad (4.5)$$

Здесь  $I'_{10}$  - ток холостого хода, выраженный в процентах от номинального тока обмотки 1, приведенного к номинальной мощности трансформатора;  $I_{1n}$  и  $S_{1n}$  - номинальные ток и мощность обмотки 1;  $I_n$  и  $U_n$  - номинальные ток и напряжение наиболее мощной обмотки;  $I_{10}$  - ток холостого хода в амперах, измеренный со стороны обмотки 1, при номинальном напряжении на ее зажимах  $U_{1n}$ . В нашем случае обмоткой 1 является обмотка ВН, мощность которой принимается за номинальную мощность трансформатора и, следовательно,  $I'_{10} = I_{10}$ .

Из выражения (4.5) следует, что значения токов холостого хода, измеренные со стороны различных обмоток и выраженные в процентах от своих номинальных токов, приведенных к номинальной мощности трансформатора одинаковы, т.е.  $I'_{10} = I'_{20} = I'_{30}$ .

Потери холостого хода трехобмоточного трансформатора, как и в случае двухобмоточного, практически не зависят того, со стороны какой обмотки они измеряются, так как основную их часть составляют потери в стали сердечника, пропорциональные квадрату питающего напряжения. Точно так же и зависимость  $\cos \varphi_0 = f(U_0)$  будет одинаковой при питании любой из обмоток.

#### 4.4. Опыты короткого замыкания

В трехобмоточном трансформаторе необходимо провести поочередно три опыта короткого замыкания между парами обмоток, причем обмотка, не участвующая в опыте, остается разомкнутой. Эти опыты будем называть основными опытами короткого замыкания. Для

проверки правильности результатов, полученных из трех основных опытов, производится четвертый – дополнительный контрольный опыт короткого замыкания. В этом опыте при питании первой обмотки закорачиваются две остальные. Основные и дополнительный опыты короткого замыкания проводятся полностью аналогично опыту короткого замыкания двухобмоточного трансформатора (см. раздел 2.3) по схеме рис.2.2 с закороченной вторичной обмоткой (или двумя в четвертом опыте). Очередность опытов следующая:

- 1) питается обмотка 1, закорочена обмотка 2;
- 2) питается обмотка 1, закорочена обмотка 3;
- 3) питается обмотка 2, закорочена обмотка 3;
- 4) питается обмотка 1, закорочены обмотки 2 и 3.

При проведении опытов целесообразно нарушить их очередность, а именно, сначала выполнить опыты 1, 2, 4, а последним – опыт 3. Это связано с тем, что для проведения опыта 3 необходимо переключать питание с обмотки 1 на обмотку 2.

Расчет параметров  $z_k, r_k, x_k$  в опытах 1, 2, 4 производится по тем же формулам, как и в разделе 2.3, так как питающая обмотка 1 соединена звездой. При проведении опыта 3, когда питающая обмотка 2 соединена треугольником, расчет параметров следует выполнять по выражениям:

$$z_{k23} = \frac{\sqrt{3} U_{k23}}{I_{k2}}, \quad r_{k23} = \frac{P_{k23}}{I_{k2}^2}, \quad x_{k23} = \sqrt{z_{k23}^2 - r_{k23}^2} . \quad (4.6)$$

После вычисления всех величин строятся графики четырех коротких замыканий, аналогичных рис.2.5, из которых определяются номинальные величины напряжений короткого замыкания и сопоставляются со щитковыми данными трансформатора. Так же как в двухобмоточном трансформаторе, эти величины могут быть найдены без построения графиков, а из вычислений по формулам (2.15 - 2.17) с учетом того, что все величины, зависящие от температуры, приводятся к расчетной температуре (75°C).

Сопротивление короткого замыкания и его составляющие для любой пары обмоток подобно двухобмоточному трансформатору может быть

выражено в относительных единицах или процентах. Тогда из трех опытов короткого замыкания получим:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 z_{\kappa 12}^* = u_{\kappa 12} = \frac{z_{\kappa 12} I_{1H\Phi}}{U_{1H\Phi}} \text{ o.e.} = \frac{z_{\kappa 12} I_{1H\Phi}}{U_{1H\Phi}} 100\% , \\
 z_{\kappa 13}^* = u_{\kappa 13} = \frac{z_{\kappa 13} I_{1H\Phi}}{U_{1H\Phi}} \text{ o.e.} = \frac{z_{\kappa 13} I_{1H\Phi}}{U_{1H\Phi}} 100\% , \\
 z_{\kappa 23}^* = u_{\kappa 23} = \frac{z_{\kappa 23} I_{2H\Phi}}{U_{2H\Phi}} \text{ o.e.} = \frac{z_{\kappa 23} I_{2H\Phi}}{U_{2H\Phi}} 100\% , \\
 r_{\kappa 12}^* = u_{\kappa a 12} = \frac{r_{\kappa 12} I_{1H\Phi}}{U_{1H\Phi}} \text{ o.e.} = \frac{r_{\kappa 12} I_{1H\Phi}}{U_{1H\Phi}} 100\% , \\
 r_{\kappa 13}^* = u_{\kappa a 13} = \frac{r_{\kappa 13} I_{1H\Phi}}{U_{1H\Phi}} \text{ o.e.} = \frac{r_{\kappa 13} I_{1H\Phi}}{U_{1H\Phi}} 100\% , \\
 r_{\kappa 23}^* = u_{\kappa a 23} = \frac{r_{\kappa 23} I_{1H\Phi}}{U_{2H\Phi}} \text{ o.e.} = \frac{r_{\kappa 23} I_{2H\Phi}}{U_{2H\Phi}} 100\% , \\
 x_{\kappa 12}^* = u_{\kappa r 12} = \frac{x_{\kappa 12} I_{1H\Phi}}{U_{1H\Phi}} \text{ o.e.} = \frac{x_{\kappa 12} I_{1H\Phi}}{U_{1H\Phi}} 100\% , \\
 x_{\kappa 13}^* = u_{\kappa r 13} = \frac{x_{\kappa 13} I_{1H\Phi}}{U_{1H\Phi}} \text{ o.e.} = \frac{x_{\kappa 13} I_{1H\Phi}}{U_{1H\Phi}} 100\% , \\
 x_{\kappa 23}^* = u_{\kappa r 23} = \frac{x_{\kappa 23} I_{2H\Phi}}{U_{2H\Phi}} \text{ o.e.} = \frac{x_{\kappa 23} I_{2H\Phi}}{U_{2H\Phi}} 100\%
 \end{array} \right. \quad (4.7)$$

Согласно ГОСТ все напряжения короткого замыкания трехобмоточного трансформатора должны быть приведены к номинальной мощности трансформатора. Этот вопрос требует некоторых пояснений. Как известно, приведение сопротивлений короткого замыкания, выраженного в Ом, к другой обмотке, например, к первичной, производится путем умножения его на квадрат коэффициента трансформации. В противоположность этому, напряжение короткого замыкания, выраженное в относительных единицах, приводится к другой обмотке путем умножения его на отношение номинальных мощностей обмоток. Приведем, например, сопротивление  $z_{\kappa 23}^*$  (4.7) к первичной обмотке. Для этого сопротивление  $z_{\kappa 23}$  (в Ом) умножим на квадрат коэффициента трансформации и умножим на отношение номинальных тока и напряжения



первичной обмотки, чтобы представить в относительных единицах. Тогда получим:

$$z'_{e23} = \frac{z'_{e23} I_{1i}}{U_{1i}} = \frac{z_{e23} U_{1i}^2 I_{1i} I_{2i}}{U_{2i} U_{1i} I_{2i}} = z_{e23}^* \frac{U_{1i} I_{1i}}{U_{2i} I_{2i}} = z_{e23}^* \frac{S_{1i}}{S_{2i}} \quad (4.8)$$

В двухобмоточном трансформаторе номинальные мощности обеих обмоток всегда одинаковы, поэтому напряжение короткого замыкания в относительных единицах не зависит от того, со стороны какой из обмоток оно определялось. В трехобмоточном же трансформаторе обмотки могут иметь разную номинальную мощность. Поэтому все напряжения короткого замыкания следует привести к номинальной мощности трансформатора. Будем считать, что наш испытуемый трансформатор выполнен по варианту 1 (табл.4.1), т.е. мощность каждой обмотки одинакова и равна 100%. Тогда, приведенные сопротивления и напряжения короткого замыкания будут равны реальным, определенным из опытов коротких замыканий.

