

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**А.И. Верхотуров, В.М. Игнатович, В.И. Попов,
О.Л. Рапопорт, Т.В. Усачева**

**ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭНЕРГИИ
И ТРАНСФОРМАТОРЫ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство
Томского политехнического университета
2011

УДК 621.314 (076.5)
ББК 31.261.8я73
Э455

Верхотуров А.И.

Э455 Электромеханические преобразователи энергии и трансформаторы. Лабораторный практикум. / А.И. Верхотуров, В.М. Игнатович, В.И. Попов, О.Л. Рапопорт, Т.В. Усачева; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 152 с.

В пособии излагаются вопросы исследования трансформаторов, асинхронных и синхронных электрических машин и машин постоянного тока на лабораторных установках кафедры «Электромеханические комплексы и материалы» Энергетического института ТПУ.

Предлагаются контрольные вопросы задаваемые студентам при проведении допуска к выполнению лабораторных работ и при их защите. Это актуально для организации самостоятельной работы и контроля учебного процесса.

Пособие предназначено для студентов, всех форм обучения, изучающих дисциплины «Электрические машины», «Электромеханика», «Силовые электромашинные преобразователи энергии».

УДК 621.314 (076.5)
ББК 31.261.8я73

Рецензенты

Кандидат технических наук,
заведующий кафедрой электротехники и автоматики ТГАСУ
Ю.А. Орлов

Кандидат технических наук,
заместитель директора по технике
ОАО «Томский электромеханический завод»
В. В. Големгрейн

© ГОУ ВПО НИ ТПУ, 2011
© Верхотуров А.И., 2011
© Обложка. Издательство Томского
политехнического университета, 2011

ВВЕДЕНИЕ

Пособие посвящено исследованиям преобразователей энергии: трансформаторов, асинхронных и синхронных электрических машин и машин постоянного тока. В процессе исследований формируются необходимые практические навыки, подтверждаются теоретические знания. Для квалифицированного выполнения работ и правильного оформления полученных результатов содержится раздел по технике безопасности выполнения лабораторных работ, по организационным вопросам. Основной материал пособия излагается в виде четырех разделов, имеющих названия, одноименные с исследуемыми преобразователями энергии.

Трансформаторы – статические электромагнитные устройства, имеющие две (или более) индуктивно связанные обмотки и предназначенные для преобразования посредством явления электромагнитной индукции одной (первичной) системы переменного тока в другую (вторичную) систему переменного тока.

Опыты холостого хода и короткого замыкания трансформатора позволяют получить значения параметров его электрической схемы замещения, чтобы расчетным путем, не расходуя энергоресурсов, получить эксплуатационные характеристики. К эксплуатационным характеристикам трансформатора относят зависимости коэффициента полезного действия, величины напряжения вторичной обмотки и его изменения от величины и характера нагрузки.

Не менее важными являются исследования трансформатора при несимметричной нагрузке, которая зависит от схем соединения первичной обмотки и конструкции магнитопровода. А также исследуются группы соединений трехфазных трансформаторов. При параллельной работе трансформаторов анализируется распределение нагрузки при допустимых отличиях коэффициентов трансформации и номинальных напряжений короткого замыкания.

Асинхронные машины – электромеханические преобразователи энергии переменного тока, работающие с частотой вращения, зависящей от нагрузки. Асинхронные машины используются главным образом в качестве двигателей.

Расчеты параметров схемы замещения, пусковых и рабочих характеристик асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором производятся на основании опытов холостого хода и короткого замыкания. Возникает необходимость работы трехфазного асинхронного двигателя от однофазной сети. Поэтому проводятся сравнительные исследования эксплуатационных характеристик в трехфазном, однофазном и конден-

саторном режиме. Испытание двухскоростного двигателя позволяет освоить один из способов регулирования частоты вращения и проанализировать изменения эксплуатационных характеристик.

Исследуя асинхронный двигатель с фазным ротором, приобретаются практические навыки выполнения реостатного пуска, получения рабочих характеристик методом непосредственной нагрузки.

Синхронные машины – электромеханические преобразователи энергии переменного тока, работающие с частотой вращения, не зависящей от нагрузки. Они применяются в качестве генераторов переменного тока промышленной и повышенной частоты, а в электроприводах в качестве двигателей.

При исследовании генератора получают комплекс характеристик, позволяющих оценить эксплуатационные свойства, осваиваются эксперименты для получения параметров явнополусной синхронной машины. Приобретаются практические навыки включения генератора на параллельную работу и изменения его активной нагрузки.

