

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

С. В. СВЕТЛИЧНЫЙ

ТРАНСФОРМАТОРЫ

ПРАКТИКУМ

Благовещенск
Дальневосточный ГАУ
2023

УДК 621.314
ББК 31.261.8
С24

Рецензент

*Александр Николаевич Козлов, кандидат технических наук,
доцент, доцент кафедры энергетики
Амурского государственного университета*

*Рекомендовано к печати методическим советом
электроэнергетического факультета
Дальневосточного государственного аграрного университета*

Светличный, С. В. Трансформаторы : практикум / С. В. Светличный ;
С24 Дальневост. гос. аграр. ун-т. – Благовещенск : Дальневосточный
ГАУ, 2023. – 134 [1] с.

ISBN 978-5-9642-0591-3

Практикум предназначен для организации выполнения лабораторных работ по дисциплине «Электрические машины». Он содержит описание и методику выполнения лабораторных работ по электрическим машинам раздела «Трансформаторы» указанной дисциплины. Представлены теоретические сведения, основные формулы для расчета и построения основных характеристик трансформаторов, а также тесты для проверки знаний.

Практикум предназначен для обучающихся очной и заочной форм обучения, обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», и очной формы обучения, обучающихся по направлению 35.03.06 «Агроинженерия».

УДК 621.314
ББК 31.261.8

ISBN 978-5-9642-0591-3

© Светличный С. В., 2023
© ФГБОУ ВО Дальневосточный
государственный аграрный университет, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Организация и порядок проведения лабораторных работ	5
Основные требования по электробезопасности	8
Составление отчета	9
Лабораторная работа 1. Устройство, классификация и маркировка трансформаторов	10
Лабораторная работа 2. Исследование однофазного трансформатора	43
Лабораторная работа 3. Исследование трехфазного трансформатора	70
Лабораторная работа 4. Опытное определение групп соединения трехфазного трансформатора	93
Лабораторная работа 5. Исследование параллельной работы трехфазных трансформаторов	113
Список рекомендуемой литературы	130
Приложение А. Условно-графические обозначения элементов электрических схем	131

ВВЕДЕНИЕ

Практикум «Трансформаторы» составлен в соответствии с программой дисциплины «Электрические машины» для обучающихся очной и заочной форм обучения по направлению 13.03.02. «Электроэнергетика и электротехника» и очной формы обучения по направлению 35.03.06 «Агроинженерия».

Представленный материал содержит общие теоретические сведения, описание и методику выполнения лабораторных работ. Его использование позволит приобрести навыки по сборке электрических схем для исследования параметров и характеристик трансформаторов. После описания каждой работы представлены тесты для проверки знаний. Имеется список рекомендуемой литературы и приложение с условно-графическими обозначениями элементов электрических схем.

Освоение данной дисциплины поможет обучающимся в приобретении следующих компетенций:

1. Общепрофессиональная компетенция «ОПК-4»: способность использования методов анализа и моделирования электрических цепей и электрических машин.

2. Профессиональная компетенция «ПК-2»: способность организовать монтаж, наладку, эксплуатацию энергетического и электротехнического оборудования, машин и установок в сельскохозяйственном производстве.

3. Профессиональная компетенция «ПК-4»: способность выполнять работы по повышению эффективности энергетического и электротехнического оборудования, машин и установок в сельскохозяйственном производстве.

ОРГАНИЗАЦИЯ И ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Лабораторные занятия в лаборатории электрических машин представляют собой один из важнейших элементов изучения курса электрических машин. В первую очередь, студент должен твердо уяснить цель задания и отчетливо представлять назначение устройства, его условное обозначение на схемах, а также принцип действия и характеристики. Чтобы качественно выполнить лабораторные работы, студентам необходимо тщательно подготовиться к ним:

- 1) повторить теоретический материал по конспекту и по учебнику;
- 2) ознакомиться с описанием лабораторной работы; в специальной рабочей тетради записать название и номер работы; вычертить таблицы для записей показаний приборов и результатов расчетов; подготовить миллиметровую бумагу, если требуются графические построения;
- 3) выяснив цель работы, четко представить себе поставленную задачу и способы ее достижения, продумать ожидаемые результаты опытов;
- 4) сделать предварительный домашний расчет (если требуется в задании);
- 5) ответить устно или письменно на контрольные вопросы.

Для работы в лаборатории электрических машин группа студентов делится на бригады из трех – четырех человек, так как иногда бывает необходимо одновременно измерять три – четыре величины, а большее число участников вызывает тесноту у рабочего места и мешает активному участию в работе всех членов бригады. Допущенная к работе бригада приступает к ознакомлению с рабочим стендом. Студенты знакомятся с электрической машиной, пусковыми и регулировочными реостатами. Записывают данные технического паспорта (тип, номер и номинальные значения напряжения, тока,

мощности, частоты вращения, частоты тока, режима работы). Составляют перечень электроизмерительных приборов с указанием системы приборов, номинальных значений измеряемых величин, класса точности [6].

В большинстве случаев каждый стенд лаборатории оснащен постоянным набором пусковой и регулировочной аппаратуры, а также электроизмерительных приборов. Задача студентов состоит в том, чтобы разобраться, какие приборы следует включить в отдельные цепи принципиальной схемы опыта. Иногда один и тот же стенд служит рабочим местом для нескольких разнородных работ. Тогда перед студентами стоит более трудная, но и более интересная задача – выбрать из имеющейся аппаратуры именно ту, которая необходима для данной работы.

У всех электрических машин, реостатов и электроизмерительных приборов до соединения их в схему следует установить назначение их выводов, а у реостатов, кроме того, выяснить, какие положения рукояток подвижных контактов соответствуют пусковому и рабочему режимам (пуск, ход). Провода монтажной схемы по сечению должны соответствовать тем токам, которые будут в них при работе, а также иметь необходимую длину. Все места соединений проводов с элементами схемы должны иметь хороший контакт и надежно закрепляться в зажимах.

Сборку монтажных цепей удобнее производить следующим образом. Руководствуясь принципиальной схемой, нужно, начав сборку главной последовательной цепи от одного зажима источника энергии, закончить ее у другого зажима источника. К этой цепи в соответствующих принципиальной схеме местах присоединяются все параллельные цепи. Каждая собранная схема обязательно должна быть показана руководителю работ лаборатории, и только после разрешения она может быть включена под напряжение.

При включении схемы под напряжение необходимо сразу сосредоточить внимание на показаниях электроизмерительных приборов. Если стрелка прибора не отклоняется, то это указывает или на обрыв в цепи, или на неправильное присоединение зажимов прибора. После этого производят требуемый опыт и записывают показания приборов в таблицы рабочих тетрадей. Для построения графика необходимо сделать пять – шесть таких отчетов. По окончании опыта все записи сводят в общую таблицу, показанную в задании. Записи показаний технических электроизмерительных приборов производятся в тех единицах, которые нанесены на шкале прибора (вольтах, амперах, ваттах и т. д.) [6].

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ ПО ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ

1. Перед началом работы в лаборатории, студенты проходят обязательный инструктаж по электробезопасности и расписываются в специальном журнале.

2. При сборке электрической схемы необходимо соблюдать следующие требования:

1) сборку цепи присоединения в схеме выполнять только при отключенном рубильнике (автомате) сети;

2) соединительные провода должны иметь исправные наконечники, хорошую изоляцию и обеспечивать надежный контакт;

3) соединительные провода, приборы и аппараты необходимо размещать так, чтобы исключить при работе случайные прикосновения к токоведущим частям, и чтобы провода не перегибались, а также не скручивались петлями.

3. Включение электрической схемы под напряжение производится только после проверки преподавателем и с его разрешения.

4. При выполнении работы должно быть исключено прикосновение к токоведущим частям схемы, а также к корпусам машины. Необходимо обращать особое внимание на вращающиеся части машин, чтобы исключить захватывание ими частей одежды, соединительных проводов.

5. При появлении неисправностей при работе схемы исследования, электрического оборудования и измерительных приборов необходимо немедленно отключить рубильник питания стенда.

6. Если схема содержит конденсаторы, то после ее отключения необходимо разрядить конденсаторы, замкнув накоротко их выводы.

7. Студенты должны знать правила оказания первой помощи пострадавшему от поражения электрическим током и уметь применять эти правила на практике [6].

СОСТАВЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет является документом о проделанном эксперименте, поэтому он должен иметь все необходимые сведения для проверки результатов опыта и расчета. Составление отчета является индивидуальной домашней работой каждого члена бригады. Отчет должен содержать название и номер лабораторной работы; название учебного заведения и лаборатории; шифр группы; фамилию студента; дату выполнения работы. Кроме этого, должны быть указаны цель работы; приборы и аппараты; схема; программа работы; расчетные формулы или сами расчеты; таблицы результатов; графики. Особое внимание нужно уделять графикам зависимостей между величинами, ибо они являются наглядным результатом работы, графическим ответом на вопросы, поставленные экспериментатором.

При вычерчивании графиков следует учитывать, что всякое измерение имеет случайные погрешности (истинное значение измеряемой величины остается неизвестным и вместо него принимают некоторые ее значения, признаваемые за наиболее приближающиеся к истинному значению). Поэтому не следует проводить кривые через все экспериментальные точки. На графике необходимо проводить плавные непрерывные кривые, которые проходят среди экспериментальных точек. Отступление некоторых точек от плавной кривой называют «разбросом точек»; величина разброса при наблюдении закономерных явлений определяет тщательность проведения эксперимента.

В заключение всей работы должен быть сделан вывод. Он касается выполнения поставленной задачи; подтверждения опытным путем тех законов, правил и формул, которые изучались на теоретических занятиях. После каждой лабораторной работы проводится зачет. Обучающийся должен знать теорию по данной теме; уметь собрать цепь и рассказать ход лабораторной работы; пояснить, как проводился расчет; уметь проанализировать полученные результаты и объяснить причины расхождения расчетных и опытных данных. Такая защита лабораторных работ проводится систематически, как правило, на следующем лабораторном занятии [6].

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1. УСТРОЙСТВО, КЛАССИФИКАЦИЯ И МАРКИРОВКА ТРАНСФОРМАТОРОВ

Цель работы: ознакомиться с устройством, принципом работы трансформатора, конструкцией; изучить назначение трансформаторов и их классификацию; изучить назначение активных частей трансформатора: магнитопровода и обмоток; изучить системы охлаждения, климатическое исполнение, категории размещения и маркировку трансформаторов.

Программа работы

1. Изучить принцип работы, назначение трансформаторов.
2. Изучить классификацию трансформаторов.
3. Изучить конструкцию и устройство трансформаторов.
4. Изучить системы охлаждения трансформаторов.
5. Изучить маркировку трансформаторов.
6. Составить отчет.

Общие сведения

Трансформатором называется статический (то есть без движущихся частей) электромагнитный аппарат, имеющий две (или более) индуктивно связанные обмотки и предназначенный для преобразования посредством явления электромагнитной индукции электрической энергии переменного тока одного напряжения в электрическую энергию переменного тока другого напряжения при неизменной частоте. Трансформаторы широко применяются в системах передачи и распределения электроэнергии. Для передачи энергии на большие расстояния это напряжение повышают с помощью силовых трансформаторов до 110, 220, 330, 500, 750 и 1 150 кВ в зависимости от расстояния

и передаваемой мощности. Далее на распределительных подстанциях напряжение понижают до 6, 10 или 35 кВ. Наконец, к непосредственному потребителю электрическая энергия подводится напряжением 0,4 или 0,23 кВ. Таким образом, суммарная мощность силовых трансформаторов, установленных в энергетических системах, в несколько раз превышает установленную мощность генераторов электрических станций [7].

Известно, что передача электроэнергии на дальние расстояния осуществляется при высоком напряжении (до 500 кВ и более), благодаря чему значительно уменьшаются электрические потери в линии электропередачи. Получить такое высокое напряжение в генераторе невозможно, поэтому электроэнергия после генератора подается на повышающий трансформатор, в котором напряжение увеличивается до требуемого значения. Это напряжение должно быть тем выше, чем больше протяженность линии электропередачи и чем больше передаваемая по этой линии мощность. Например, при передаче электроэнергии мощностью 10^6 кВт на расстояние 1 000 км необходимо напряжение 500 кВ. В местах распределения электроэнергии между потребителями устанавливают понижающие трансформаторы, которые понижают напряжение до требуемого значения. И, наконец, в местах потребления электроэнергии напряжение еще раз понижают посредством трансформаторов до 220, 380 или 660 В и подают непосредственно потребителям – на рабочие места предприятий и в жилые помещения. Таким образом, электроэнергия переменного тока в процессе передачи от электростанции к потребителям подвергается трех, а иногда и четырехкратному трансформированию [7, 8].

Напряжение генераторов на электрических станциях не превышает, как правило, 24 кВ. При передаче электрической энергии на высоком напряжении и небольшом токе (при одной и той же мощности), с увеличением напряжения сила тока соответственно уменьшается, и уменьшаются потери мощности на нагрев проводов, которые пропорциональны квадрату тока (1.1):

$$P = I^2 R \quad (1.1)$$

где P – потери на нагрев проводов, Вт;

I – сила тока в проводе, А;

R – сопротивление проводов, Ом.

Уменьшение потерь мощности на нагрев проводов позволяет применять провода меньших сечений, а также изготавливать провода не из меди, а из более дешевых материалов – стальных и сталеалюминевых проводов. Этим достигается снижение стоимости линий электропередач и экономия цветных металлов.

Принцип действия трансформаторов

В основе работы трансформатора лежит явление электромагнитной индукции, открытое в 1831 г. английским ученым М. Фарадеем, который доказал, что при всяком изменении магнитного потока (Φ), пронизывающего проводящий контур, в нем возникает (индуцируется) электродвижущая сила (ЭДС), пропорциональная скорости изменения этого потока во времени (1.2):

$$e \sim \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.2)$$

Петербургский профессор Э. Х. Ленц в 1833 г. доказал, что индуцируемая ЭДС направлена так, что вызванный ею ток препятствует изменению магнитного потока. Правило Ленца позволяет для проводящего контура с несколькими витками, записать закон электромагнитной индукции (1.3):

$$e = -W \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.3)$$

Простейший силовой трансформатор состоит из магнитопровода (сердечника), выполненного из ферромагнитного материала (обычно листовая электротехническая сталь), и двух обмоток, расположенных на стержнях магнитопровода (рис. 1.1). Одна из обмоток, которую называют

первичной, присоединена к источнику переменного тока G на напряжение U_1 . К другой обмотке, называемой вторичной, подключен потребитель Z_n .

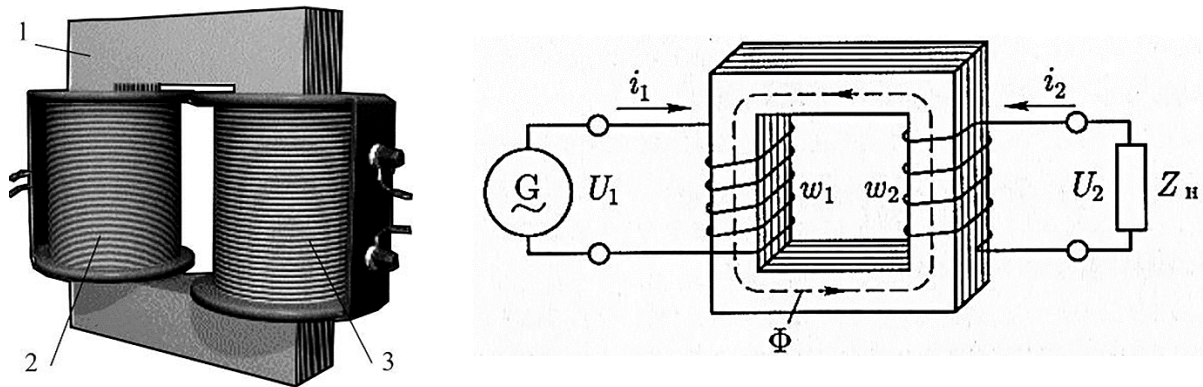


Рисунок 1.1 – Внешний вид и электромагнитная схема трансформатора

Основные части трансформатора (рис. 1.1): сердечник 1 (магнитопровод) из ферромагнитного материала, например, из листовой электротехнической стали, и две обмотки 2 и 3 , индуктивно связанные при помощи основного магнитного потока [2, 7].

Первичная и вторичная обмотки трансформатора не имеют электрической связи друг с другом, и мощность из одной обмотки в другую передается электромагнитным путем. Магнитопровод, на котором расположены эти обмотки, служит для усиления индуктивной связи между обмотками.

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. При подключении первичной обмотки к источнику переменного тока в витках этой обмотки протекает переменный ток i_1 , который создает в магнитопроводе переменный магнитный поток Φ . Замыкаясь в магнитопроводе, этот поток сцепляется с обеими обмотками (первичной и вторичной) и индуцирует в них ЭДС: в первичной обмотке – ЭДС самоиндукции; во вторичной обмотке – ЭДС взаимной индукции.

При подключении нагрузки Z_n к выводам вторичной обмотки трансформатора под действием ЭДС e_2 в цепи этой обмотки создается ток i_2 , а на выводах вторичной обмотки устанавливается напряжение U_2 . В повышающих трансформаторах – $U_2 > U_1$, а в понижающих – $U_2 < U_1$.

Из рисунка 1.1 видно, что ЭДС e_1 и e_2 , наводимые в обмотках трансформатора, отличаются друг от друга лишь за счет разного числа витков W_1 и W_2 в обмотках, поэтому, применяя обмотки с требуемым соотношением витков, можно изготовить трансформатор практически на любое отношение напряжений. Обмотку трансформатора, подключенную к сети с более высоким напряжением, называют обмоткой высшего напряжения (ВН); обмотку, присоединенную к сети меньшего напряжения, – обмоткой низшего напряжения (НН).

На рисунке 1.1 показан внешний вид и электромагнитная схема однофазного трансформатора.

Трансформаторы обладают свойством обратимости: один и тот же трансформатор можно использовать в качестве повышающего и понижающего. Но обычно трансформатор имеет определенное назначение: либо он повышающий, либо – понижающий.

Трансформатор – это аппарат переменного тока. Если же его первичную обмотку подключить к источнику постоянного тока, то магнитный поток в магнитопроводе трансформатора также будет постоянным, как по величине, так и по направлению $[(d\Phi/dt) = 0]$, поэтому в обмотках трансформатора не будет наводиться ЭДС, а, следовательно, электроэнергия из первичной обмотки не будет передаваться во вторичную обмотку [1, 2, 7].

Классификация трансформаторов

Трансформаторы в электрических установках различают по следующим признакам:

1. По назначению:

-
- 1) силовые трансформаторы, служащие для передачи и распределения электрической энергии;
 - 2) силовые трансформаторы специального назначения, предназначенные для питания электрических печей (для выплавки стали); трансформаторы для выпрямительных установок, сварочные трансформаторы;
 - 3) импульсные трансформаторы – выдающие короткие импульсы напряжения;
 - 4) пик-трансформаторы – для управления тиристорами;
 - 5) стабилизирующие трансформаторы, предназначенные для стабилизации напряжения;
 - 6) трансформаторы для изменения частоты – умножители частоты;
 - 7) фазорегуляторы для изменения числа фаз;
 - 8) индукционные регуляторы (вариаторы) для регулировки напряжения;
 - 9) реакторы для регулирования высокого напряжения;
 - 10) измерительные трансформаторы тока;
 - 11) измерительные трансформаторы напряжения;
 - 12) разделительные трансформаторы;
 - 13) испытательные трансформаторы, применяющиеся при испытании изоляции и высоковольтной аппаратуры;
 - 14) автотрансформаторы – для изменения напряжения в небольших пределах (латры).

2. По числу фаз:

- 1) однофазные (О);
- 2) двухфазные;
- 3) трехфазные (Т);
- 4) многофазные.

3. По системе охлаждения:

- 1) сухие (С);

2) масляные (М);

3) с негорючим жидким диэлектриком.

4. По числу обмоток на одну фазу:

1) однообмоточные;

2) двухобмоточные;

3) трехобмоточные;

4) многообмоточные.

5. По форме магнитопровода:

1) стержневые;

2) броневые;

3) бронестержневые;

4) тороидальные.

Классификация трансформаторов по габаритам представлена в таблице 1.1 [1, 4, 5, 7].

Таблица 1.1 – Габариты трехфазных силовых трансформаторов

Габарит	Диапазон мощностей, кВА	Класс напряжения, кВ
1	до 100	до 35
2	от 100 до 1 000	до 35
3	от 1 000 до 6 300	до 35
4	свыше 6 300	до 35
5	свыше 8 000	до 110
6	от 8 000 до 32 000	до 330
7	от 32 000 до 200 000	до 330
8	свыше 200 000	свыше 330

Устройство трансформаторов

Современный трансформатор состоит из различных конструктивных элементов: магнитопровода, обмоток, бака, крышки с выводами, расширителя с воздухоосушителем, термосифонного фильтра, реле сигнализации и защиты, арматуры и подъемных устройств. *Магнитопровод с насаженными на его стержни обмотками составляет активную часть трансформатора.*

Остальные элементы трансформатора называют **неактивными (вспомогательными) частями**. Рассмотрим подробнее конструкцию основных частей трансформатора.

Магнитопровод (сердечник из электротехнической стали) в трансформаторе выполняет *четыре функции*:

- 1) образует магнитную цепь, по которой замыкается основной магнитный поток трансформатора;
- 2) служит для увеличения основного магнитного потока трансформатора в 500–5 000 раз;
- 3) является основой для установки и крепления обмоток, отводов, переключателей;
- 4) является радиатором для себя и для обмоток из-за своих больших габаритов и массы.

Магнитопровод имеет шихтованную конструкцию, то есть он состоит из тонких (обычно толщиной 0,5 мм) стальных пластин, покрытых с двух сторон изолирующей пленкой (например, лаком). Такая конструкция магнитопровода обусловлена стремлением ослабить вихревые токи, наводимые в нем переменным магнитным потоком, а, следовательно, уменьшить величину магнитных потерь энергии в трансформаторе. Части магнитопровода с обмотками называют стержнями, а без обмоток – ярами [2, 7, 8].

Силовые трансформаторы выполняются с магнитопроводами трех типов: стержневого, броневого и бронестержневого.

В магнитопроводе стержневого типа (рис. 1.2, а) вертикальные стержни 1, на которых расположены обмотки 2, сверху и снизу замкнуты ярами 3. На каждом стержне расположены обмотки соответствующей фазы и проходит магнитный поток этой фазы: в крайних стержнях – потоки Φ_A и Φ_C , а в среднем стержне – поток Φ_B .

На рисунке 1.2, б показан внешний вид магнитопровода. При этом стержни имеют ступенчатое сечение, вписываемое в круг диаметром d (рис. 1.3). Стержни трансформаторов большой мощности имеют много ступеней, что обеспечивает лучшее заполнение сталью площади внутри обмотки. Для лучшей теплоотдачи иногда между отдельными пакетами стержня оставляют воздушные зазоры шириной 5–6 мм, служащие вентиляционными каналами.

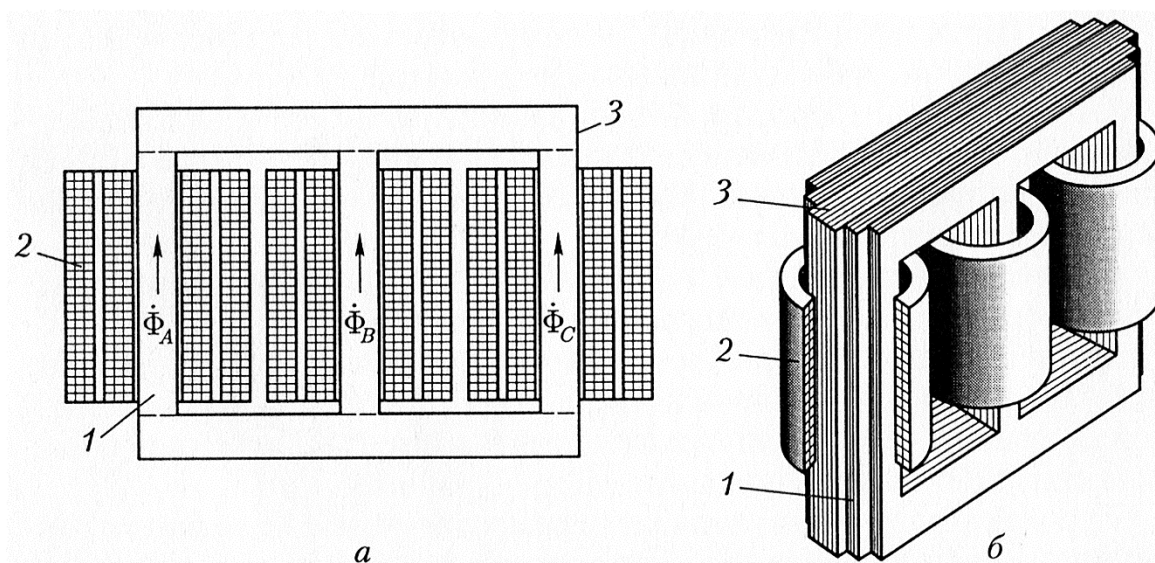


Рисунок 1.2 – Магнитопровод трехфазного трансформатора стержневого типа с обмотками

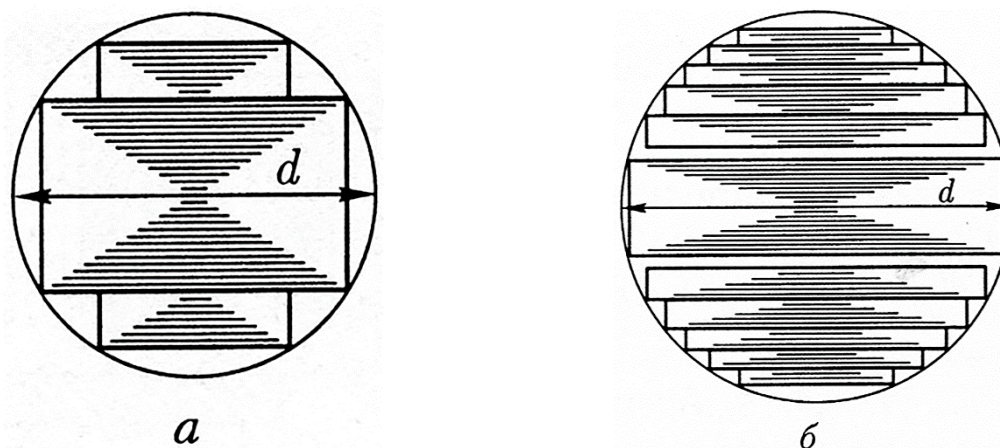


Рисунок 1.3 – Форма сечения стержней трансформаторов
а) малой и средней мощности; б) большой мощности

Магнитопровод броневое типа представляет собой разветвленную конструкцию со стержнем и ярами, частично прикрывающими («бронирующими») обмотки (рис. 1.4). Магнитный поток в стержне магнитопровода броневое типа в два раза больше, чем в ярах, каждое из которых имеет сечение, вдвое меньшее сечения стержня. Из-за технологической сложности изготовления магнитопроводы броневое типа не получили широкого распространения; их применяют лишь в силовых трансформаторах весьма малой мощности (радиотрансформаторы).

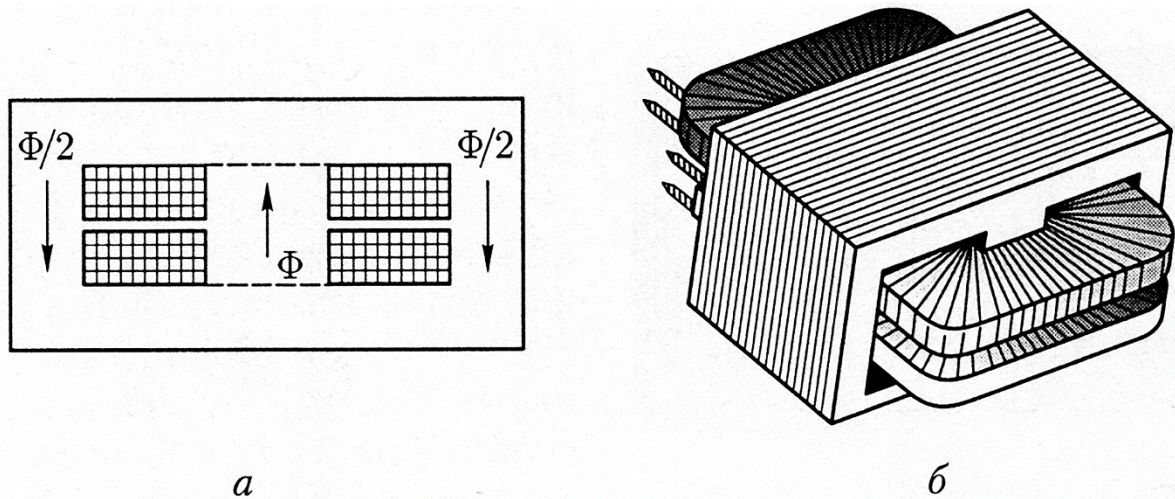


Рисунок 1.4 – Однофазный трансформатор броневое типа
а) устройство; б) внешний вид

В трансформаторах большой мощности применяют бронестержневую конструкцию магнитопровода (рис. 1.5), которая хотя и требует несколько повышенного расхода электротехнической стали, но позволяет уменьшить высоту магнитопровода ($H_{БС} < H_C$) а, следовательно, и высоту трансформатора. Это имеет большое значение при транспортировке трансформаторов. Основное преимущество броневой конструкции силового трансформатора в том, что он получается более компактным за счет применения бака, прилегающего к сердечнику. В броневом трансформаторе с радиально расположенными листами стали практически отсутствуют потери в стали сердечника от потоков

рассеяния, поскольку эти потоки входят вдоль листов стали, а не перпендикулярно их поверхности, как это имеет место в стержневых трансформаторах. По способу сочленения стержней с ярами различают стыковую и шихтованную конструкции стержневого магнитопровода (рис. 1.6) [2, 7, 8].

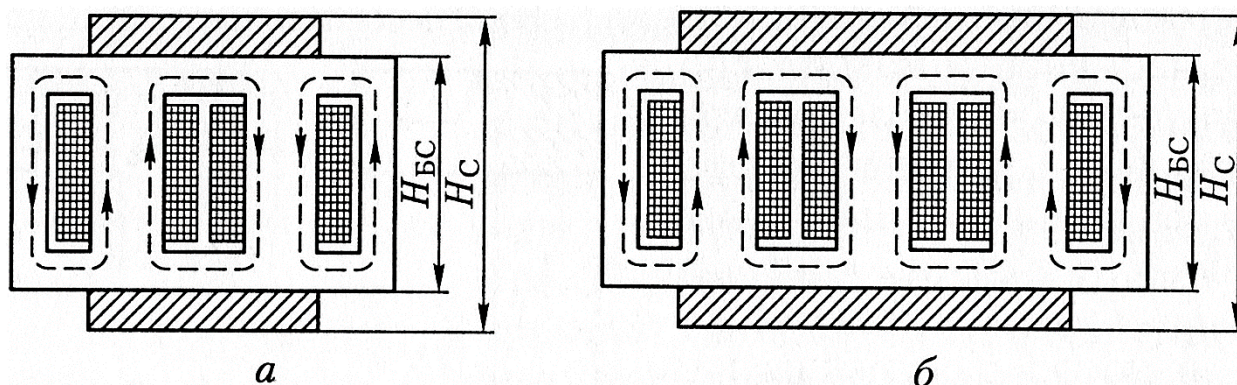


Рисунок 1.5 – Магнитопроводы бронестержневых трансформаторов
а) однофазный; б) трехфазный

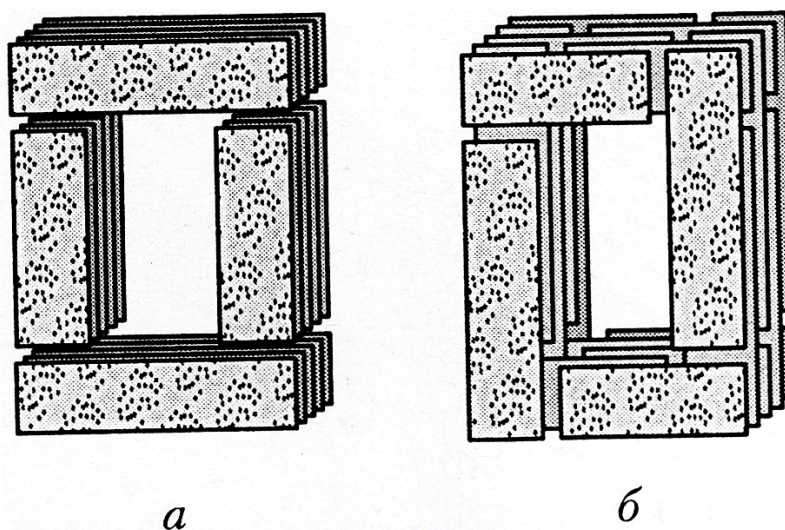


Рисунок 1.6 – Стыковая (а) и шихтованная (б)
конструкции магнитопроводов

При стыковой конструкции (рис. 1.6, а) стержни и яра собирают раздельно, насаживают обмотки на стержни, а затем приставляют верхнее и нижнее яра, заранее проложив изолирующие прокладки между стыкующимися элементами, с целью ослабления вихревых токов, возникающих при взаимном перекрытии листов стержней и яра. После установки двух яра всю конструкцию

прессуют и стягивают вертикальными шпильками. Стыковая конструкция хотя и облегчает сборку магнитопровода, но не получила распространения в силовых трансформаторах из-за громоздкости стяжных устройств и необходимости механической обработки стыкующихся поверхностей для уменьшения магнитного сопротивления в месте стыка.

Шихтованная конструкция магнитопроводов силовых трансформаторов показана на рис. 1.6, б. В данном случае стержни и ярма собирают слоями в переплет. Обычно слой содержит 2–3 листа. В настоящее время магнитопроводы силовых трансформаторов изготавливают из холоднокатаной электротехнической стали, у которой магнитные свойства вдоль направления прокатки листов лучше, чем поперек. Поэтому при шихтованной конструкции в местах поворота листов на 90° появляются «зоны несовпадения» направления прокатки с направлением магнитного потока. На этих участках наблюдаются увеличение магнитного сопротивления и рост магнитных потерь. С целью ослабления данного явления применяют для шихтовки пластины (полосы) со скошенными краями. В этом случае вместо прямого стыка (рис. 1.7, а) получают косой стык (рис. 1.7, б), у которого «зона несовпадения» гораздо меньше.