#### 4.5. Схема замещения трехобмоточного трансформатора и определение ее параметров

Трехобмоточный трансформатор имеет две схемы замещения: в виде трехлучевой звезды и треугольника. Наиболее часто употребляют схему трехлучевой звезды, вид которой изображен на рис. 4.3.

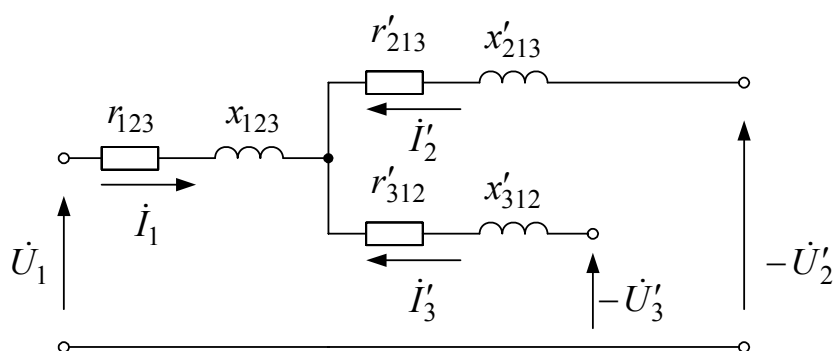


Рис.4.3. Схема замещения трехобмоточного трансформатора

Эта схема замещения является приближенной, так как при ее выводе намагничивающий ток принимается равным нулю. Поэтому расчет

параметров трансформатора по этой схеме возможен только для трансформатора несущего существенную нагрузку, т.е. когда намагничивающим током можно пренебречь. Схема замещения включает в себя следующие комплексные сопротивления:

$$\begin{cases} Z_{123} = r_{123} + jx_{123} \\ Z'_{213} = r'_{213} + jx'_{213} \\ Z'_{312} = r'_{312} + jx'_{312} \end{cases} \quad (4.9)$$

Сопротивление  $Z_{123}$  является эквивалентным сопротивлением обмотки 1 с учетом влияния обмоток 2 и 3, а сопротивления  $Z'_{213}$  и  $Z'_{312}$  являются эквивалентными сопротивлениями обмоток 2 и 3, с учетом влияния других обмоток, приведенных к обмотке 1. Параметры (сопротивления) схемы замещения трехобмоточного трансформатора могут быть рассчитаны на основании данных трех опытов коротких замыканий по следующим формулам:

$$\begin{aligned} Z_{123} &= \frac{Z_{\kappa 12} + Z_{\kappa 13} - Z_{\kappa 23}}{2}, & Z'_{213} &= \frac{Z_{\kappa 12} + Z_{\kappa 23} - Z_{\kappa 13}}{2}, \\ Z'_{312} &= \frac{Z_{\kappa 13} + Z_{\kappa 23} - Z_{\kappa 12}}{2}, & r_{123} &= \frac{r_{\kappa 12} + r_{\kappa 13} - r_{\kappa 23}}{2}, \\ r'_{213} &= \frac{r_{\kappa 12} + r_{\kappa 23} - r_{\kappa 13}}{2}, & r'_{312} &= \frac{r_{\kappa 13} + r_{\kappa 23} - r_{\kappa 12}}{2}, \\ x_{\kappa 123} &= \frac{x_{\kappa 12} + x_{\kappa 13} - x_{\kappa 23}}{2}, & x'_{\kappa 213} &= \frac{x_{\kappa 12} + x_{\kappa 23} - x_{\kappa 13}}{2}, \\ x'_{\kappa 312} &= \frac{x_{\kappa 13} + x_{\kappa 23} - x_{\kappa 12}}{2} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Сопротивления короткого замыкания между парами обмоток могут быть рассчитаны в Ом или относительных единицах. Если в формулы (4.10) вместо сопротивлений  $Z_{\kappa}, r_{\kappa}, x_{\kappa}$  подставить сопротивления  $z_{\kappa}^*, r_{\kappa}^*, x_{\kappa}^*$  или напряжения короткого замыкания  $u_{\kappa}, u_{\kappa a}, u_{\kappa r}$ , вычисленные по (4.7), то получатся параметры схемы замещения рис. 4.3, представленные в относительных единицах или процентах.

Пользуясь схемой замещения рис. 4.3, можно произвести проверку точности полученных выше параметров короткого замыкания трансформатора. Для этого, как отмечалось ранее, производится

дополнительный опыт короткого замыкания (опыт 4), в котором обмотка 1 является питающей, а обмотки 2 и 3 замкнуты накоротко. Из опыта получают сопротивление  $Z_{\kappa 1-23} = r_{\kappa 1-23} + jx_{\kappa 1-23}$ . Это же сопротивление рассчитывают, используя схему замещения рис.4.3 и формулы (4.10), по выражению:

$$Z_{\kappa 1-23} = Z_{123} + \frac{Z'_{213} Z'_{312}}{Z'_{213} + Z'_{312}} = r_{123} + jx_{123} + \frac{(r'_{213} + jx'_{213})(r'_{312} + jx'_{312})}{r'_{213} + r'_{312} + j(x'_{213} + x'_{312})} \quad (4.11)$$

Подсчитанное по (4.11) сопротивление  $Z_{\kappa 1-23}$  сопоставляется с его значением, полученным из дополнительного опыта короткого замыкания. Чем меньше разница между ними, тем меньшая ошибка была допущена при определении сопротивления короткого замыкания в опытах.

#### 4.6. Определение изменения напряжения трехобмоточного трансформатора

У трехобмоточного трансформатора могут одновременно работать все три обмотки или только две. Одновременная работа двух обмоток не представляет интереса, поскольку в данном случае трехобмоточный трансформатор превращается в двухобмоточный, подробно рассмотренный в разделе 2. Поэтому рассмотрим наиболее общий случай одновременной работы всех трех обмоток.

Особенностью работы трехобмоточного трансформатора является тот факт, что напряжение на любой из обмоток зависит не только от нагрузки этой обмотки, но также и от нагрузки другой вторичной обмотки. Исходя из этого, под номинальными вторичными напряжениями будем понимать напряжения, получающиеся на той или иной вторичной обмотке при холостом ходе трансформатора, т.е. при отсутствии нагрузки на обеих вторичных обмотках при номинальном первичном напряжении. По аналогии с двухобмоточным трансформатором назовем изменением напряжения на одной из вторичных обмоток трансформатора выраженную в процентах от номинального вторичного напряжения арифметическую

разность между номинальным вторичным напряжением и напряжением на этой обмотке при нагрузке. Таким образом, изменения напряжения на обмотках 2 и 3 будут равны

$$\begin{cases} \Delta U_{12} = \frac{U_{2н} - U_2}{U_{2н}} 100 = \frac{U'_{2н} - U'_2}{U'_{2н}} 100 = \frac{U_{1н} - U'_2}{U_{1н}} 100\% \\ \Delta U_{13} = \frac{U_{3н} - U_3}{U_{3н}} 100 = \frac{U'_{3н} - U'_3}{U'_{3н}} 100 = \frac{U_{1н} - U'_3}{U_{1н}} 100\% \end{cases} \quad (4.12)$$