Исследуется синхронный реактивный двигатель, осваивая способ пуска и получая рабочие характеристики методом непосредственной нагрузки.

Машины постоянного тока – электромеханические устройства, преобразующие электрическую энергию в механическую и наоборот. Двигатели и генераторы различаются по способу возбуждения. В пособии исследуются машины с различными способами возбуждения и анализируются их эксплуатационные характеристики.

В каждом разделе пособия содержатся методические указания по проведению экспериментальных исследований и контрольные вопросы. Это актуально для организации самостоятельной работы и эффективного контроля учебного процесса.

Опыт показывает, что наиболее трудными для понимания и освоения являются электромагнитные физические явления и процессы, сопровождающие преобразование энергии. Поэтому настоящее учебное пособие предполагает предварительное изучение конструкций всех типов преобразователей, их принципов действия и протекающих в них физических процессов по учебной литературе, приведенной в прилагаемом списке.

Пособие предназначено для студентов, всех форм обучения, изучающих дисциплины «Электрические машины», «Электромеханика», «Силовые электромашинные преобразователи энергии», а также будет полезно и преподавателям.

Авторы будут благодарны всем, кто не сочтет за труд высказать замечания и предложения по улучшению пособия.

1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

1.1. ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Лаборатория оснащена лабораторными установками, предназначенными для выполнения работ студентами очного и заочного обучения по дисциплинам «Электрические машины», «Электромеханика» и «Силовые электромашинные преобразователи энергии». Лаборатория в отношении опасности поражения электрическим током относится к помещениям с повышенной опасностью.

В целях исключения несчастных случаев должны неукоснительно выполняться следующие правила [19]:

1.2.1. К работе на установках стендах допускаются студенты, прошедшие инструктаж по охране труда на рабочем месте, с соответствующим оформлением в журнал инструктажа по технике безопасности.

1.2.2. Все виды занятий в лаборатории проводятся под наблюдением преподавателя, имеющего группу допуска по электробезопасности не ниже третьей при работе в установках до 1000В.

1.2.3. Электропитание лабораторных установок осуществляется с пульта управления. Включение каждой установки осуществляется только преподавателем.

1.2.4. Изменение положения тумблеров, выключателей, регуляторов и переключателей, в том числе отключение и подачу напряжения на стенд, производить только в строгом соответствии с ходом работы, изложенным в учебном пособии.

1.2.5. Запрещается производить изменение в электрических схемах под напряжением. Сборка схем, их изменения и демонтаж производятся только при выключенном напряжении. Повторная подача напряжения производится только после проверки схемы преподавателем.

1.2.6. В лаборатории запрещается:

- шуметь;
- находиться в верхней одежде;
- класть верхнюю одежду на установки, столы, стулья;
- портить приборы и оборудование;
- принимать пищу;
- сорить;
- находиться в нетрезвом состоянии;
- пользоваться выключателями на пульте управления установками за исключением аварийных ситуаций;

- регулировать положение стрелок на измерительных приборах;
- самостоятельно устранять неисправности оборудования;
- приносить легковоспламеняющиеся жидкости и взрывоопасные вещества.

1.2.7. При возникновении аварийной ситуации в лаборатории необходимо отключить напряжение кнопкой «СТОП» на пульте управления и сообщить об этом преподавателю.

1.2. ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ В УЧЕБНОЙ ЛАБОРАТОРИИ

К работе в лаборатории допускаются студенты, ознакомившиеся с правилами организации и техники безопасности, усвоившие соответствующий раздел дисциплины и получившие допуск преподавателя.

При подготовке к лабораторной работе студент должен понять цель работы, изучить программу работы, подготовить таблицы для записи результатов исследований, ознакомиться с методическими указаниями по проведению работы и обработке результатов, ответить на вопросы при допуске к выполнению работы.

Каждая лабораторная работа выполняется бригадой, состоящей из 2 - 4 человек и рассчитана на два академических часа работы в лаборатории. Выполнение необходимых расчетов, построение и объяснение полученных зависимостей, оформление отчета выносятся на самостоятельную работу студента.

Допуск к выполнению лабораторной работы проводится перед ее началом в форме собеседования.

Студенты, не выполнившие этих требований и не прошедшие собеседования, к выполнению работы не допускаются.

Порядок выполнения лабораторных работ и отчетности определяются изложенным пособием. При выполнении работы студент должен строго соблюдать правила техники безопасности и бережно относиться к оборудованию.