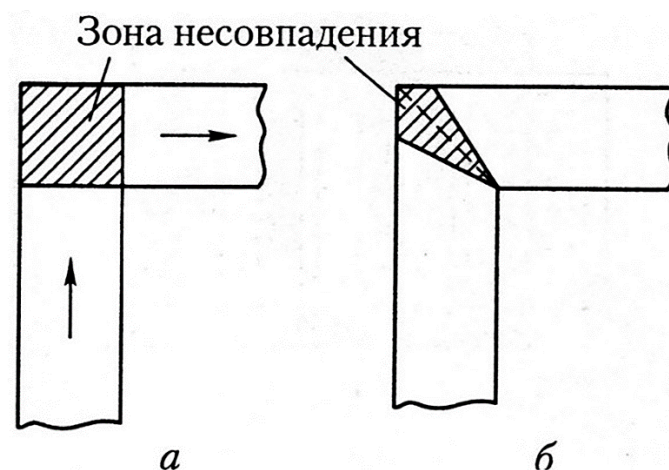


Рисунок 7 – «Зоны несовпадения» при прямом (а) и косом (б) стыках

Недостатком магнитопроводов шихтованной конструкции является некоторая сложность сборки, так как для насадки обмоток на стержни приходится

расшлифовывать верхнее ярмо, а затем после насадки обмоток вновь его зашлифовывать.

Стержни магнитопроводов во избежание распушения спрессовывают (скрепляют). Делают это обычно наложением на стержень банджа из стеклоленты или стальной проволоки. Стальной бандаж выполняют с изолирующей пряжкой, что исключает создание замкнутых стальных витков на стержнях. Бандаж накладывают равномерно, с определенным натягом. Для опрессовки ярм 3 и мест их сочленения со стержнями 1 используют ярмовые балки 2, которые в местах, выходящих за крайние стержни (рис. 1.8), стягивают шпильками [1, 2, 5, 7].

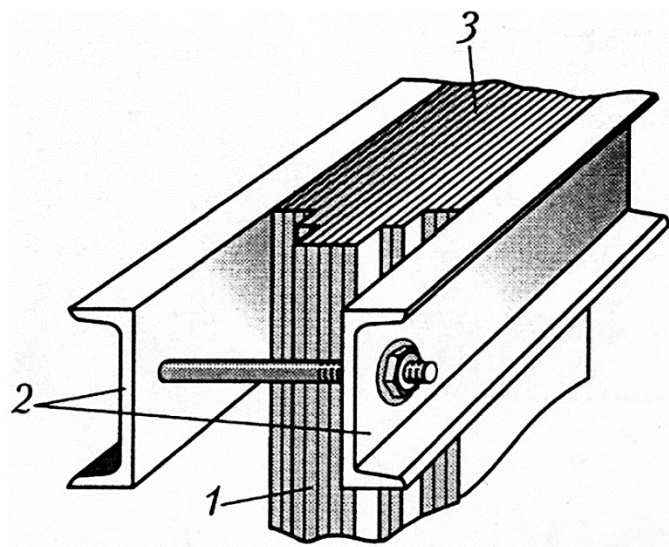


Рисунок 1.8 – Опрессовка ярма

Во избежание возникновения разности потенциалов между металлическими частями во время работы трансформатора, что может вызвать пробой изоляционных промежутков, разделяющих эти части, магнитопровод и детали его крепления обязательно заземляют. Заземление осуществляют медными лентами, вставляемыми между стальными пластинами магнитопровода одними концами и прикрепляемыми к ярмовым балкам другими концами.

Магнитопроводы трансформаторов малой мощности (обычно мощностью не более 1 кВ·А) чаще всего изготавливают из узкой ленты электротехнической холоднокатаной стали путем навивки. Такие магнитопроводы делают разрезными (рис. 1.9), а после насадки обмоток собирают встык и стягивают специальными хомутами.

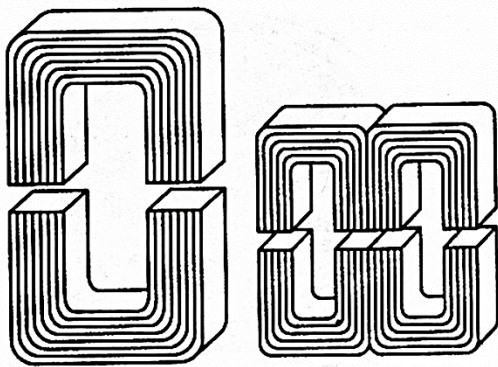


Рисунок 1.9 – Ленточные разрезные магнитопроводы

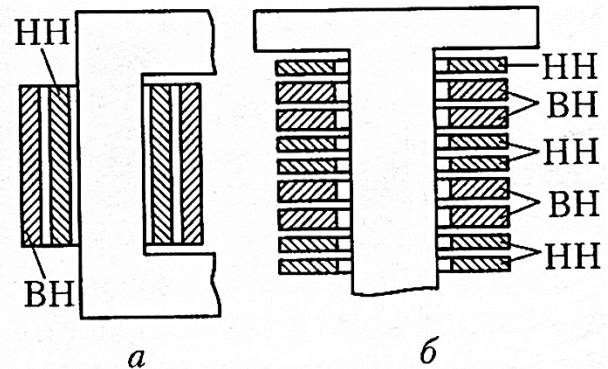


Рисунок 1.10 – Концентрическая (а) и дисковая (б) обмотки трансформаторов

Передача энергии в трансформаторе электромагнитным путем сопровождается потерями в его магнитопроводе. При изменении магнитного поля в ферромагнитном материале часть энергии преобразуется в теплоту. *Мощность, соответствующая потерям энергии, называется магнитными потерями или потерями в стали. Потери в стали обусловлены перемагничиванием ферромагнитного магнитопровода в переменном магнитном поле (потери на гистерезис) и вихревыми токами (токи Фуко), возникающими в материале магнитопровода под действием ЭДС, наведенных в нем изменяющимся во времени вихревым магнитным потоком.*

Известно, что потери от гистерезиса пропорциональны частоте перемагничивания и квадрату амплитуды магнитной индукции (1.4):

$$\Delta P_{\Gamma} \equiv f \equiv B_m^2 \quad (1.4)$$

Кроме того, их величина зависит и от сорта материала.

В свою очередь, потери от вихревых токов определяются также сортом материала и пропорциональны квадрату частоты перемагничивания, квадрату амплитуды магнитной индукции и квадрату толщины листа – составной части магнитопровода:

$$\Delta P_{\text{вт}} \equiv f^2 \equiv B_m^2 \equiv \sigma^2 \quad (1.5)$$

Одно из важнейших требований, предъявляемых к правильно сконструированному трансформатору, – получение возможно меньших потерь в стали при максимальном использовании активных материалов. Поэтому на всем протяжении трансформаторостроения производился поиск снижения потерь, прежде всего за счет применения более качественной стали.

Для изготовления магнитопроводов трансформаторов применяются специальные тонколистовые стали с повышенным содержанием кремния (до 5 %). Кремний способствует обезуглероживанию стали, что приводит к увеличению магнитной проницаемости, снижает потери на гистерезис и увеличивает ее удельное электрическое сопротивление, а это позволяет уменьшить потери в стали от вихревых токов. Кроме этого, кремний ослабляет старение стали, уменьшает магнитострикцию стали (магнитострикция – изменение размеров и формы тела при намагничивании) и, следовательно, уменьшает шум трансформаторов.

Раньше для сердечников, подвергающихся перемагничиванию, применялась горячекатаная изотропная электротехническая сталь 1212 (Э12), 1312 (Э22) и 1412 (Э32) по государственному стандарту ГОСТ 21427.3–83 «Сталь электротехническая холоднокатаная изотропная тонколистовая. Технические условия», поставляемая в виде листов стандартных размеров. За последние годы эта сталь вытесняется освоенной производством холоднокатаной изотропной электротехнической сталью, обладающей более высокой магнитной проницаемостью, пониженными удельными потерями при перемагничивании.

Холоднокатаная сталь поставляется также в рулонах и резаных лентах, что позволяет внедрять на электромашиностроительных заводах автоматический процесс штамповки.

Для магнитопроводов (сердечников) электрических машин используют тонколистовую электротехническую сталь. Указанные стандарты распространяются на горячекатаную и холоднокатаную сталь разных марок. Обозначение марок стали по ГОСТ 21427.0–83 состоит из четырех цифр, условно характеризующих основные свойства стали.

Материалом для магнитопроводов силовых трансформаторов служит специальная электротехническая кремнистая тонколистовая сталь толщиной 0,35, 0,30 и 0,27 мм, например, 3411, 3412, 3413.

Обмотки. Конструкция обмотки определяется в ходе расчета трансформатора, когда ее тип и обмоточные данные увязывают с электромагнитными, изоляционными и тепловыми характеристиками конструируемого трансформатора. При выборе типа обмотки исходят из таких требований, предъявляемых к ней, как *технологичность выполнения, достаточная механическая прочность, нагревостойкость и электрическая прочность изоляции*. Основные проводниковые материалы для изготовления обмоток – медь и алюминий. Обмоточные провода из этих материалов имеют круглое или прямоугольное сечение. Диаметр круглого медного провода не превышает обычно 5,6 мм, а алюминиевого – 8 мм. Размеры сечения прямоугольных проводов обычно не превосходят размеры: для меди – 5,6×18 мм; для алюминия – 7×22 мм.

Элемент обмотки – это виток, сечение которого выбирают в зависимости от величины номинального тока. При малых номинальных токах применяют провода круглого сечения, при больших – прямоугольного сечения.

Обмотки трансформаторов средней и большой мощности выполняют из обмоточных проводов круглого или прямоугольного сечения, изолированных

хлопчатобумажной пряжей или кабельной бумагой. Основной обмотки в большинстве случаев является бумажно-бакелитовый цилиндр, на котором крепятся элементы (рейки, угловые шайбы и т. д.), обеспечивающие обмотке механическую и электрическую прочность.

По взаимному расположению на стержне обмотки разделяют на концентрические и чередующиеся. **Концентрические обмотки** выполняют в виде цилиндров, размещаемых на стержне концентрически: ближе к стержню обычно располагают обмотку НН (требующую меньшей изоляции от стержня), а снаружи – обмотку ВН (рис. 1.10, а).

Чередующиеся (дисковые) обмотки выполняют в виде отдельных секций (дисков) НН и ВН и располагают на стержне в чередующемся порядке (рис. 1.10, б). Чередующиеся обмотки применяют весьма редко, лишь в некоторых трансформаторах специального назначения.

Концентрические обмотки в конструктивном отношении разделяют на несколько типов. Рассмотрим некоторые из них.

1. Цилиндрические однослойные или двухслойные обмотки из провода прямоугольного сечения (рис. 1.11, а) используют главным образом в качестве обмоток НН на номинальный ток до 800 А.

2. Винтовые одно- и многоходовые обмотки выполняют из нескольких параллельных проводов прямоугольного сечения. При этом витки укладывают по винтовой линии, имеющей один или несколько ходов (рис. 1.11, б). Для того чтобы все параллельные проводники одинаково нагружались током, выполняют *транспозицию (перекладку) этих проводников*.

3. Непрерывные обмотки (рис. 1.11, в) состоят из отдельных дисковых обмоток (секций), намотанных по спирали и соединенных между собой без пайки, то есть выполненных «непрерывно». Если обмотка выполняется несколькими параллельными проводами, то в ней применяют транспозицию проводов [2, 7].

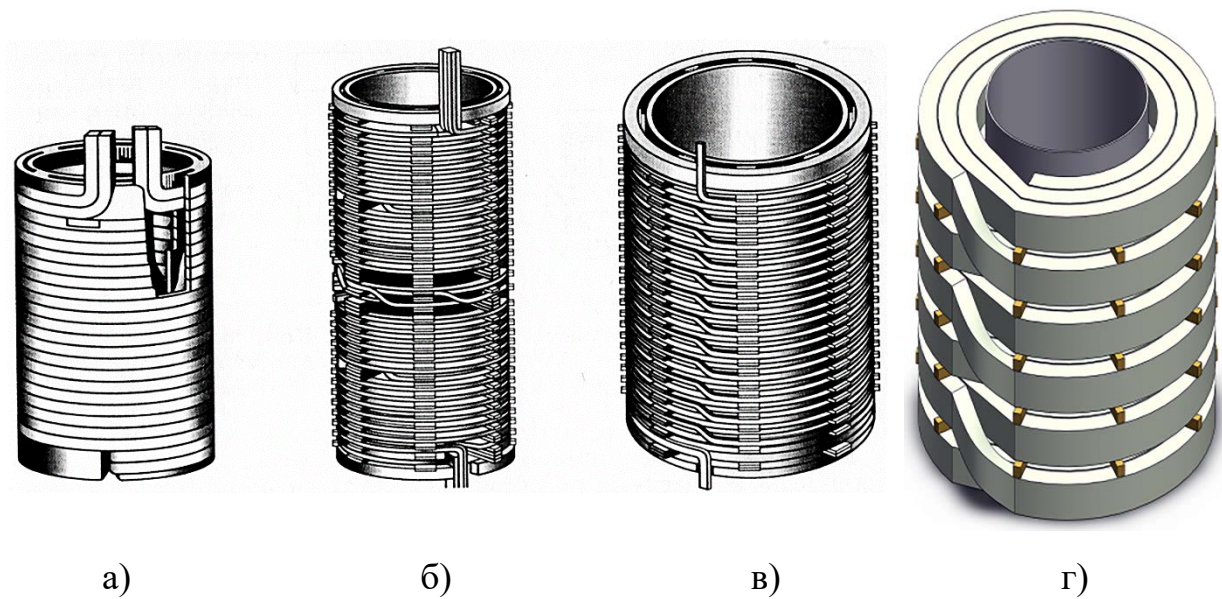


Рисунок 1.11 – Конструкции концентрических обмоток
а) цилиндрическая; б) винтовая; в) непрерывная;
г) дисковая с замковыми прокладками

Электроизоляционные материалы

Электроизоляционные материалы служат для изоляции токопроводящих элементов и деталей, находящихся под разными потенциалами. **Основными свойствами и параметрами электроизоляционных материалов являются:** *большое удельное объемное и поверхностное сопротивление, достаточная электрическая прочность, малые диэлектрические потери.* Все это должно сочетаться с рядом других свойств, обеспечивающих их длительную и надежную работу – нагревостойкостью, механической прочностью, эластичностью, химической стойкостью, масло- и влагостойкостью.

Для оценки пожарной опасности диэлектриков большое значение имеет нагревостойкость – способность изоляционных материалов выполнять свое назначение при длительном воздействии рабочей температуры. Электроизоляционные материалы по степени нагрева разделены на семь классов: Y, A, E, B, F, H, C (табл. 1.2).

Таблица 1.2 – Классы по нагревостойкости электроизоляционных материалов для электрических машин, трансформаторов и аппаратов

Обозначение класса	Температура, характеризующая нагревостойкость материалов данного класса, °С	Краткая характеристика электроизоляционных материалов, соответствующих данному классу нагревостойкости
Y	90	бумага, картон др. материалы из целлюлозы, хлопка, шелка, не пропитанные жидким диэлектриком, а также синтетические материалы: полиэтилен, полистирол
A	105	материалы из целлюлозы, хлопка, шелка и дерева, пропитанные жидким диэлектриком (гетинакс, текстолит, лакоткани, электротехнический картон), трансформаторное масло, капрон и др.
E	120	эмаль (винифлекс), эпоксидная смола, лавсан и другие синтетические материалы
B	130	материалы на основе слюды (миканит, микалента), асбеста и стекловолокна, пропитанные органическими лаками и смолами
F	155	материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, пропитанные смесью органических лаков и кремнийорганическими смолами, а также высокопрочная эмаль на полиэфиримидной основе
H	180	материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, пропитанные кремнийорганическими смолами (стекломиканит, стеклоткань, стеклотекстолит и др.)
C	выше 180	слюда, асбест, стекловолокно, стекло, кварц, фарфор в чистом виде, без пропиток

Нагревание и охлаждения трансформаторов

При работе трансформаторов возникают потери электрической энергии, вызванные током, протекающим по обмоткам. Эти потери преобразуются в тепловую энергию и вызывают нагревание частей трансформатора. Главными источниками теплоты в трансформаторе являются магнитопровод и обмотки, потери в которых составляют 75 % всех потерь. Нагревание трансформатора является главной причиной, ограничивающей его мощность при различных режимах работы, поскольку максимально допустимая температура обмоток,

магнитопровода и других конструктивных элементов зависит от интенсивности их охлаждения, нагревостойкости применяемых изоляционных материалов и установленного срока службы трансформатора.

На крышке бака масляного трансформатора располагают небольшой бак расширитель, который патрубком соединен с основным баком. Объем масла, заливаемого в трансформатор, выбирают таким, чтобы при колебаниях температуры окружающей среды или в результате изменения режима нагрузки открытая поверхность масла оставалась в пределах расширителя.

Трансформаторное масло – горючее вещество, поэтому масляные трансформаторы взрыво- и пожароопасны. При внутренних повреждениях изоляции в трансформаторе возможно, вследствие чрезмерного нагрева, испарение масла, сопровождающееся выделением газов. Для предотвращения разрушения бака при резком повышении давления внутри него на крышке бака предусмотрена **выпускная труба**, закрытая стеклянной мембраной, которая лопается при превышении давления внутри бака.

В качестве другого наиболее важного вспомогательного оборудования систем охлаждения служат: **воздухоосушитель** – для очистки от влаги и загрязнений воздуха, поступающего в трансформатор при температурных колебаниях уровня масла; **термосифонный фильтр** – для непрерывной автоматической регенерации масла (устанавливается в трансформаторах мощностью 1 000 кВ·А и более); **газовое реле** – для защиты трансформатора от внутренних повреждений, сопровождающихся выделением газа.

В отдельных трансформаторах основной изолирующей средой и теплоносителем может служить также синтетическая негорючая и неокисляющаяся жидкость – **совтол**, которая имеет практически такие же электроизоляционные свойства и теплопроводность, как и трансформаторное масло. Совтол дороже трансформаторного масла, токсичен и требует тщательной герметизации систем охлаждения. Кроме того, трансформаторы мощностью до 1600 кВ·А

могут изготавливаться также сухими, в которых основная изолирующая среда – атмосферный воздух.

В трансформаторах с масляным охлаждением магнитопровод с обмотками помещен в бак, наполненный трансформаторным маслом (рис. 1.12). Трансформаторное масло, омывая обмотки 2 и 3 и магнитопровод 1, отбирает от них теплоту и, обладая более высокой теплопроводностью, чем воздух, через стенки бака 4 и трубы радиатора 5 отдает ее в окружающую среду. Наличие трансформаторного масла обеспечивает более надежную работу высоковольтных трансформаторов, так как электрическая прочность масла намного выше, чем воздуха. Масляное охлаждение интенсивнее воздушного, поэтому габариты и вес масляных трансформаторов меньше, чем у сухих трансформаторов такой же мощности.

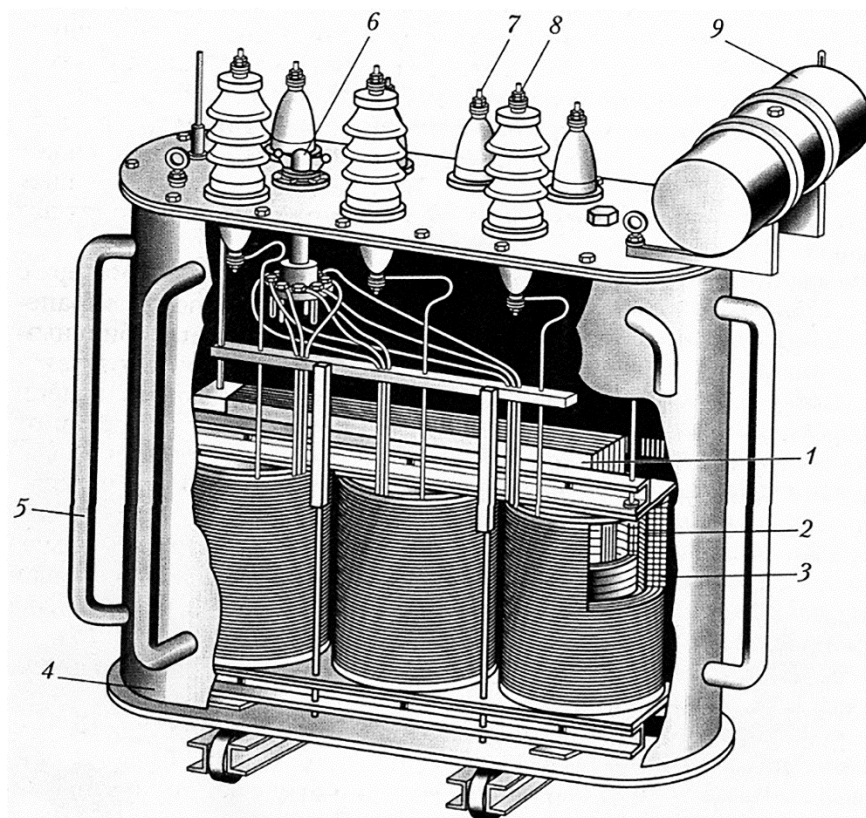


Рисунок 1.12 – Устройство трансформатора с масляным охлаждением
1 – магнитопровод; 2 и 3 – обмотки; 4 – бак; 5 – трубы радиатора;
6 – переключатель напряжений; 7 и 8 – вводы; 9 – расширительный бачок

В трансформаторах мощностью до 30 кВ·А применяют баки с гладкими стенками. У более мощных трансформаторов для увеличения охлаждаемой поверхности стенки бака, делают ребристыми или же применяют трубчатые баки. Масло, нагреваясь, поднимается вверх, а, охлаждаясь, опускается вниз. При этом масло циркулирует в трубах, что способствует более быстрому его охлаждению.

Для непрерывной очистки масла от влаги и продуктов окисления в процессе эксплуатации на трансформаторах мощностью 160 кВ·А и выше устанавливают **термосифонный фильтр** (рис. 1.13). Он выполнен в виде цилиндра, который соединен с полостью бака в верхней и нижней частях. В цилиндр помещена решетка с сорбентом (поглотителем), в качестве которого служит силикагель или активный оксид алюминия. Масло в фильтре перемещается сверху вниз вследствие разностей плотностей нагретого и охлажденного масла. При возрастании кислотного числа трансформаторного масла до определенного значения сорбент заменяют [2, 3, 7, 8, 10].

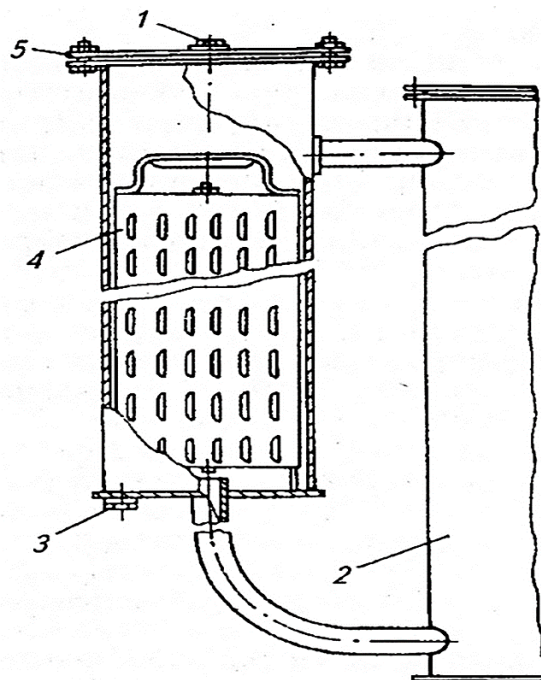


Рисунок 1.13 – Схема термосифонного фильтра

1 – пробка для выпуска воздуха; 2 – бак трансформатора;
3 – пробка для спуска грязи; 4 – решетка с силикагелем; 5 – крышка

Для компенсации объема масла при изменении температуры, а также для защиты масла от окисления и увлажнения при контакте с воздухом в трансформаторах применяют расширитель 9, представляющий собой цилиндрический сосуд, установленный на крышке бака и сообщающийся с ним. Колебания уровня масла с изменением его температуры происходят не в баке, который всегда заполнен маслом, а в расширителе, сообщаемся с атмосферой. Расширитель выполняет функцию компенсатора (регулятора) при изменении объема масла вследствие колебаний температуры окружающей среды или при изменении режима нагрузки трансформатора. Кроме того, применяют и воздухоочистительный фильтр (воздухоосушитель), который непосредственно встраивают в расширитель или устанавливают на нем.

Воздухоосушитель (рис. 1.14) представляет собой трубу с масляным затвором, заполненную сорбентом (цеолитом).

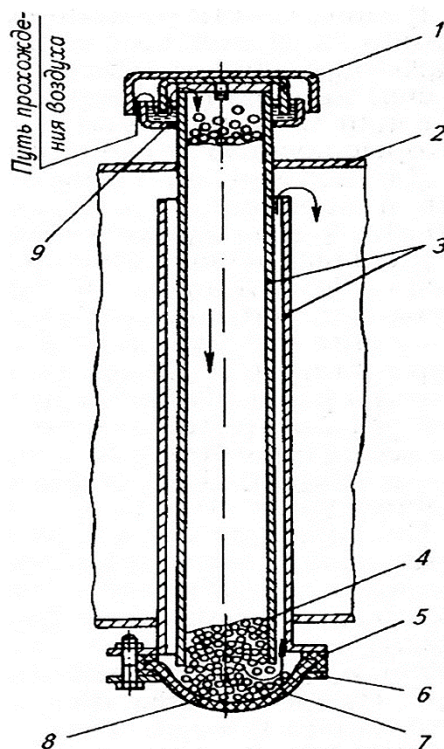


Рисунок 1.14 – Схема воздухоосушителя

1 – колпак; 2 – труба расширителя; 3 – корпус; 4 – цеолит; 5 – прокладка;
6 – фланец; 7 – прозрачный колпак; 8 – силикагель-индикатор; 9 – масляный затвор

При понижении уровня масла в расширителе засасываемый воздух проходит через масляный затвор, очищаясь от взвешенных примесей, и через сорбент, поглощающий влагу. Контроль за воздухоосушителем в эксплуатации заключается в наблюдении за окраской селикагеля-индикатора, который изначально имеет ярко-голубую окраску.

В процессе работы трансформаторов не исключена возможность возникновения в них явлений, сопровождающихся бурным выделением газов, что ведет к значительному увеличению давления внутри бака. Поэтому во избежание повреждения баков трансформаторы мощностью 1 000 кВ·А и выше снабжают выхлопной трубой, которую устанавливают на крышке бака. Нижним концом труба сообщается с баком, а ее верхний конец заканчивается фланцем, на котором укреплен стеклянный диск.

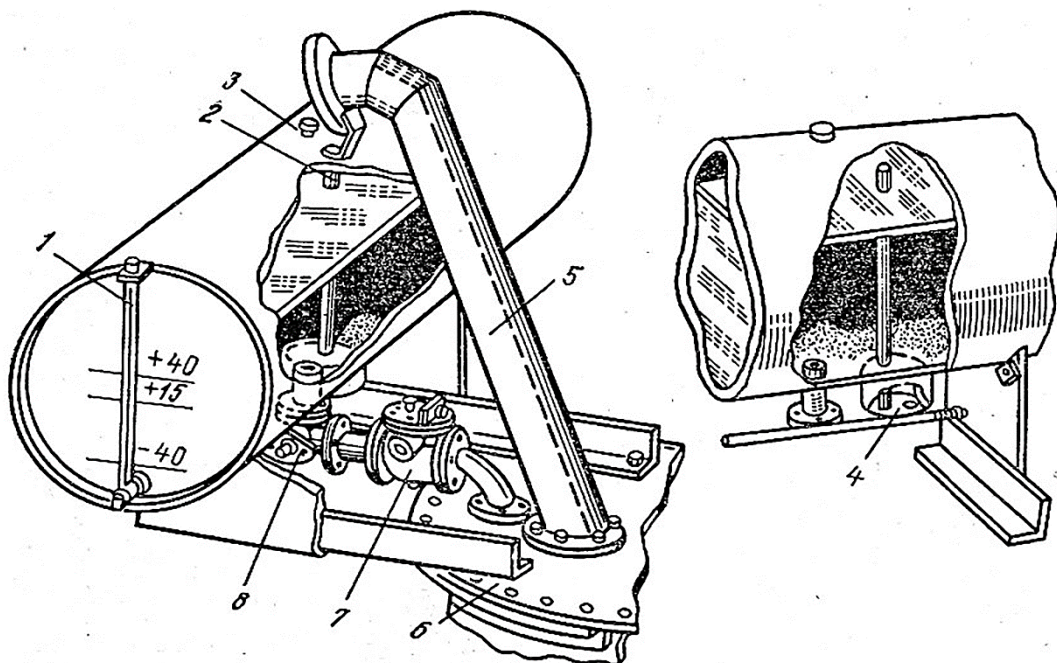


Рисунок 1.15 – Расширитель и выхлопная труба

- 1 – указатель уровня масла; 2 – трубка для свободного обмена воздухом;
 3 – пробка для заливки масла; 4 – грязеотстойник; 5 – выхлопная труба;
 6 – бак трансформатора; 7 – газовое реле; 8 – кран для отсоединения расширителя

При давлении, превышающем безопасное для бака, стеклянный диск лопается, и газы выходят наружу. При возникновении в трансформаторе значительных повреждений, сопровождаемых обильным выделением газов (например, при коротком замыкании между витками обмоток), давление в баке повышается, что может привести к его разрушению [3, 4, 7].

Для защиты от таких аварий трансформаторы снабжают специальным газовым реле. В трубопровод, соединяющий бак масляного трансформатора с расширителем, помещено газовое реле. Внутри корпуса газового реле находится два поплавка с закрепленными на них постоянными магнитами (рис. 1.16). Из-за газообразования в аварийных режимах газ в изоляционной жидкости поднимается вверх, собирается в газовом реле и вытесняет изоляционную жидкость. С падением уровня жидкости верхний поплавок опускается. При этом постоянные магниты приближаются к магнитоуправляемым контактам (герконам) и замыкают цепь отключения трансформатора от источника питания.

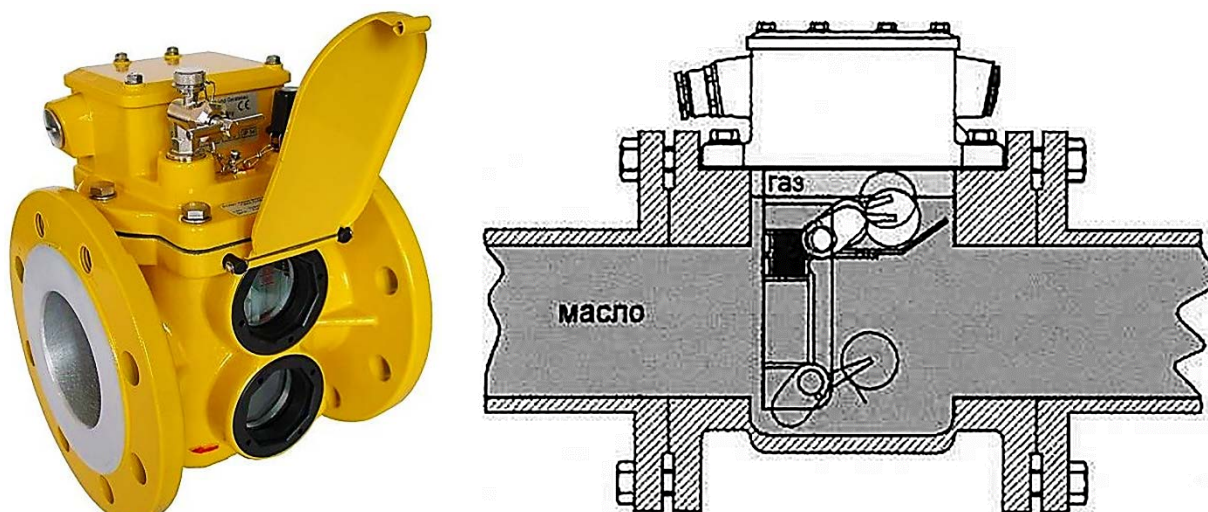


Рисунок 1.16 – Газовое реле трансформатора (реле Бухгольца)

С этой же целью трансформаторы мощностью 1 000 кВ·А и выше снабжают выпускной трубой, устанавливаемой на крышке бака. Труба закрыта

стеклянной мембраной, которая разрушается при повышении давления в трансформаторе, выпуская газы в атмосферу [4, 5, 7, 10, 11].

Обмотки трансформатора с внешней цепью соединяют вводами 7 и 8 (рис. 1.12). В масляных трансформаторах для вводов обычно используют проходные фарфоровые изоляторы. Такой ввод снабжен металлическим фланцем, посредством которого он крепится к крышке или стенке бака. К дну бака прикреплена тележка, позволяющая перемещать трансформатор в пределах подстанции. На крышке бака расположена рукоятка переключателя напряжений 6.

В таблице 1.3 представлены системы охлаждения трансформаторов и их условные обозначения. Таблица 1.4 содержит условные обозначения климатических исполнений трансформаторов. В таблице 1.5 приведены условные обозначения категорий размещения трансформаторов.

Таблица 1.3 – Системы охлаждения трансформаторов и их условные обозначения

Условное обозначение	Система охлаждения
Сухие трансформаторы	
С	естественное воздушное при открытом исполнении
СЗ	естественное воздушное при защищенном исполнении
СГ	естественное воздушное при герметичном исполнении
СД	воздушное с принудительной циркуляцией воздуха
Масляные трансформаторы	
М	естественная циркуляция воздуха и масла
Д	принудительная циркуляция воздуха и естественная циркуляция масла
МЦ	естественная циркуляция воздуха и принудительная циркуляция масла с ненаправленным потоком масла
НМЦ	естественная циркуляция воздуха и принудительная циркуляция масла с направленным потоком масла
ДЦ	принудительная циркуляция воздуха и масла с ненаправленным потоком масла
НДЦ	принудительная циркуляция воздуха и масла с направленным потоком масла
Ц	принудительная циркуляция воды и масла с ненаправленным потоком масла
НЦ	принудительная циркуляция воды и масла с направленным потоком масла
Трансформаторы с негорючим жидким диэлектриком	
Н	естественное негорючим жидким диэлектриком

Лабораторная работа 1.