Вторичные обмотки трехобмоточного трансформатора могут нести различные нагрузки. Обозначим коэффициенты нагрузки обмоток, т.е. отношения мощностей, которыми нагружены вторичные обмотки, к номинальной мощности трансформатора через

$$K_2 = \frac{S_2}{S_n} \quad ; \quad K_3 = \frac{S_3}{S_n} . \quad (4.13)$$

Тогда изменения напряжений трехобмоточного трансформатора (по аналогии с двухобмоточным трансформатором) с достаточной степенью точности в пренебрежении членом в формуле (2.22), можно представить выражениями:

$$\Delta U_{12} = K_2 (u_{\hat{e}a12} \cos \varphi_2 + u_{\hat{e}r12} \sin \varphi_2) + K_3 (u_{\hat{e}a1} \cos \varphi_3 + u_{\hat{e}r1} \sin \varphi_3) , \quad (4.14)$$

$$\Delta U_{13} = K_3 (u_{\hat{e}a13} \cos \varphi_3 + u_{\hat{e}r13} \sin \varphi_3) + K_2 (u_{\hat{e}a1} \cos \varphi_2 + u_{\hat{e}r1} \sin \varphi_2) . \quad (4.15)$$

Здесь через  $u_{ka1}$  и  $u_{kr1}$  обозначены активная и индуктивная составляющие так называемого напряжения влияния, равные:

$$u_{ka1} = \frac{u_{ka12} + u_{ka13} - u_{ka23}}{2} \quad ; \quad u_{kr1} = \frac{u_{kr12} + u_{kr13} - u_{kr23}}{2} . \quad (4.16)$$

Выражения (4.14, 4.15) можно представить через относительные значения сопротивлений, вычисляемых по (4.7). Вместо составляющих напряжения влияния  $u_{ka1}$  и  $u_{kr1}$  в (4.14, 4.15) надо подставить относительные значения сопротивлений  $r_{123}^*$ ,  $x_{123}^*$  соответственно, рассчитываемых по формулам:

$$r_{123}^* = u_{ka1} = \frac{r_{123} I_{1H\Phi}}{U_{1H\Phi}} \text{ o.e.} = \frac{r_{123} I_{1H\Phi}}{U_{1H\Phi}} 100\% \quad (4.17)$$

$$x_{123}^* = u_{kr1} = \frac{x_{123} I_{1H\Phi}}{U_{1H\Phi}} \text{ o.e.} = \frac{x_{123} I_{1H\Phi}}{U_{1H\Phi}} 100\%$$

где  $r_{123}, x_{123}$  - параметры схемы замещения рис.4.3.

В заключение отметим, что все активные составляющие напряжений короткого замыкания должны быть приведены к 75°C.

#### 4.7. Определение коэффициента полезного действия трехобмоточного трансформатора

Определение коэффициента полезного действия (к.п.д.) трехобмоточного трансформатора может быть произведено для случаев работы трансформатора в качестве двух- и трехобмоточного. Работа двухобмоточного трансформатора была рассмотрена ранее (см. раздел 2), а поэтому остановимся здесь только на случае работы трансформатора как трехобмоточного. К.п.д. трансформатора

$$\eta = \left(1 - \frac{\sum p}{P_2 + P_3 + \sum p}\right) \cdot 100\% = \quad (4.18)$$

$$= \left(1 - \frac{p_0 + p_{\dot{\epsilon}}}{K_2 S_i \cos \varphi_2 + K_3 S_i \cos \varphi_3 + p_0 + p_{\dot{\epsilon}}}\right) \cdot 100\%$$

Здесь обозначено:  $\sum p$  - сумма всех потерь трансформатора в (Вт);  $P_2, P_3$  - активные мощности, отдаваемые во внешние сети второй и третьей обмотками;  $K_2, K_3$  - коэффициенты нагрузки второй и третьей обмоток трансформатора, рассчитанные по (4.13);  $p_0$  - потери в стали сердечника трансформатора, определяемые из опыта холостого хода;  $p_{\dot{\epsilon}}$  - сумма основных и добавочных потерь в обмотках и потерь в стенках бака и металлических конструкциях от полей рассеяния, называемая потерями короткого замыкания. Потери короткого замыкания  $p_{\dot{\epsilon}}$  могут быть определены на основании трех опытов короткого замыкания. В

соответствии с трехлучевой схемой замещения трехобмоточного трансформатора (рис. 4.3) потери короткого замыкания равны:

$$p_{\kappa} = m(I_1^2 r_{123} + I_2'^2 r_{213}' + I_3'^2 r_{312}'), \quad (4.19)$$

где  $m$  - число фаз трансформатора;  $I_1, I_2', I_3'$  - токи в обмотках трансформатора, приведенные к первичной обмотке (токи в лучах схемы замещения).

Выражение (4.19) может быть преобразовано к виду:

$$\begin{aligned} p_{\kappa} &= m U_n I_n \left( \frac{I_1^2 I_n r_{123}}{U_n I_n^2} + \frac{I_2'^2 I_n r_{213}'}{U_n I_n^2} + \frac{I_3'^2 I_n r_{312}'}{U_n I_n^2} \right) = \\ &= S_n (K_1^2 r_{123}^* + K_2^2 r_{213}^* + K_3^2 r_{312}^*) \quad , \end{aligned} \quad (4.20)$$

где  $S_n$  - номинальная мощность трансформатора (в ВА);  $r_{123}^*, r_{213}^*, r_{312}^*$  - активные сопротивления трех лучей схемы замещения рис. 4.3 в относительных единицах. Вместо указанных активных сопротивлений в формулу (4.20) могут быть подставлены соответствующие им активные составляющие напряжений короткого замыкания. Относительные значения всех активных сопротивлений трех лучей схемы замещения и соответствующие им активные составляющие напряжений короткого замыкания могут быть определены аналогично, как это было выполнено для  $r_{123}^* = u_{\kappa a1}$  по формуле 4.17.

В выражении (4.20) коэффициенты нагрузок вторичных обмоток  $K_2, K_3$  должны быть предварительно заданы. Тогда коэффициент нагрузки первичной обмотки

$$K_1 = \sqrt{K_2^2 + K_3^2 + 2K_2 K_3 \cos(\varphi_2 - \varphi_3)} \quad . \quad (4.21)$$

По результатам расчета к.п.д. на график, аналогичный рис.2.6, наносятся зависимости  $\eta = f(K_{н2})$  для случаев одновременной работы двух и трех обмоток трансформатора.

## 5. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРОВ

### 5.1. Условия параллельной работы трансформаторов

Из теоретического курса известно, что условия, при которых допускается параллельная работа нескольких трансформаторов, следующие:

1. Одинаковые группы соединения обмоток;
2. Равенство коэффициентов трансформации;
3. Равенство напряжений короткого замыкания и их активной и реактивной составляющих (равенство углов короткого замыкания  $\varphi_k$ ).

Из перечисленных условий только первое является безоговорочным, а второе и третье могут выполняться с определенными допусками, величина которых устанавливается ГОСТом. Допустимые отклонения параметров трансформатора согласно ГОСТу приведены в табл. 5.1

Таблица 5.1

№	Наименование величины	Допуски (%)
1	Коэффициент трансформации	$\pm 0,5$
2	Напряжение короткого замыкания	$\pm 10$
3	Потери короткого замыкания	+10
4	Потери холостого хода	+15
5	Суммарные потери	+10
6	Ток холостого хода	+30

При учебном испытании трансформаторов исследование параллельной работы включает в себя:

1. Определение группы соединения обмоток трансформаторов;
2. Анализ параллельной работы трансформаторов, имеющих одинаковые коэффициенты трансформации и напряжения короткого замыкания;
3. Анализ параллельной работы трансформаторов при неравенстве их коэффициентов трансформации;
4. Анализ параллельной работы трансформаторов при неодинаковых напряжениях короткого замыкания.