Лабораторная работа считается полностью выполненной после проверки и утверждения преподавателем результатов исследований.

Студенты, не выполнившие лабораторную работу по уважительной причине, выполняют ее на согласованном с преподавателем дополнительном занятии. Студенты, нарушившие дисциплину, правила работы и техники безопасности удаляются из лаборатории. Если при нарушении настоящих правил нанесен ущерб оборудованию, виновные несут материальную ответственность.

После окончания лабораторных работ предусматривается их защита. По усмотрению преподавателя защита лабораторных работ проводится в устной или письменной форме. В помощь студентам пособие содержит контрольные вопросы, задаваемые преподавателем.

1.3. УКАЗАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе – учебная работа, содержащая результаты выполнения программы работы, проведения исследований, расчетов, графические построения и выводы. Отчет содержит систематизированные данные о выполненной студентом работе, описывающий процесс ее выполнения и полученные результаты в виде текста и необходимых иллюстраций.

Отчет по лабораторной работе выполняется каждым студентом. Лабораторная работа подлежит защите после принятия отчета преподавателем.

Отчет должен включать:

- титульный лист;
- цель работы;
- программу работы;
- электрические схемы исследований;
- результаты исследований
- примеры расчетов;
- зависимости и диаграммы;
- выводы.

Отчет выполняется на листах формата А4, приказом ректора разрешается оформлять с одной или двух сторон листов. Все листы должны быть скреплены и пронумерованы.

Цель работы дается в описании работы.

Программа работы записывается в проводимой последовательности, кратко, с указанием условий выполнения опытов.

Электрические схемы исследований выполняются в соответствии с СТО ТПУ 2.5.01- 2011 [16].

Результаты исследований заносятся в таблицы отчета в тех физических единицах, которые будут использоваться при построении зависимостей и диаграмм.

Примеры расчетов выполняются для одного опыта каждого из проведенных исследований. При оформлении расчетной части, сначала приводится формула, затем численные значения всех величин, входящих в формулу, и дается результат с обязательным указанием размерности.

Зависимости и диаграммы представляются прямо по тексту отчета. Перед построением зависимостей должна быть нанесена равномерная масштабная сетка со шкалами по осям координат, начиная с нуля. Наименование величин проставляется внутри осей координат, а их раз-

мерность и численные значения снаружи. Через точки, полученные экспериментально или расчетами, проводится плавная кривая, занимающая среднее положение и охватывающая наибольшее количество точек. В целях сопоставления и объяснения характера нескольких зависимостей допускается строить их в одних осях координат, при этом точки, относящиеся к разным зависимостям следует выделять разными цветами и значками.

Выводы по работе являются обязательными. Их содержание должно раскрывать природу исследуемых явлений, объяснять характер процессов и устанавливать взаимосвязь между параметрами и величинами.

2. ТРАНСФОРМАТОРЫ

2.1. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХОБМОТОЧНОГО ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ СИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКЕ

2.1.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить основные элементы конструкции, принцип действия трансформатора; провести опыты холостого хода и короткого замыкания; исследовать эксплуатационные характеристики.

2.1.2. ПРОГРАММА РАБОТЫ

2.1.2.1. Ознакомиться с лабораторной установкой.

2.1.2.2. Провести опыт холостого хода для:

- определения коэффициента трансформации;
- определения коэффициента мощности холостого хода;
- построения характеристик холостого хода и определения их номинальных значений;
- определения параметров схемы замещения при холостом ходе.

2.1.2.3. Провести опыт короткого замыкания для:

- определения коэффициента мощности короткого замыкания;
- построения характеристик короткого замыкания и определения их номинальных значений;
- определения параметров схемы замещения при коротком замыкании.

2.1.2.4. Рассчитать и построить эксплуатационные характеристики:

- коэффициент полезного действия (КПД) от величины нагрузки при активном и индуктивном ее характере;
- напряжение вторичной обмотки от величины коэффициента нагрузки при активном, активно-индуктивном, активно-емкостном характерах нагрузки.
- изменение вторичного напряжения обмотки от характера нагрузки при неизменной ее величине.

2.1.2.7. Сделать основные выводы по результатам исследований.

2.1.3. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Плавное регулирование величины напряжения, подаваемого на первичную обмотку трансформатора, осуществляется индукционным регулятором ИР.