Устройство, классификация и маркировка трансформаторов

Продолжение таблицы 1.3

Условное обозначение	Система охлаждения
НД	негорючим жидким диэлектриком с принудительной циркуляцией воздуха
ННД	негорючим жидким диэлектриком с принудительной циркуляцией воздуха и с направленным потоком жидкого диэлектрика

Таблица 1.4 – Условные обозначения климатических исполнений трансформаторов

Условные обозначения	Климатические исполнения
У	для эксплуатации в районах с умеренным климатом
УХЛ	то же, с умеренным и холодным климатом
ТВ	то же, с влажным тропическим климатом
ТС	то же, с сухим тропическим климатом
Т	то же, как с сухим, так и влажным тропическим климатом
О	во всех районах на суше, кроме районов с очень холодным климатом (общеклиматическое исполнение)
М	в районах с умеренно-холодным морским климатом
ТМ	в районах с тропическим морским климатом
ОМ	как с умеренно холодным, так и тропическим морским климатом
В	для эксплуатации во всех районах на суше и на море, кроме районов с очень холодным климатом (общеклиматическое исполнение)

Таблица 1.5 – Условные обозначения категорий размещения трансформаторов

Условные обозначения	Характеристика категорий размещения
1	для эксплуатации на открытом воздухе
2	для эксплуатации под навесом, или в помещениях, где колебания температуры и влажности воздуха несущественно отличаются от колебаний на открытом воздухе, и имеется сравнительно свободный доступ наружного воздуха
3	для эксплуатации в закрытых помещениях с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий, где колебания температуры и влажности воздуха существенно меньше, чем на открытом воздухе
4	для эксплуатации в помещениях с искусственно регулируемыми климатическими условиями
5	для эксплуатации в помещениях с повышенной влажностью

Маркировка трансформаторов

В зависимости от мощности и класса напряжения силовые трансформаторы подразделяют на восемь габаритов: 1–8. Для отличия по конструктивным

признакам, назначению, мощности и напряжению все трансформаторы подразделяют на типы, которым присваивается соответствующее условное обозначение. Условное обозначение (маркировка) типов трансформаторов состоит из букв и цифр [8, 10]. Структурная схема условного обозначения типа трансформатора показана на рисунке 1.17.





Рисунок 1.17 – Структурная схема
условного обозначения типа трансформатора

Контрольные вопросы

1. Объясните принцип действия трансформатора.
2. Что называется трансформатором?
3. Посредством чего достигается экономия электрической энергии в электрических сетях?
4. Как классифицируют трансформаторы?
5. Раскройте назначение и область применения трансформаторов.

-
6. На каких явлениях основан принцип действия трансформатора? Какая связь между обмотками трансформатора?
 7. Для каких целей и где применяются силовые трансформаторы?
 8. Какие бывают трансформаторы по форме магнитопровода?
 9. Какие бывают трансформаторы по назначению?
 10. Какие бывают трансформаторы по виду охлаждения?
 11. Какие бывают трансформаторы по числу трансформируемых фаз?
 12. Какие бывают трансформаторы по числу обмоток на фазу?
 13. Раскройте назначение и особенности магнитопровода трансформатора.
 14. Почему стальной сердечник выполняется из отдельных изолированных пластин специальной электротехнической стали, легированной кремнием?
 15. Какая сталь в настоящее время применяется – горячекатаная или холоднокатаная и почему?
 16. Назовите функции магнитопровода.
 17. Поясните назначение и исполнение обмоток трансформатора.
 18. Что такое магнитный поток рассеяния и где он образуется?
 19. Объясните устройство и назначение магнитопровода трансформатора.
 20. Какова роль трансформаторного масла?
 21. Рассмотрите назначение, устройство и работу газового реле трансформатора.
 22. Рассмотрите назначение, устройство и работу термосифонного фильтра трансформатора.
 23. Раскройте назначение, устройство и работу воздухоосушителя трансформатора.
 24. Раскройте назначение, устройство и работу расширителя и выхлопной трубы трансформатора.
 25. Кто практически построил однофазный трансформатор и трехфазный трансформатор?

26. Какие потери существуют в магнитопроводе трансформатора и от чего они зависят?

27. Что такое ярмо, стержень, сердечник? Раскройте их назначение.

28. Какие потери существуют в обмотках трансформатора и от чего они зависят?

29. Опишите системы охлаждения в трансформаторе.

30. Как выполняется маркировка обмоток трансформаторов? Расшифруйте марку трансформатора ТДТН-6300/35ХЛ2.

Тестовые задания

1. Трансформатором называется электромагнитное устройство предназначенное (выберите один правильный ответ):

а) для преобразования электрической энергии постоянного тока одного напряжения в электрическую энергию постоянного тока другого напряжения при изменяющейся частоте;

б) для преобразования электрической энергии переменного тока одного напряжения в электрическую энергию переменного тока другого напряжения при изменяющейся частоте;

в) для преобразования электрической энергии переменного тока одного напряжения в электрическую энергию переменного тока другого напряжения при неизменной частоте.

2. Что произойдет с трансформатором, если его включить в сеть постоянного напряжения той же величины?

а) ничего не произойдет;

б) уменьшится основной магнитный поток Φ ;

в) уменьшится поток рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ первичной обмотки;

г) может сгореть.

3. Назначение, газового реле в масляных трансформаторах:

- а) для поддержания в баке атмосферного давления;
- б) для повышения интенсивности охлаждения;
- в) для предохранения бака от разрыва газом при коротком замыкании между витками обмоток;
- г) для удаления слива избытков масла;
- д) для уменьшения уровня масла.

4. Зачем на трансформаторах большой мощности (1 000 кВ·А и более) устанавливается выхлопная труба?

- а) для поддержания в баке атмосферного давления;
- б) для повышения интенсивности охлаждения;
- в) для предохранения бака от разрыва при большом давлении масла;
- г) для удаления слива избытков масла;
- д) для уменьшения уровня.

5. Для чего магнитопровод трансформатора выполняется из электро-технической стали, а не из ферромагнитного материала? Укажите неправильный ответ:

- а) для уменьшения тока холостого хода;
- б) для увеличения коэффициента магнитной связи между обмотками;
- в) для уменьшения расхода меди;
- г) для удобства сборки трансформатора;
- д) для уменьшения индуктивного сопротивления, обусловленного потоками рассеяния.

6. Какая электротехническая сталь предпочтительнее для изготовления сердечников трансформаторов?

- а) горячекатаная;
- б) холоднокатаная;
- в) холоднокатаная изотропная;

- г) нелегированная;
- д) холоднокатаная анизотропная.

7. При каком напряжении целесообразно: а) передавать электрическую энергию; б) потреблять электрическую энергию?

- а) при высоком напряжении; б) при высоком напряжении
- б) при низком напряжении; б) при высоком напряжении
- а) при высоком напряжении; б) при низком напряжении

8. В рабочем режиме трансформатора токи обмоток (выберите один правильный ответ):

- а) обратно пропорциональны числам витков;
- б) прямо пропорциональны квадратам чисел витков;
- в) прямо пропорциональны числам витков;
- г) обратно пропорциональны квадратам чисел витков.

9. Какую роль в трансформаторе играет трансформаторное масло:

а) трансформаторное масло в силовых трансформаторах играет роль изоляции и охлаждающей среды;

б) трансформаторное масло служит для защиты трансформатора от короткого замыкания;

в) трансформаторное масло служит для улучшения изоляции трансформатора;

г) трансформаторное масло служит для охлаждения трансформатора.

10. При $U_1 = const$ и $f = const$ изменится ли индукция в сердечнике трансформатора, если увеличить число витков w_1 в 2 раза?

- а) увеличится в 2 раза;
- б) не изменится;
- в) уменьшится в 2 раза;
- г) для ответа недостаточно данных.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Цель работы: ознакомиться с принципом работы трансформатора; усвоить практические приемы определения потерь в трансформаторе по опытам холостого хода, короткого замыкания; научиться определять параметры трансформатора и строить его характеристики.

Общие сведения

Трансформатором называется статический (то есть без движущихся частей) электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования электрической энергии переменного тока одного напряжения в электрическую энергию переменного тока другого напряжения при неизменной частоте [2, 7, 8] (рис. 2.1, 2.2).

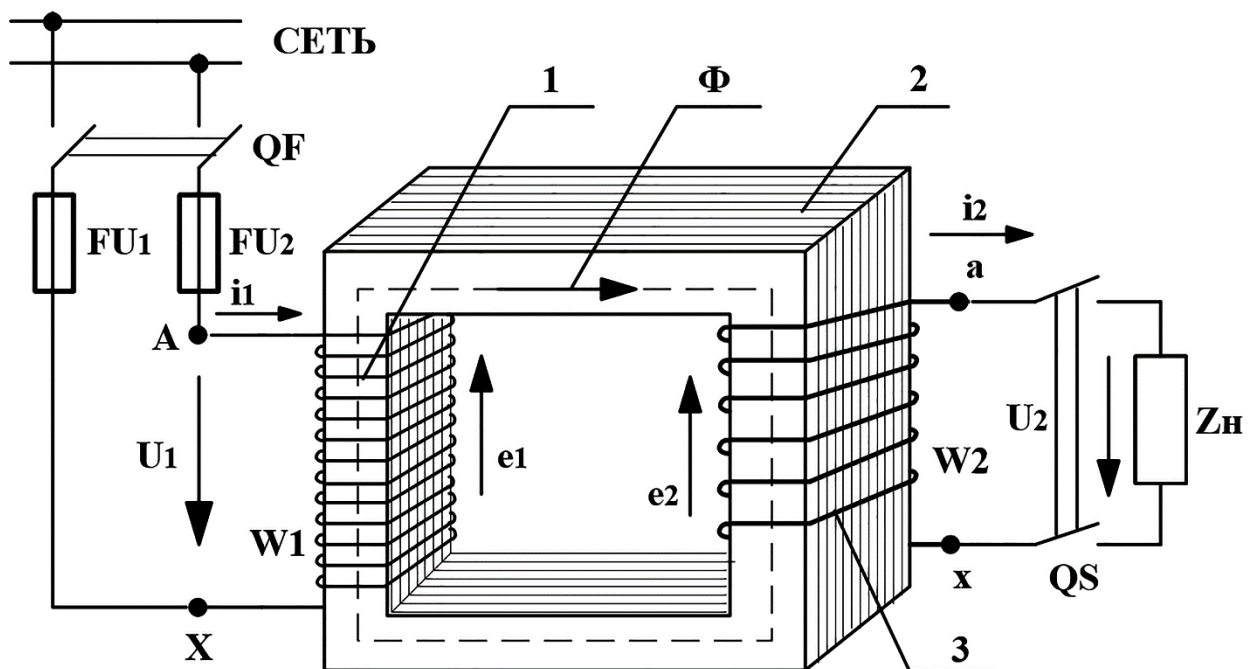


Рисунок 1 – Электромагнитная схема однофазного двухобмоточного трансформатора

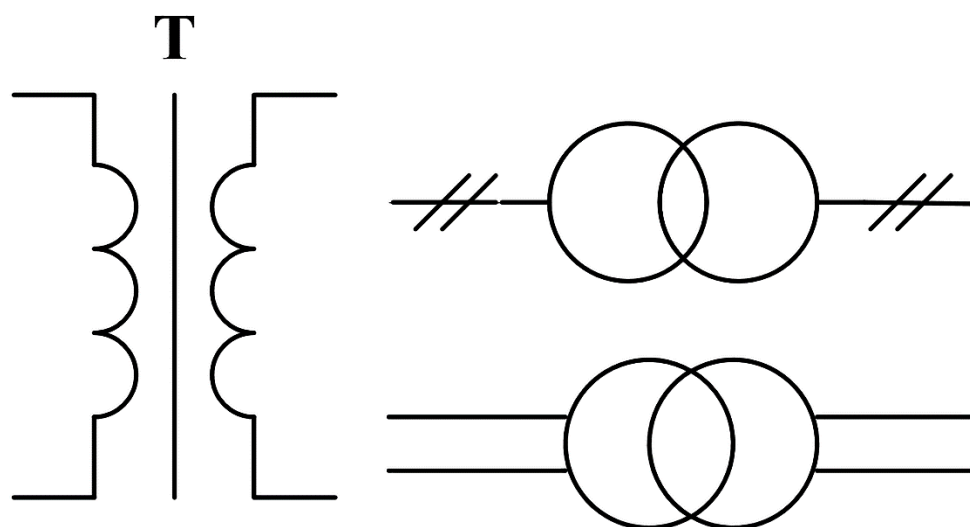


Рисунок 2.2 – Условно-графическое обозначение
однофазного трансформатора

Трансформатор состоит из двух обмоток, первичной 1 и вторичной 3, размещенных на замкнутом ферромагнитном магнитопроводе 2, который для уменьшения потерь от вихревых токов набран из листов электротехнической стали толщиной 0,3–0,5 мм, легированной кремнием. Магнитопровод служит для усиления магнитной связи между обмотками трансформатора, то есть для уменьшения магнитного сопротивления контура, через который проходит магнитный поток трансформатора.

Трансформатор представляет собой систему, в которую входит не менее двух катушек индуктивности, связанных между собой магнитным потоком.

Если магнитное поле, пронизывающее катушки трансформатора, замыкается через воздух, то такие трансформаторы называются воздушными. Воздушные трансформаторы используются в специальных устройствах автоматики, измерительной и вычислительной техники. Для увеличения магнитной связи между катушками их располагают на замкнутом ферромагнитном сердечнике с большой относительной магнитной проницаемостью $\mu = 300\text{--}20\,000$. В этом случае катушки трансформатора принято называть обмотками.

Обмотка, соединенная с источником электрической энергии, называется первичной. Соответственно первичными называются все величины, относящиеся к этой обмотке – число витков W_1 , напряжение U_1 , ток I_1 (буквенные обозначения этих параметров дополняются индексом «1»). Обмотка, отдающая электрическую энергию потребителю, называется вторичной, и соответственно относящиеся к ней величины называются вторичными, а их буквенные обозначения имеют индекс «2».

*Трансформаторы, предназначенные для повышения напряжения в электрической цепи, называют **повышающими**, а служащие для понижения напряжения – **понижающими** [2, 7, 8].*

Принцип действия трансформатора основан на законе электромагнитной индукции Фарадея, заключающегося в том, что при всяком изменении магнитного потока, пронизывающего какой-либо проводниковый контур, в нем наводится (индуцируется) электродвижущая сила. При этом направление ЭДС таково, что возникающий в контуре под действием данной ЭДС индуцированный ток имеет магнитное поле, препятствующее изменению магнитного потока, вызвавшего этот ток (правило Ленца).

Одна из обмоток – первичная, подключается к источнику переменного тока с напряжением U_1 и частотой f . Переменный ток, проходящий по виткам этой обмотки, создает МДС, которая наводит в магнитопроводе трансформатора переменный магнитный поток. Замыкаясь в магнитопроводе, этот поток сцепляется с витками обмоток трансформатора, индуцирует соответственно в первичной W_1 и вторичной W_2 обмотках ЭДС: в первичной обмотке – ЭДС самоиндукции (2.1); во вторичной обмотке – ЭДС взаимной индукции (2.2):

$$e_1 = -W_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (2.1)$$

$$e_2 = -W_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.2)$$

Если магнитный поток трансформатора – синусоидальная функция времени $\Phi = \Phi_{max} \sin \omega t$, изменяющаяся с угловой частотой $\omega = 2\pi f$, то после подстановки ее в выражения (2.1) и (2.2), дифференцирования и преобразования, получим действующие значения ЭДС первичной и вторичной обмоток, которые называются уравнениями трансформаторной ЭДС (2.3), (2.4):

$$E_1 = 4,44 f W_1 \Phi_{max}, \quad (2.3)$$

$$E_2 = 4,44 f W_2 \Phi_{max} \quad (2.4)$$

Магнитный поток Φ , пронизывая первичную и вторичную обмотки, согласно закону электромагнитной индукции, индуцирует в них одинаковую ЭДС, так как обе обмотки пронизываются одним и тем же магнитным потоком. Если число витков вторичной обмотки меньше числа витков первичной, то суммарная ЭДС, индуцируемая во вторичной обмотке, во столько раз меньше числа витков в ней. Таким образом, отношение ЭДС, индуцируемых в обмотках, равно отношению числа их витков (2.5) [6, 7, 9]:

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} \quad (2.5)$$

где E_1 и E_2 – ЭДС первичной и вторичной обмоток;

W_1 и W_2 – число витков первичной и вторичной обмоток.

При опыте холостого хода к первичной обмотке трансформатора подводится напряжение, равное номинальному его значению $U_{I_{ном}}$. Вторичная обмотка трансформатора при этом разомкнута, так как в цепи ее отсутствует нагрузка. В результате этого ток во вторичной обмотке оказывается равным нулю ($I_2 = 0$), в то время как в цепи первичной обмотки трансформатора будет ток холостого хода I_0 , значение которого обычно невелико и составляет порядка 0,5–6 % от номинального значения тока в первичной обмотке $I_{I_{ном}}$. С увеличением номинальной мощности трансформатора относительное значение тока холостого хода снижается.

При холостом ходе ЭДС первичной обмотки E_1 приблизительно равна напряжению на зажимах первичной обмотки U_1 , так как падение напряжения в ней мало. Поэтому величину ЭДС E_1 можно принять равной напряжению первичной обмотки при холостом ходе U_1 , то есть $E_1 \approx U_1$. Так как при опыте холостого хода ток во вторичной обмотке отсутствует, то напряжение этой обмотки будет равно ЭДС, то есть $U_{20} \approx E_2$. Исходя из этого равенства, можно заменить в формуле (1.5) отношение ЭДС E_1 и E_2 отношением напряжений на зажимах обмоток трансформатора U_1 и U_{20} :

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} \approx \frac{U_1}{U_{20}} \quad (2.6)$$

Коэффициентом трансформации называют отношение напряжения на зажимах первичной обмотки трансформатора к напряжению на зажимах его вторичной обмотки при холостом ходе. Если неизвестны значения W_1 и W_2 – число витков первичной и вторичной обмоток, то коэффициент трансформации определяется по данным режима опыта холостого хода.

Согласно государственного стандарта, коэффициент трансформации определяется как отношение напряжения обмотки высшего напряжения (ВН) к напряжению обмотки низшего напряжения (НН):

$$K = \frac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{НН}}} \quad (2.7)$$

При нагрузке трансформатора к вторичной обмотке трансформатора подключается потребитель электрической энергии. Поэтому напряжения обмоток будут значительно отличаться от соответствующих ЭДС в связи с наличием падения напряжений в первичной и вторичной обмотках.

Ток во вторичной обмотке нагруженного трансформатора согласно закону Ома определяется выражением (2.8):

$$I_2 = \frac{U_2}{Z_H} \quad (2.8)$$

где $Z_H = \sqrt{R_H^2 + X_H^2}$ – полное сопротивление потребителя.

В соответствии со вторым законом Кирхгофа, для первичной и вторичной обмоток нагруженного трансформатора можно записать следующие уравнения электрического состояния: для первичной цепи (2.9) и для вторичной цепи (2.10):

$$U_1 = (-\dot{E}_1) + R_1 \dot{I}_1 + jX_1 \dot{I}_1, \quad (2.9)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - R_2 \dot{I}_2 - jX_2 \dot{I}_2 \quad (2.10)$$

где $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_2$ – ток первичной и вторичной обмоток нагруженного трансформатора;

R_1 и R_2 – активное сопротивление первичной и вторичной обмоток;

X_1 и X_2 – индуктивные сопротивления первичной и вторичной обмоток.

Так как падение напряжения на первичной обмотке трансформатора $I_1 Z_1 = I_1 \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$ в пределах до номинального тока нагрузки обычно мало по сравнению с ЭДС E_1 , можно приближенно считать, что:

$$U_1 \approx E_1 = 4,44 W_1 f_1 \Phi_m \quad (2.11)$$

Из этого следует, что при неизменном напряжении питающей сети при нагрузке трансформатора, ЭДС можно считать неизменной ($E_1 = const$). Так как ЭДС наводится результирующим магнитным потоком, то, следовательно, этот поток должен также оставаться практически постоянным в пределах от холостого хода до номинальной нагрузки трансформатора, то есть $\Phi_m = const$. Уравнение магнитодвижущих сил трансформатора имеет вид (2.12):

$$\dot{I}_0 W_1 = \dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2 \quad (2.12)$$

Мгновенное значение результирующей магнитодвижущей силы ($\dot{I}_1 W_1 = \dot{I}_2 W_2$) определяется мгновенным значением приложенного к первичной обмотке напряжения U_1 , и не зависит от величины нагрузки трансформатора. В режиме холостого хода величина магнитного потока Φ_m та же, что и при

нагрузке, если $U_1 = \text{const}$. Изменение напряжения вторичной обмотки при нагрузке по сравнению с напряжением холостого хода обычно выражают в процентах:

$$\Delta U_2 \% = (U_{20} - U_{2н})100/U_{2н} \quad (2.13)$$

где U_{20} – напряжение вторичной обмотки при холостом ходе;

$U_{2н}$ – напряжение вторичной обмотки при номинальной нагрузке трансформатора.

Пренебрегая влиянием падения напряжения на первичной обмотке трансформатора $I_0 Z_1$, равного произведению тока холостого хода на сопротивление первичной обмотки $Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$, ввиду его небольшого значения по сравнению с E_1 , коэффициент трансформации приближенно можно определить по показаниям приборов при опыте холостого хода как отношение первичного напряжения ко вторичному напряжению $K = E_1/E_2 \approx U_1/U_2$.

При этом $U_1 \approx E_1 = 4,44 f I_0 W_1 \Phi_m$.

Полученное выражение дает возможность вычислить магнитный поток Φ_m , а также магнитную индукцию $B_m = \Phi_m/S_C$, где S_C – сечение сердечника.

Активная мощность, потребляемая трансформатором в режиме холостого хода P_0 , затрачивается на потери мощности в магнитопроводе и электрические потери мощности в первичной обмотке $P_0 = P_m + P_{эл}$.

При этом $P_m = \Delta P_{вт} + \Delta P_{густ}$, где $\Delta P_{вт}$ – потери на вихревые токи; $\Delta P_{густ}$ – потери на перемагничивание сердечника; $P_{эл} = R_1 I_0^2$ – электрические потери.

Так как активное сопротивление первичной обмотки R_1 , так же, как и ток холостого хода I_0 трансформатора, обычно незначительно, электрические потери в этой обмотке оказываются небольшими и ими можно пренебречь. В результате этого можно принять, что мощность, потребляемая трансформатором в опыте холостого хода и измеряемая ваттметром, расходуется на потери в магнитопроводе, обусловленные гистерезисом и вихревыми токами: $P_0 = P_m$.

Опыт холостого хода проводится с целью определения коэффициента трансформации k , магнитного потока Φ_m , а также магнитных потерь P_m в сердечнике (потерь в стали) магнитопровода трансформатора. Опыт холостого хода дает возможность определить свойства сердечника трансформатора в отношении величины потерь в стали, намагничивающего тока и степени насыщения. По данным опытов холостого хода можно определить коэффициент трансформации и построить графики зависимостей тока холостого хода I_0 , мощности P_0 , коэффициента мощности $\cos \varphi_0$ от напряжения, приложенного к первичной обмотке трансформатора U_1 .

При работе трансформатора часть мощности расходуется на нагрев сердечника (магнитные потери), а также на нагрев обмоток (электрические потери). Магнитные потери P_m (потери в стали) складываются из потерь на гистерезис (перемагничивание) и потерь на вихревые токи (токи Фуко). Магнитные потери зависят от квадрата магнитной индукции B_m^2 , следовательно, от квадрата напряжения U_1^2 .

Поэтому, при опыте холостого хода при $U_1 = U_{1н}$ магнитные потери $P_m = \gamma P_0$, где $\gamma = U_1 / U_{1н}$; P_0 – потери в сердечнике, полученные по данным опыта холостого хода. Ток холостого хода I_0 измеряют амперметром и выражают в процентах от номинального тока первичной обмотки (2.14):

$$I_0 \% = \frac{I_0}{I_{1н}} 100 \quad (2.14)$$

В режиме холостого тока ток во вторичной обмотке отсутствует, а в первичной обмотке I_0 имеет небольшое значение. Следовательно, электрические потери при холостом ходе будут ничтожные, и потребляемая мощность трансформатора будет расходоваться на преодоление магнитных потерь. Поэтому, магнитные потери определяют по показаниям ваттметра при опыте холостого хода [6, 7, 9].

Электрические потери трансформатора определяют по опыту короткого замыкания. Опыт короткого замыкания дает возможность определить свойства обмоток трансформатора в отношении напряжения короткого замыкания. По данным опытов короткого замыкания можно определить электрические потери, коэффициент мощности, параметры схемы замещения и построить соответствующие графики зависимости от напряжения короткого замыкания трансформатора U_k . Опыт проводится при замкнутой накоротко вторичной обмотке трансформатора. При этом напряжение на вторичной обмотке равно нулю ($U_2 = 0$). Замыкание вторичной обмотки трансформатора накоротко в процессе эксплуатации приводит к тому, что при номинальном напряжении, подводимом к первичной обмотке, в обмотках трансформатора возникают весьма значительные токи, которые могут привести к выходу его из строя. При проведении опыта короткого замыкания трансформатора, в отличие от опасного режима короткого замыкания, возникающего в аварийных условиях самопроизвольно, к первичной обмотке трансформатора подводится такое пониженное напряжение, при котором в его обмотках возникают токи, равные соответствующим номинальным их значениям.

Для этого достаточно к первичной обмотке трансформатора подвести напряжение U_I , сниженное (в зависимости от типа и мощности трансформатора) в 10–20 раз по сравнению с соответствующим номинальным значением напряжения $U_{Iном}$. Так как при опыте короткого замыкания напряжение, подводимое к первичной обмотке, мало и составляет $U_{Ik} \approx E_{Ik} = 4.44w_1f_1\Phi_m$, то магнитный поток трансформатора Φ_m , а, следовательно, и магнитная индукция B_m трансформатора будут также малы. Это означает, что магнитные потери мощности в магнитопроводе P_m , которые, как известно, пропорциональны квадрату магнитной индукции B_m^2 , при опыте короткого замыкания ничтожно малы и ими можно пренебречь, то есть $P_m = 0$.

Лабораторная работа 2.
Исследование однофазного трансформатора

Таким образом, можно считать, что при опыте короткого замыкания вся мощность P_k , потребляемая трансформатором, идет на нагрев обмоток трансформатора, то есть равна электрическим потерям P_Σ в проводах обмоток трансформатора (2.15):

$$P_k = P_\Sigma + P_m \approx R_1 I_{1\text{ном}}^2 + R_2 I_{2\text{ном}}^2 = I_{1\text{ном}}^2 (R_1 + R_2') \quad (2.15)$$

В выражение (2.15) входят $I_{1\text{ном}}$ и $I_{2\text{ном}}$, то есть номинальные значения токов соответственно в первичной и вторичной обмотках трансформатора, так как опыт короткого замыкания проводится при номинальном значении тока. Поэтому с учетом того, что $P_m \approx 0$, мощность $P_k = P_{\text{ном}}$, то есть равна электрическим потерям мощности в обмотках трансформатора при номинальной нагрузке (рис. 2.3).

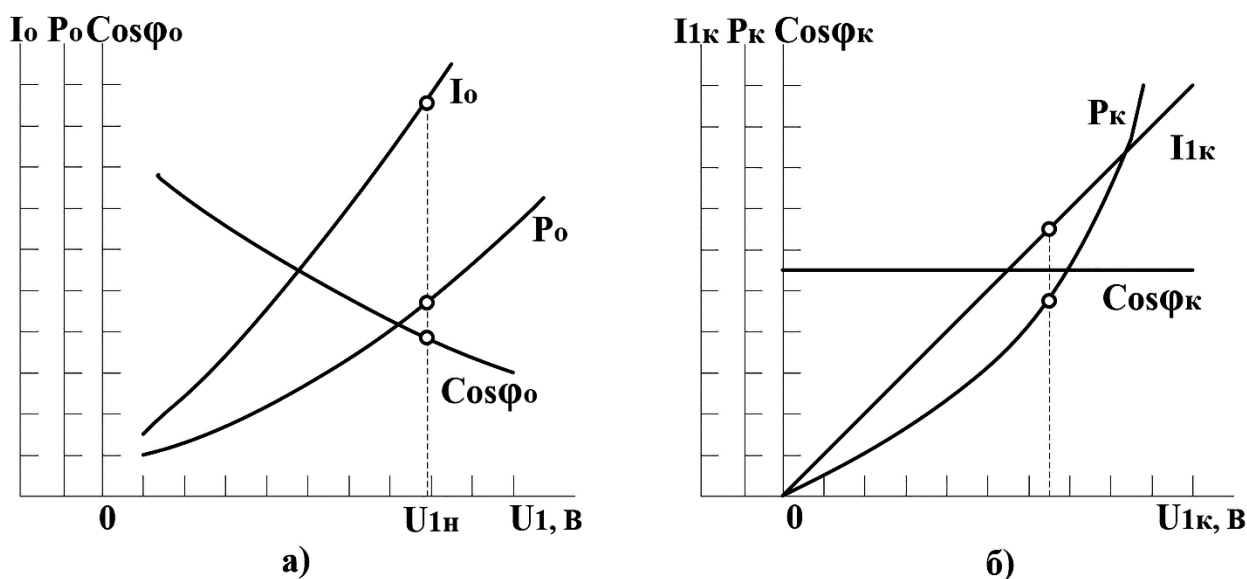


Рисунок 2.3 – Характеристики холостого хода (а) и короткого замыкания (б)

Величина напряжения короткого замыкания $U_{\text{кз}}$ обычно выражается в процентах от номинального значения $U_{\text{кз}} = (U_{\text{кз}}/U_{1\text{ном}})100$ и для нормальных силовых трансформаторов составляет 4–14 %. При таком напряжении магнитный поток в сердечнике будет иметь небольшую величину, и потери в стали будут незначительные. Поэтому мощность, потребляемая трансформатором

при опыте короткого замыкания, будет равняться электрическим потерям, которые получаются при номинальной нагрузке [3, 6, 7].

Опыты холостого хода и короткого замыкания совместно образуют метод, который дает возможность определить все характеристики трансформатора, работающего под нагрузкой: изменение напряжения, коэффициент полезного действия и др. Этим определяется большая ценность указанных опытов и высокие требования к ним в отношении точности.

К нагрузочным характеристикам трансформатора относятся зависимости вторичного напряжения U_2 , коэффициента мощности $\cos\varphi_1$ и коэффициента полезного действия η от тока нагрузки I_2 потребителя электроэнергии при $\cos\varphi_2 = \text{const}$. Зависимость напряжения на зажимах вторичной обмотки от тока нагрузки $U_2 = f(I_2)$ или коэффициента нагрузки $U_2 = f(\beta)$ является внешней характеристикой трансформатора.

Вторичная обмотка трансформатора по отношению к потребителю электроэнергии является источником, поэтому направление тока во вторичной обмотке совпадает с направлением ЭДС E_2 в этой обмотке.

Отсюда следует, что изменение тока нагрузки трансформатора приводит к изменению напряжения на зажимах его вторичной обмотки. Это происходит не только за счет увеличения падения напряжения на вторичной обмотке, то есть увеличения произведения $Z_2 I_2$, но также и за счет уменьшения ЭДС E_2 в реальных условиях, вследствие некоторого уменьшения магнитного потока при увеличении тока нагрузки трансформатора.

Внешняя характеристика трансформатора при различном характере нагрузки и $\cos\varphi_2 = \text{const}$ имеет вид (рис. 2.4, а), причем при индуктивном характере нагрузки, напряжение на вторичной обмотке уменьшается с ростом тока нагрузки (кривая 3); при емкостном характере нагрузки с увеличением тока нагрузки напряжение на зажимах вторичной обмотке возрастает (кривая

1), а при чисто активной нагрузке внешняя характеристика будет более жесткой (кривая 2).

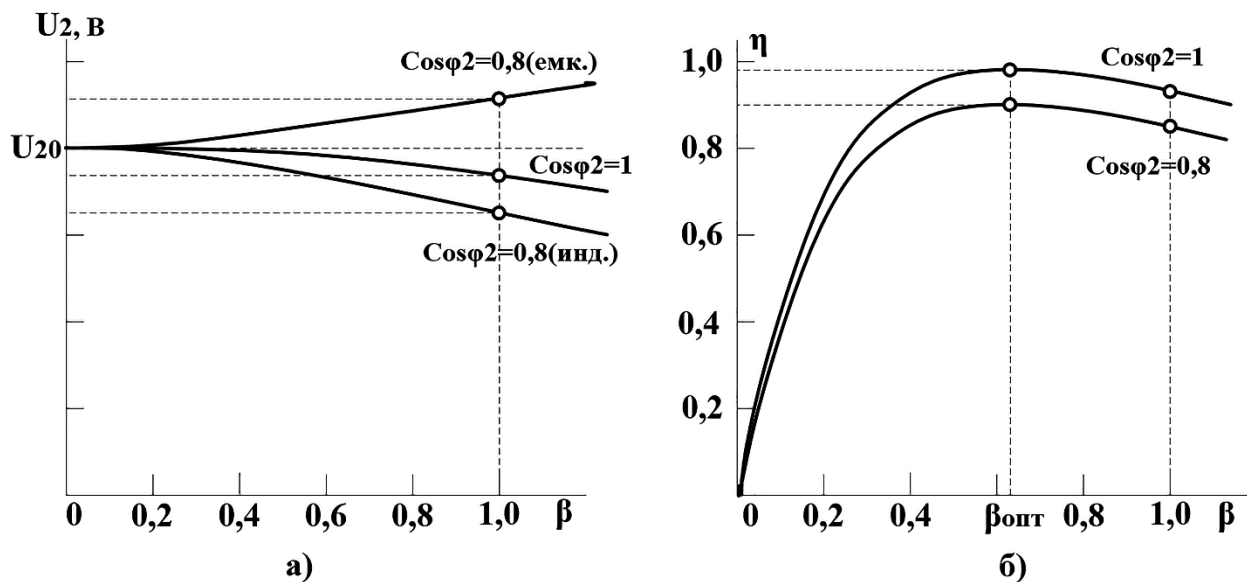


Рисунок 2.4 – Внешние характеристики трансформатора при разном характере нагрузки (а) и графики зависимости КПД трансформатора от нагрузки (б)

Коэффициент полезного действия трансформатора, как известно, представляет собой отношение полезной мощности к мощности, потребляемой им из сети (2.16):

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_m + P_\Sigma} = \frac{\beta U_2 I_2 \cos \varphi_2}{\beta U_2 I_{2H} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_k} \quad (2.16)$$

где P_m – потери в магнитопроводе трансформатора;

P_Σ – электрические потери в обмотках трансформатора;

$\beta = I_2 / I_{2H}$ – коэффициент загрузки трансформатора, то есть отношение тока нагрузки к номинальному его значению;

$\cos \varphi_2 = P_2 / U_2 I_2$ – коэффициент мощности потребителя электроэнергии.