В настоящей главе предполагается включение на параллельную работу двух трехобмоточных трансформаторов с использованием только двух обмоток – ВН и НН (см. главу 4). У этих трансформаторов напряжение короткого замыкания  $u_{к13}$  одинаковы и поэтому исследования по пункту 4 не проводятся. Экспериментальное исследование параллельной работы трансформаторов проводится на тех же стендах, что и испытание трехобмоточных трансформаторов.

## 5.2. Определение группы соединения обмоток трансформатора

Группа соединения обмоток трансформатора определяется углом сдвига между одноименными первичными и вторичными линейными электродвижущими силами (э.д.с.), измеренным по направлению часовой стрелки. При этом за единицу угла принимается  $30^0$ , т.е. центральный угол, соответствующий одному часу 12-часового циферблата. Например, если вторичные э.д.с. сдвинуты по часовой стрелке на  $90^0$  относительно одноименных первичных, то имеет место группа 3.

Группа соединения зависит от схемы соединения обмоток, направления намотки и от маркировки выводов. Для однофазного трансформатора возможны две группы: 0(12) и 6, для трехфазного трансформатора возможны все 12 групп. При определении групп соединений вектор первичной э.д.с. совмещают с минутной стрелкой, направленной на 0(12) часов, а вектор вторичной э.д.с., совмещенный с часовой стрелкой, своим положением укажет номер группы. В трехфазном трансформаторе четные группы имеют место при схемах соединения  $Y/Y$  и  $\Delta/\Delta$ . Нечетные группы получаются при соединении обмоток по схемам  $Y/\Delta$  и  $\Delta/Y$ . Если обмотки ВН и НН трансформатора имеют одинаковое направление намотки, одинаковую маркировку зажимов и одноименные обмотки находятся на одном стержне, то трансформатор имеет группу соединения обмоток 0(12). Круговым изменением маркировки выводов одной из обмоток можно получить группы 4 и 8, так как при круговой перестановке маркировки выводов одноименные линейные напряжения



поворачиваются на  $120^0$ , т.е. на 4 часа. Изменением маркировки начал с концами обмотки удается изменить группу на 6 часов. Например, из группы 0(12) получается группа 6; из группы 6, путем круговой перестановки маркировки выводов можно получить группы 2 и 10, из группы 11 — группы 3 и 7, а из группы 5 — группы 1 и 9. Заметим, что при изменении маркировки только у двух зажимов не получится никакой группы, так как в этом случае между различными парами линейных э.д.с. будут разные углы, например, между  $AC$  и  $ac$  —  $180^0$ , между  $CB$  и  $cb$  —  $240^0$  (рис. 5.1).

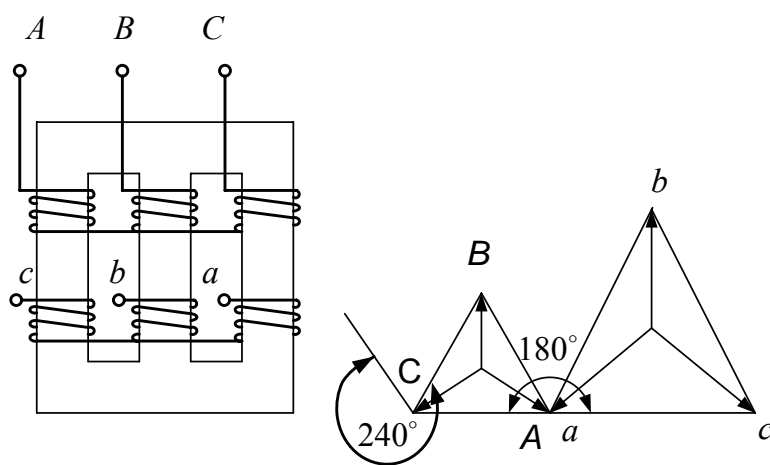


Рис. 5.1. Неправильная маркировка выводов трехфазного трансформатора

Напомним, что ГОСТ рекомендует следующие группы соединения обмоток трехфазных трансформаторов:

- для двухобмоточных трансформаторов  $Y/Y_0 - 12$ ,  $Y/\Delta - 11$ ,  $Y_0/\Delta - 11$ ;
- для трехобмоточных трансформаторов  $Y/Y_0/\Delta = 0(12) - 11$ ,  $Y/\Delta/\Delta = 11 - 11$ .

Рекомендуются следующие способы определения групп соединения обмоток трансформаторов: метод фазометра (прямой метод), метод двух вольтметров, метод постоянного тока, метод моста. Последний метод применяется крайне редко, поэтому здесь будут рассмотрены только первые три метода.

**Метод фазометра.** В этом методе при помощи фазометра непосредственно измеряется угол между одноименными первичной и вторичной э.д.с. трансформатора. На рис. 5.2 дана схема для такого определения.

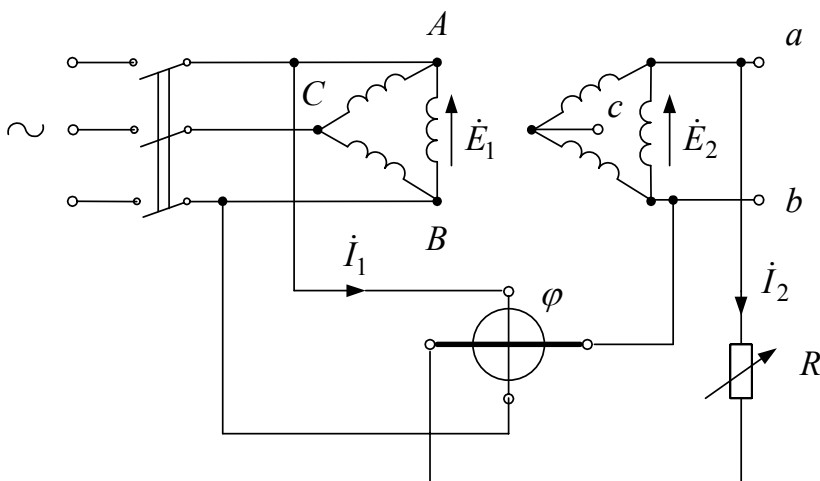


Рис. 5.2. Определение группы соединения обмоток трехфазного трансформатора методом фазометра

Обмотка напряжения фазометра включается на линейное напряжение одной из обмоток трансформатора, а токовая обмотка фазометра через сопротивление  $R$  включается на соответствующее линейное напряжение второй обмотки. Сопротивление  $R$  регулируется так, чтобы по токовой обмотке фазометра проходил номинальный ток. Из рис. 5.2 видно, что токи  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$ , протекающие по обмоткам фазометра, совпадают по фазе соответственно с первичными и вторичными линейными э.д.с. трансформатора, а поэтому угол сдвига между этими токами определит группу соединения обмоток трансформатора.

**Метод двух вольтметров.** Этот метод является наиболее распространенным в лабораторной практике. Для определения группы соединения обмоток трехфазного трансформатора методом двух вольтметров необходимо иметь источник напряжения, например, ИР или автотрансформатор. Особенное внимание нужно обратить здесь на симметрию напряжений, так как невыполнение этого требования может привести к ошибкам в определении группы соединения.

Для определения группы соединений трехфазного трансформатора соединяют проводом два какие-нибудь одноименные вывода первичной и вторичной обмоток, например зажимы  $A$  и  $a$  (рис. 5.3), подводят к первичной обмотке напряжение, удобное по условиям измерений (обычно не более 250 В), и измеряют напряжение между выводами  $b - B$ ,  $b - C$  и  $c - B$ .