Управление регулятором ИР осуществляется тумблером SA2 передней панели лабораторной установки. Этот тумблер имеет три положения: среднее (постоянное, фиксирующееся), верхнее и нижнее. При удержании тумблера SA2 в верхнем положении напряжение регулятора увеличивается, при удержании тумблера в нижнем положении напряжение регулятора уменьшается, при среднем положении тумблера величина напряжения фиксируется.

Плавно изменяющееся напряжение регулятора подается на первичную обмотку исследуемого трансформатора. Для этого необходимо предварительно собрать электрическую схему, соответствующую конкретному исследованию.

Проводимые исследования подразделяются на экспериментальные и аналитические.

Экспериментальные исследования проводятся в виде опытов холостого хода и короткого замыкания. По результатам этих опытов получают коэффициент трансформации, параметры схемы замещения, номинальные величины характеристик холостого хода и короткого замыкания.

Аналитические исследования позволяют оценить работу трансформатора при симметричной нагрузке. Для этого рассчитываются эксплуатационные характеристики, представляющие практический интерес, без непосредственного нагружения исследуемого трансформатора.

Проведение опытов холостого хода и короткого замыкания требует разных диапазонов регулирования напряжения, подаваемого на первичную обмотку исследуемого трансформатора. При опыте холостого хода плавно регулируемое напряжение подается непосредственно, напрямую, от регулятора ИР. При опыте короткого замыкания плавно регулируемое напряжение подается с регулятора ИР через понижающий трансформатор.

Переключатель SA1 на передней панели лабораторной установки с двумя фиксируемыми положениями «ХХ» и «КЗ» позволяет обеспечивать нужный диапазон регулирования напряжения.

Такие измерительные приборы, как ваттметр и амперметр, имеют двойные шкалы, что дает возможность использовать их без замены в опытах холостого хода и короткого замыкания.

2.1.4. ОПЫТ ХОЛОСТОГО ХОДА

Режим холостого хода трансформатора – работа его при номинальном напряжении U_{1H} номинальной частоты на первичной обмотке и отсутствии тока во вторичной обмотке. Опыт холостого хода проводится

при изменении напряжения на первичной обмотке трансформатора в диапазоне $(0,3 \div 1,2) U_{1H}$. Электрическая схема опыта холостого хода изображена на рис. 2.1.1.

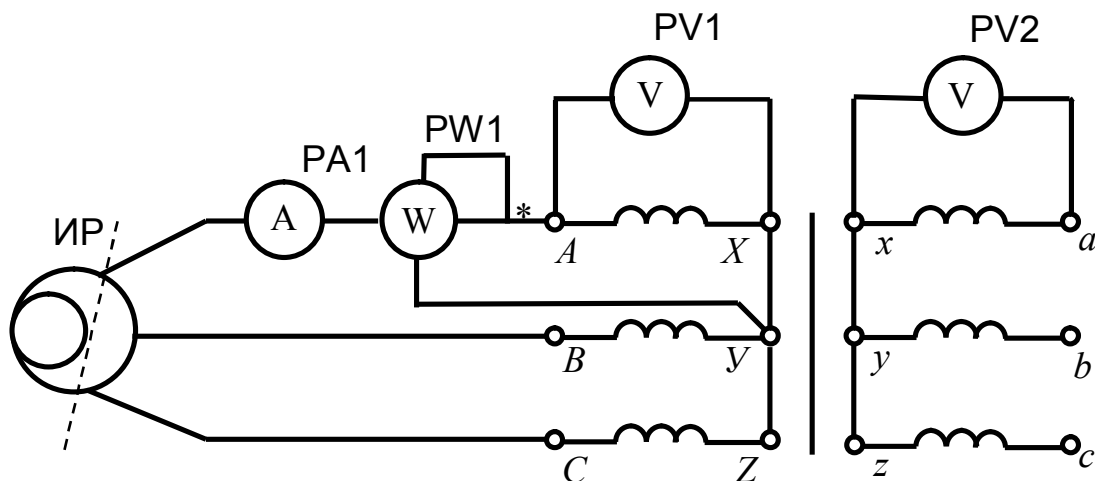


Рис. 2.1.1. Электрическая схема опыта холостого хода

Используется минимальное количество измерительных приборов, фиксирующих ток, напряжение, ЭДС и активную мощность одной из фаз, указанной преподавателем. Результаты измерений и расчетов представляются в виде табл. 2.1.1, где P_0 - утроенные показания ваттметра.