При отсутствии нагрузки коэффициент полезного действия оказывается равным нулю, поэтому зависимость $\eta = f(I_2)$ будет выходить из начала координат (рис. 2.4, б). Из формулы (2.16) видно, что при малых значениях нагрузки, когда электрическими потерями мощности P_Σ в обмотках трансформатора вследствие небольшого значения тока нагрузки можно пренебречь, и

когда потери мощности в магнитопроводе P_m оказываются соизмеримыми с полезной мощностью P_2 , значение КПД трансформатора оказывается небольшим. С увеличением тока нагрузки КПД трансформатора растет.

Потери мощности в магнитопроводе трансформатора не зависят от нагрузки, в то время как с увеличением нагрузки электрические потери мощности в обмотках трансформатора растут пропорционально квадрату тока. С учетом этого анализ приведенной формулы показывает, что КПД трансформатора имеет наибольшее значение при равенстве электрических потерь мощности в обмотках и потерь мощности в магнитопроводе трансформатора. При дальнейшем возрастании нагрузки трансформатора потерями в магнитопроводе можно пренебречь. Анализ показывает, что при этих условиях КПД трансформатора с увеличением тока нагрузки сверх номинального, хотя и незначительно, будет снижаться, что видно из рисунка 2.4, б.

КПД современных трансформаторов весьма высок. С увеличением номинальной мощности трансформатора КПД растет, причем для мощных трансформаторов он достигает значений порядка 98–99 % [1, 6, 7, 8].

Программа работы

1. Ознакомиться с устройством трансформатора; записать его паспортные данные, а также данные измерительных приборов и регулятора напряжения.
2. Собрать схему опыта холостого хода однофазного трансформатора, и после проверки ее преподавателем выполнить опыт холостого хода.
3. Собрать схему опыта короткого замыкания однофазного трансформатора, и после проверки ее преподавателем выполнить опыт короткого замыкания.
4. Собрать схему и осуществить режим нагрузки однофазного трансформатора путем включения в его вторичную цепь переменного активного сопротивления.

5. На основании полученных экспериментальных данных произвести определение параметров трансформатора и построить его рабочие характеристики. Используя результаты опытов холостого хода и короткого замыкания, построить характеристики холостого хода: $I_0, P_0, \cos \varphi_0 = f(U_1)$; короткого замыкания: $I_K, P_K, \cos \varphi_K = f(U_K)$.

6. Используя результаты опытов холостого хода и короткого замыкания, построить внешнюю характеристику $U_2 = f(I_2)$ и рабочие характеристики трансформатора: $I_1 = f(I_2)$, $\eta = f(I_2)$ и $\cos \varphi_1 = f(I_2)$; КПД трансформатора от нагрузки при $\cos \varphi_2 = 0,8$ и $\cos \varphi_2 = 1$ и определить нагрузку трансформатора, соответствующую максимальному значению КПД. Составить отчет, и выводы по работе.

Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал: принцип действия и устройство силового трансформатора, уравнения ЭДС, МДС и токов; схему замещения трансформатора; трехфазный трансформатор; опыты холостого хода и короткого замыкания, потери и КПД; внешние характеристики трансформатора.

2. Ознакомиться с приборами, аппаратами и оборудованием стенда, используемыми при выполнении работы, и занести в отчет по лабораторной работе номинальные технические данные исследуемого трансформатора.

3. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатные сетки для построения графиков.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством трансформатора; записать его паспортные данные, а также данные измерительных приборов и регулятора напряжения.

2. Опыт холостого хода.

Лабораторную работу выполняют на однофазном трансформаторе:

ТП-0,25-УХЛ-4, имеющем паспортные данные:

$$S_{НОМ} = 0,25 \text{ кВА} = 250 \text{ ВА};$$

$$U_{1НОМ} = 220 \text{ В}; U_{2НОМ} = 24 \text{ В};$$

$$I_{1НОМ} = 250/220 = 1,136 \text{ А}; I_{2НОМ} = 250/24 = 10,42 \text{ А};$$

$$P_{ac} = 30 \text{ см}^2 = 30 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$w_2 = 50 \text{ витков}; w_1 = 460 \text{ витков}.$$

В схеме включения однофазного трансформатора при опыте холостого хода применены следующие устройства (рис. 2.5):

- 1) автоматический выключатель QF;
- 2) регулятор напряжения РНО, позволяющий плавно регулировать подводимое к первичной обмотке трансформатора напряжение;
- 3) измерительные приборы: амперметр РА; ваттметр РW; два вольтметра PV1 и PV2.

Произвести опыт холостого хода трансформатора:

а) в соответствии с принципиальной схемой (рис. 2.5) собрать электрическую цепь для проведения опыта холостого хода трансформатора; питание электрической цепи осуществлять от регулируемого источника синусоидального напряжения РНО; в качестве первичной обмотки используют обмотку низшего напряжения НН [6, 7, 9];

б) измерение тока I_0 , мощности P_0 в первичной обмотке трансформатора при холостом ходе производить измерительным комплектом К505, а напряжения на зажимах вторичной обмотки – вольтметром В7-22А; всего делают не менее пяти замеров через приблизительно одинаковые интервалы тока холостого хода, изменяя подводимое к трансформатору напряжение от $0,5 U_{1НОМ}$ до $1,15 U_{1НОМ}$; показания измерительных приборов заносят в таблицу 2.1.

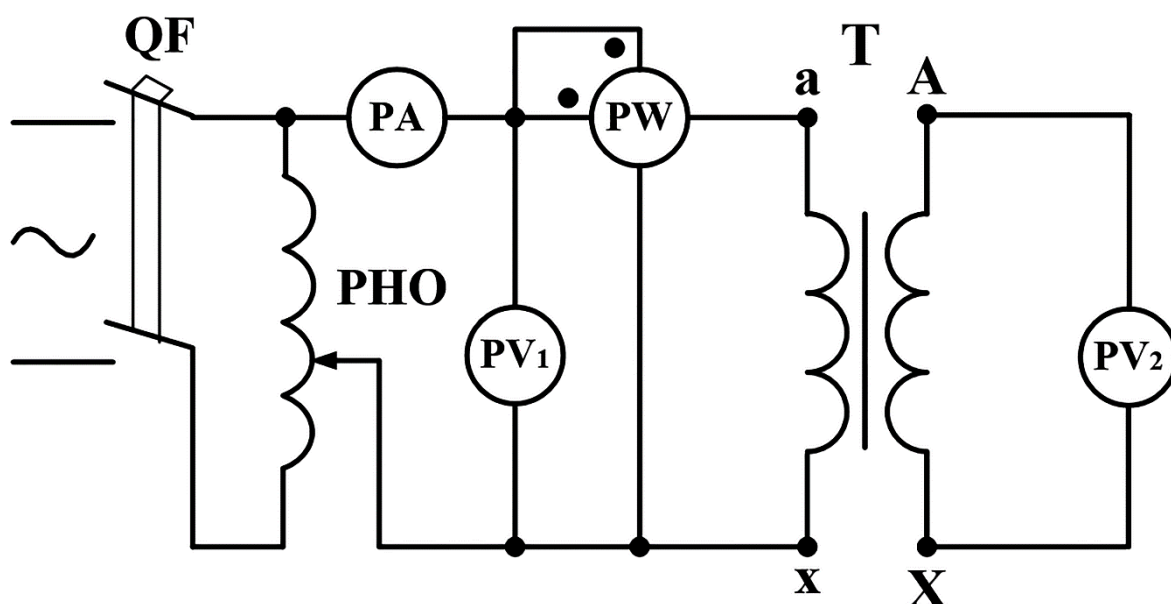


Рисунок 2.5 – Схема включения однофазного трансформатора
(опыт холостого хода)

Таблица 2.1 – Данные режима холостого хода трансформатора

Измерения				Вычисления						
U_1	I_0	P_0	U_{20}	I_0	$\cos \varphi_0$	K	Φ_m	B_m	R_0	X_0
В	А	Вт	В	%	—	—	Вб	Тл	Ом	Ом

3. Опыт короткого замыкания. При опыте короткого замыкания трансформатора (рис. 2.6) напряжение обычно подводят к обмотке ВН, номинальное значение тока в которой меньше, чем в обмотке НН. В некоторых случаях это позволяет включать ваттметр в первичную цепь без трансформатора тока. Вторичную обмотку трансформатора замыкают накоротко медным проводом достаточного поперечного сечения, чтобы не создавать во вторичной цепи трансформатора значительного электрического сопротивления.

Опыт короткого замыкания проводят в такой последовательности: устанавливают рукоятку РНО на нулевую отметку, а затем, включив рубильник, медленно посредством РНО повышают напряжение, изменяя значение тока короткого замыкания от 0 до $1,2I_{ном}$. Показания измерительных приборов (U_K ,

$I_{1к}$ и P_k), снятые через приблизительно одинаковые интервалы тока короткого замыкания, а также результаты вычислений заносят в таблицу 2.2. Значения величин, соответствующих току $I_{1к} = I_{ном}$, подчеркивают.

Опыт короткого замыкания трансформатора необходимо произвести при пониженном напряжении на первичной обмотке трансформатора, при котором ток в первичной обмотке $I_{1к} = I_{1н}$, а во вторичной – $I_{2к} = I_{2н}$, то есть токи в обмотках равны номинальным их значениям. Поэтому напряжение, подводимое к первичной обмотке, должно устанавливаться изменением напряжения источника питания от $U_{1к} = 0$, то есть с нулевого значения.

Для проведения опыта короткого замыкания необходимо:

1) собрать электрическую цепь для проведения опыта короткого замыкания исследуемого трансформатора, принципиальная схема, которой приведена на рисунке 2.6.

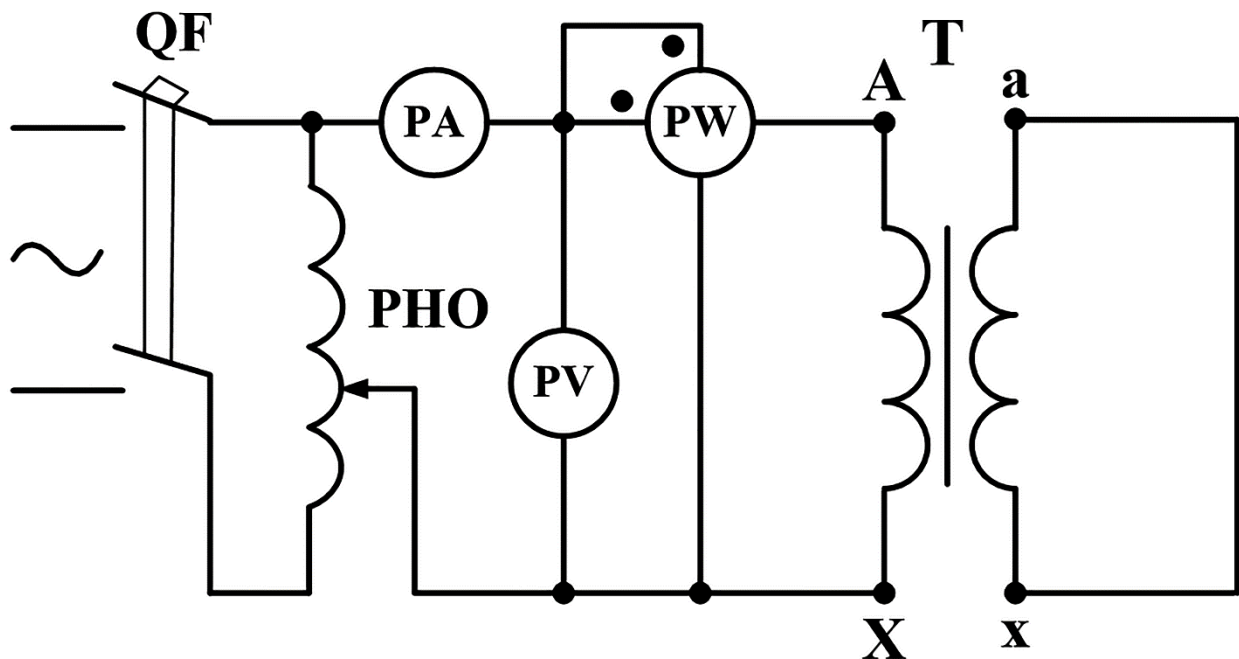


Рисунок 2.6 – Схема включения однофазного трансформатора (опыт короткого замыкания)

2) измерения тока $I_{1к}$, мощности P_k и напряжения U_k в первичной обмотке при опыте короткого замыкания трансформатора производятся измерительным комплектом К505;

3) плавно изменяют напряжение на первичной обмотке трансформатора от нуля до значения, при котором токи в обмотках достигнут номинальных значений величин, определяемых в таблице 2.2 [6, 7, 9].

Таблица 2.2 – Данные режима короткого замыкания трансформатора

Измерения				Вычисления			
U_{1K}	I_{1K}	P_K	U_{1K}	$\cos\varphi_{1K}$	R_K	Z_K	X_K
В	А	Вт	%	–	Ом	Ом	Ом

4. Опыт нагрузки трансформатора. Провести опыт нагрузки трансформатора:

1) собрать электрическую цепь, принципиальная схема которой для проведения опыта нагрузки исследуемого трансформатора приведена на рисунке 2.7.

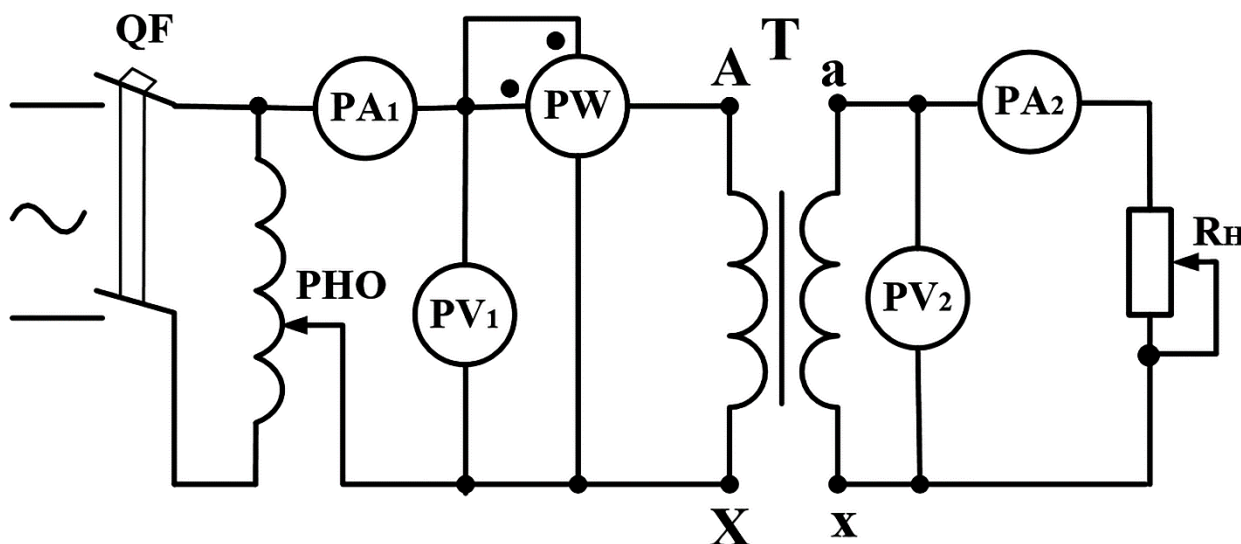


Рисунок 2.7 – Схема включения однофазного трансформатора для испытания под нагрузкой

2) в качестве нагрузки к зажимам вторичной обмотки трансформатора подключить резисторы с переменными и постоянными параметрами, суммарное сопротивление которых, рассчитав с учетом того, что во вторичной обмотке ток должен изменяться от $I_2 = 0,1I_{2н}$ до $I_2 = (1,2-5-1,25) I_{2н}$,

3) измерение тока I_1 , мощности P_1 и напряжения U_1 первичной обмотки трансформатора производить измерительным комплектом К505, а измерение тока I_2 и напряжения U_2 вторичной обмотки – цифровыми амперметром и вольтметром;

4) установить на первичной обмотке трансформатора номинальное напряжение U_{1h} и, изменяя сопротивление резисторов во вторичной цепи с переменными параметрами, произвести пять – шесть измерений при различных токах нагрузки в указанном диапазоне его изменений; при проведении опыта напряжение на зажимах первичной обмотки трансформатора поддерживать неизменным; результаты измерений записать в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Данные режима трансформатора под нагрузкой

Номер измерений	Измерения						Вычисления			
	U_1	I_1	P_1	U_2	I_2	P_2	β	γ	η	$\cos\varphi_1$
	В	А	Вт	В	А	Вт				
Примечания: $\beta = I_2/I_{2H}$ коэффициент нагрузки трансформатора. $\gamma = U_2/U_{2H}$ коэффициент изменения напряжения на вторичной обмотке. $P_2 = U_2 I_2 \cos\varphi_2$ активная мощность потребителя электроэнергии.										

5. По результатам измерений, проведенных в опыте холостого хода трансформатора, произвести вычисления:

1) рассчитать ток холостого хода в процентах от номинального первичного тока:

$$I_0 = \left(\frac{I_0}{I_{1ном}} \right) 100 \quad (2.17)$$

2) коэффициент мощности в режиме холостого хода:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_1 I_0} \quad (2.18)$$

3) коэффициент трансформации (так как при опыте холостого хода первичной является обмотка НН, то коэффициент трансформации определяют отношением вторичного напряжения к первичному):

$$k = \frac{U_{20}}{U_1} \quad (2.19)$$

4) амплитудные значения магнитного потока и магнитной индукции в сердечнике трансформатора:

$$\Phi_m = \frac{U_2}{4,44w_2f_1}; B_m = \frac{\Phi_m}{S} \quad (2.20)$$

где w_2 – число витков вторичной обмотки трансформатора;

S – площадь поперечного сечения сердечника трансформатора (указаны в паспортных данных).

5) параметры намагничивающего контура (пренебрегая падениями напряжений на R_I и X_I от тока I_0):

$$R_0 = \frac{P_0}{I_0^2}; Z_0 = \frac{U_1}{I_0}; X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} \quad (2.21)$$

6) магнитные потери мощности в магнитопроводе трансформатора: $P_M \cong P_0$.

Величины, соответствующие номинальному первичному напряжению $U_{Iном}$, следует выделить, например, подчеркнув их. По данным таблицы 2.1 строят характеристики холостого хода трансформатора (на общей координатной сетке): $I_0, P_0, \cos\varphi_0 = f(U_1)$. На характеристиках отмечают точки $U_{0ном}$; $P_{0ном}$ и $\cos\varphi_{0ном}$, соответствующие номинальному напряжению $U_{Iном}$.

6. По результатам измерений опыта короткого замыкания произвести вычисления:

1) напряжение короткого замыкания в процентах от номинального первичного напряжения:

$$U_k \% = \left(\frac{U_k}{U_{1ном}} \right) 100 \quad (2.22)$$

2) коэффициент мощности при опыте короткого замыкания:

$$\cos \varphi_{1k} = \frac{P_k}{U_k I_{1k}} \quad (2.23)$$

3) электрические потери мощности в трансформаторе: $P_{Эн} \cong P_k$;

4) параметры схемы замещения трансформатора:

$$R_k = R_1 + R'_2 = \frac{P_k}{I_{1k}^2}; Z_k = \frac{U_{1k}}{I_{1k}}; X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad (2.21)$$

По расчетным данным таблицы строят характеристики короткого замыкания (на общей координатной сетке): I_k ; P_k ; $\cos \varphi_k = f(U_k)$. На характеристиках отмечают точки $U_{кном}$, $P_{кном}$, соответствующие току короткого замыкания $I_{1k} = I_{кном}$.

7. Внешние характеристики. С увеличением нагрузки трансформатора напряжение на клеммах его вторичной обмотки изменяется. Зависимость этого напряжения от нагрузки выражается графически внешними характеристиками трансформатора $U_2 = f(I_2)$. Вид внешней характеристики зависит от характера нагрузки и коэффициента мощности $\cos \varphi_2$: при активной и активно-индуктивной нагрузках внешние характеристики имеют падающий вид; причем, чем меньше коэффициент мощности $\cos \varphi_2$, тем больше наклон характеристики к оси абсцисс; при активно-емкостной нагрузке внешняя характеристика имеет восходящий вид (рис. 2.4, а).

При любой нагрузке напряжение на клеммах вторичной обмотки трансформатора равно:

$$U_2 = U_{20}(1 - 0,01\Delta U) \quad (2.25)$$

где $U_{20} = U_{2ном}$ – напряжение на вторичной обмотке в режиме холостого хода, принимаемое за номинальное напряжение на выходе трансформатора;

ΔU – изменение вторичного напряжения, вызванное влиянием нагрузки трансформатора, %.

Для построения внешней характеристики трансформатора необходимо рассчитать не менее пяти значений вторичного напряжения U_2 при разных значениях коэффициента нагрузки $\beta = I_2/I_{2ном}$, например, при $\beta = 0,25; 0,50; 0,75; 1,0$ и $1,2$. Расчет ΔU ведут по формуле:

$$\Delta U = \beta U_k (\cos \varphi_k \cos \varphi_2 + \sin \varphi_k \sin \varphi_2) \quad (2.26)$$

Расчеты ΔU выполняют три раза: при $\cos \varphi_2 = 1,0$, $\cos \varphi_2 = 0,8$ (нагрузка активно-индуктивная) и $\cos \varphi_2 = 0,8$ (нагрузка активно-емкостная). В последнем случае получают отрицательные значения ΔU . Результаты вычислений заносят в таблицу 2.4 и строят на общей координатной сетке три внешние характеристики. Проведя ординату при $\beta = 1,0$ (номинальная нагрузка), отмечают на характеристиках напряжения, соответствующие номинальной нагрузке трансформатора [6, 7, 9].

Таблица 2.4 – Данные для построения внешней характеристики трансформатора

β	$\cos \varphi_2 = 1$		$\cos \varphi_2 = 0,8$ (активно-индуктивная)		$\cos \varphi_2 = 0,8$ (активно-емкостная)	
	$\Delta U, \%$	$U_2, В$	$\Delta U, \%$	$U_2, В$	$\Delta U, \%$	$U_2, В$
0,25						
0,5						
0,75						
1,0						
1,2						

8. Зависимость КПД трансформатора от нагрузки. Для построения графика $\eta = f(\beta)$ при $\cos \varphi_2 = 1,0$ и $\cos \varphi_2 = 0,8$ определяют КПД трансформатора для ряда значений коэффициента нагрузки β , равного $0,25; 0,5; 0,75; 1,0$ и $1,2$, воспользовавшись для этого выражением (2.27):

$$\eta = 1 - \frac{P_{0ном} + \beta^2 P_{к.ном}}{\beta S_{ном} \cos \varphi_2 + P_{0ном} + \beta^2 P_{к.ном}} \quad (2.27)$$

где $S_{ном}$ – номинальная мощность трансформатора, В.

Результаты вычислений заносят в таблицу 2.5.

Таблица 2.5 – Данные зависимости КПД трансформатора от коэффициента нагрузки β

β		0,25	0,5	0,75	1,0	1,2
КПД	$\cos\varphi_2 = 1$					
	$\cos\varphi_2 = 0,8$					

По этим данным строят графики КПД (рис. 2.4, б).

Максимальное значение КПД трансформатора соответствует нагрузке, при которой электрические потери трансформатора равны магнитным потерям. Коэффициент нагрузки, соответствующий максимальному значению β , равен:

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{P_{0.\text{ном}}}{P_{\text{к.ном}}}} \quad (2.28)$$

На оси абсцисс отмечают значение $\beta_{\text{опт}}$ и, проведя в этой точке ординату, определяют максимальные значения КПД. Эти значения можно получить по формуле (2.29), подставив в это выражение $\beta_{\text{опт}}$:

$$\eta_{\text{max}} = 1 - \frac{P_{0.\text{ном}}}{0,5\beta_{\text{опт}}S_{\text{ном}}\cos\varphi_2 + P_{0.\text{ном}}} \quad (2.29)$$

Коэффициент мощности трансформатора равен:

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{U_1 I_1} \quad (2.30)$$

9. По расчетным и измеренным данным испытаний построить в единой координатной системе внешнюю характеристику $U_2 = f(I_2)$ и рабочие характеристики трансформатора: $I_1 = f(I_2)$, $\eta = f(I_2)$ и $\cos\varphi_1 = f(I_2)$. Зарисовать Т-образную схему замещения нагруженного трансформатора с указанием ее элементов. Составить отчет и сделать выводы о проделанной работе [6, 7, 9].

Контрольные вопросы

1. Поясните назначение трансформатора.
2. Объясните устройство и принцип действия однофазного трансформатора.
3. Где применяются повышающие и понижающие трансформаторы?
4. Определите виды и назначение магнитопроводов.
5. Как по внешним признакам отличить обмотку высшего напряжения от обмотки низшего напряжения?
6. Что называется коэффициентом трансформации?
7. Как и с какой целью производится опыт холостого хода трансформатора?
8. Объясните, почему коэффициент трансформации определяется из опыта холостого хода?
9. Почему потери мощности в магнитопроводе трансформатора не зависят от тока нагрузки?
10. Как и с какой целью производится опыт короткого замыкания?
11. Почему при опыте короткого замыкания можно пренебречь потерями мощности в магнитопроводе трансформатора?
12. Что называется внешней характеристикой трансформатора?
13. Почему при изменении тока во вторичной обмотке трансформатора изменяется ток и в первичной его обмотке?
14. Какое влияние оказывает характер нагрузки на внешнюю характеристику трансформатора?
15. Почему с возрастанием тока нагрузки энергетические показатели трансформатора вначале возрастают, а затем снижаются?
16. Почему с увеличением первичного напряжения при опыте холостого хода уменьшается коэффициент мощности трансформатора?

17. Почему мощность холостого хода принимают за магнитные потери, а мощность короткого замыкания – за электрические потери?

18. Почему при нагрузке $\beta > \beta_{\text{опт}}$ коэффициент полезного действия трансформатора уменьшается?

19. Почему при изготовлении сердечника используют ферромагнитные материалы?

20. Почему при подключении трансформатора к сети переменного тока он начинает гудеть?

Тестовые задания

1. Поясните, на каком физическом явлении основан принцип работы трансформатора, как преобразователя электрической энергии?

- а) явление взаимодействия проводников с током и магнитного поля;
- б) явление возникновения вокруг проводника с током магнитного поля;
- в) явление электромагнитной индукции;
- г) явление гистерезиса;
- д) явление обратимости.

2. Чему пропорциональны потери в стали магнитопровода при работе трансформатора в режиме холостого хода?

- а) току холостого хода I_0 ;
- б) квадрату приложенного напряжения U_1^2 ;
- в) приложенному напряжению U_1 ;
- г) квадрату тока холостого хода I_0^2 ;
- д) пропорциональны току нагрузки I_n .

3. В каком случае трансформатор нагревается больше?

- а) в опыте холостого хода;
- б) в опыте короткого замыкания;
- в) при номинальной нагрузке;

г) во всех перечисленных выше случаях нагрев трансформатора примерно одинаков.

4. Какое из приведенных условий не определяет режим холостого хода трансформатора?

- а) ток нагрузки равен нулю $I_n = 0$;
- б) ток в первичной обмотке равен нулю $I_1 = 0$;
- в) к первичной обмотке подведено номинальное напряжение U_{1n} .

5. Какое из приведенных условий не определяет режим короткого замыкания трансформатора?

- а) постоянное значение коэффициента мощности $\cos \varphi_1 = \cos \varphi_2 = \text{const}$;
- б) напряжение вторичной обмотки равно нулю $U_2 = 0$;
- в) к первичной обмотке подведено пониженное напряжение U_{1n} , при котором ток короткого замыкания равен номинальному току $I_k = I_n$;
- г) частота тока в обмотках равна номинальной частоте;
- д) ток нагрузки равен нулю $I_n = 0$.

6. На что расходуется энергия трансформатора в режиме холостого тока?

- а) на электрические потери первичной обмотки трансформатора;
- б) на электрические потери вторичной обмотки трансформатора;
- в) на магнитные потери в стали;
- г) на электрические потери первичной и вторичной обмотки трансформатора;
- д) на нагрев вторичной обмотки трансформатора.

7. На что расходуется энергия в режиме короткого замыкания трансформатора?

- а) на электрические потери первичной обмотки трансформатора $\Delta P_{эл1}$;
- б) на электрические потери вторичной обмотки трансформатора $\Delta P_{эл2}$;
- в) на магнитные потери в стали ΔP_m ;

г) на электрические потери первичной $\Delta P_{эл1}$ и вторичной обмотки трансформатора $\Delta P_{эл2}$;

д) на нагрев вторичной обмотки трансформатора.

8. Укажите полную формулу для определения коэффициента трансформации:

а) $K = E_1/E_2 = W_1/W_2 \approx U_1/U_2$;

б) $K = U_1/U_2$;

в) $K = E_2/E_1$;

г) $K = W_1/W_2$;

д) $K = U_2/U_1$.

9. Как зависят от коэффициента нагрузки трансформатора β : потери в меди $\Delta P_{эл}$ и потери в стали $\Delta P_{м}$? Укажите вариант полного правильного ответа:

а) $\Delta P_{эл} \equiv \beta^2 \Delta P_{м} \equiv \beta^2$;

б) $\Delta P_{эл} \equiv \beta^2 \Delta P_{м}$ не зависят от β ;

в) $\Delta P_{эл}$ не зависят от β $\Delta P_{м} \equiv \beta^2$;

г) $\Delta P_{эл}$ не зависят от β $\Delta P_{м}$ не зависят от β .

10. Для трансформатора коэффициентом трансформации называется отношение:

а) числа витков первичной обмотки к числу витков вторичной обмотки $K = W_1/W_2$;

б) числа витков первичной обмотки к общему числу витков обмоток;

в) числа витков вторичной обмотки к числу витков первичной обмотки $K = W_1/W_2$;

г) числа витков вторичной обмотки к общему числу витков обмоток.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Цель работы: изучение устройства, принципа действия и испытание трехфазного трансформатора в режимах короткого замыкания и холостого хода; построение внешней характеристики трансформатора.

Общие сведения

Преобразование и передача электрической энергии осуществляются трехфазной системой токов и напряжений. В системах электроснабжения при передаче и распределении электроэнергии применяют силовые трехфазные трансформаторы. По конструктивному исполнению трехфазные трансформаторы бывают двух типов: трехстержневые с общим магнитопроводом и групповые трехфазные трансформаторы, состоящие из трех однофазных трансформаторов [2, 7, 8, 9].

1. Трехстержневой трехфазный трансформатор. В цепях трехфазного тока для трансформирования электрической энергии переменного тока в большинстве случаев применяются трехфазные трансформаторы. На рисунке 3.1 показан трехфазный трансформатор с трехстержневым магнитопроводом, на каждый стержень которого намотаны первичная и вторичная обмотки соответствующей фазы. Магнитопровод трансформатора имеет три стержня А, В, С равного сечения, которые расположены в одной плоскости, и ярмо D.

Стержнем называют часть магнитной системы, на которой располагаются обмотки трансформатора. Часть магнитной системы трансформатора, не несущая основных обмоток и служащая для замыкания магнитной цепи, называется **ярмом**.

Обмотки высшего (ВН) и низшего (НН) напряжений каждой из фаз трансформатора размещают на стержне концентрически одна поверх другой. Обычно

ближе к стержню располагают обмотку НН. Обмотки изолированы друг от друга и от стержня жесткими цилиндрами, изготовленными из бумаги с последующей пропиткой ее бакелитовым лаком. Обмотки наматываются в одну сторону, каждая из них имеет условное начало и конец. Начала обмоток высшего напряжения ВН обозначают соответственными прописными латинскими буквами А, В, С, а их концы – X, Y, Z, начало фаз обмоток низшего напряжения НН обозначают строчными латинскими буквами, а, b, c, а концы – x, y, z.