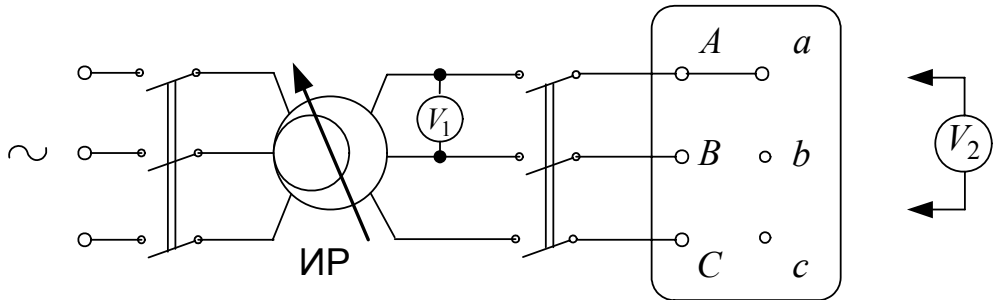


Рис.5.3. Определение группы соединения обмоток трехфазного трансформатора методом двух вольтметров

В трехфазных трансформаторах треугольник  $abc$  линейных э.д.с. вторичной обмотки может занимать относительно треугольника  $ABC$  линейных э.д.с. первичной обмотки двенадцать различных положений соответственно указанным выше двенадцати группам соединения обмоток. При переходе от одной группы соединения к соседней положение треугольника  $abc$  относительно треугольника  $ABC$  изменяется на  $30^\circ$ . В связи с этим получают различные значения напряжений  $U_{bB}$ ,  $U_{bc}$  и  $U_{cB}$ , для расчета которых нужно построить соответствующие диаграммы линейных э.д.с. первичной и вторичной обмоток. Предположим, например, что мы имеем группу соединений 0(12). В этом случае угловое смещение треугольников  $ABC$  и  $abc$  соответствует рис. 5.4.

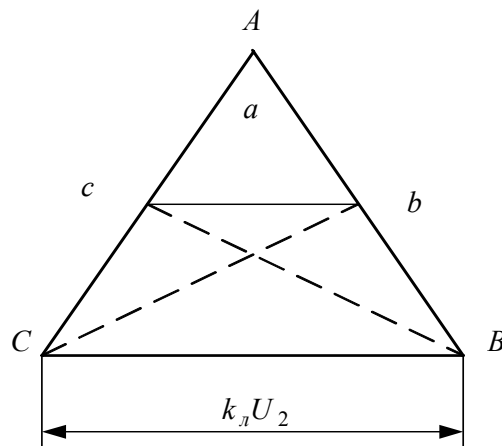


Рис. 5.4. Диаграмма линейных напряжений для определения группы соединений обмоток трехфазного трансформатора

Из рисунка 5.4 следует

$$U_{bB} = U_2(k_L - 1)$$

$$U_{bC} = U_{cB} = m_U \sqrt{(bc)^2 + (bB) - 2(bc)(bB)\cos 120^\circ} = \\ = \sqrt{U_2^2 + U_2^2(k_L - 1)^2 + U_2^2(k_L - 1)} = U_2 \sqrt{1 - k_L + k_L^2},$$

где  $U_2$  – линейное напряжение на выводах обмотки низшего напряжения при данном испытании;  $k_L$  – коэффициент трансформации линейных напряжений;  $m_U$  – масштаб напряжений, в котором построена диаграмма.

Произведя аналогичные расчеты для остальных 11 групп, получим таблицу 5.2. Сравнивая измеренные напряжения  $U_{bB}$ ,  $U_{bC}$  и  $U_{cB}$ , с соответствующими расчетными значениями в табл. 5.2, устанавливают правильность группы соединения обмоток трансформатора.

Для определения группы соединений обмоток однофазных трансформаторов соединяют зажимы  $A$  и  $a$  и измеряют напряжение между зажимами  $X$  и  $x$ . При группе 0(12) векторы э.д.с. обмоток ВН и НН совпадают, при группе 6 эти векторы находятся в противофазе. Следовательно, в первом случае  $U_{Xx} = U_2(k_L - 1)$ , а во втором  $U_{bB} = U_2(k_L + 1)$ .

Описанный метод удобен для проверки группы соединений в том случае, если предполагаемая группа быстро подтверждается. В противном случае приходится вести многочисленные вычисления напряжений по формулам табл. 5.2, что связано с большими затратами времени. Для уменьшения вычислений при определении группы соединений на основании формул табл. 5.2 рассчитана табл. 5.3. В этой таблице приведены подсчитанные значения напряжений  $U_{bB}$ ,  $U_{bC}$  и  $U_{cB}$ , выраженные в процентах от первичного линейного напряжения для различных значений коэффициента трансформации линейных напряжений  $k_L$ . Для определения группы соединений обмоток нужно измерить коэффициент трансформации линейных напряжений трансформатора и напряжения  $U_{bB}$ ,  $U_{bC}$  и

$U_{cB}$ . Затем по табл. 5.3 в колонке, соответствующей измеренному коэффициенту трансформации, найти строку, где расчетные значения указанных напряжений совпадают с их измеренными значениями, выраженными в процентах от первичного линейного напряжения.

Таблица 5.2

Группа соединений	Угловое смещение линейных э.д.с.	Возможное соединение обмоток	$U_{bB}$	$U_{bC}$	$U_{cB}$
0	$0^0$	YY, ΔΔ	$U_2(k_n - 1)$	$U_2\sqrt{1 - k_n + k_n^2}$	$U_2\sqrt{1 - k_n + k_n^2}$
1	$30^0$	YΔ, ΔY	$U_2\sqrt{1 - \sqrt{3}k_n + k_n^2}$	$U_2\sqrt{1 - \sqrt{3}k_n + k_n^2}$	$U_2\sqrt{1 + k_n^2}$
2	$60^0$	YY, ΔΔ	$U_2\sqrt{1 - k_n + k_n^2}$	$U_2(k_n - 1)$	$U_2\sqrt{1 + k_n + k_n^2}$
3	$90^0$	YΔ, ΔY	$U_2\sqrt{1 + k_n^2}$	$U_2\sqrt{1 - \sqrt{3}k_n + k_n^2}$	$U_2\sqrt{1 + \sqrt{3}k_n + k_n^2}$
4	$120^0$	YY, ΔΔ	$U_2\sqrt{1 + k_n + k_n^2}$	$U_2\sqrt{1 - k_n + k_n^2}$	$U_2(k_n + 1)$
5	$150^0$	YΔ, ΔY	$U_2\sqrt{1 + \sqrt{3}k_n + k_n^2}$	$U_2\sqrt{1 + k_n^2}$	$U_2\sqrt{1 + \sqrt{3}k_n + k_n^2}$
6	$180^0$	YY, ΔΔ	$U_2(k_n + 1)$	$U_2\sqrt{1 + k_n + k_n^2}$	$U_2\sqrt{1 + k_n + k_n^2}$
7	$210^0$	YΔ, ΔY	$U_2\sqrt{1 + \sqrt{3}k_n + k_n^2}$	$U_2\sqrt{1 + \sqrt{3}k_n + k_n^2}$	$U_2\sqrt{1 + k_n^2}$
8	$240^0$	YY, ΔΔ	$U_2\sqrt{1 + k_n + k_n^2}$	$U_2(k_n + 1)$	$U_2\sqrt{1 - k_n + k_n^2}$
9	$270^0$	YΔ, ΔY	$U_2\sqrt{1 + k_n^2}$	$U_2\sqrt{1 + \sqrt{3}k_n + k_n^2}$	$U_2\sqrt{1 - \sqrt{3}k_n - k_n^2}$
10	$300^0$	YY, ΔΔ	$U_2\sqrt{1 - k_n + k_n^2}$	$U_2\sqrt{1 + k_n + k_n^2}$	$U_2(k_n - 1)$
11	$330^0$	YΔ, ΔY	$U_2\sqrt{1 - \sqrt{3}k_n + k_n^2}$	$U_2\sqrt{1 + k_n^2}$	$U_2\sqrt{1 - \sqrt{3}k_n + k_n^2}$