Таблица 2.1.1

Результаты опыта холостого хода

№ опыта	Измерения				Расчеты		
	U_1 В	U_{20} В	I_0 А	$P_{0\Phi}$ Вт	P_0 Вт	$\cos \varphi_0$ -	$k =$; $I_{0H} =$, А; $i_{0H} =$, %; $P_{0H} =$ Вт; $\cos \varphi_{0H} =$.
1 ÷ 5							

При проведении опыта холостого хода устанавливаются не менее пяти по возможности равномерно распределенных значений напряжения U_1 в указанном выше диапазоне.

2.1.4.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРАНСФОРМАЦИИ

Коэффициент трансформации представляет отношение фазной ЭДС обмотки высшего напряжения к фазной ЭДС обмотки низшего напряжения независимо от того какая из обмоток является первичной.

С достаточной точностью коэффициент трансформации можно определить учитывая, что $E_1 \approx U_1$, а $E_2 = U_{20}$. Коэффициент трансформации рассчитывается при $U_1 = U_{1H}$ и для исследуемого понижающего трансформатора равен

$$k \approx U_1 / U_{20}. \quad (2.1.1)$$

2.1.4.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

Коэффициент мощности холостого хода определяется по формуле

$$\cos \varphi_0 = P_{0\phi} / U_1 \cdot I_0, \quad (2.1.2)$$

где $P_{0\phi}$ - активная мощность фазы, потребляемая при холостом ходе, Вт;

U_1, I_0 - фазные значения напряжения и тока первичной обмотки, соответственно В, А.

2.1.4.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОМИНАЛЬНЫХ ВЕЛИЧИН ХАРАКТЕРИСТИК ХОЛОСТОГО ХОДА

Номинальные значения тока холостого хода I_{0H} , мощности P_{0H} , коэффициента мощности $\cos \varphi_{0H}$ определяются для $U_1 = U_{1H}$, используя построенные в одних осях координат характеристики холостого хода: $I_0 = f(U_1)$, $P_0 = f(U_1)$, $\cos \varphi_0 = f(U_1)$.

Значение номинального тока холостого хода в процентах i_{0H} рассчитывается относительно номинального тока первичной обмотки

$$i_{0H} = I_{0H} \cdot 100 / I_{1H}, \%. \quad (2.1.3)$$

2.1.4.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ПРИ ХОЛОСТОМ ХОДЕ

Параметры схемы замещения можно определить по результатам опытов холостого хода и короткого замыкания. В расчетах используются номинальные значения характеристик холостого хода и короткого замыкания.

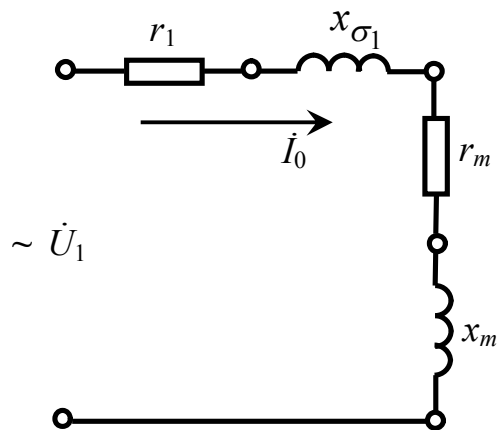


Рис. 2.1.2. Схема замещения трансформатора при холостом ходе

Схема замещения при холостом ходе содержит следующие параметры:

r_1 - активное сопротивление фазы первичной обмотки;

$x_{\sigma 1}$ - индуктивное сопротивление рассеяния фазы первичной обмотки;

r_m, x_m - активное и индуктивное сопротивления ветви намагничивания.

По результатам опыта холостого хода для $U_1 = U_{1H}$ можно найти

$$Z_1 + Z_m = U_1 / I_{0H}; \quad r_1 + r_m = P_{0H} / (3 \cdot I_{0H}^2) . \quad (2.1.4)$$

Так как обычно $Z_m \gg Z_1$ и $r_m \gg r_1$, то можно считать

$$Z_m \approx U_1 / I_{0H}; \quad r_m \approx P_{0H} / (3 I_{0H}^2); \quad x_m = \sqrt{Z_m^2 - r_m^2} . \quad (2.1.5)$$

Остальные параметры схемы замещения трансформатора при холостом ходе ($r_1, x_{\sigma 1}$) определяются по результатам опыта короткого замыкания.