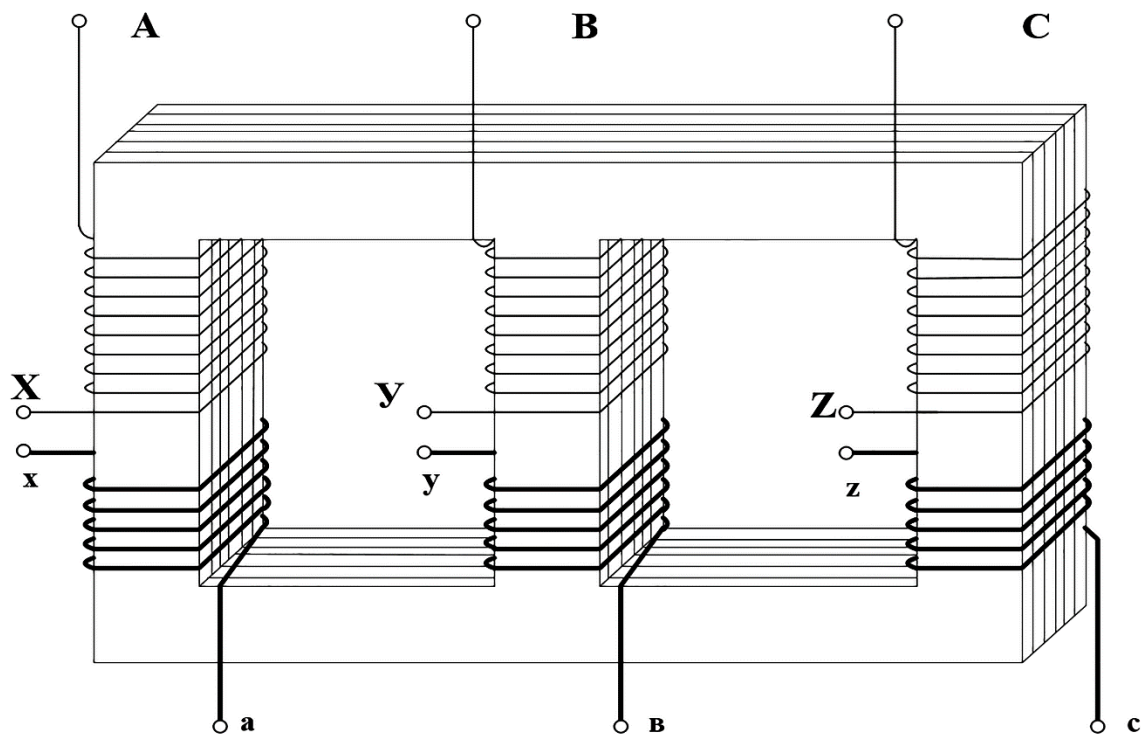


Рисунок 3.1 – Трехфазный трехстержневой трансформатор

В трехстержневых трансформаторах между обмотками каждой фазы, имеющей общий магнитопровод, существует магнитная связь. Трехстержневые трансформаторы используются в распределительных сетях на предприятиях. В цепях трехфазного тока для трансформирования электрической энергии переменного тока в большинстве случаев применяются трехфазные трансформаторы, хотя для этой цели могут быть использованы три однофазных трансформатора (если их мощности достаточно велики – более 100 кВА в

фазе). Трансформирование трехфазной системы напряжений можно выполнить тремя однофазными трансформаторами, соединенными в трансформаторную группу [1, 3, 7, 8, 9].

2. Групповые трехстержневые трехфазные трансформаторы. Групповым трехфазным трансформатором называется *трехфазный трансформатор, образованный из трех однофазных трансформаторов, обмотки которого соединены по определенной схеме и подключены к трехфазной сети переменного тока*. Групповой трансформатор имеет независимую магнитную систему, то есть каждая фаза трансформируется своим отдельным трансформатором, имеющим на каждую фазу отдельный магнитопровод (рис. 3.2).

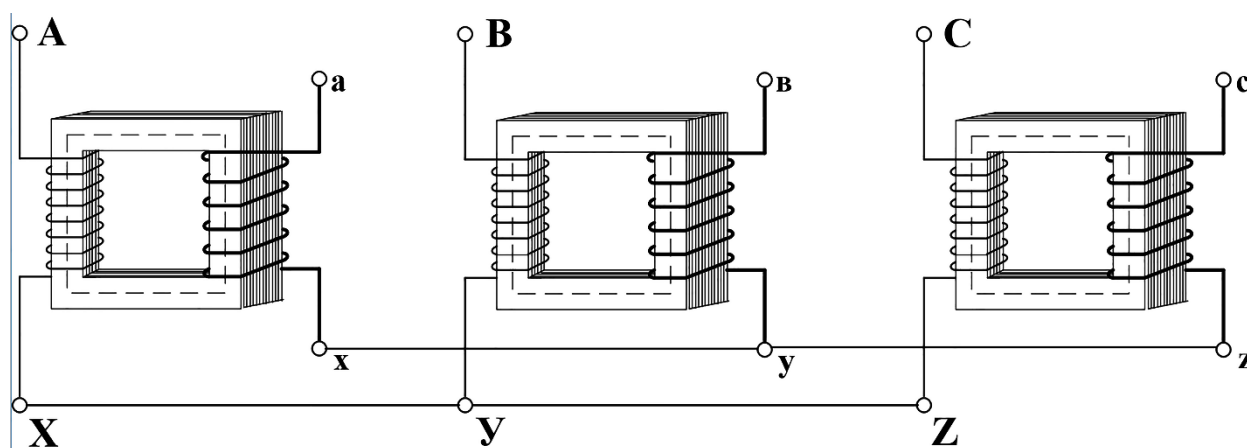


Рисунок 3.2 – Трехфазная группа однофазных трансформаторов
(групповой трехфазный трансформатор)

В трансформаторах с независимой магнитной системой (групповые) каждая фаза преобразуется своим отдельным трансформатором, имеющим на каждую фазу отдельный магнитопровод. Однако относительная громоздкость, большой вес и повышенная стоимость ограничивают применение группового трансформатора, и поэтому такой трансформатор применяется только в установках большой мощности с целью уменьшения веса и габаритов единицы оборудования, что важно при монтаже и транспортировке трансформаторов.

Недостатками группового трансформатора являются: 1) занимает большую площадь; 2) высокая стоимость; 3) меньший коэффициент полезного действия.

Достоинства группового трансформатора: 1) резерв достаточен на одну треть установленной мощности; 2) транспортный габарит одной фазы меньше, чем у трехстержневого трансформатора.

Групповой трансформатор используется на большие мощности на тепловых станциях. Однако применение трехфазных трансформаторов предпочтительнее, так как они меньше по размерам (чем три однофазных) и дешевле. Следовательно, при симметрии напряжения на фазах первичной обмотки и симметричной нагрузке, подключенной к вторичной обмотке, все фазы трансформатора находятся в равных условиях и для анализа можно рассматривать работу только одной фазы, считая, что процессы в других фазах аналогичны. Для фазных напряжений и токов при симметричной нагрузке справедливы формулы, полученные для однофазного тока, при подстановке в них фазных напряжений, токов, мощностей. Поэтому вся теория, рассмотренная для однофазного трансформатора относится и к трехфазному применительно к одной фазе. **Но в трехфазных трансформаторах есть свои особенности, которые рассмотрены ниже.**

1. Первая особенность. Эта особенность относится к трехстержневому трансформатору (рис. 2.1). *Трехстержневой магнитопровод с расположением стержней в одной плоскости с точки зрения магнитных цепей несимметричен, так как длина магнитной цепи, по которой замыкается магнитный поток средней фазы (фазы В), короче, чем магнитные цепи для замыкания потоков крайних фаз (фаз А и С).* Магнитная несимметрия обуславливает несимметрию фазных токов намагничивания. Ток намагничивания фазы В, размещенной на среднем стержне, меньше на 10–15 % токов фаз на крайних стержнях.

При холостом ходе намагничивающие токи обмоток образуют несимметричную трехфазную систему. Поэтому, поток в среднем стержне при холостом ходе проходит путь меньше, чем в крайних стержнях. То есть, при холостом ходе токи представляют несимметричную систему. Модули не равны и угол не равен 120° . Для уменьшения магнитной несимметрии трехстержневого магнитопровода, то есть уменьшения магнитного сопротивления потокам крайних фаз, сечение ярм делают на 10–15 % больше сечения стержней, что уменьшает их магнитное сопротивление.

При симметричной нагрузке система токов по фазам принимает симметричную систему. При симметричном питающем напряжении и равномерной трехфазной нагрузке все фазы трехфазного трансформатора, выполненного на трехстержневом магнитопровode, практически находятся в одинаковых условиях. Поэтому рассмотренные ранее уравнения напряжений, МДС и токов, а также схема замещения и векторные диаграммы для однофазного трансформатора могут быть использованы для исследования работы каждой фазы трехфазного трансформатора [1, 3, 6, 7, 10].

При питании трансформатора от симметричной трехфазной сети в его стержнях возбуждаются магнитные потоки Φ_A , Φ_B и Φ_C , сдвинутые по фазе относительно друг друга на угол 120° . Эти потоки, в свою очередь, индуцируют в фазах обмоток трансформатора симметричные системы ЭДС: в фазах обмотки высшего напряжения E_A , E_B , E_C , в фазах обмотки низшего напряжения E_a , E_b , E_c . В симметричных трехфазных системах фазные ЭДС сдвинуты относительно друг друга на угол 120° .

2. Вторая особенность трехфазного трехстержневого трансформатора связана со способом соединения обмоток. Выводы обмоток трансформаторов принято обозначать: обмотки ВН – начала обмоток А, В, С, соответствующие концы Х, Y, Z; обмотки НН – начала обмоток а, b, с, соответствующие концы х, у, z. Обмотки трехфазных трансформаторов принято соединять

по различным схемам, которые предусмотрены соответствующим государственным стандартом.

Y , Δ , Z – звезда, треугольник, зигзаг (рис. 2.3, а, б, в). Схемы соединения обмоток трансформатора обозначают дробью, в числителе которой указана схема соединения обмоток ВН, а в знаменателе – схема соединения обмоток НН. Например, Y/Y_0 для мелких распределительных трансформаторов (на предприятиях); Y/Δ для трансформаторов средней и большой мощности; Y_0/Δ для трансформаторов большой мощности при повышенном напряжении.

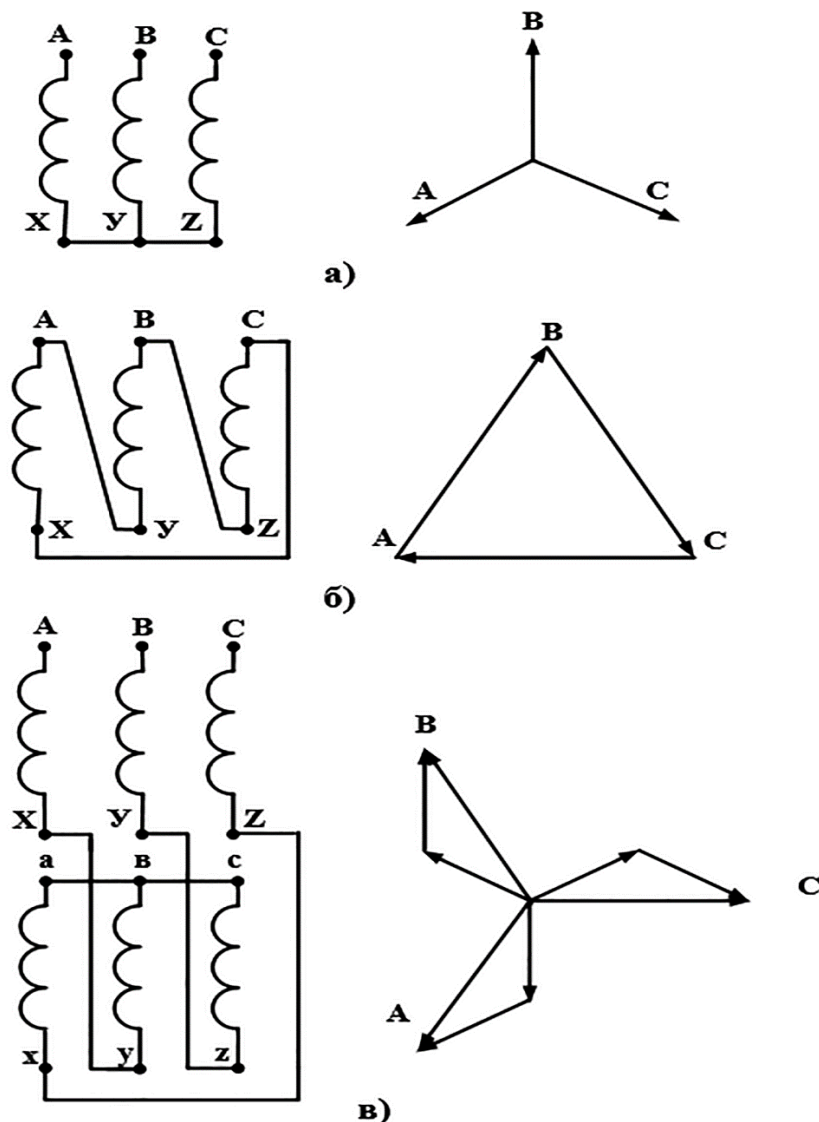


Рисунок 3.3 – Схемы и векторные диаграммы соединения обмоток трехфазного трансформатора
а) звезда; б) треугольник; в) зигзаг

Соединение в зигзаг делается на стороне низкого напряжения. Для выполнения соединения зигзаг каждую фазу обмотки НН делят на две части, располагая их на разных стержнях. Указанные части обмоток соединяют так, чтобы конец одной части фазной обмотки был присоединен к концу другой части этой же обмотки, расположенной на другом стержне (рис. 2.3, в). Соединения делается так, чтобы ЭДС этих полуобмоток вычиталась; для этого необходимо конец одной части фазы соединить с концом второй части другого стержня. Такой способ применяется там, где существует резкая несимметрия нагрузки (точные трансформаторы, трансформаторы для выпрямительных устройств). При таком способе соединения выравнивается магнитная несимметрия по стержням.

3. Третья особенность. *Трехфазные трансформаторы обычно характеризуют двумя коэффициентами трансформации: фазным и линейным.*

Фазный коэффициент трансформации *равен отношению числа витков фазы обмотки высшего напряжения к числу витков обмотки низшего напряжения или отношению фазных напряжений этих обмоток при холостом ходе:*

$$K_{\phi} = \frac{W_{\text{ВН}}}{W_{\text{НН}}} = \frac{U_{\phi.\text{ВН}}}{U_{\phi.\text{НН}}} \quad (3.1)$$

Линейный коэффициент трансформации *равен отношению линейного напряжения обмотки высшего напряжения к линейному напряжению обмотки низшего напряжения при холостом ходе:*

$$K_{\text{л}} = \frac{U_{\text{л.ВН}}}{U_{\text{л.НН}}} \quad (3.2)$$

Следовательно, отношение линейных напряжений (коэффициент трансформации линейных напряжений) в трехфазном трансформаторе определяется

не только отношением числа витков обмоток каждой фазы, но и схемой их соединения, как показано в таблице 3.1 [1, 2, 7, 10].

Таблица 3.1 – Формулы для определения коэффициентов трансформации

Схема соединения обмоток	Y/Y; Δ/Δ	Δ/Y	Y/ Δ
Линейный и фазный коэффициенты трансформации	$K_L = K_\Phi = \frac{W_1}{W_2}$	$K_L = \frac{K_\Phi}{\sqrt{3}} = \frac{W_1}{\sqrt{3}W_2}$	$K_L = K_\Phi \cdot \sqrt{3} = \frac{\sqrt{3}W_1}{W_2}$

При соединении обмотки зигзагом соотношение между фазными и линейными токами и напряжениями такие же, как и для соединения звездой. При соединении вторичных обмоток трехфазного трансформатора в звезду вывод нулевой точки обычно располагают на вводной панели, что дает возможность получить на выходе трансформатора не только линейное, но и фазное напряжение.

При соединениях Y/Y и Δ/Δ линейный и фазный коэффициенты трансформации равны между собой; для соединения Y/ Δ : $K_L = \sqrt{3}K_\Phi$, а для соединения Δ/Y : $K_L = K_\Phi/\sqrt{3}$.

Для фазных напряжений и токов при симметричной нагрузке справедливы формулы, полученные для однофазного тока, при подстановке в них фазных напряжений, токов, мощностей.

Программа работы

Ознакомиться с трансформатором и записать данные таблицы, а также измерительной аппаратуры.

1. Произвести опыт холостого хода и построить зависимости: тока холостого хода от напряжения на первичных зажимах, то есть $I_0 = f(U_1)$, мощности при холостом ходе от первичного напряжения: $P_0 = f(U_1)$, и коэффициента

Лабораторная работа 3.
Исследование трехфазного трансформатора

мощности: $\cos \varphi_0 = f(U_1)$. Найти значения тока холостого хода I_0 , $\cos \varphi_0$ и потерь холостого хода P_0 при номинальном напряжении $U_{1н}$; соотношение между активной и реактивной составляющими тока холостого хода. Определить отношения $I_0/I_{1н}$ и $P_0/P_{1н}$.

2. Произвести опыт короткого замыкания и по данным опыта построить зависимости тока, мощности и коэффициента мощности от напряжения короткого замыкания, то есть $I_k = f(U_{1к})$; $P_k = f(U_{1к})$; $\cos \varphi_k = f(U_{1к})$.

3. Определить напряжение короткого замыкания трансформатора и построить зависимость процентного изменения напряжения трансформатора $\Delta U_2\%$:

1) от коэффициента нагрузки β : $\Delta U_2\% = f(\beta)$ при $\cos \varphi_2 = 0,8$; $\cos \varphi_2 = 1$ и $\cos(-\varphi_2) = 0,8$.

2) от коэффициента мощности $\cos \varphi_2$: $\Delta U_2\% = f(\cos \varphi_2)$ при $\beta = \text{const}$.

4. Построить кривую зависимости КПД трансформатора от коэффициента нагрузки β , то есть $\eta = f(\beta)$ при $\cos \varphi_2 = 0,8$ и $\cos \varphi_2 = 1$.

5. Определить нагрузку (коэффициент нагрузки $\beta_{\text{онм}}$) трансформатора, при которой наступает максимум КПД (η_{max}).

6. Составить отчет, сделать заключение и составить выводы о проделанной работе.

Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал: принцип действия и устройство силового трехфазного трансформатора; опыты холостого хода и короткого замыкания; коэффициент трансформации; потери и КПД; внешние характеристики трансформатора.

2. Ознакомиться с приборами, аппаратами и оборудованием стенда, используемыми при выполнении работы; записать номинальные технические данные исследуемого трехфазного трансформатора.

3. Начертить в рабочей тетради схемы включения трехфазного трансформатора, подготовить таблицы для занесения результатов опытов и координатные сетки для построения графиков.

Порядок выполнения работы

Для выполнения опытов холостого хода и короткого замыкания требуется устройство для понижения напряжения, подводимого к трансформатору, и плавного его регулирования.

В данном случае предполагается, что это будет индукционный регулятор, с которым необходимо ознакомиться и установить то положение ротора, при котором напряжение на выходных зажимах наименьшее. Следует также выяснить пределы регулирования напряжения.

1. Опыт холостого хода. Схема для определения коэффициента трансформации показана на рисунке 3.4, а, б. К зажимам одной из обмоток (лучше высшего напряжения) А, В, С подводится напряжение при разомкнутой вторичной обмотке. Вольтметром измеряются напряжения на зажимах обеих обмоток и результаты опыта записываются в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Данные для определения линейных коэффициентов трансформации

Схема соединения	U_{AB}	U_{ab}	k_A	U_{BC}	U_{bc}	k_B	U_{CA}	U_{ca}	k_C	k
	В	В		В	В		В	В		
Y/Y										
Y/Δ										
Примечания: $k_A = U_{AB}/U_{ab}$; $k_B = U_{BC}/U_{bc}$; $k_C = U_{CA}/U_{ca}$.										

Среднее значение коэффициента трансформации определяют по формуле (3.3):

$$K = \frac{K_A + K_B + K_C}{3} \quad (3.3)$$

Для проведения опыта холостого хода трехфазного трансформатора собираем схему, изображенную на рисунке 3.5, а [1, 3, 6, 7, 10].

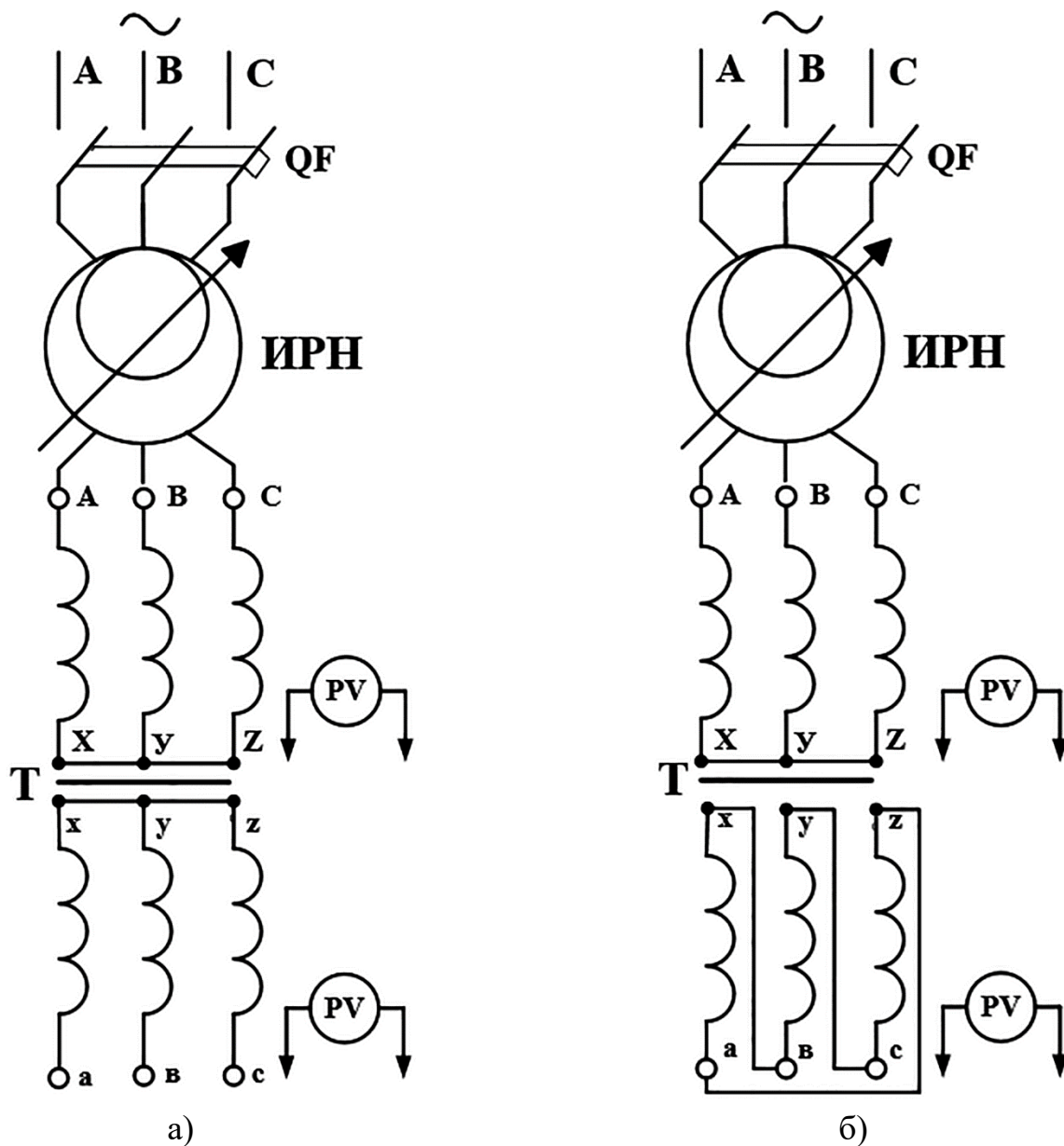


Рисунок 3.4 – Схема для определения коэффициента трансформации

Для регулирования первичного напряжения на схеме показан индукционный регулятор ИРН, к которому присоединяют зажимы а, б и с обмотки низшего напряжения (НН). Обмотка высшего напряжения (ВН) остается разомкнутой. Амперметр, ваттметр и вольтметр измерительного комплекта К-505 включаются так, что они измеряют ток, мощность и напряжение одной фазы.

Во избежание повреждения броском тока, перед включением выключателя 1 приборы следует зашунтировать выключателем 2, который размыкают, когда производят измерения. Выключатели 1 и 2 находятся на панели измерительного комплекта К-505 [1, 2, 7, 9, 10].

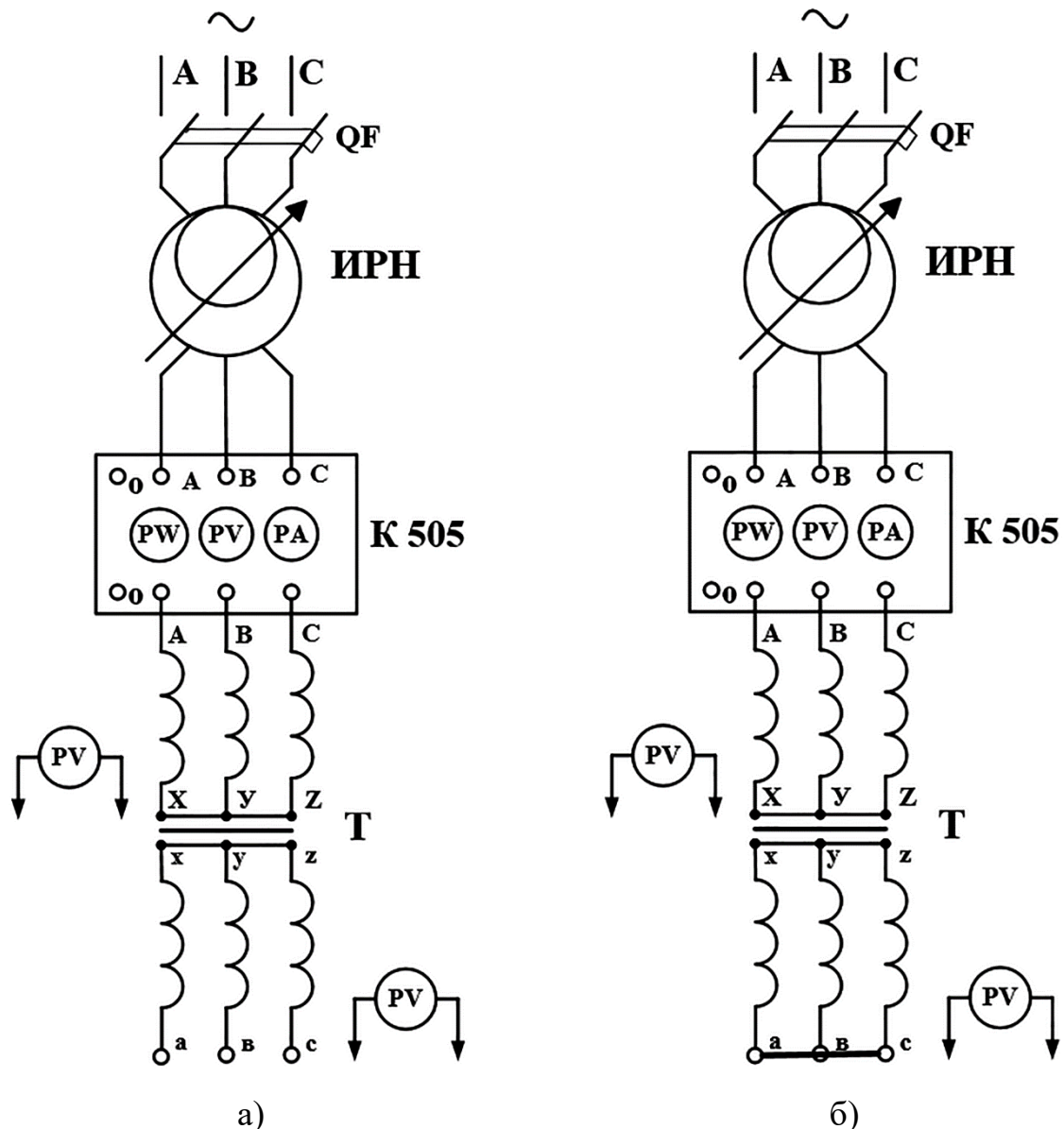


Рисунок 3.5 – Схема включения трехфазного трансформатора
а) при опыте холостого хода; б) при опыте короткого замыкания

Установив ротор индукционного выключателя ИРН так, чтобы получить наименьшее напряжение на его зажимах, включают автомат QF. Повышая

Лабораторная работа 3.
Исследование трехфазного трансформатора

напряжение, производят измерение тока, мощности и напряжения в одной фазе при напряжениях от $U_1 = 0,5U_{1н}$ до $U_1 = 1,2U_{1н}$.

Таким же образом производят измерения в двух других фазах, переключая измерительные приборы в соответствующие фазы. Результаты измерений записывают в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 – Данные режима холостого хода трехфазного трансформатора

Номер измерения и вычисления	Измерения									Вычисления					
	U_a	I_a	P_a	U_b	I_b	P_b	U_c	I_c	P_c	U_1	U_1^*	I_0	I_0^*	P_0	P_0^*
	В	А	Вт	В	А	Вт	В	А	Вт	В	О. е.	А	О. е.	Вт	О. е.

Если в процессе измерения оказывается, что разница между измеряемыми напряжениями U_a , U_b , U_c невелика, то для экономии времени можно измерять одно напряжение.

Для расчетов в таблице 3.3 используют следующие зависимости:

$$U_1 = \frac{U_a + U_b + U_c}{3} \sqrt{3}; U_1^* = \frac{U_1}{U_{1н}}$$

$$I_0 = \frac{I_a + I_b + I_c}{3}; I_0^* = \frac{I_0}{I_{1н}} = I_0$$

$$P_0 = P_a + P_b + P_c; P_0^* = \frac{P_0}{P_{1н}}$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_0}{\sqrt{3} U_1 I_0}$$

По данным таблицы 3.3 строятся кривые зависимости тока I_0 , мощности P_0 при холостом ходе от напряжения U_1 . Значения мощности P_0 и тока I_0 , соответствующие номинальному напряжению, находят по кривым построенных зависимостей. Активная и реактивная составляющие тока холостого хода соответственно равны:

$$I_{0.a.} = I_0 \cos \varphi_0; I_{0.p.} = I_0 \sin \varphi_0 \quad (3.4)$$

Обычно $I_{0.a.} \leq I_{0.p.} \leq 0,1$. Отношения $I_{0.н.}/I_{1.н.}$ и $P_0/P_{1н}$ вычисляют для номинального напряжения.

2. Опыт короткого замыкания. Опыт короткого замыкания производят по схеме, изображенной на рисунке 3.5, б. При этом одна из обмоток замкнута накоротко, а к другой подведено такое пониженное напряжение, чтобы токи в обмотках не превышали номинальных. Пониженное напряжение во многих случаях удобнее подводить к обмотке ВН, а обмотку НН замкнуть накоротко, что и показано на рисунке. Замыкать обмотку накоротко следует очень надежно, короткими проводами большого сечения и не ставить в цепь амперметров.

Напряжения короткого замыкания трансформаторов находятся в пределах $(3-15\%)U_{1н.}$ Поэтому, установив ротор фазорегулятора ток, чтобы получалось напряжение, равное наименьшему из указанных, подключают трансформатор и замыкают выключатель на комплекте К-505. Увеличивая напряжение, устанавливают ток, равный номинальному, и измеряют мощность и напряжение. Опыт следует производить с возможной быстротой, так как обмотка трансформатора быстро нагревается. Данные опыта записывают в таблицу 3.4.

Таблица 3.4 – Данные режима короткого замыкания трансформатора

Номер измерения и вычисления	I_A	I_B	I_C	I_K	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_{IK}	P_{IK}	P_{2K}	P_K
	A	A	A	A	B	B	B	B	Вт	Вт	Вт

Для расчета таблицы 3.4 используют зависимости:

$$I_k = \frac{I_A + I_B + I_C}{3}; U_k = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3}$$

$$P'_k = P_{1k} + P_{2k}$$

Если при опыте короткого замыкания ток короткого замыкания не был равен номинальному, то данные опыта приводят к номинальному току, используя выражение (3.5):

$$U_{1к} = U_k \frac{I_n}{I_k}; P_k = P'_k \left(\frac{I_n}{I_k} \right)^2 \quad (3.5)$$

В этом случае I_k , $U_{1к}$ и P'_k – ток, напряжение и мощность короткого замыкания при токе I_k , отличающемся от номинального I_n . По измеренным и расчетным данным строим зависимости $I_k = f(U_{1к})$; $P_k = f(U_{1к})$; $\cos \varphi_k = f(U_{1к})$.

3. Изменение напряжения трансформатора. По данным опыта короткого замыкания находят полное сопротивление приведенных обмоток трансформатора (3.6), сумму приведенных активных сопротивлений обмоток (3.7), сумму приведенных реактивных сопротивлений обмоток (3.8) и коэффициент мощности при коротком замыкании (3.9):

$$z_k = \frac{U_k}{\sqrt{3}I_{1н}}, \quad (3.6)$$

$$r_k = \frac{U_k}{3I_{1н}^2}, \quad (3.7)$$

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}, \quad (3.8)$$

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3}U_k I_{1н}} \quad (3.9)$$

Стороны треугольника короткого замыкания находят в процентах номинального напряжения той обмотки, к которой подводилось пониженное напряжение. Ток также берется для этой обмотки.

Для построения зависимости $\Delta U_2 \% = f(\beta)$ при $\cos \varphi_2 = 0,8$; $\cos \varphi_2 = 1$ и $\cos(-\varphi_2) = 0,8$, представленной на рисунке 3.6, воспользуемся формулой (3.10):

$$\Delta U_2 \% = \beta (U_{КА} \cos \varphi_2 + U_{КР} \sin \varphi_2) \quad (3.10)$$

где $\beta = I_2/I_{2н}$ – коэффициент нагрузки трансформатора.

Когда при определении $\Delta U_2\%$ не требуется особой точности, вторым членом суммы пренебрегают.

Задаваясь различными значениями тока нагрузки I_2 или коэффициента нагрузки $\beta = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$, при определенном коэффициенте мощности $\cos\varphi_2$, рассчитаем изменение напряжения $\Delta U_2\%$ и расчетные данные запишем в таблицу 3.5 [1, 3, 6, 7, 9, 10].