Таблица 5.3

Группа соединений	$U_{bB}$ (I), $U_{bC}$ (II), $U_{cB}$ (III)	Коэффициент трансформации линейных напряжений $k_L$									
		1	1,5	2	3	4	5	6	7	8	9-10
		Расчетные значения напряжений $U_{bB}$ , $U_{bC}$ , $U_{cB}$									
1	I	52	54	62	73	79	83	86	88	90	91
	II	52	54	62	73	79	83	86	88	90	91
	III	141	120	112	105	103	102	101	101	101	100,5
2	I	100	88	87	88	90	92	93	94	95	95
	II	0	33	50	67	75	80	83	86	88,5	90
	III	173	145	132	120	115	111	109	108	107	106
3	I	141	120	112	105	103	102	101	101	101	100,5
	II	52	54	62	73	79	83	86	88	90	91
	III	193	161	146	130	122	118	115	113	111	109,5
4	I	173	145	132	120	115	111	109	108	107	106
	II	100	88	87	88	90	92	93	94	95	95
	III	200	167	150	133	125	120	117	114	113	110,5
5	I	193	161	146	130	122	118	115	113	111	109,5
	II	141	120	112	105	103	102	101	101	101	100,5
	III	193	161	146	130	122	118	115	113	111	109,5
6	I	200	167	150	133	125	120	117	114	112,5	110,5
	II	173	145	132	120	115	111	109	108	107	106
	III	173	145	132	120	115	111	109	108	107	106
7	I	193	161	146	130	122	118	115	113	111	109,5
	II	193	161	146	130	122	118	115	113	111	109,5
	III	141	120	112	105	103	102	101	101	101	109,5
8	I	173	145	132	120	115	111	109	108	107	106
	II	200	167	150	133	125	120	117	114	113	110,5
	III	100	88	87	88	90	92	93	94	95	95
9	I	141	120	112	105	103	102	101	101	101	100,5
	II	193	161	149	130	122	118	115	113	111	109,5
	III	52	54	62	73	79	83	87	88	90	91
10	I	100	88	87	88	90	92	93	94	95	95
	II	173	145	132	120	115	111	109	108	107	106
	III	0	33	50	67	75	80	83	86	88	90
11	I	52	54	62	73	79	83	86	88	90	91
	II	141	120	112	105	103	102	101	101	101	100,5
	III	52	54	62	73	79	83	86	88	90	91
12	I	0	33	50	67	75	80	83	86	88	90
	II	100	88	87	88	90	92	93	94	95	95
	III	100	88	87	88	90	92	93	94	95	95

Чтобы полностью избежать вычислений, рекомендуется к обмотке ВН подвести линейное напряжение, равное 100 В, или к обмотке НН подвести такое напряжение, чтобы в обмотке ВН было 100 В (или 100 делений вольтметра). Тогда измеренные тем же вольтметром при неизменной цене деления напряжения  $U_{bB}$ ,  $U_{bC}$  и  $U_{cB}$  одновременно будут являться процентными значениями тех же напряжений.

**Метод постоянного тока.** Этот метод применим для определения групп соединений однофазных трансформаторов и для определения “противоположных” групп (например, 0 и 6) трехфазных трансформаторов при доступности обоих концов фазных обмоток. По этому методу к выводам  $A - X$  трансформатора подводят напряжение постоянного тока порядка (2-12)В и измеряют его полярность магнитоэлектрическим вольтметром. Затем тот же вольтметр переносят на выводы  $a - x$  и определяют полярность этих выводов в момент включения или отключения тока. Если при подаче напряжения на первичную обмотку полярность на выводах  $a - x$  совпадет с полярностью  $A - X$ , а при снятии напряжения оказывается разной, то трансформатор принадлежит к группе соединения 0, в противном случае – к группе 6.

### 5.3. Параллельная работа трансформаторов с одинаковыми коэффициентами трансформации и одинаковыми напряжениями короткого замыкания

Если на параллельную работу включены трансформаторы, принадлежащие к одной группе соединения обмоток, то при равенстве коэффициентов трансформации и напряжений короткого замыкания в трансформаторах будут отсутствовать уравнивающие токи, и нагрузочный ток будет распределяться между трансформаторами прямо пропорционально их номинальным мощностям.

В настоящем пособии предполагается проведение параллельной работы трансформаторов без нагрузки с дальнейшим расчетом нагрузочных токов аналитическим путем. В качестве объекта исследования выступают трехобмоточные трансформаторы с одинаковыми

коэффициентами трансформации и одинаковыми напряжениями короткого замыкания, у которых задействованы только две обмотки – ВН и НН. Обмотка ВН имеет 4 ответвления витков в сторону понижения равными ступенями через 1,5%. Испытания проводятся на тех же стендах, что и испытания трехобмоточного трансформатора (глава 4).

Включение первичных обмоток каждого трансформатора в сеть через свой регулятор напряжения (ИР или автотрансформатор) может привести к появлению сдвига фаз между одноименными напряжениями трансформаторов и связанному с этим уравнительному току. Поэтому перед сборкой схемы необходимо отключить от сети регулятор напряжения, для чего нужно отсоединить перемычки, связывающие напряжение сети и регуляторы напряжения, и в дальнейшем первичные обмотки трансформаторов подключать непосредственно к клеммам питающей сети А В С .

Схема для исследования параллельной работы трансформаторов показана на рис. 5.5. Выключатели  $B_1$  и  $B_2$  подключают обмотки ВН трансформаторов  $T_1$  и  $T_2$  к питающей сети. Обмотки обоих трансформаторов соединены по схеме  $Y/Y - 0(12)$ . Выключатель  $B_3$  подключает трансформатор  $T_1$  на вторичную сеть а б с , а двухполюсный выключатель  $B_4$  и однополюсный  $B_5$  включают трансформатор  $T_2$  на параллельную работу. Амперметры  $A_1$  и  $A_2$ , включенные через трансформаторы тока, измеряют первичные токи трансформаторов  $T_1$  и  $T_2$ . Амперметры  $A_3$  и  $A_4$ , измеряющие вторичные токи этих трансформаторов, щитовые и выбираются на предел по току, составляющий примерно  $25\% I_{2н}$ . Вольтметры  $V_1$  и  $V_2$  измеряют напряжения первичной и вторичной сетей трансформаторов и подбираются в соответствии с номинальными напряжениями их первичной и вторичной обмоток. При сборке схемы следует строго выполнять подключение линий А В С сети к соответствующим маркировкам первичных обмоток трансформаторов. Точно также клеммы а б с вторичной обмотки трансформатора  $T_1$  необходимо подсоединить к соответствующим клеммам вторичной обмотки трансформатора  $T_2$ .