2.1.5. ОПЫТ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Короткое замыкание – аварийное состояние трансформатора, т.к. при замкнутой накоротко вторичной обмотке номинальное напряжение первичной обмотки вызывает протекание в обеих обмотках токов в десятки раз превышающих номинальные. При проведении опыта короткого замыкания – работа трансформатора при замкнутой накоротко вторичной обмотке, когда к первичной обмотке подведено такое пониженное напряжение номинальной частоты, что токи в обмотках допускаются не более 1,1÷1,2 номинальных значений. Электрическая схема опыта короткого замыкания изображена на рис. 2.1.3.

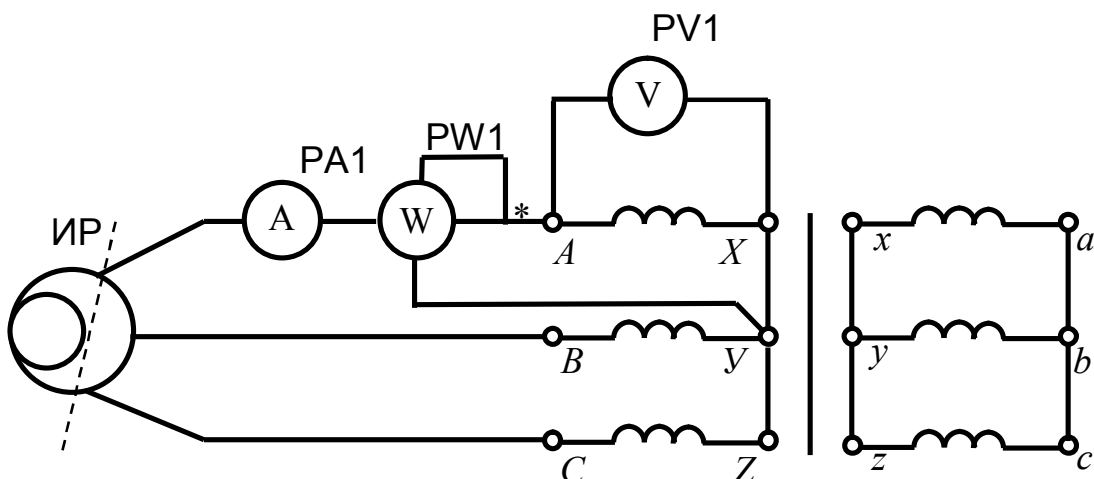


Рис. 2.1.3. Электрическая схема опыта короткого замыкания

Указанное предельное значение тока является исходным при проведении опыта, затем напряжение уменьшается для получения не менее пяти значений по каждому измеряемому параметру. Результаты измерений и расчетов представляются в виде табл. 2.1.2, где P_K - утроенные показания ваттметра.

Таблица 2.1.2

Результаты опыта короткого замыкания

№ опыта	Измерения			Расчеты		
	U_{1K} В	I_{1K} А	$P_{K\Phi}$ Вт	P_K Вт	$\cos \varphi_K$ -	$U_{K\%} =$ %; $P_{KH} =$ Вт; $\cos \varphi_K =$.
1 ÷ 5						

2.1.5.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

Коэффициент мощности короткого замыкания определяется по формуле

$$\cos \varphi_K = P_{K\Phi} / U_{1K} \cdot I_{1K}, \quad (2.1.6)$$

где $P_{K\Phi}$ - активная фазная мощность, потребляемая при коротком замыкании, Вт;

U_{1K} , I_{1K} - фазные значения напряжения и тока первичной обмотки при коротком замыкании, соответственно В, А.

2.1.5.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОМИНАЛЬНЫХ ВЕЛИЧИН ХАРАКТЕРИСТИК КОРотКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Номинальные значения мощности P_{KH} , коэффициента мощности $\cos \varphi_K$, напряжения U_{1KH} определяют для $I_{1K} = I_{1H}$, используя построенные в одних осях координат характеристики короткого замыкания: $I_{1K} = f(U_{1K})$, $P_K = f(U_{1K})$, $\cos \varphi_K = f(U_{1K})$.