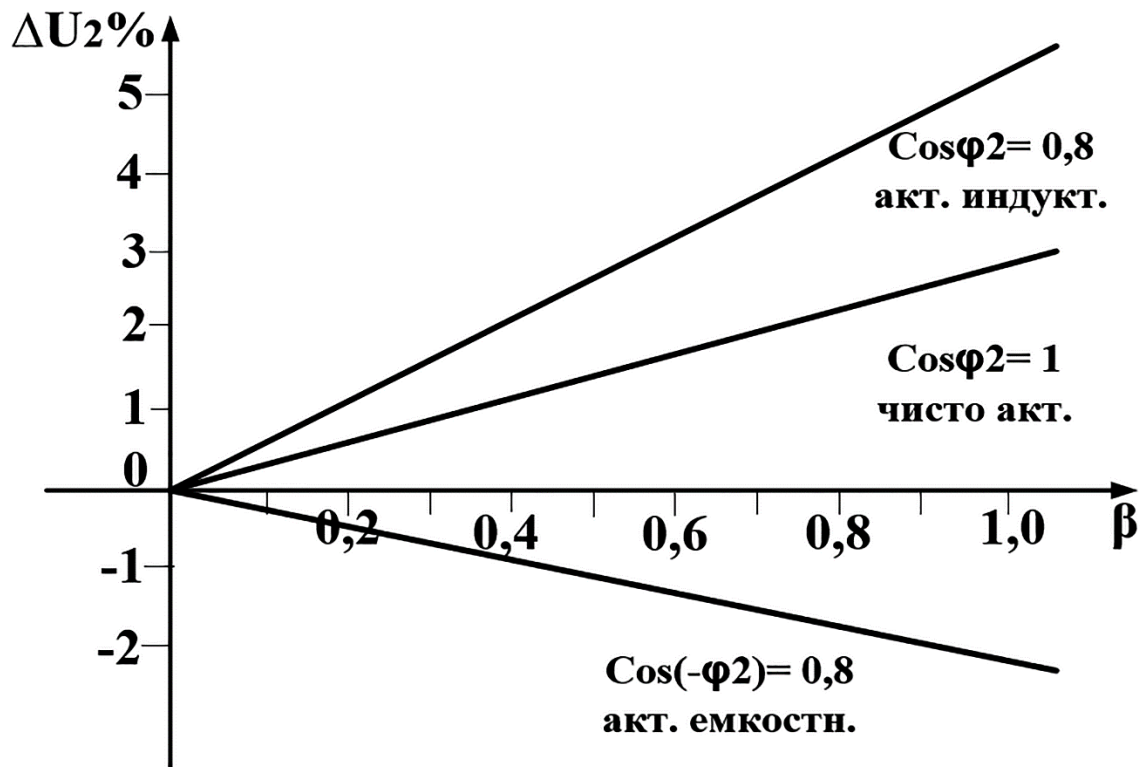


Рисунок 3.6 – Зависимость изменения напряжения от нагрузки, $\Delta U_2\% = f(\beta)$

Таблица 3.5 – Данные изменения напряжения от нагрузки трехфазного трансформатора

β		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$\Delta U_2\%$	$\cos\varphi_2 = 1$						
	$\cos\varphi_2 = 0,8$						
	$\cos(-\varphi_2) = 0,8$						

По измеренным и расчетным данным таблицы 3.5 строим зависимости процентного изменения напряжения трансформатора $\Delta U_2\%$ от коэффициента нагрузки β при фиксированном значении коэффициента мощности $\cos\varphi_2$, то есть $\Delta U_2\% = f(\beta)$ при $\cos\varphi_2 = 0,8$; $\cos\varphi_2 = 1$ и $\cos(-\varphi_2) = 0,8$ (рис. 3.6.).

Лабораторная работа 3.
Исследование трехфазного трансформатора

Для построения зависимости $\Delta U_2\% = f(\cos\varphi_2)$ при $\beta - \text{Const} = 1$, воспользуемся формулой (3.10), задаваясь различными значениями $\cos\varphi_2$, при постоянном коэффициенте нагрузки. Рассчитаем процентное изменение напряжения $\Delta U_2\%$ и расчетные данные запишем в таблицу 3.6 [1, 3, 6, 7, 9, 10].

Таблица 3.6 – Данные изменения напряжения от коэффициента мощности трехфазного трансформатора

$\cos \varphi_2$	–0,4	–0,6	–0,8	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2
$\Delta U_2\%$								

По измеренным и расчетным данным таблицы 3.6 строим зависимости процентного изменения напряжения трансформатора $\Delta U_2\%$ от коэффициента мощности $\cos\varphi_2$, при постоянном коэффициенте нагрузки ($\Delta U_2\% = f(\cos\varphi_2)$), при $\beta - \text{const}$ (рис. 3.7).

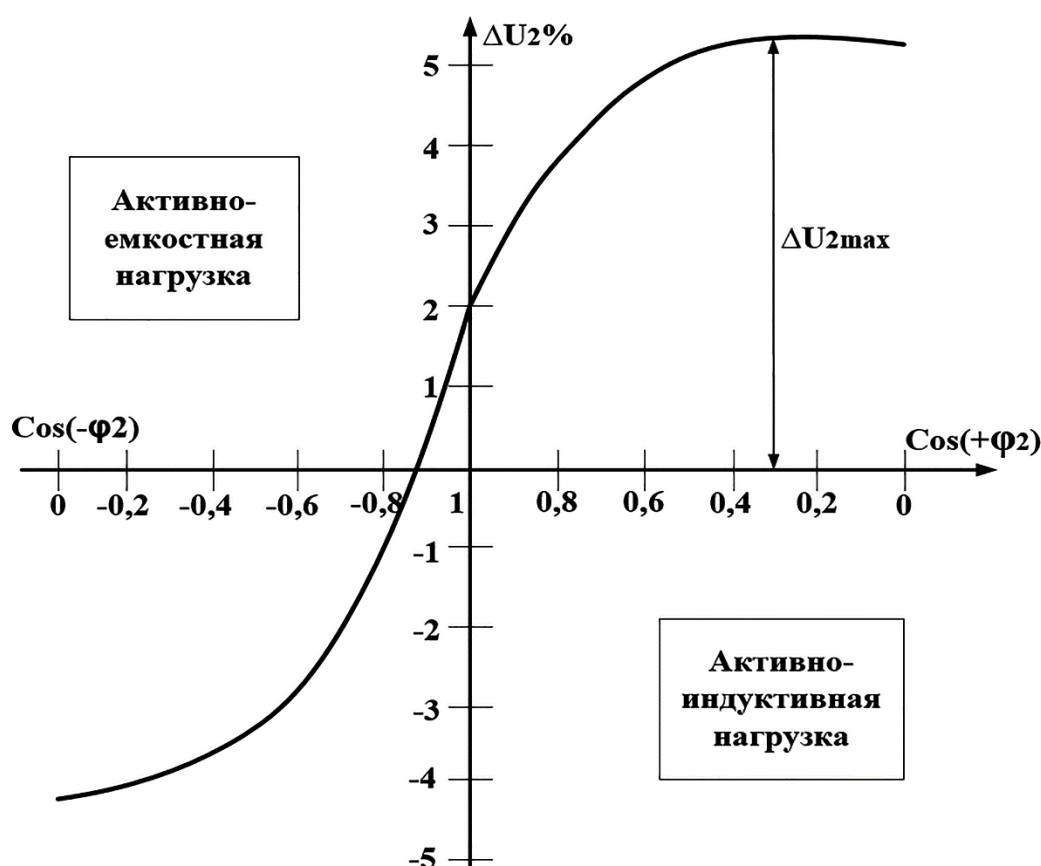


Рисунок 3.7 – Зависимость изменения напряжения от коэффициента мощности при номинальном токе нагрузки $\Delta U_2\% = f(\cos\varphi_2)$ при $\beta = 1$

4. Зависимость КПД от коэффициента нагрузки. Коэффициент полезного действия трансформатора может быть рассчитан по формуле (3.11):

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\beta S_{2H} \cos \varphi_2}{\beta S_{2H} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_K} = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_K}{\beta S_{2H} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_K} \quad (3.11)$$

где P_0 – потери в стали, полученные при опыте холостого хода при номинальных напряжениях и частоте;

P_K – потери короткого замыкания при номинальном токе.

Задавая значениями $\beta = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2$, вычисляем коэффициент полезного действия (табл. 3.7.) и строим зависимость $\eta = f(\beta)$ (рис. 2.4, б).

Таблица 3.7 – Данные зависимости КПД от коэффициента нагрузки трехфазного трансформатора

Номер измерения и вычисления	β	β^2	$\cos \varphi_2$	P_0	P_K	$P_0 + \beta^2 P_K$	$\beta S_{2H} \cos \varphi_2$	η
	–	–	–	Вт	Вт	Вт	Вт	%

5. Расчет максимального коэффициента полезного действия. Как известно, наибольшее значение КПД наступает при такой нагрузке, при которой электрические потери в обмотках становятся равными магнитным потерям в магнитопроводе, то есть $P_0 = \beta_{\text{опт}}^2 P_K$. Отсюда:

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{P_{0.\text{ном}}}{P_{K.\text{ном}}}} \quad (3.12)$$

6. Составление отчета. На основании выполненной работы составить выводы, сделать заключение о достижении цели работы.

Контрольные вопросы

1. Укажите назначение основных частей трехфазного трансформатора.
2. Объясните принцип работы трехфазного трансформатора.
3. Как можно определить коэффициент трансформации?
4. Почему магнитопровод трансформатора набирается из отдельных изолированных листов трансформаторной стали?
5. Что такое поля рассеяния обмоток и как они влияют на работу трансформатора?
6. Почему в режиме холостого хода трансформатора его магнитопровод нагревается, а обе обмотки остаются холодными?
7. Почему в режиме короткого замыкания трансформатора обе обмотки нагреты, а магнитопровод остается холодным?
8. Почему при опыте короткого замыкания трансформатора значительно снижают напряжение на фазах первичной обмотки?
9. Изменится ли величина магнитного потока в магнитопроводе трансформатора при переходе от режима номинальной нагрузки в испытательный режим короткого замыкания?
10. При каком соотношении потерь холостого хода и короткого замыкания трансформатора КПД достигает максимального значения?
11. Какие специальные типы трансформаторов Вы знаете?
12. Почему обмотку низшего напряжения трансформатора выполняют проводом большего сечения?
13. Почему в силовых трансформаторах обмотка НН располагается ближе к стержню?
14. Как соединяют обмотки трехфазных трансформаторов?
15. Какие существуют потери в трехфазных трансформаторах?
16. Какие особенности имеют трехфазные трансформаторы?

17. От чего зависит коэффициент трансформации трехфазного трансформатора?

18. Вычертите схему соединения обмоток трансформатора Y/Y_0 .

19. Вычертите схему соединения обмоток трансформатора Y/Δ .

20. Вычертите схему соединения обмоток трансформатора Y/Z .

Тестовые задания

1. Почему обмотка ВН размещается дальше от стержня, а обмотка НН ближе к стержню?

а) для уменьшения электрических потерь $\Delta P_{эл}$;

б) для уменьшения магнитных потерь ΔP_m ;

в) для уменьшения электроизоляционных материалов.

2. Почему в мощных силовых трансформаторах поперечное сечение стержня выполняют ступенчатой формы?

а) это позволяет увеличить сечение стержня, амплитуду основного потока и уменьшить число витков обмоток;

б) это позволяет уменьшить сечение стержня, амплитуду основного потока и увеличить число витков обмоток;

в) это позволяет уменьшить сечение стержня, увеличить амплитуду основного потока и уменьшить число витков обмоток.

3. Какой трехфазный трансформатор называется групповым?

а) трехфазный трансформатор, состоящий из трех однофазных с магнитно не связанной магнитной системой;

б) это трехфазный трансформатор, состоящий из трех однофазных с магнитно связанной магнитной системой;

в) это трехфазный трансформатор, состоящий из магнитопровода с общей магнитной системой.

4. Изменится ли величина магнитного потока в магнитопроводе трансформатора при переходе от режима номинальной нагрузки в испытательный режим короткого замыкания?

а) величина магнитного потока Φ в магнитопроводе трансформатора не изменится ;

б) величина магнитного потока Φ в магнитопроводе трансформатора увеличится;

в) величина магнитного потока Φ в магнитопроводе трансформатора уменьшится.

5. Чем отличаются режим внезапного (эксплуатационного) короткого замыкания от испытательного?

а) внезапное (эксплуатационное) короткое замыкание проходит при номинальном напряжении первичной обмотки и при аварийных токах в обеих обмотках;

б) внезапное (эксплуатационное) короткое замыкание проходит при пониженном напряжении первичной обмотки и при номинальных токах в обеих обмотках;

в) внезапное (эксплуатационное) короткое замыкание проходит при номинальном напряжении первичной обмотки и при номинальных токах в обеих обмотках.

6. При каком соотношении потерь холостого хода и короткого замыкания трансформатора КПД достигает максимального значения?

а) максимальный коэффициент полезного действия трансформатора наблюдается при равенстве постоянных и переменных потерь;

б) максимальный коэффициент полезного действия трансформатора наблюдается при неравенстве постоянных и переменных потерь;

в) максимальный коэффициент полезного действия трансформатора наблюдается при номинальной нагрузке;

г) максимальный коэффициент полезного действия трансформатора наблюдается при максимальной нагрузке.

7. Какие особенности имеют трехфазные трансформаторы? Выберите правильный ответ:

а) трехстержневой магнитопровод с расположением стержней в одной плоскости с точки зрения магнитных цепей несимметричен, так как длина магнитной цепи, по которой замыкается магнитный поток средней фазы (фазы В), короче, чем магнитные цепи для замыкания потоков крайних фаз (фаз А и С);

б) обмотки трехфазных трансформаторов принято соединять звездой, треугольником, зигзагом, причем в числителе указывается схема соединения обмотки ВН, а в знаменателе указывается схема соединения обмотки НН;

в) трехфазные трансформаторы обычно характеризуют двумя коэффициентами трансформации: фазным и линейным, в зависимости от схемы соединения обмоток ВН и НН;

г) трехфазные трансформаторы имеют особенности, перечисленные выше в пунктах, а), б), в).

8. Трехфазный трансформатор имеет число витков на фазу в первичной обмотке $W_1 = 2\,000$, вторичной – $W_2 = 100$, и подключен к трехфазной сети с линейным напряжением 380 В. Определите: линейный и фазный коэффициенты трансформации при соединении обмоток Y/Δ?

а) $K_l \approx 34,6$; $K_\phi = 20$;

б) $K_l = 34,6$; $K_\phi \approx 34,6$;

в) $K_l = 20$; $K_\phi \approx 34,6$;

г) $K_l = 20$; $K_\phi = 20$;

д) $K_l \approx 5,77$; $K_\phi \approx 11,55$.

9. Сопротивление короткого замыкания – это (выберите один правильный ответ):

- а) сумма сопротивлений приведенной вторичной обмотки и ветви холостого хода;
- б) сумма сопротивлений первичной обмотки и ветви холостого хода;
- в) сумма сопротивлений первичной обмотки и приведенной вторичной обмотки;
- г) сумма сопротивлений первичной и вторичной обмотки и ветви холостого хода;
- д) сумма сопротивлений первичной обмотки и вторичной обмотки.

10. Внешняя характеристика трансформатора – это зависимость (выберите один правильный ответ):

- а) напряжения на входах трансформатора U_1 от тока первичной обмотки I_1 при фиксированном напряжении вторичной обмотки U_2 ;
- б) напряжения на выходах трансформатора U_2 от тока первичной обмотки I_1 при фиксированном напряжении первичной обмотки U_1 ;
- в) напряжения на выходах трансформатора U_2 от тока, протекающего через нагрузку I_n , подключенную к этим выводам, при фиксированном напряжении первичной обмотки U_1 .

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4.
ОПЫТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРУПП
СОЕДИНЕНИЯ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Цель работы: экспериментально подтвердить теоретические сведения о группах соединения трансформаторов и приобрести практические навыки по опытному определению групп соединения трехфазных трансформаторов.

Общие сведения

Группы соединения трансформаторов. Дополнительно к схемам соединения обмоток вводят понятие о **группах соединений**, которые характеризуют относительный сдвиг фаз линейных напряжений (или ЭДС) первичной (ВН) или вторичной (НН) обмоток трансформаторов. Понятия о схемах и группах соединений имеют большое значение при эксплуатации трансформаторов. По группам соединений обмоток трансформаторы подразделяют на основании знания угла сдвига фаз между линейными высшими и низшими напряжениями. У трансформаторов одной группы сдвиг фаз одинаков. Сдвиг фаз между линейными высшими и низшими напряжениями имеет большое значение при параллельной работе трансформаторов, так как на параллельную работу можно включать трансформаторы только одной группы соединений обмоток, в противном случае возникают уравнивающие токи, вызывающие перегрев обмоток [1, 2, 5, 9, 10, 11, 12].

При включении трансформаторов на параллельную работу удобно соединять начала обмоток одного трансформатора с началом обмоток другого и стандартизовать обозначения. Чтобы не было ошибок при эксплуатации трансформаторов, введено понятие сдвига фаз между ЭДС (напряжениями) первичной и вторичной обмоток. Этот угол сдвига фаз между ЭДС первичной

и вторичной обмоток и будет характеризовать группу соединения трансформаторов. Одним из важнейших условий включения трехфазных трансформаторов на параллельную работу является их принадлежность к одной группе и схеме соединения обмоток, так как только при выполнении этих условий не будет сдвига фаз между ЭДС параллельно включенных трансформаторов и обусловленного этим нежелательного уравнительного тока, вызывающего перегрев обмоток. У трансформаторов одной группы соединения сдвиг фаз одинаков.

Группой соединения трансформатора называется угол сдвига между линейными ЭДС первичной и вторичной обмоток трансформатора.

Единицей измерения группы соединения трансформаторов является единичный угол сдвига (смещения) между линейными ЭДС первичной и вторичной обмоток – 30° .

За первичную обмотку принимают обмотку высшего напряжения (ВН), за вторичную – обмотку низшего напряжения (НН). Угол сдвига отсчитывается от вектора ЭДС обмотки ВН по часовой стрелке до вектора ЭДС обмотки НН. Сдвиг фаз между ЭДС обмотки ВН и ЭДС обмотки НН принято выражать номером группы соединения. Так как этот сдвиг фаз может изменяться от 0 до 360° , а кратность сдвига (единица измерения) составляет 30° , то для обозначения группы соединения принят ряд чисел: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 и 0 (12). Угол сдвига ЭДС обмоток ВН и НН всегда кратен 30° . Тогда для определения номера группы соединения необходимо угол сдвига векторов линейной ЭДС обмоток ВН и НН разделить на единичный угол – 30° . Например, $150^\circ:30^\circ = 5$. То есть получим пятую группу соединения. $180^\circ:30^\circ = 6$. $330^\circ:30^\circ = 11$.

Для лучшего понимания принятого обозначения групп соединения пользуются сравнением с часами. При этом вектор линейной ЭДС обмотки ВН совмещают с минутной (большой) стрелкой и устанавливают ее на цифре 12, а вектор линейной ЭДС обмотки НН совмещают с часовой (малой) стрелкой.

При этом часовая (малая) стрелка будет показывать нам номер группы соединения. Необходимо иметь ввиду, что совпадение по фазе векторов ЭДС обмоток ВН и НН, эквивалентное совпадению стрелок часов на циферблате, обозначается группой 0 (а не 12).

Группа соединения обмоток трансформатора будет зависеть от:

- 1) направления намотки обмоток (правая, левая);
- 2) маркировки концов обмотки;
- 3) схемы соединения обмоток.

В трехфазных трансформаторах применяют следующие схемы соединений: Y/Y , Δ/Δ , Δ/Z , Y/Δ , Δ/Y , Y/Z – в числителе указаны соединения обмотки ВН, в знаменателе – соединения обмотки НН.

В литературе можно встретить обозначения: Д – соединение треугольником; У – соединение звездой. Эти схемы соединений образуют 12 различных групп соединения – от 0 до 11. Схемы Y/Y , Δ/Δ , Δ/Z могут образовывать четные группы – 0, 2, 4, 6, 8, 10; а схемы Y/Δ , Δ/Y , Y/Z – нечетные группы – 1, 3, 5, 7, 9, 11.

Группы 0 и 6 являются основными четными группами, а группы 11 и 5 – основными нечетными. Остальные группы являются производными от основных четных и нечетных. Из основных групп круговой перестановкой (перемаркировкой) выводов получаются еще по три группы соединений: из группы 0 образуются группы 4 и 8, из группы 6 – группы 10 и 2, из группы 11 – группы 3 и 7, из группы 5 – группы 9 и 1.

В однофазном трансформаторе возможны лишь две группы соединения: группа 0, соответствующая совпадению по фазе E_{AX} и E_{ax} и группа 6, соответствующая сдвигу фаз между E_{AX} и E_{ax} на 180° . Группы соединения необходимо знать для включения трансформаторов на параллельную работу [1, 2, 3, 6, 7, 9, 10].

Векторные диаграммы основных групп соединения. Схемы одноименных соединений первичной и вторичной обмоток Y/Y , Δ/Δ , Δ/Z могут образовывать четные группы – 0, 2, 4, 6, 8, 10, а схемы Y/Δ , Δ/Y , Y/Z – нечетные группы – 1, 3, 5, 7, 9, 11. Группы 0 и 6 являются основными четными группами, а группы 11 и 5 – основными нечетными группами (рис. 4.1).

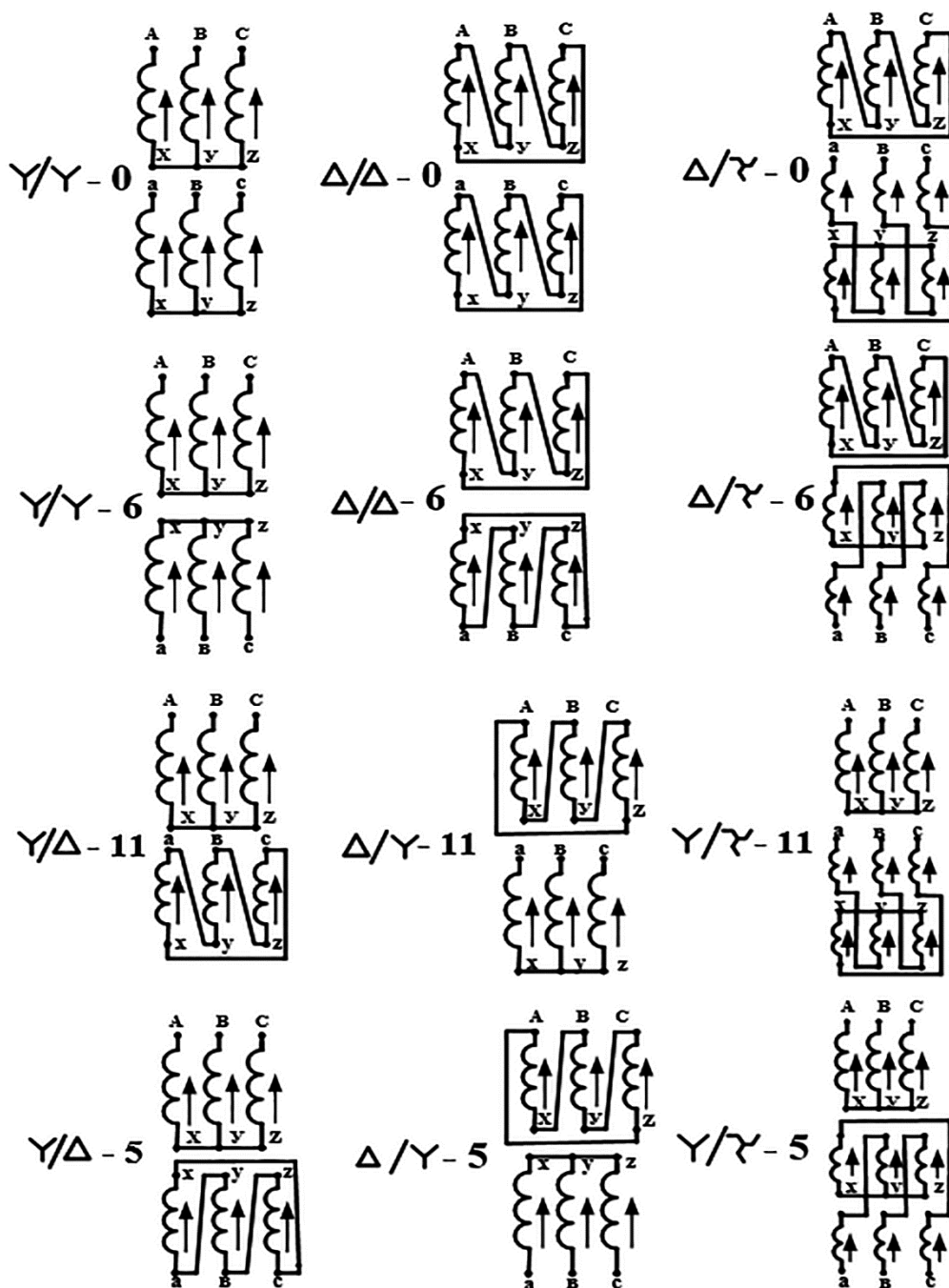


Рисунок 4.1 – Схемы основных соединений обмоток трехфазных трансформаторов (0, 6 и 11, 5)

Построим векторные диаграммы для основных соединений. Для более удобной взаимной ориентировки векторов ЭДС, выводы А и а обмоток будем считать электрическими соединенными.

При соединении обмоток трансформатора по схемам Y/Y, Δ/Δ , Δ/Z при согласном их включении можно получить группу соединения – 0, то есть угол сдвига фаз между линейными напряжениями или ЭДС обмоток ВН и НН будет равен 0 градусов.

1. Y/Y – 0. Рассмотрим в качестве примера схему соединений звезда – звезда ноль (рис. 4.2).

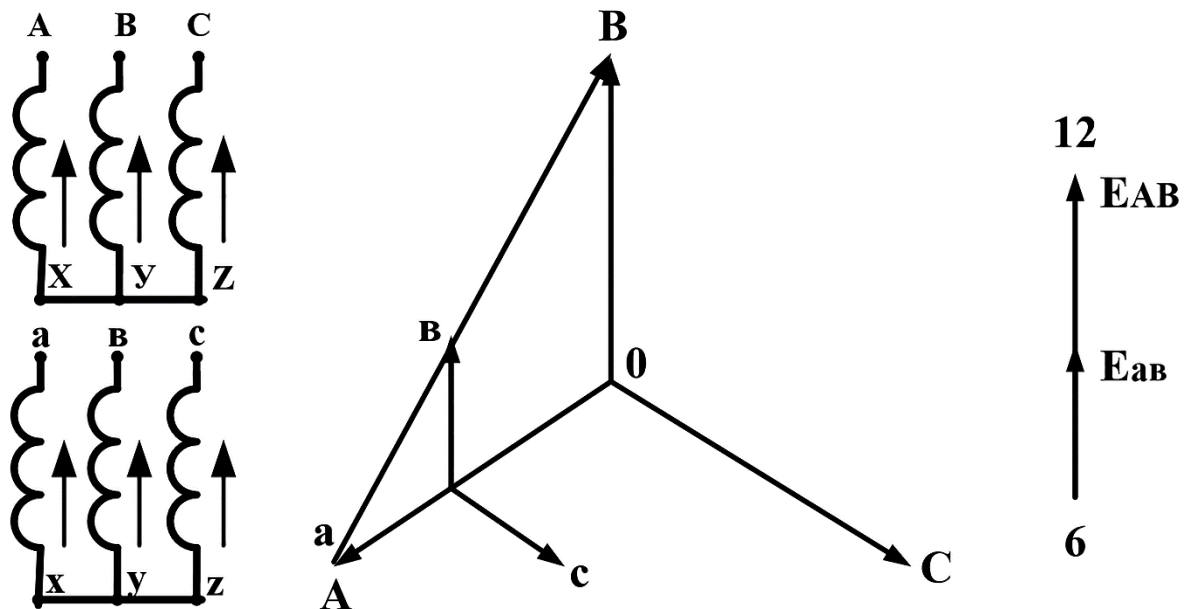


Рисунок 4.2 – Схема и векторная диаграмма соединения Y/Y – 0

Для этого совместим вектор линейной ЭДС обмотки ВН с минутной стрелкой, стоящей на цифре 12, а вектор линейной ЭДС обмотки НН с часовой стрелкой. Так как сдвиг между векторами равен нулю, то эти векторы совпадают.

Если же у одной из обмоток этого трансформатора, например, у обмотки НН поменять маркировку начал и концов всех обмоток фаз, то есть включить эти обмотки встречно, то векторы линейных ЭДС обмотки ВН – E_{AB} и обмотки

НН – $E_{ав}$ будут сдвинуты на 180° . Тогда получим шестую группу соединения – 6. В качестве примера рассмотрим построение векторных диаграмм для группы 6.

2. Y/Y – 6. Если одноименные фазные ЭДС будут находиться в противофазе, то есть векторы линейных ЭДС E_{AB} и $E_{ав}$ сдвинуты на 180° , при расположении этих векторов на циферблате часов, часы будут показывать шесть (6) часов (рис. 4.3).

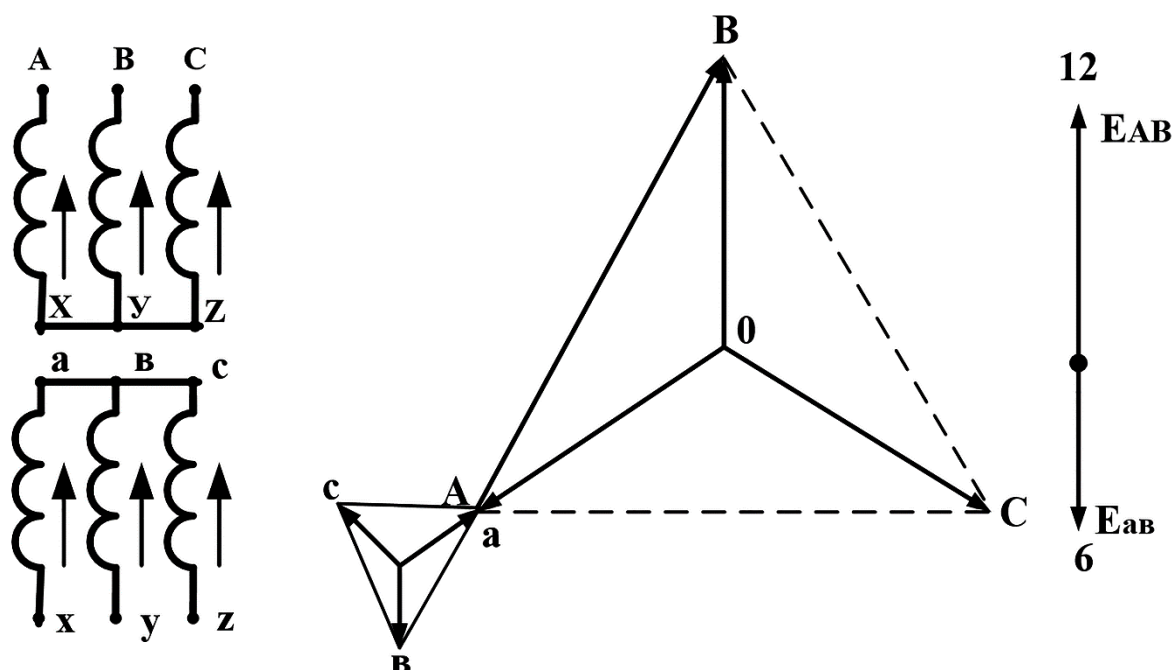


Рисунок 4.3 – Схема и векторная диаграмма соединения Y/Y – 6

При соединении обмоток трансформатора по схемам Y/ Δ , Δ /Y, Y/Z при согласном их включении можно получить группу соединения – 11, то есть угол сдвига фаз между линейными напряжениями или ЭДС обмоток ВН и НН будет равен 330° . В качестве примера рассмотрим построение векторных диаграмм для группы 11 при соединении обмоток трансформатора по схеме Y/ Δ – 11.

3. Y/ Δ – 11. У трансформаторов, одна обмотка которых соединена звездой, а другая – треугольником получают нечетные группы соединений. При построении векторной диаграммы ЭДС обмотки, соединенной в треугольник, удобно обозначать не только начала, но и концы векторов в соответствии с

началом и концом фазы. Ориентация векторов ЭДС на диаграмме производится согласно схеме соединения фаз между собой. Так, например, на схеме вывод a соединен с выводом y , и на векторной диаграмме – точка a вектора должна быть совмещена с точкой y другого вектора (рис. 4.4).

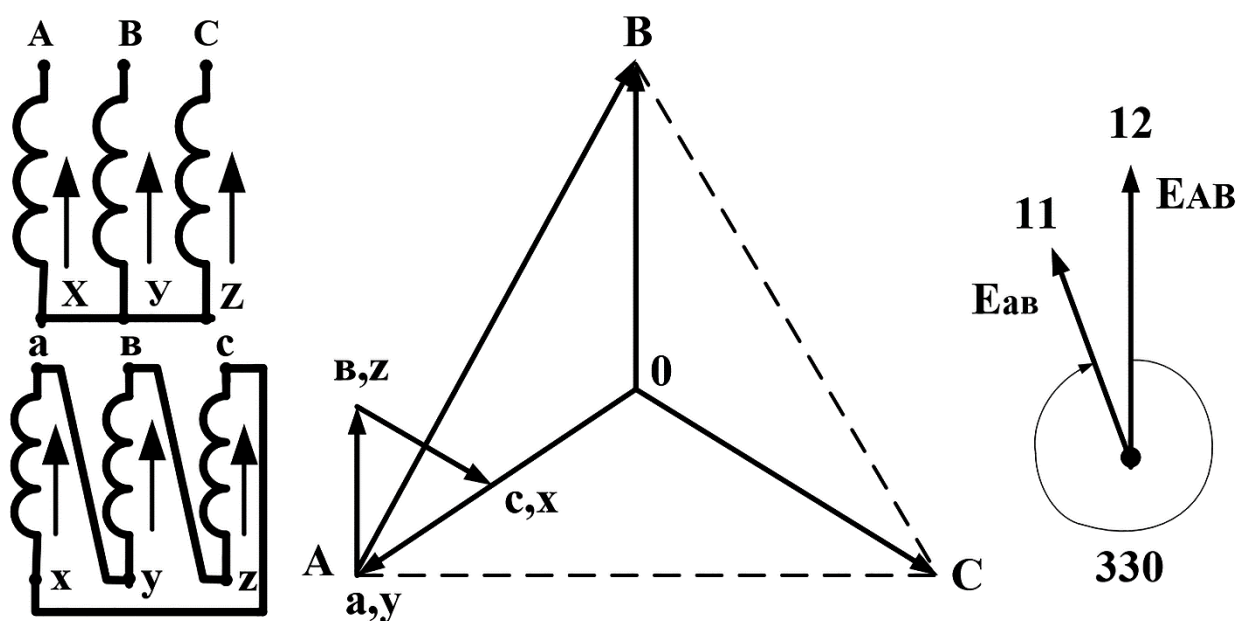


Рисунок 4.4 – Схема и векторная диаграмма соединения Y/Δ – 11

4. Y/Δ – 5. Оставив без изменения схему соединения первичной обмотки ВН, поменяем местами начала и концы фазных обмоток НН. При этом вектор E_{ab} повернется на 180° относительно вектора E_{AB} (рис. 4.5).