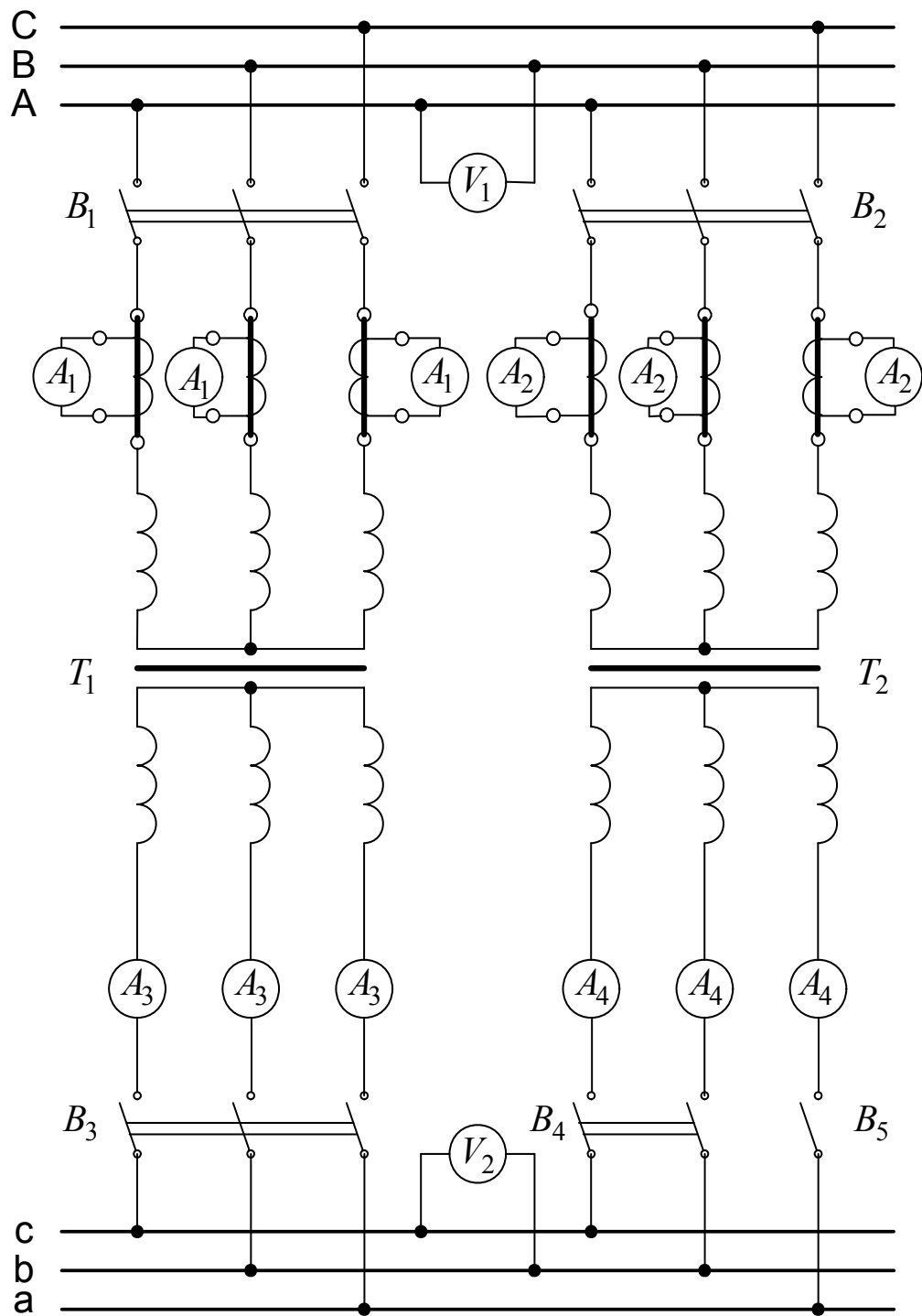


Рис. 5.5. Схема испытания параллельной работы трехфазных двухобмоточных трансформаторов

После проверки схемы преподавателем, включают выключатели  $B_1$  и  $B_2$ . При этом амперметры  $A_1$  и  $A_2$  будут измерять намагничивающие токи трансформаторов. Затем замыкают выключатель  $B_3$ . Перед подключением на параллельную работу трансформатора  $T_2$  необходимо проверить соответствие фаз вторичных обмоток этого трансформатора и трансформатора  $T_1$ . Для этого замыкают  $B_5$  и вольтметром со щупами замеряют напряжения на ножах соответствующих фаз выключателя  $B_4$ . Если эти напряжения равны нулю, то соответствие соблюдено. В противном случае они будут равны номинальным вторичным напряжениям (при номинальных первичных). Тогда необходимо отключить  $B_3$  и поменять местами подключенные к  $B_4$  выводы трансформатора  $T_1$  или  $T_2$ . После чего снова включить  $B_3$ , опять проверить фазировку вторичных обмоток трансформаторов, и если она правильная, замкнуть  $B_4$ . После замыкания  $B_5$  и  $B_4$  в силу одинаковости коэффициентов трансформации и напряжений короткого замыкания трансформаторов уравнивающие токи во вторичных цепях будут отсутствовать и амперметры  $A_3$  и  $A_4$  покажут токи близкие к нулю.

Поскольку мощности трансформаторов одинаковы, и кроме того, у них одинаковы коэффициенты трансформации и напряжения короткого замыкания  $u_k$ , а также их составляющие  $u_{ka}$  и  $u_{kr}$ , то нагрузка трансформаторов будет одинаковой. Токи нагрузки трансформаторов  $I_{2I}$ ,  $I_{2II}$  в зависимости от тока сети  $I_c = I_{2I} + I_{2II}$  могут быть нанесены на график  $I_{2I}$ ,  $I_{2II} = f(I_c)$  в амперах или в относительных единицах, вычисляемых по следующим формулам

$$I_{2I}^* = \frac{I_{2I}}{I_{2нI}}; \quad I_{2II}^* = \frac{I_{2II}}{I_{2нII}}; \quad I_c^* = \frac{I_c}{I_{2нI} + I_{2нII}} \quad (5.1)$$

В последнем случае зависимости  $I_{2I}$ ,  $I_{2II} = f(I_c)$  будут представляться одной прямой линией, наклонённой к оси абсцисс под углом  $45^\circ$  (рис. 5.6а)

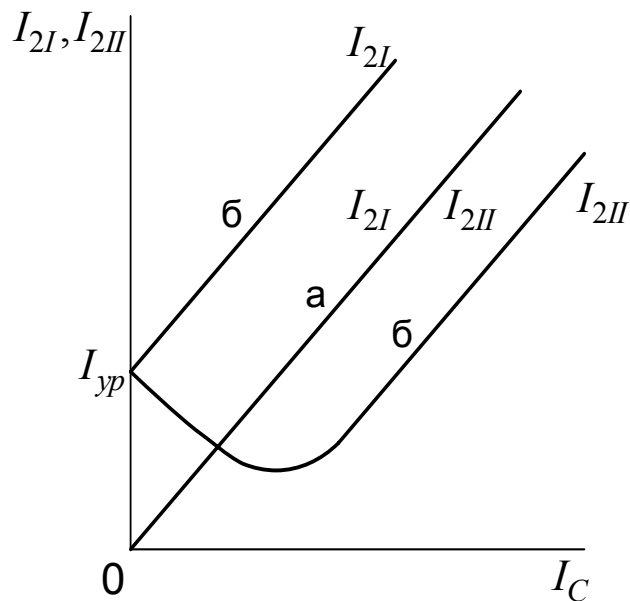


Рис. 5.6. Характеристики параллельной работы трансформаторов:

$$а - k_I = k_{II}$$

$$б - k_I \neq k_{II}$$

#### 5.4. Параллельная работа трансформаторов с неодинаковыми коэффициентами трансформации

Трансформаторы, предназначенные для параллельной работы должны иметь очень близкие значения коэффициентов трансформации. Допуск в расхождении коэффициентов трансформации согласно ГОСТу равен  $\pm 1\%$  для трансформаторов с коэффициентом трансформации меньше трех;  $\pm 0,5\%$  для всех прочих трансформаторов. Такие жесткие требования объясняются тем, что при параллельном включении трансформаторов с разными коэффициентами трансформации по их обмоткам протекают уравнивающие токи, нагревающие обмотки и снижающие к.п.д. трансформаторов.