Значение номинального напряжения короткого замыкания в процентах рассчитывается относительно номинального напряжения фазы первичной обмотки

$$U_{K\%} = U_{1KH} \cdot 100 / U_{1H}. \quad (2.1.7)$$

2.1.5.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

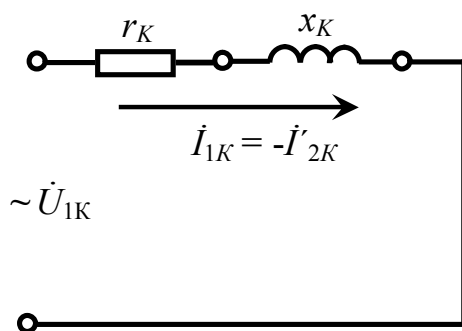


Рис. 2.1.4. Схема замещения трансформатора при опыте короткого замыкания

$$Z_K = U_{1KH} / I_{1H}; \quad r_K = P_{KH} / (3 \cdot I_{1H}^2); \quad X_K = \sqrt{Z_K^2 - r_K^2}. \quad (2.1.8)$$

Приближенно можно принять, используя результаты опыта короткого замыкания,

$$Z_1 \approx Z_2' \approx Z_K / 2; \quad r_1 \approx r_2' \approx r_K / 2; \quad x_{\sigma 1} \approx x_{\sigma 2}' \approx x_K / 2, \quad (2.1.9)$$

где Z_1 - полное сопротивление фазы первичной обмотки;

Z_2' - приведенное полное сопротивление фазы вторичной обмотки;

Z_K - полное сопротивление фазы схемы замещения при опыте короткого замыкания;

r_2' - приведенное активное сопротивление фазы вторичной обмотки;

$x_{\sigma 2}'$ - приведенное индуктивное сопротивление рассеяния фазы вторичной обмотки;

r_K - активное сопротивление фазы схемы замещения при опыте короткого замыкания;

x_K - индуктивное сопротивление фазы схемы замещения при опыте короткого замыкания.

2.1.6. РАСЧЕТ ЗАВИСИМОСТЕЙ КПД ОТ ВЕЛИЧИНЫ И ХАРАКТЕРА НАГРУЗКИ

Для проведения расчетов используется упрощенная схема замещения трансформатора, результаты опытов холостого хода и короткого замыкания. Это позволяет полагать, что $\cos \varphi_1 \approx \cos \varphi_2$, а коэффициент нагрузки

$$K_{НГ} = I_2 / I_{2H} = I'_2 / I'_{2H} \approx I_1 / I_{1H}. \quad (2.1.10)$$

КПД трансформатора при $U_1 = U_{1H}$, $f = const$ и заданном характере нагрузки ($\cos \varphi_2 = const$) определяется следующим образом

$$\eta = P_2 \cdot 100 / P_1 = (P_1 - \Sigma P) \cdot 100 / P_1, \% \quad (2.1.11)$$

$$\text{где } P_1 = 3I_1 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_1 \approx 3 \cdot K_{НГ} \cdot I_{1H} \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_2; \quad (2.1.12)$$

$$\Sigma P = P_{0H} + P_K = P_{0H} + K_{НГ}^2 \cdot P_{KH}. \quad (2.1.13)$$

Изменение коэффициента нагрузки принять в пределах $0 \div 1,2$ для не менее пяти по возможности равномерно распределенных значений. Результаты расчетов для двух значений $\cos \varphi_2 = const$ представляют в виде табл. 2.1.3 и строят в одних осях координат две зависимости $\eta = f(K_{НГ})$.

Таблица 2.1.3

Результаты расчетов коэффициента полезного действия

№ опыта	$K_{НГ}$	ΣP	$\cos \varphi_2 = 1$			$\cos \varphi_2 = 0,8$			Примечание
			P_1	P_2	η	P_1	P_2	η	
			Вт	Вт	%	Вт	Вт	%	
1÷5								$\cos \varphi_2 = 1: \eta_{\max} = \%$; $\cos \varphi_2 = 0,8: \eta_{\max} = \%$.	

При $K_{НГ} = 0$, $\Sigma P = P_{0H}$, $P_1 = P_{0H}$, т.е. $\eta = 0$.

КПД достигает максимального значения при такой нагрузке, когда суммарные потери в обмотках становятся равными потерям в магнитной системе:

$$K_{НГ}^2 \cdot P_{KH} = P_{0H}, \quad (2.1.14)$$

что соответствует

$$K_{НГ} = \sqrt{P_{0H} / P_{KH}} . \quad (2.1.15)$$

Значения η_{\max} для двух значений $\cos \varphi_2$ рассчитываются по выше приведенным формулам.

2.1.7. РАСЧЕТ ВНЕШНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Внешняя характеристика – зависимость $U_2 = f(K_{НГ})$ при $U_1 = U_{1H}$, $f = const$, $\cos \varphi_2 \approx \cos \varphi_1 = const$.