Из каждой рассмотренной основной группы соединения 0 и 6, 11 и 5 методом круговой перемаркировки выводов на одной стороне трансформатора, например, на стороне НН (без изменения схемы соединения), можно получить по две производные группы. Например, если в трансформаторе с группой соединения Y/Y – 0 выводы обмотки НН перемаркировать и вместо последовательности, a, b, c принять последовательность c, a, b , то вектор ЭДС E_{ab} повернется на 120° , при этом получим группу соединения Y/Y – 4.

Если же выводы обмоток НН перемаркировать в последовательность b, c, a , то вектор E_{ab} повернется еще на 120° , а всего на 240° ; получим группу Y/Y –

8. Аналогично от основной группы 6 путем круговой перемаркировки получают производные группы 10 и 2, от основной группы 11 – производные группы 3 и 7, от основной группы 5 – производные группы 9 и 1.

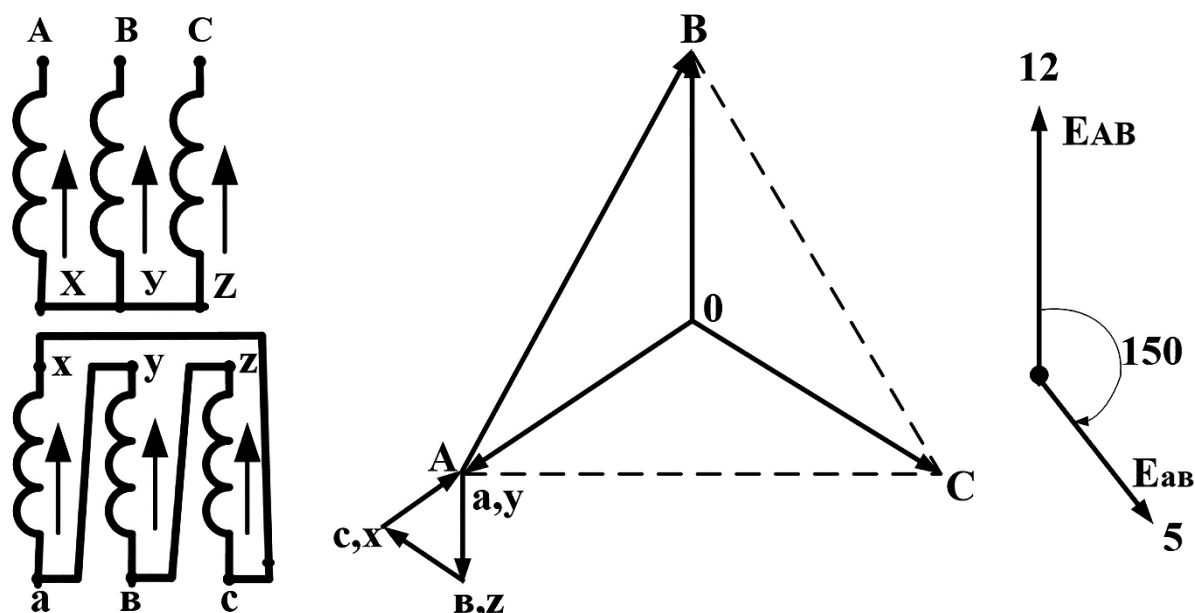


Рисунок 4.5 – Схема и векторная диаграмма соединения $Y/\Delta - 5$

Основные группы соединения имеют некоторое преимущество перед производными, так как предусматривают одноименную маркировку выводов обмоток, расположенных на одном стержне. Это уменьшает вероятность ошибочных присоединений. Однако, не все группы соединения имеют практическое применение в трехфазных трансформаторах.

В стране стандартизованы (ГОСТ 11677–85 «Трансформаторы силовые. Общие технические условия») группы $Y/Y_n - 0$, $Y/\Delta - 11$, $Y_n/\Delta - 11$, Y/Z_n , $\Delta/Y_n - 11$. Соединяя обмотки НН в зигзаг в сочетании с соединением обмотки ВН в звезду или треугольник, можно получить практически любой угол сдвига фаз (любую группу соединения) между ЭДС обмоток ВН и НН. Это достигается разделением обмотки НН на две части с различным соотношением витков в этих частях, а, следовательно, и с различным значением [1, 2, 3, 6, 7, 9, 10] (табл. 4.1).

Таблица 4.1 – Схемы соединения обмоток трехфазных трансформаторов

Схемы соединения обмоток		Диаграммы векторов ЭДС		Условные обозначения
ВН	НН	ВН	НН	
				-0 (группа 0)
				-11 (группа 11)
				-11 (группа 11)
				-11 (группа 11)
				-11 (группа 11)
				1/1-0 (группа 0)

Программа работы

1. Ознакомиться с устройством трансформатора, записать его паспортные данные, а также данные фазометра (если он имеется) и вольтметра.
2. Собрать схему, изображенную на рисунке 4.6, а, и экспериментально определить группу соединения трансформатора методами фазометра и вольтметра; таким же образом определить группы соединения при включении трансформаторов по схемам, показанным на рис. 4.6, б, в и г.
3. Построить топографические диаграммы линейных напряжений для четырех групп соединения, соответствующих схемам, представленным на рисунке 4.6, а, б, в, г; по ним определить напряжение между точками диаграммы b и B ; сравнить его с напряжением U_{bB} между зажимами трансформатора b и B , измеренным вольтметром.
4. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал: схемы соединения обмоток трехфазных трансформаторов; влияние схемы соединения на отношение линейных напряжений; группы соединения трансформаторов – основные и производные; группы соединения, предусмотренные действующим стандартом.
2. Подготовить в рабочей тетради таблицу для занесения результатов лабораторной работы.

Порядок выполнения работы

Определение группы соединения. При опытном определении группы соединения трансформаторов наибольшее применение получили методы:

- 1) *метод фазометра, основанный на непосредственном измерении угла фазового сдвига между соответствующими линейными напряжениями обмоток ВН и НН;*

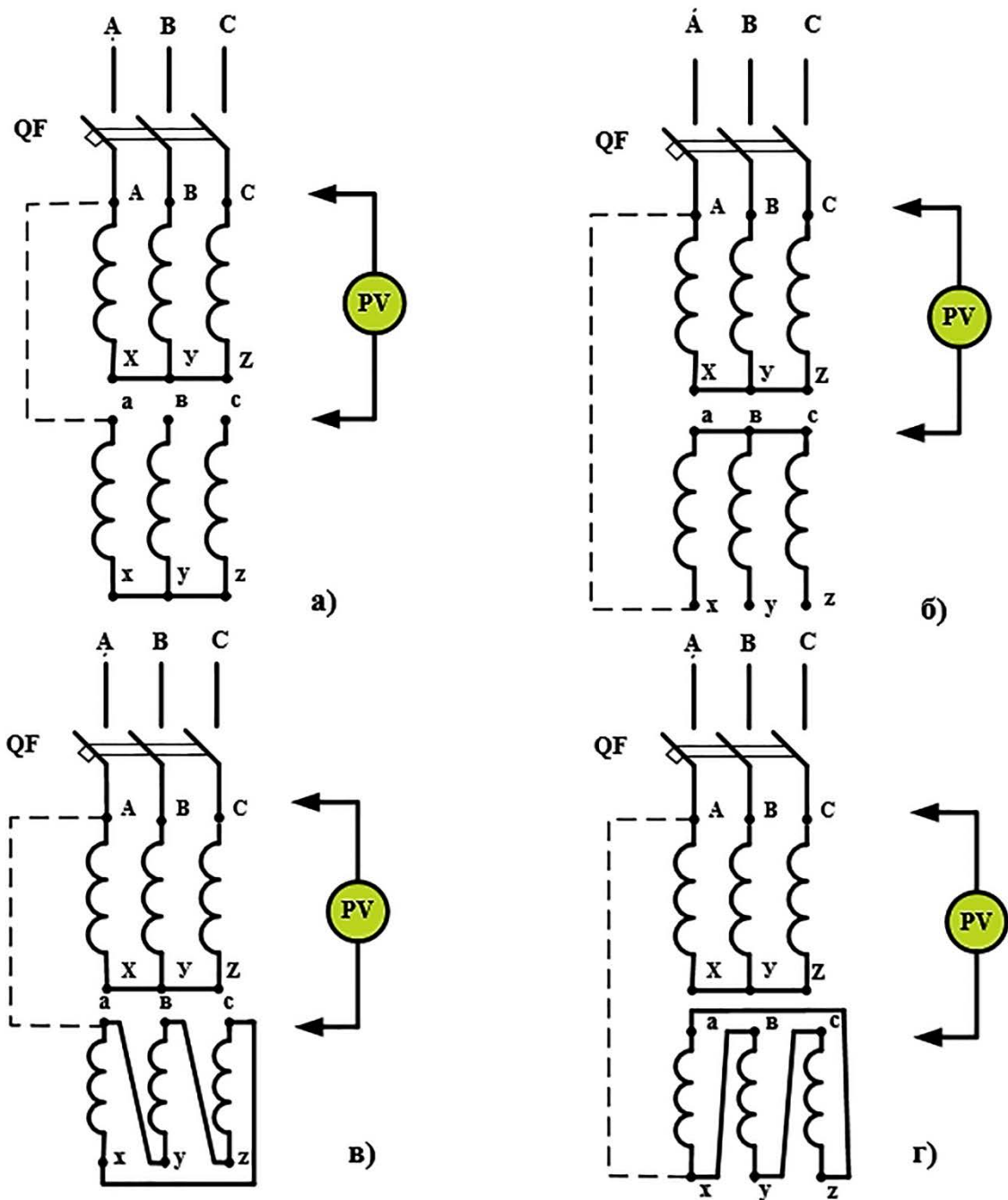


Рисунок 4.6 – Схемы соединения обмоток для определения основных четных а) и б), и основных нечетных в) и г) групп соединения

2) метод вольтметра, основанный на измерении напряжений между выводами обмоток ВН и НН с последующим сравнением этих напряжений с напряжениями, полученными в результате расчетов;

3) метод построения векторных диаграмм.

В данной работе воспользуемся двумя методами – сначала методом построения векторных диаграмм, а затем методом вольтметра.

1. Метод построения векторных диаграмм. Выбрав масштаб напряжения m_U (В/мм), строят топографическую диаграмму линейных напряжений, между векторами линейных напряжений U_{AB} и U_{ab} . В выбранном масштабе напряжений строят треугольник линейных напряжений первичной обмотки (должны быть известны напряжения между всеми зажимами обмоток ВН и НН, то есть U_{Bb}, U_{Bc} и U_{Cc}, U_{Cc}). Точки A и a совмещают. Из вершин C и B с помощью циркуля проводятся дуги радиусами Cc и Bc – точка пересечения этих дуг соответствует вершине c треугольника линейных вторичных напряжений, дугами Cb и Bb находится вершина b . Таким образом определяют положение векторов линейных напряжений вторичной и первичной цепи. Измерив угол между соответствующими векторами линейных напряжений ВН и НН, определяют группу соединения трансформатора (рис. 4.7).

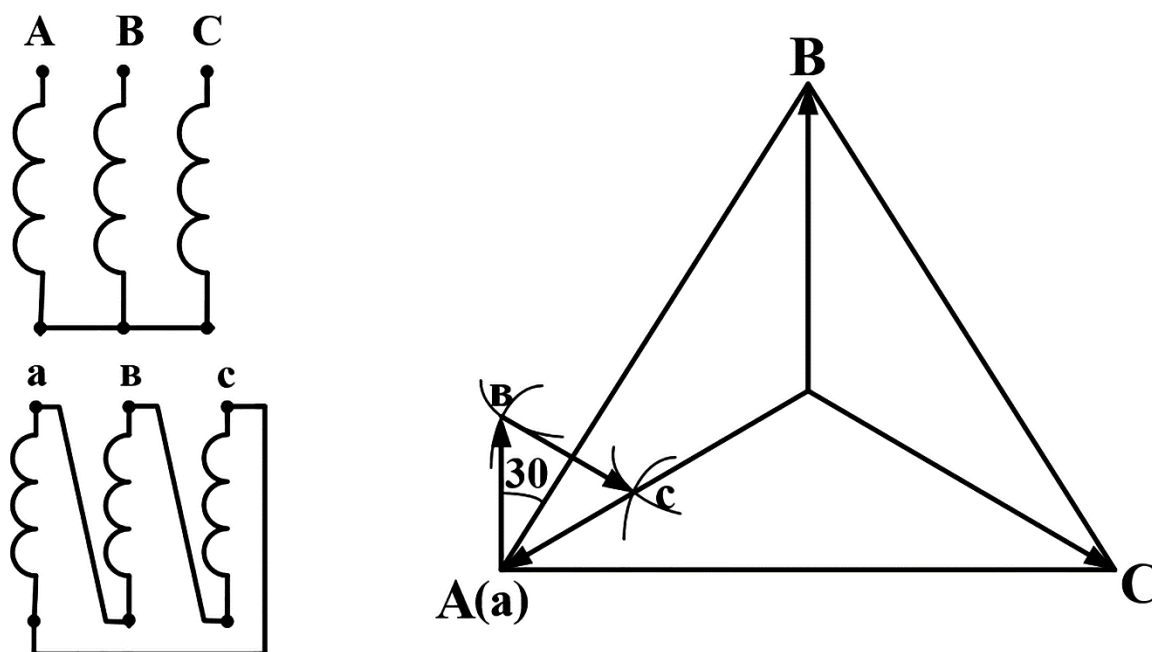


Рисунок 4.7 – Графическое определение группы соединения обмоток трансформатора при соединении обмоток по схеме $Y/\Delta - 11$

2. Метод двух вольтметров. Этот метод заключается в измерении напряжений на зажимах обмоток ВН и НН, и определении группы соединения по

таблицам, предложенным профессором Г. Н. Петровым.

Предположим, что нужно определить группу соединения трехфазного трансформатора, у которого обозначены выводы A, B, C и a, b, c ; при этом даны номинальные напряжения обмоток ВН и НН. Чтобы получить соединения $Y/Y-0$, зажимы обмоток ВН и НН соединяют по схеме, показанной на рисунке 4.6, а; включают рубильник и проверяют симметрию напряжений U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} , а также U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} ; при помощи вольтметра измеряют напряжения U_{AB} и U_{ab} и определяют коэффициент трансформации (4.1):

$$K_L = \frac{U_{AB}}{U_{ab}} \quad (4.1)$$

Далее подсчитываем контрольное напряжение, с которым в дальнейшем будем сравнивать измеряемые напряжения. Оно определяется по формуле (4.2):

$$U_k = U_{ab} \sqrt{k_L + 1} \quad (4.2)$$

где U_{ab} – напряжение на вторичных зажимах при определении коэффициента трансформации.

После этого соединяем проводом зажимы A и a , как показано на рисунке 4.6, а; подав напряжение на обмотку высшего напряжения, производим измерение напряжений U_{Bb}, U_{Bc} и U_{Cc}, U_{Cb} , после чего записываем их в таблицу 4.2.

Затем собираем схему (рис. 4.2, б), в которой обмотки соединены по схеме $Y/Y-6$, а перемычкой соединяем выводы A и x ; и снова производим измерение напряжений U_{Bb}, U_{Bc} и U_{Cc}, U_{Cb} , записывая их в таблицу 4.2 [1, 2, 3, 6, 7, 9, 10].

Затем собираем схемы (рис. 4.7 в, г), в которых обмотки соединяются по схемам $Y/\Delta-5$ и $Y/\Delta-11$, и производим измерения этих же напряжений, которые также записываем в таблицу 4.2.

После этого необходимо рассчитать напряжения U_{Bb}, U_{Bc} и U_{Cc}, U_{Cb} по формулам, указанным в таблице 4.3. Результаты вычислений заносят в таблицу 4.2.

Лабораторная работа 4.

Опытное определение групп соединения трехфазного трансформатора

Таблица 4.2 – Данные межфазных напряжений основных групп соединения трехфазных трансформаторов

	Схема соединения обмоток	$U_{AB},$ В	$U_{ab},$ В	$U_{Bb},$ В	$U_{Bc},$ В	$U_{Cb},$ В	$U_{Cc},$ В	Номер группы
	Y/Y,Δ/Δ,Δ/Z			М	М	М	М	0
Измерения								
Вычисления								
	Y/Δ,Δ/Y, Y/Z			Б	Б	Р	Б	5
Измерения								
Вычисления								
	Y/Y,Δ/Δ,Δ/Z			Б	Б	Б	Б	6
Измерения								
Вычисления								
	Y/Δ,Δ/Y, Y/Z			М	М	Р	М	11
Измерения								
Вычисления								

Таблица 4.3 – Формулы для расчета межфазных напряжений основных групп соединения трехфазных трансформаторов

Группа	$U_{Bb},$ В	$U_{Bc},$ В	$U_{Cb},$ В	$U_{Cc},$ В
0	$U_{ab}(K_L - 1)$	$U_{ab}\sqrt{1 - K_L + K_L^2}$	$U_{ab}\sqrt{1 - K_L + K_L^2}$	$U_{ab}(K_L - 1)$
5	$U_{ab}\sqrt{1 + \sqrt{3}K_L + K_L^2}$	$U_{ab}\sqrt{1 + \sqrt{3}K_L + K_L^2}$	$U_{ab}\sqrt{1 + K_L^2}$	$U_{ab}\sqrt{1 + \sqrt{3}K_L + K_L^2}$
6	$U_{ab}(1 + K_L)$	$U_{ab}\sqrt{1 - K_L + K_L^2}$	$U_{ab}\sqrt{1 - K_L + K_L^2}$	$U_{ab}(1 + K_L)$
11	$U_{ab}\sqrt{1 - \sqrt{3}K_L + K_L^2}$	$U_{ab}\sqrt{1 - \sqrt{3}K_L + K_L^2}$	$U_{ab}\sqrt{1 + K_L^2}$	$U_{ab}\sqrt{1 - \sqrt{3}K_L + K_L^2}$
Примечание: $K_L = \frac{U_{AB}}{U_{ab}}$.				

Сравнивая эти напряжения с контрольным напряжением U_K , замечаем, что измерительные напряжения оказываются порознь: меньше, больше или равны U_K (в таблице 4.2 это обозначено буквами М, Б, Р соответственно).

Тогда по таблице 4.2, определяют принадлежность данного трансформатора к определенной группе соединений.

Анализ результатов лабораторной работы. При анализе результатов лабораторной работы необходимо иметь в виду следующее:

1. Группы соединения трансформаторов определяются не только схемой

соединения обмоток ВН и НН, но и маркировкой их выводов (направлением намотки).

2. Исследованные в лабораторной работе четыре группы соединения являются основными, и каждая из них может быть преобразована в две производные группы соединения путем круговой перемаркировки выводов обмоток либо на стороне ВН, либо на стороне НН; следует указать, какие производные группы соединения могут быть получены из каждой основной.

3. Необходимо отметить, какие из групп соединения, рассмотренных в данной работе, предусмотрены стандартом.

Содержание отчета. Отчет должен содержать:

- 1) название, цель и программу работы;
- 2) выбранную для проверки схему соединения обмоток;
- 3) таблицу опытных данных;
- 4) вычисления, производимые для проверки группы соединения;
- 5) векторную диаграмму;
- 6) выводы по проведенной работе

Контрольные вопросы

1. Что такое группа соединения и как она обозначается?
2. Чем определяется группа соединения трансформатора?
3. Какие группы соединения могут быть получены при одинаковой схеме соединения обмоток ВН и НН?
4. Какие группы соединения называют основными, а какие – производными?
5. Как из основных групп соединения можно получить производные?
6. Какие группы соединения возможны для однофазных трансформаторов?
7. Перечислите группы соединения, предусмотренные государственным

стандартом, зарисуйте соответствующие им схемы соединения обмоток.

8. Какими способами можно определить группы соединения трансформаторов?

9. В чем состоит метод фазометра при определении группы соединения трансформатора?

10. С какой целью при определении группы соединения по методу вольтметра соединяют выводы $A - a$?

11. Постройте векторную диаграмму для соединения обмоток трехфазного трансформатора по схеме Y/Y_n-0 .

12. Постройте векторную диаграмму для соединения обмоток трехфазного трансформатора по схеме $Y/Y-6$.

13. Постройте векторную диаграмму для соединения обмоток трехфазного трансформатора по схеме $Y/D-11$.

14. Постройте векторную диаграмму для соединения обмоток трехфазного трансформатора по схеме $Y/D-5$.

15. Соедините обмотки по схеме Y/Y_0-0 и проверьте правильность соединения.

16. Соедините обмотки по схеме $Y/Y-6$ и проверьте правильность соединения.

17. Соедините обмотки по схеме $Y/\Delta-11$ и проверьте правильность соединения.

18. Соедините обмотки по схеме $Y/\Delta-5$ и проверьте правильность соединения.

19. Что является единицей измерения группы соединения?

20. Для чего нужно знать группу соединения трансформатора?

Тестовые задания

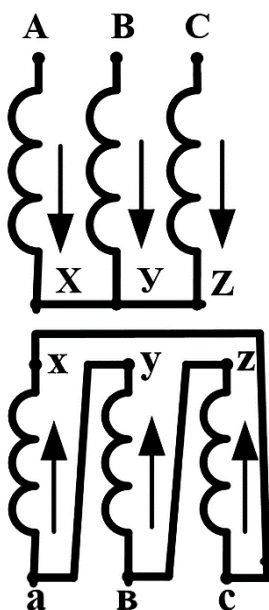
1. От чего будет зависеть группа соединения обмоток трехфазного трансформатора? Укажите правильный ответ:

- а) от направления намотки обмоток (правая, левая);
- б) от маркировки начала и конца обмотки;
- в) от схемы соединения обмоток;
- г) все ответы, указанные под буквами а, б, в, – правильные.

2. Группа соединения трансформатора характеризуется:

- а) величиной угла смещения вектора линейного напряжения обмотки НН относительно соответствующего вектора линейного напряжения обмотки ВН;
- б) величиной угла, на который вектор фазного напряжения обмотки НН отстает от соответствующего вектора фазного напряжения обмотки ВН;
- в) величиной угла, на который вектор фазного напряжения обмотки НН опережает соответствующий вектор фазного напряжения обмотки ВН;
- г) схемой соединения обмоток.

3. Укажите группу соединений обмоток трансформатора, если фазные обмотки на каждом стержне намотаны встречно:



- а) $Y/\Delta - 9$;
- б) $Y/\Delta - 1$;
- в) $Y/\Delta - 5$;
- г) $\Delta/Y - 3$;
- д) $Y/\Delta - 11$.

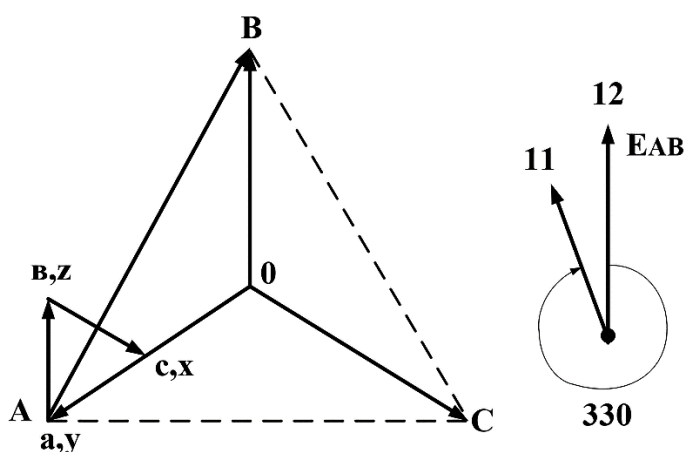
4. При каком соединении первичной и вторичной обмоток трехфазного трансформатора получаются нечетные группы соединений?

- а) Δ/Δ ; Δ/Y ; Y/Δ ;
- б) Y/Y ; Δ/Y ; Y/Δ ;
- в) Y/Δ ; Δ/Δ ; Δ/Y ;
- г) Y/Z ; Δ/Y ; Y/Δ ;
- д) Y/Y ; Δ/Δ ; Δ/Z .

5. При каком соединении первичной и вторичной обмоток трехфазного трансформатора получаются четные группы соединений?

- а) Δ/Δ ; Δ/Y ; Y/Δ ;
- б) Y/Y ; Δ/Y ; Y/Δ ;
- в) Y/Δ ; Δ/Δ ; Δ/Y ;
- г) Y/Z ; Δ/Y ; Y/Δ ;
- д) Y/Y ; Δ/Δ ; Δ/Z .

6. На рисунке изображена совмещенная векторная диаграмма линейных ЭДС обмоток ВН и НН. Определите схему соединения и номер группы соединения обмоток:



- а) соединение обмоток Y/Δ группа 11;
- б) соединение обмоток Y/Δ группа 1;
- в) соединение обмоток Y/Y группа 0;
- г) соединение обмоток Y/Y группа 6;
- д) соединение обмоток Δ/Δ группа 0.

7. Определите производные группы от основных четных групп соединения 0 и 6:

- а) для группы 0 – производные группы 4 и 8, для группы 6 – производные группы 10 и 2;
- б) для группы 0 – производные группы 2 и 10, для группы 6 – производные группы 4 и 8;
- в) для группы 0 – производные группы 4 и 10, для группы 6 – производные группы 8 и 2;
- г) для группы 0 – производные группы 2 и 4, для группы 6 – производные группы 10 и 8.

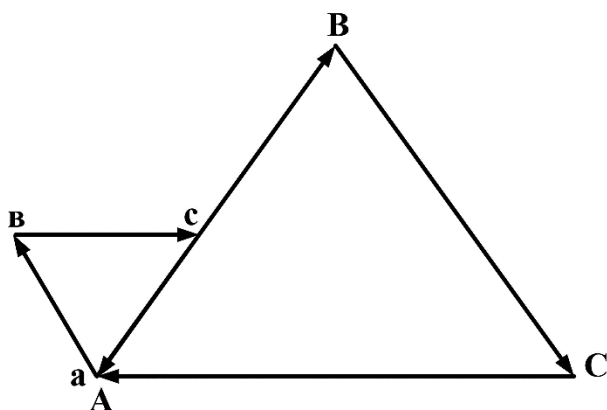
8. Определите производные группы от основных нечетных групп соединения 11 и 5:

- а) для группы 11 – производные группы 3 и 9, для группы 5 – производные группы 9 и 1;
- б) для группы 11 – производные группы 7 и 3, для группы 5 – производные группы 9 и 1;
- в) для группы 11 – производные группы 7 и 9, для группы 5 – производные группы 3 и 1;
- г) для группы 11 – производные группы 5 и 7, для группы 5 – производные группы 11 и 9.

9. Какие группы соединения возможны для однофазных трансформаторов?

- а) 0, 1, 2;
- б) 0, 6;
- в) 0, 1, 2, 6;
- г) 11, 1, 2;
- д) 1, 2.

10. На рисунке изображена совмещенная векторная диаграмма линейных ЭДС обмоток ВН и НН. Определите угол сдвига и номер группы соединения обмоток:



- а) угол сдвига 0° , группа 0;
- б) угол сдвига 360° , группа 6;
- в) угол сдвига 60° , группа 2;
- г) угол сдвига 120° , группа 4;
- д) угол сдвига 300° , группа 10.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Цель работы: научиться проводить фазировку трансформаторов и включать их на параллельную работу.

Общие сведения

Включение трансформаторов на параллельную работу необходимо для обеспечения бесперебойного снабжения потребителей электрической энергией. В большинстве случаев при значительной мощности электрической установки целесообразно иметь не один, а несколько трансформаторов меньшей мощности, включенных параллельно на общую нагрузку. Такое дробление общей трансформаторной мощности позволяет лучше решать проблему электроснабжения потребителей, отключать часть трансформаторов при уменьшении нагрузки, проще проводить профилактический ремонт трансформаторов и др.

В этом случае при уменьшении общей нагрузки можно отключать часть трансформаторов, заставляя оставшиеся работать при более экономичном режиме, а при профилактическом ремонте одного из трансформаторов или при аварийном выходе из строя одного из них, оставшиеся будут принимать на себя всю нагрузку или, в крайнем случае, ее часть. Один мощный трансформатор делать выгоднее, чем несколько трансформаторов на ту же суммарную мощность. В мощном трансформаторе меньше расход активных материалов и выше энергетические показатели. Однако часто в энергетических установках необходимо включать несколько трансформаторов на параллельную работу. При этом легче решается проблема резервирования энергоснабжения потребителей, упрощается организация ремонтных работ, при недогрузках можно

отключать часть трансформаторов. Поэтому трансформаторы в сетях и подстанциях чаще всего работают параллельно. Включение трансформаторов на параллельную работу необходимо для обеспечения бесперебойного снабжения потребителей электрической энергией.

Параллельная работа трансформаторов обеспечивает надежность в электроснабжении и используется для следующих целей:

- 1) дает возможность отключить трансформатор при аварийной ситуации (при выходе из строя любого трансформатора);
- 2) для обеспечения резервов при выводе одного из трансформаторов на профилактику и в ремонт;
- 3) для обеспечения суточных и сезонных колебаний нагрузки включать и отключать часть трансформаторов с целью повышения КПД установки;
- 4) для включения нескольких трансформаторов при отсутствии одного трансформатора необходимой большой мощности.

При параллельной работе первичные и вторичные обмотки трансформаторов подключаются к общим шинам с одноименными фазами сети и нагрузки (рис. 5.1) [1, 2, 3, 5, 6, 7, 9, 10].

Для включения трансформаторов на параллельную работу необходимо выполнить следующие **обязательные условия, обеспечивающие нормальную работу трансформаторов:**

- 1) напряжения первичных и вторичных обмоток трансформаторов должны быть одинаковыми, то есть должно быть равенство коэффициентов трансформации: $K_I = K_{II} = K_{III} = \dots$; по требованиям государственного стандарта допускается различие коэффициентов трансформации не более $\pm 0,5 \%$;
- 2) напряжения короткого замыкания параллельно работающих трансформаторов должны быть одинаковыми, (равенство напряжений короткого замыкания), то есть $U_{KI} = U_{KII} = U_{KIII} = \dots$; в соответствии с государственным стандартом допускается различие напряжений короткого замыкания не более

$\pm 10\%$ от среднего арифметического значения $U_K\%$;

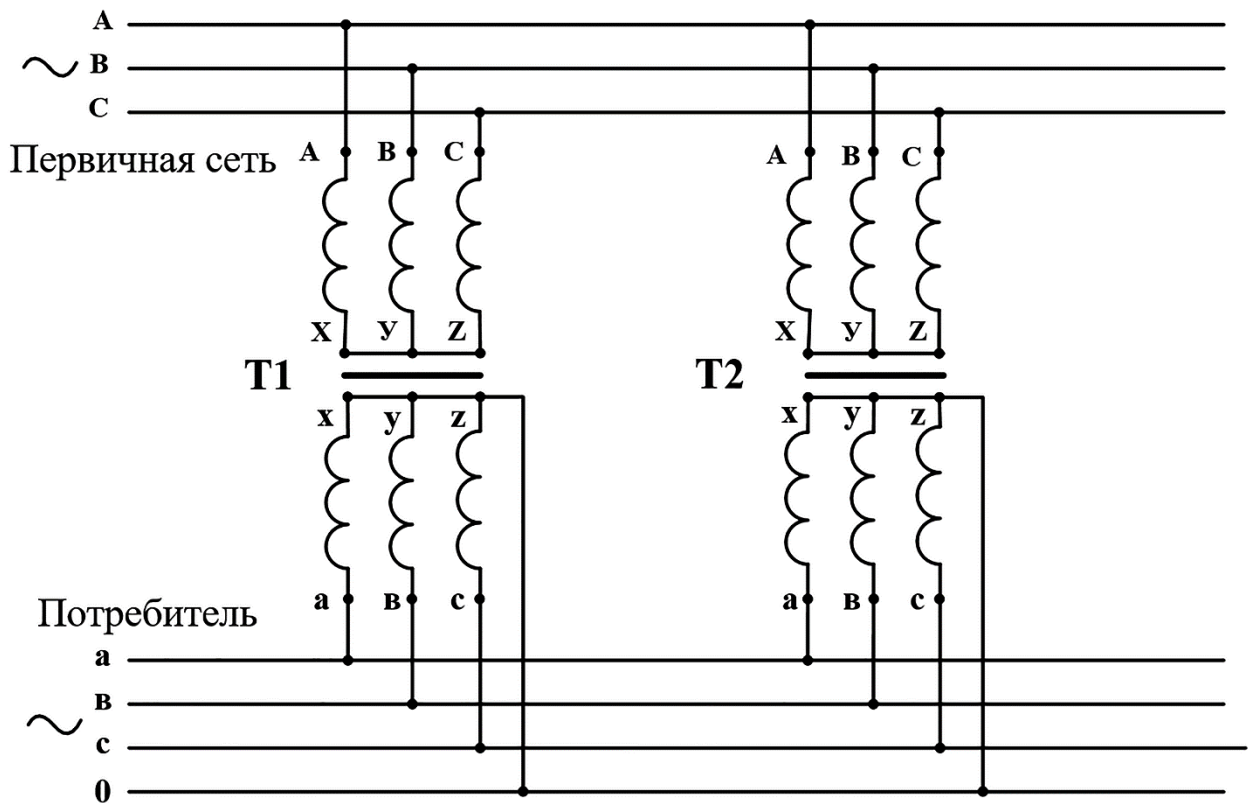


Рисунок 5.1 – Схема включения трехфазных трансформаторов на параллельную работу (соединение обмоток Y/Y₀)

3) группы соединения параллельно работающих трансформаторов должны быть одинаковыми (принадлежность к одной группе соединения), то есть первичные и вторичные напряжения и ЭДС должны совпадать по фазе;

4) мощность параллельно работающих трансформаторов не должна отличаться более чем в три раза; соотношение мощностей работающих трансформаторов должно быть не более 1:3;

5) одинаковый порядок чередования фаз при подключении первичных и вторичных обмоток в сеть и в нагрузку: A, B, C – a, в, с.