В настоящем пособии для оценки влияния неравенства коэффициентов трансформации на уравнивающие токи предусмотрено изменение коэффициента трансформации любого трансформатора от  $1,5\%$  до  $6\%$  ступенями через  $1,5\%$  путем уменьшения числа витков обмотки ВН. На трансформаторе  $T_2$  изменяют коэффициент трансформации на

величину, указанную преподавателем, а затем проводят опыт, аналогично предыдущему. Измеряют и заносят в протокол испытаний все первичные и вторичные токи трансформаторов. Очевидно, что токи, измеренные амперметрами  $A_3$  и  $A_4$  являются уравнительными токами и будут равны по величине. Эти токи трансформируются в первичные обмотки и будут намагничивающими по отношению к трансформатору  $T_2$  и размагничивающими по отношению к трансформатору  $T_1$ . В результате токи, измеренные амперметрами  $A_2$ , будут больше токов, измеренных амперметрами  $A_1$ .

С учетом того, что испытываемые трансформаторы имеют одинаковые номинальные мощности, величину уравнительного тока, протекающего в обмотках параллельно включенных трансформаторов при отключенной нагрузке, можно рассчитать по формуле

$$I_{yp}^* = \frac{U_1^* \Delta k^*}{z_{\kappa I}^* + z_{\kappa II}^*}, \quad (5.2)$$

где  $I_{yp}^*$  – уравнительный ток, выраженный в долях номинального тока первого трансформатора;  $U_1^*$  – первичное напряжение в долях номинального;  $z_{\kappa I}^*, z_{\kappa II}^*$  – сопротивления короткого замыкания первого и второго трансформаторов в процентах;  $\Delta k^*$  – выраженная в процентах разность между коэффициентами трансформации двух трансформаторов

$$\Delta k^* = \frac{k_I - k_{II}}{\sqrt{k_I k_{II}}} \cdot 100\%. \quad (5.3)$$

Уравнительный ток отстает от вторичного напряжения  $U_2$  на угол  $\varphi_\kappa$ , величина которого может быть вычислена как

$$\operatorname{tg} \varphi_\kappa = \frac{x_{\kappa I} + x_{\kappa II}}{r_{\kappa I} + r_{\kappa II}}, \quad (5.4)$$

где  $x_{\kappa I}, x_{\kappa II}$  – индуктивные;  $r_{\kappa I}, r_{\kappa II}$  – активные сопротивления короткого замыкания обоих трансформаторов. Поскольку, как уже отмечалось, испытываемые трансформаторы имеют одинаковые напряжения короткого замыкания, то у них  $z_{\kappa I}^* = z_{\kappa II}^* = u_{\kappa I} = u_{\kappa II} = u_\kappa$ , а

$\varphi_{кI} = \varphi_{кII} = \varphi_{к}$ . Эти данные могут быть заимствованы из опыта трехфазного короткого замыкания трехобмоточного трансформатора при питании обмотки ВН и замкнутой обмотке НН и в дальнейшем использованы при расчетах и построениях.

Уравнительный ток, вызванный неравенством коэффициентов трансформации, выравнивает напряжение на вторичных выводах обоих трансформаторов, благодаря чему ток нагрузки распределяется между трансформаторами так же, как и при равенстве коэффициентов трансформации, т.е. прямо пропорционально их номинальным мощностям. Обозначив токи нагрузки трансформаторов через  $I_{cI}$  и  $I_{cII}$ , получим

$$\frac{I_{cI}}{I_{cII}} = \frac{S_{нI}}{S_{нII}}, \quad (5.4)$$

$$I_{cI} + I_{cII} = I_c, \quad (5.5)$$

где  $I_c$  – суммарный ток нагрузки.

Из соотношений (5.4-5.5) имеем

$$I_{cI} = I_c \frac{S_{нI}}{S_{нI} + S_{нII}}, \quad (5.6)$$

$$I_{cII} = I_c \frac{S_{нII}}{S_{нI} + S_{нII}}. \quad (5.7)$$

В нашем случае  $S_{нI} = S_{нII} = S_n$  и, следовательно,  $I_{cI} = I_{cII} = \frac{1}{2} I_c$ ;

$$I_{cII} = I_{cI} = \frac{1}{2} I_c.$$

Величина уравнительного тока практически не меняется, когда к параллельно включенным трансформаторам подключается нагрузка. Поэтому токи в обмотках параллельно включенных нагруженных трансформаторов можно получить геометрическим сложением векторов уравнительного тока с током нагрузки. На рис. 5.7 приведена векторная диаграмма, позволяющая определить указанным способом токи нагрузки

$I_{2I}, I_{2II}$  обоих трансформаторов. По оси ординат отложено вторичное напряжение  $U_2$ ;  $\varphi_c$  – угол сдвига между вторичным напряжением и током нагрузки, определяемый ее характером. Уравнительный ток в обмотках первого и второго трансформаторов протекает в противоположных направлениях, поэтому для разных трансформаторов он изображен равными, но противоположно направленными векторами  $\dot{I}_{yp} = \dot{I}_{ypII} = -\dot{I}_{ypI}$ . Заметим, что в первом квадранте откладывается уравнительный ток, протекающий по обмоткам трансформатора, имеющего более высокое вторичное напряжение при отключенных  $B_3, B_4$  и  $B_5$  (рис.5.5). В случае, показанном на рис. 5.7,  $k_I > k_{II}$  и трансформаторы понижающие, т.е.  $U_{20II} > U_{20I}$ . Для подсчета токов  $I_{2I}, I_{2II}$  можно использовать выражения

$$I_{2I} = \sqrt{I_{cI}^2 + I_{\delta\delta}^2 \mp 2 I_{cI} I_{\delta\delta} \cos(\varphi_{\delta} - \varphi_c)}, \quad (5.8)$$

$$I_{2II} = \sqrt{I_{cII}^2 + I_{\delta\delta}^2 \pm 2 I_{cII} I_{\delta\delta} \cos(\varphi_{\delta} - \varphi_c)}. \quad (5.9)$$

Выбор знака “+” или “-” перед удвоенным произведением в формулах (5.8-5.9) определяется взаимным расположением векторов уравнительного тока и тока нагрузки. Если для данного трансформатора эти токи расположены в одном квадранте, то выбирают знак “+”, если в разных, то знак “-”. Задаваясь разными значениями токов  $I_{cI}$  и  $I_{cII}$ , например с интервалом 20%, можно по (5.8-5.9) рассчитать токи  $I_{2I}, I_{2II}$ . Эти же токи можно получить из построения диаграммы (рис. 5.7), задаваясь несколькими значениями тока  $I_c$ . Диаграмма может быть построена как в именованных, так и в относительных единицах. Определенные из диаграммы или по формулам зависимости  $I_{2I}, I_{2II} = f(I_c)$  наносятся на график (рис. 5.6б).

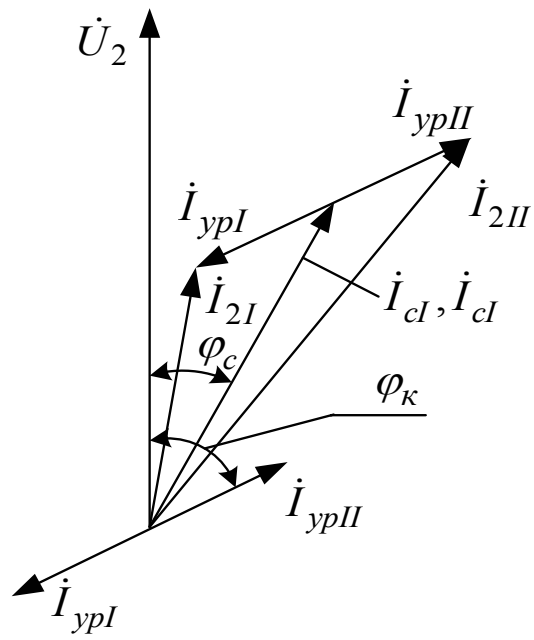


Рис. 5.7. Определение величины тока в параллельно работающих трансформаторах при неравенстве коэффициентов трансформации.