Невыполнение перечисленных условий приводит к следующим последствиям:

1) несоблюдение фазы вызывает прохождение тока через первичную об-

мотку даже при отсутствии нагрузки в результате сдвига фаз между проводами; в наихудшем варианте, при сдвиге фаз 180° , ток будет равен току короткого замыкания;

2) при неравенстве коэффициента трансформации ток будет протекать от устройства с высоким напряжением; также увеличится холостой ход, который будет тем выше, чем больше разница в коэффициенте трансформации;

3) неравенство напряжения короткого замыкания не вызывает роста тока холостого хода, но при подключении нагрузки трансформатор с меньшим сопротивлением обмотки будет работать с перегрузкой;

4) аналогичная ситуация возникает при использовании устройств с большой разницей номинальной мощности; мощность одного из устройств не должна превышать более чем в 3 раза мощность другого.

При невыполнении любого из этих условий параллельная работа трансформаторов запрещается, так как это приводит к появлению уравнительных токов, к перегрузке и выходу из строя одного из трансформаторов [1, 2, 3, 5, 6, 7, 9, 10].

Распределение нагрузок между параллельно включенными трансформаторами зависит от сопротивлений короткого замыкания. Токи в трансформаторах, работающих параллельно, распределяются обратно пропорционально сопротивлениям короткого замыкания. Поэтому для пропорционального распределения мощности между трансформаторами необходимо иметь одинаковые напряжения короткого замыкания $U_K\%$. При параллельной работе трансформаторов с разными напряжениями короткого замыкания $U_K\%$ перегружается трансформатор, имеющий меньшее значение напряжения короткого замыкания $U_K\%$.

Если трансформатор, имеющий наименьшее значение $U_K\%$, будет нагружен номинальной мощностью, другие трансформаторы с большими $U_K\%$ бу-

дут недогружены. При этом другие трансформаторы еще не будут иметь номинальную нагрузку и будет иметь место недоиспользование установленной мощности трансформаторов. Наиболее затруднительным является выполнение условия равенства напряжений короткого замыкания, так как не всегда можно подобрать трансформаторы с одинаковыми U_k .

Относительные нагрузки параллельно работающих трансформаторов обратно пропорциональны их напряжениям короткого замыкания.

Общая нагрузка включенных на параллельную работу трансформаторов S не должна превышать суммарной номинальной мощности этих трансформаторов: $S \leq \sum S_{\text{ном}}$. При параллельной работе двух трансформаторов нагрузка на каждый трансформатор распределяется прямо пропорционально их номинальным мощностям и обратно пропорционально напряжениям короткого замыкания (5.1):

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{U_{k2} S_{\text{ном1}}}{U_{k1} S_{\text{ном2}}} \quad (5.1)$$

где S_1 и S_2 – мощности нагрузки трансформаторов;

$S_{\text{ном1}}$ и $S_{\text{ном2}}$ – номинальные мощности трансформаторов.

Из выражения (5.1) можно определить распределение нагрузки $S_{\text{нагр}}$ между двумя параллельно работающими трансформаторами (5.2) и для n параллельно работающих трансформаторов (5.3):

$$S_1 = S_{\text{нагр}} \frac{S_{\text{ном1}}}{U_{k1} \left(\frac{S_{\text{ном1}}}{U_{k1}} + \frac{S_{\text{ном2}}}{U_{k2}} \right)}, \quad (5.2)$$

$$S_2 = S_{\text{нагр}} \frac{S_{\text{ном2}}}{U_{k2} \left(\frac{S_{\text{ном1}}}{U_{k1}} + \frac{S_{\text{ном2}}}{U_{k2}} \right)},$$

$$S_i = S_{\text{нагр}} \frac{S_{\text{ном}i}}{U_{ki} \% \sum_{i=1}^n \left(\frac{S_{\text{ном}i}}{U_{ki} \%} \right)} \quad (5.3)$$

где $S_{\text{нагр}}$ – общая нагрузка трансформаторов, кВА;

U_{k1} , U_{k2} , U_{ki} – напряжение короткого замыкания трансформаторов, %.

Для включения трансформаторов Т1 и Т2 на параллельную работу необходимо, чтобы при холостом ходе в их обмотках не возникали уравнительные токи и чтобы нагрузка распределялась между обоими трансформаторами в соответствии с их номинальной мощностью. Для этого требуется соблюдать следующие условия.

При неравенстве ЭДС параллельно работающих трансформаторов (их вторичных напряжений при холостом ходе) возникает уравнительный ток. Этот ток вызывает циркуляцию мощности от одного трансформатора к другому, а, следовательно, неравномерную нагрузку трансформаторов, сопровождающуюся увеличением потерь и нагрева [1, 2, 3, 5, 6, 7, 9, 10].

Первым необходимым условием для включения трансформаторов на параллельную работу является равенство их вторичных ЭДС, то есть вторичных напряжений холостого хода. Предполагается, что первичные напряжения у них одинаковы, то есть трансформаторы подключены к одной и той же первичной сети. При этом трансформаторы должны иметь одинаковые коэффициенты трансформации. На практике допускается параллельная работа силовых трансформаторов, имеющих различие в коэффициентах трансформации не более 0,5 %, а для трансформаторов с $k > 3$ – не более 1 %. При таком различии в коэффициентах трансформации разность вторичных ЭДС: $E_{2a} - E_{2b}$ небольшая и уравнительный ток незначительный.

Вторым необходимым условием является совпадение по фазе ЭДС, с тем, чтобы их векторная разность $\Delta E = E_{2a} - E_{2b}$ равнялась нулю. Для этого параллельно работающие трансформаторы должны принадлежать к одной группе соединений. При невыполнении этого условия между одноименными зажимами вторичных обмоток возникает разность ЭДС, вызывающая появление уравнительного тока. Так, например, если трансформаторы принадлежат даже к ближайшим группам (например, одиннадцатой и нулевой), сдвиг по

фазе между их вторичными ЭДС составляет 30° , и в контуре параллельно соединенных вторичных обмоток возникает большая разность ЭДС. При этом уравнивающий ток в несколько раз больше номинального.

Третьим необходимым условием является равенство напряжений короткого замыкания трансформаторов: $U_{k1} = U_{k11} = U_{k111} \dots = U_{kn}$.

Для того чтобы нагрузки распределялись между параллельно включенными трансформаторами прямо пропорционально их номинальным мощностям, они должны иметь одинаковые напряжения короткого замыкания. Практически удовлетворительное распределение нагрузки получается в случаях, когда напряжения короткого замыкания параллельно работающих трансформаторов отклоняется от их среднеарифметического значения не более чем на 10 %.

Если при параллельной работе напряжения U_K не равны, то перегружается трансформатор с меньшим значением U_K , то есть с меньшим сопротивлением Z_k . В этом случае придется уменьшить общую нагрузку всей группы параллельно работающих трансформаторов, так как установленная мощность трансформаторов не используется.

При неравенстве активных U_{KA} и реактивных U_{KP} составляющих напряжения короткого замыкания, токи параллельно работающих трансформаторов сдвинуты по фазе на некоторый угол. При этом суммарный ток, отдаваемый нагрузке, равен векторной сумме токов всех трансформаторов, то есть меньше их алгебраической суммы. В этом случае номинальная мощность трансформаторов используется не полностью.

У трансформаторов различных мощностей составляющие U_{KA} и U_{KP} различны: у трансформаторов большей мощности U_{KA} больше, а U_{KP} меньше, чем у трансформаторов меньшей мощности. Поэтому не рекомендуется включение на параллельную работу трансформаторов с отношением номинальных мощностей больше 3:1.

Перед включением трансформаторов на параллельную работу необходимо их **сфазировать**, то есть проверить совпадения по фазе вторичных напряжений трансформаторов, присоединенных с первичной стороны к одной и той же сети. Фазировку, как правило, проводят на низком напряжении трансформатора, пользуясь вольтметром, а при высоком напряжении вольтметры включают через трансформаторы напряжения.

При фазировке трансформаторов с изолированной нейтралью соединяют перемычками два одноименных вывода, например, a_1 и a_2 (рис. 5.3), создавая замкнутую электрическую цепь, по которой проходит ток вольтметра. У трансформаторов с заземленной нейтралью, такое соединение делать нельзя, так как при соединении двух разноименных фаз произойдет короткое замыкание.

При фазировке измеряют напряжение между фазами обмоток трансформаторов. Если напряжение между одноименными фазами b_1 и b_2 , c_1 и c_2 равны нулю, а между разноименными равны линейным напряжениям U_{b1c1} и $U_{c1b1} = U_L$, то трансформатор можно включать на параллельную работу, он сфазирован. При фазировке трансформаторов с заземленной нейтралью напряжение между фазами a_1 и a_2 , c_1 и c_2 , b_1 и b_2 , должны быть равны нулю, а напряжения между разноименными фазами – линейному напряжению.

Программа работы

1. Ознакомиться с установкой и записать данные таблиц трансформаторов и измерительных приборов. Собрать схему, определить коэффициенты трансформации обеих трансформаторов, определить возможность включения трансформаторов на параллельную работу, произвести фазировку трансформаторов.

2. Включить на параллельную работу два трехфазных трансформатора, имеющих равные напряжения короткого замыкания.

3. Нагрузить трансформаторы и проследить распределение нагрузки между ними. Построить зависимости $I_1 = f(I)$; $I_2 = f(I)$.

4. Нагрузить работающие параллельно трансформаторы, имеющие неравные напряжения короткого замыкания: $U_{K1} \neq U_{K2}$. Построить зависимости $I_1 = f(I)$; $I_2 = f(I)$.

5. Подготовить выводы и заключение.

Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал: условия включения трансформаторов на параллельную работу, группы соединения трансформаторов – основные и производные; группы соединения, предусмотренные действующим стандартом.

2. Подготовить в рабочей тетради таблицу для занесения результатов лабораторной работы.

Порядок выполнения работы

Для опыта параллельной работы трансформаторов собирают схему (рис. 5.2). Два трехфазных трансформатора Т1 и Т2 со стороны первичных обмоток присоединяют к питающей сети рубильниками QF и QS₁.

Таблица 5.1 – Данные для определения линейных и фазных коэффициентов трансформации трехфазных трансформаторов

	U_{AB}	U_{BC}	U_{AC}	K_L	U_A	U_B	U_C	K_Φ	K_{CP}	ΔK
Т1										
Т2										

До включения трансформаторов на параллельную работу нужно определить их линейные и фазные коэффициенты трансформации: $K_{1L} = U_{BH1} / U_{HH1}$;

$K_{2L} = U_{BH2}/U_{HH2}$; $K_{1\Phi} = U_{\Phi1}/U_{\Phi2}$; $K_{2\Phi} = U_{\Phi1}/U_{\Phi2}$. Измеренные величины зане-
сти в таблицу 5.1

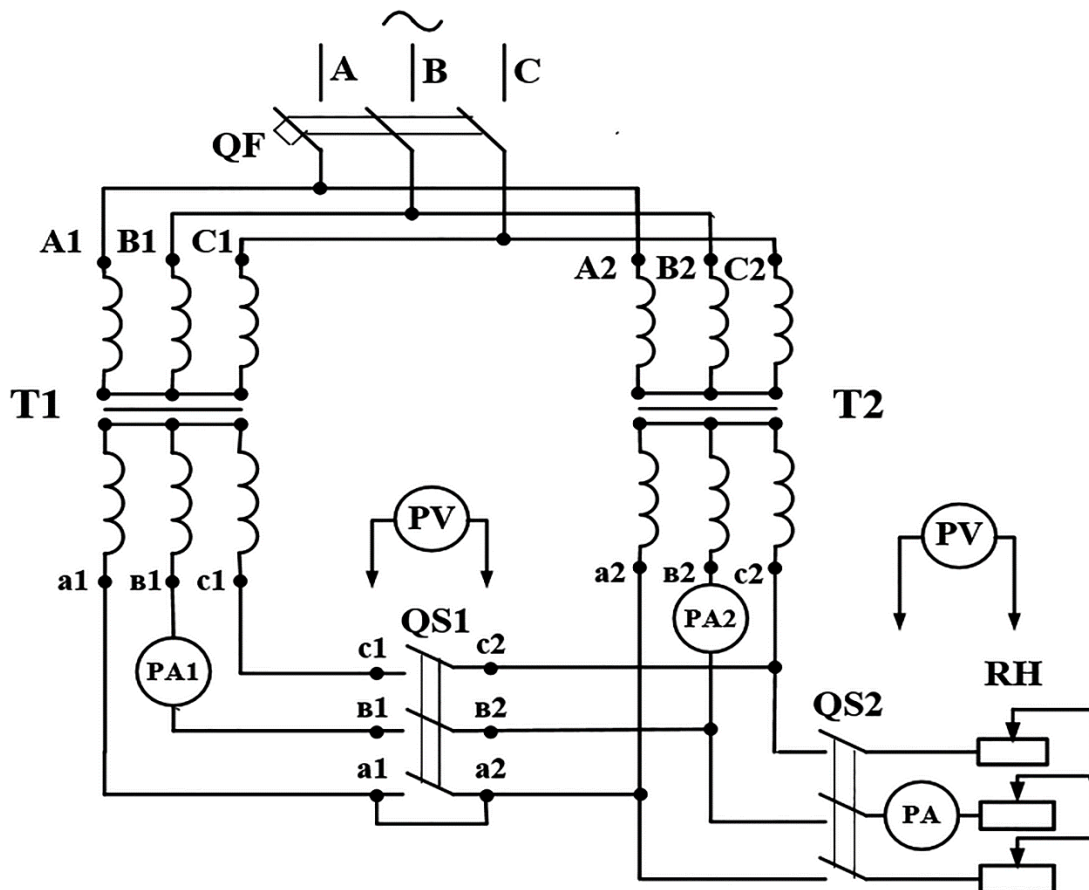


Рисунок 5.2 – Схема включения
трехфазных трансформаторов на параллельную работу

Конечно, для этого опыта лучше иметь еще два трансформатора при $k_1 \neq k_2$ и при $U_{K1} \neq U_{K2}$. В качестве нагрузки применяется три реостата RH, подключаемые рубильником QS₂ [1, 2, 3, 5, 6, 7, 9, 10].

Для нормальной параллельной работы трансформаторов должны быть соблюдены следующие условия:

- 1) первичные и вторичные номинальные напряжения должны быть соответственно равны;
- 2) трансформаторы должны принадлежать к одной группе соединения;
- 3) напряжение короткого замыкания не должно отличаться друг от друга более чем на $\pm 10\%$ среднего значения:

$$U_{k1}, U_{k2} \leq \left(0,1 \frac{U_{k1} + U_{k2}}{2}\right) \quad (5.4)$$

Включение на параллельную работу производится следующим образом. В первую очередь убеждаются, что все напряжения на вторичных зажимах равны. Для этого при разомкнутых рубильниках QS_1 и QS_2 включают рубильник QF и вольтметром проверяют напряжения U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} на обоих трансформаторах. Прежде чем подключить трансформаторы на параллельную работу, то есть включить рубильник QS_2 , при замкнутом рубильнике QF необходимо провести фазировку трансформаторов (проверку соответствия фаз вторичных ЭДС трансформаторов $T1$ и $T2$). Для этого соединяют проводом одну из противоположащих клемм рубильника QS_1 и вольтметром PV измеряют напряжение между двумя несоединенными парами противоположащих клемм рубильника QS_1 (рис. 5.3). Если вторичные напряжения трансформаторов равны, их группы соединения одинаковы и порядок соединения фаз у них один и тот же, то показания вольтметра PV равны нулю.

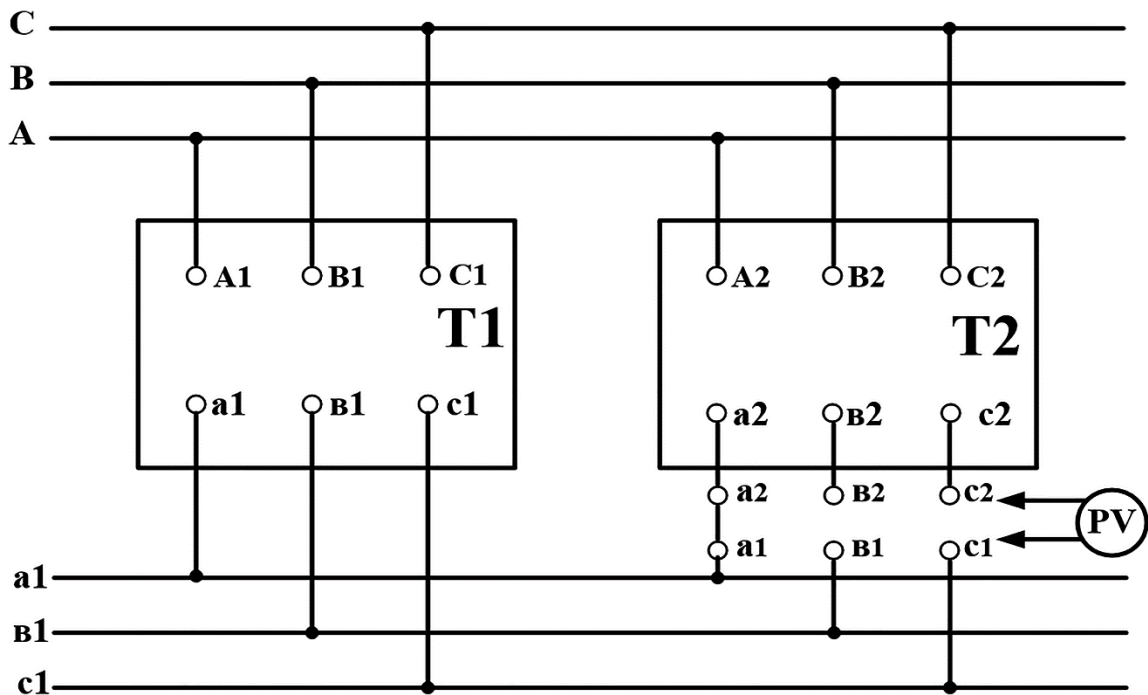


Рисунок 5.3 – Схема фазировки трансформаторов без заземленных нейтралей

Далее проверяют, что трансформаторы принадлежат к одной группе. Для этого, перемкнув проводом два соответствующих зажима рубильника QS₁, например *c* и *c*₁, измеряют напряжение между *v*₁ и *v*₂, *a*₁ и *a*₂. Если группы соединения одинаковы, то показания вольтметра должны равняться нулю, и рубильник QS₂ может быть включен. Если при измерении напряжения между зажимами *v*₁ и *v*₂, *a*₁ и *a*₂, вольтметр показывает некоторое напряжение, то это может происходить от неправильного присоединения вторичных зажимов обмоток к рубильнику QS₁ или первичных зажимов QF к рубильникам. В этих случаях следует поменять местами присоединение зажимов к рубильникам. Если трансформаторы принадлежат к разным группам, то включение рубильника QS₁ недопустимо, так как напряжение между зажимами *v*₁ и *v*₂, *a*₁ и *a*₂ не могут быть сделаны равными нулю.

После, включения трансформаторов на параллельную работу включают рубильник QS₂ и нагружают их. Запись измерений токов нагрузки сводят в таблицу 5.2 [1, 2, 3, 5, 6, 7, 9, 10].

Таблица 5.2 – Данные распределения нагрузки между трехфазными трансформаторами, включенными на параллельную работу

Номер измерения	I , А	I_1 , А	I_2 , А

В этом случае, когда напряжения короткого замыкания равны между собой, ток делится между трансформаторами пропорционально их номинальным мощностям. На основании записей таблицы 5.2, строятся зависимости $I_1 = f(I)$; $I_2 = f(I)$.

Для того чтобы найти распределение нагрузки между трансформаторами, имеющими неравномерные напряжения короткого замыкания, включение на параллельную работу производят при разомкнутом рубильнике. В этом случае между вторичными зажимами трансформатора и рубильником оказывается

включенным специально подобранное реактивное сопротивление, что увеличивает падение напряжения в этой цепи. Включив трансформаторы на параллельную работу, нагружают их, производят запись токов I , I_1 , I_2 в таблицу 5.2 и строят зависимости $I_1 = f(I)$; $I_2 = f(I)$. Большую нагрузку будет иметь тот трансформатор, у которого напряжение короткого замыкания меньше.

Содержание отчета. Отчет должен включать:

- 1) название, цель и программу работы;
- 2) выбранную для проверки схему параллельной работы трансформаторов;
- 3) таблицу опытных данных;
- 4) графики зависимостей распределения тока нагрузки между двумя трансформаторами, включенными на параллельную работу;
- 5) схему фазировки трансформаторов;
- 6) выводы по проведенной работе.

Контрольные вопросы

1. При каких условиях возможна параллельная работа трансформаторов?
2. Что такое фазировка трансформатора и как она выполняется?
3. Какими способами определяют группу соединения обмоток трансформатора?
4. Как определяют экономическую целесообразность параллельной работы трансформаторов?
5. В каких случаях применяется параллельная работа трансформаторов?
6. Как распределяется нагрузка между двумя трансформаторами при параллельном включении?
7. Почему появляется уравнивающий ток в обмотках трансформаторов, включенных на параллельную работу при неодинаковых коэффициентах трансформации?

8. Что произойдет при включении на параллельную работу трансформаторов с неодинаковыми напряжениями короткого замыкания?
9. Можно ли включить на параллельную работу трансформаторы с разными группами соединения?
10. Какова разница между фазными и линейными величинами токов и напряжений в зависимости от схемы соединения трехфазной обмотки: звездой «Y» и треугольником «Δ»?
11. От чего зависит распределение нагрузки между параллельно работающими трансформаторами?
12. Приведите формулу для определения распределения нагрузки между двумя трансформаторами, включенными на параллельную работу.
13. Вычертите схему включения двух трехфазных трансформаторов на параллельную работу.
14. В каком случае параллельная работа трансформаторов запрещается?
15. Какая должна быть общая нагрузка на трансформаторы, включенные на параллельную работу?
16. Как определить степень загрузки трансформатора?
17. Что покажет вольтметр при правильной фазировке трансформаторов?
18. Что покажет вольтметр при неправильной фазировке трансформаторов?
19. Как проверить группу соединения трансформатора?
20. Что значит, если трансформатор имеет шестую, нулевую группу соединения?

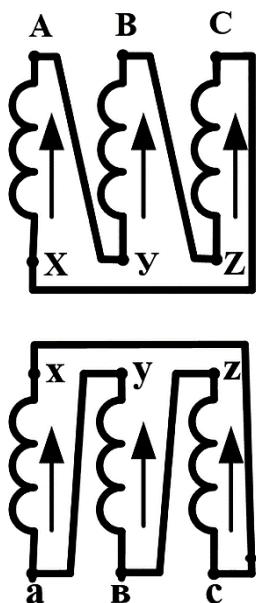
Тестовые задания

1. Параллельная работа трехфазных трансформаторов разрешается если:

- а) группы соединения обмоток одинаковы;

- б) соотношение мощностей не более 1:3;
- в) коэффициенты трансформации отличаются не более $\pm 0,5 \%$;
- г) напряжения короткого замыкания отличаются не более $\pm 10 \%$;
- д) произведена правильная фазировка трансформаторов;
- е) все ответы, указанные под пунктами а), б), в), г), д) – правильные.

2. Укажите группу соединений обмоток трансформатора, если фазные обмотки на каждом стержне намотаны встречно:



- а) Y/Y₀ – группа 0;
- б) Y/Y₀ – группа 6;
- в) Y/Y – группа 0;
- г) Δ/Δ – группа 0;
- д) Δ/Δ – группа 6.

3. Можно ли включить на параллельную работу трансформаторы, если напряжения короткого замыкания трансформаторов равны: $U_{K1} = 6,6 \%$, $U_{K2} = 6 \%$, а все остальные условия выполняются? Укажите наиболее полный ответ:

- а) можно;
- б) нельзя;
- в) нельзя, так, как напряжения короткого замыкания отличаются более чем на 10 %;
- г) можно, так, как напряжения короткого замыкания отличаются на 9,52 %;
- д) можно, но через обмотки трансформаторов потечет большой ток.

4. Что такое степень загруженности трансформатора при параллельной работе трансформатора?

- а) отношение номинальной мощности к мощности нагруженного трансформатора;
- б) отношение мощности нагруженного трансформатора к его номинальной мощности;
- в) отношение номинальной мощности трансформатора к мощности потребителя;
- г) отношение мощности потребителя к номинальной мощности трансформатора;
- д) отношение номинальной мощности одного трансформатора к номинальной мощности другого трансформатора.

5. С какой целью применяется параллельная работа трансформаторов:

- а) дает возможность отключить трансформатор при аварийной ситуации (при выходе из строя любого трансформатора);
- б) для обеспечения резервов при выводе одного из трансформаторов на профилактику и в ремонт;
- в) для обеспечения суточных и сезонных колебаний нагрузки включать и отключать часть трансформаторов с целью повышения КПД установки;
- г) для включения нескольких трансформаторов при отсутствии одного трансформатора необходимой большой мощности;
- д) все ответы, указанные под пунктами а), б), в), г) – правильные.

6. Какое условие не является необходимым для включения трансформаторов на параллельную работу?

- а) равенство коэффициентов трансформации;
- б) равенство напряжений короткого замыкания;
- в) одинаковые группы соединения;
- г) соотношение номинальных мощностей не более 1:4;
- д) правильная фазировка.

7. При включении трансформаторов на параллельную работу допускается различие напряжений короткого замыкания не более чем...

- а) на $\pm 5 \%$;
- б) на $\pm 10 \%$;
- в) на $\pm 0,5 \%$;
- г) 1:3.

8. Что произойдет, если на параллельную работу включить трансформаторы с разными группами соединения обмоток?

- а) напряжение на нагрузке уменьшится до нуля;
- б) возникнут колебания напряжения на нагрузке;
- в) через обмотки трансформаторов потечет большой уравнивающий ток;
- г) ничего не произойдет.

9. Как распределяется нагрузка между трансформаторами, если все условия параллельной работы выполнены, а напряжение короткого замыкания первого трансформатора больше на 5 %, чем у второго?

- а) поровну;
- б) пропорционально мощности трансформаторов;
- в) пропорционально мощности трансформаторов и обратно пропорционально их напряжениям короткого замыкания;
- г) пропорционально мощности трансформаторов и пропорционально их напряжениям короткого замыкания;
- д) пропорционально напряжениям короткого замыкания трансформаторов.

10. При включении трансформаторов на параллельную работу допускается различие коэффициентов трансформации не более чем...

- а) на $\pm 5 \%$;
- б) на $\pm 10 \%$;
- в) на $\pm 0,5 \%$;
- г) 1:3.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

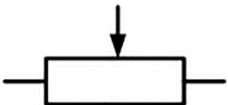
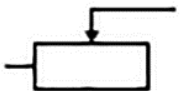
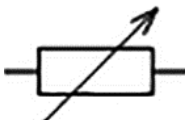
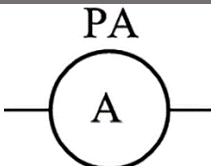
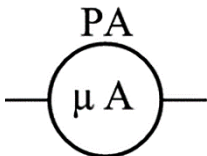
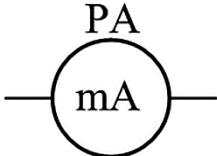
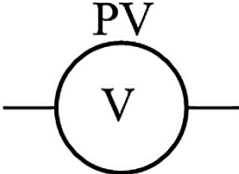
1. Беспалов, В. Я. Электрические машины : учебник / В. Я. Беспалов, Н. Ф. Котеленец. – М. : Академия, 2013. – 319 [1] с.
2. Ванурин, В. Н. Электрические машины / В. Н. Ванурин. СПб. : Лань, 2022. – 304 с. // ЭБС Лань : [сайт]. – URL: <https://e.lanbook.com/book/230381>.
3. Вольдек, А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы : учебник / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб. : Питер, 2007. – 320 с.
4. Епифанов, А. П. Электрические машины : учебник / А. П. Епифанов, Г. А. Епифанов. – СПб. : Лань, 2022. – 300 с. // ЭБС Лань : [сайт]. – URL: <https://e.lanbook.com/book/209984>.
5. Игнатович, В. М. Электрические машины и трансформаторы : учебное пособие / В. М. Игнатович, Ш. С. Ройз. М. : Юрайт, 2020. – 181 с. // ЭБС Юрайт : [сайт]. – URL: <https://urait.ru/bcode/451214>.
6. Кацман, М. М. Лабораторные работы по электрическим машинам и электрическому приводу : учебное пособие / М. М. Кацман. – М. : Издательский центр «Академия», 2016. – 256 с.
7. Кацман, М. М. Электрические машины : учебник / М. М. Кацман. – М. : Издательский центр «Академия», 2013. – 496 с.
8. Копылов, И. П. Электрические машины : учебник / И. П. Копылов. – М. : ЮРАЙТ, 2014. – 675 с.
9. Стрижков, И. Г. Лабораторный практикум по электрическим машинам : учебное пособие / И. Г. Стрижков, Е. Н. Чеснюк. – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет, 2006. – 296 с.
10. Сукманов, В. И. Электрические машины и аппараты : учебное пособие / В. И. Сукманов. – М. : Колос, 2001. – 296 с.
11. Усольцев, А. А. Электрические машины : учебное пособие / А. А. Усольцев. – СПб. : Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет, 2013. – 416 с. // ЭБС AgriLib : [сайт]. – URL: <https://ebs.rgazu.ru/?q=node/2502>.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

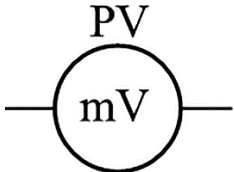
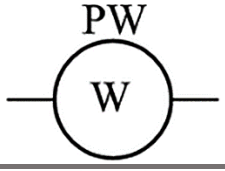
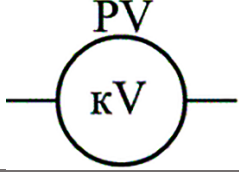
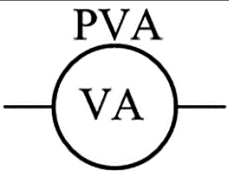
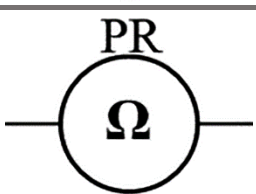
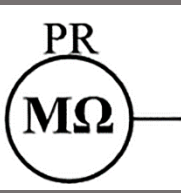
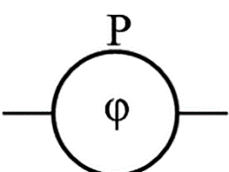
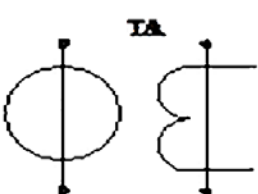
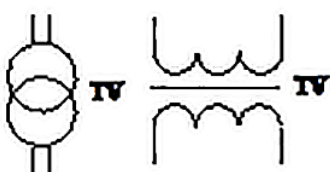
УСЛОВНО-ГРАФИЧЕСКИЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ

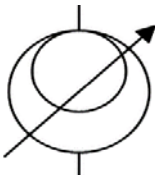
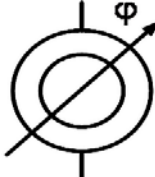
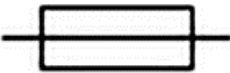
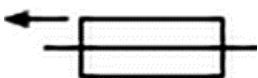
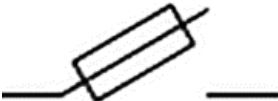
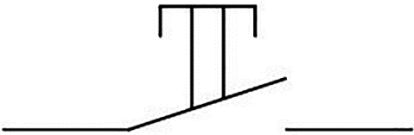
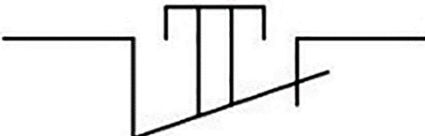
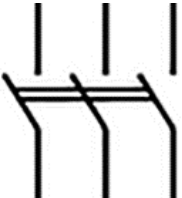
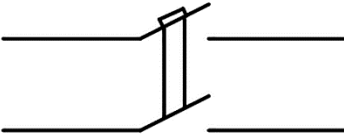
Таблица А.1 – Условно-графические обозначения элементов электрических схем

Резистор постоянный		R1
Резистор переменный (стрелкой обозначен подвижный контакт)		R2
Резистор переменный (неиспользуемый вывод допускается не изображать)		R3
Резистор переменный с линейным регулированием		R4
Элемент нагревательный		EK
Амперметр		РА
Микроамперметр		РА
Миллиамперметр		РА
Вольтметр		PV

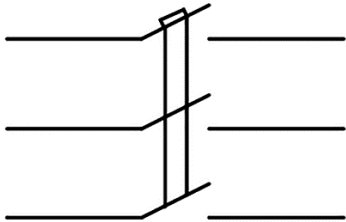
Продолжение таблицы А.1

Милливольтметр		PV
Ваттметр		PW
Киловольтметр		PV
Ампервольтметр		PVA
Омметр		PR
Мегомметр		PR
Фазомер (угол сдвига в градусах)		P
Измерительные трансформаторы тока с одной вторичной обмоткой		TA1
Измерительный трансформатор напряжения однофазный		TV1

Продолжение таблицы А.1

Индуктивный регулятор напряжения		TL
Катушка индуктивности		L
Фазовый регулятор		TV
Предохранитель плавкий (общее обозначение)		FU
Предохранитель плавкий: быстродействующий		FU
Выключатель-предохранитель		FU
Кнопка управления: замыкающий контакт кнопки		SB1
Кнопка управления: замыкающий контакт кнопки		SB2
Пакетный выключатель трехполюсный		SA
Автоматический выключатель с автоматическим возвратом: однополюс- ный		QF1
Автоматический выключатель с автоматическим возвратом: двухполюс- ный		QF2

Продолжение таблицы А.1

Автоматический выключатель с автоматическим возвратом: трехполюсный		QF3
--	--	-----

Учебное издание

*Светличный Сергей Васильевич,
старший преподаватель*

ТРАНСФОРМАТОРЫ

Практикум

Подписано в печать 28.02.2023 г.
Формат 60х90/16. Уч.-изд. л – 4,04. Усл. печ. л. – 7,76.
Тираж по требованию. Заказ 13.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Дальневосточный государственный аграрный университет»

Отпечатано в отделе оперативной полиграфии
Дальневосточного государственного
аграрного университета
675005, г. Благовещенск, ул. Политехническая, 86