При проведении расчетов используются упрощенная схема замещения трансформатора и результаты опыта короткого замыкания. Коэффициент нагрузки изменяют в пределах $0 \div 1,2$ для не менее пяти по возможности равномерно распределенных значений. Характер нагрузки задается тремя значениями $\cos \varphi_2$.

Внешняя характеристика трансформатора определяются арифметической разностью между фазным вторичным напряжением при холостом ходе (100%) и падением напряжения в фазе при нагрузке

$$U_{2\%} = 100 - \Delta U , \quad (2.1.16)$$

$$\text{где } \Delta U = K_{НГ} (U_{Ka\%} \cdot \cos \varphi_2 + U_{Kp\%} \cdot \sin \varphi_2) , \% ; \quad (2.1.17)$$

$$U_{Ka\%} = I_{1H} \cdot r_K \cdot 100 / U_{1H} ; \quad U_{Kp\%} = \sqrt{U_{K\%}^2 - U_{Ka\%}^2} ; \quad (2.1.18)$$

$U_{Ka\%}, U_{Kp\%}$ - активная и реактивная составляющие номинального напряжения короткого замыкания.

Результаты расчетов представляют в виде табл. 2.1.4. и строят в одних осях координат три внешних характеристики $U_{2\%} = f(K_{НГ})$.

Таблица 2.1.4

Результаты расчетов внешних характеристик

№ опыта	$K_{НГ}$	$\cos \varphi_2 = 1$		$\cos \varphi_2 = 0,8$		$\cos(-\varphi_2) = 0,8$		Примечание
		$\Delta U, \%$	$U_{2\%}$	$\Delta U, \%$	$U_{2\%}$	$\Delta U, \%$	$U_{2\%}$	
1÷5								$U_{K\%} =$; $U_{Ka\%} =$; $U_{Kp\%} =$.

2.1.8. РАСЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ВТОРИЧНОЙ ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРА ОТ ХАРАКТЕРА НАГРУЗКИ ПРИ НОМИНАЛЬНОЙ ЕЕ ВЕЛИЧИНЕ

Изменение напряжения вторичной обмотки ΔU рассчитывают по выше приведенной формуле при $U_1 = U_{1H}$, $f = const$, $K_{НГ} = 1$. Представляют в виде табл. 2.1.5 и строят зависимость $\Delta U = f(\varphi_2)$.

Таблица 2.1.5

Результаты расчетов изменения напряжения вторичной обмотки от φ_2

φ_2	град	-90	-75	-60	-45	-30	-15	0
ΔU	%							

Окончание табл. 2.1.5

φ_2	град	15	30	45	60	75	90
ΔU	%						

2.1.9. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

При анализе полученных результатов исследований необходимо дать в отчете следующие пояснения.

Характеристики холостого хода трансформатора:

- для чего проводится опыт холостого хода;
- что такое номинальные величины характеристик холостого хода;
- причины поведения каждой из характеристик;
- указать, что принято считать потерями холостого хода трансформатора;
- привести обоснование сделанных пояснений.

Характеристики короткого замыкания:

- для чего проводится опыт короткого замыкания;
- что такое номинальные величины характеристик короткого замыкания;
- причины поведения каждой из характеристик;
- указать, что принято считать потерями короткого замыкания;
- привести обоснование сделанных пояснений.

Зависимости коэффициента полезного действия трансформатора от величины и характера нагрузки:

- какой вид имеет зависимость $\eta = f(K_{НГ})$ и как изменяется соотношение между потерями в магнитной системе и в обмотках,
- как влияет характер нагрузки на КПД и чем это объясняется.

Внешние характеристики трансформатора:

- какой вид имеют характеристики и чем это объясняется.
Изменение напряжения вторичной обмотки от характера нагрузки при неизменной ее величине:
- какой вид имеет зависимость $\Delta U = f(\varphi_2)$;
- при каком значении угла φ_2 отсутствует падение напряжения в фазе, и какой при этом характер нагрузки;
- при каком значении угла φ_2 имеет максимальное значение падения напряжения в фазе, и какой при этом характер нагрузки.

2.1.10. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПРИ ДОПУСКЕ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

2.1.10.1. Перечислите основные элементы конструкции трансформатора и поясните их назначение.

2.1.10.2. Поясните принцип действия и назначение трансформатора.

2.1.10.3. Какой тип магнитной системы у исследуемого трансформатора?

2.1.10.4. Какие типы магнитных систем используются у трехфазных трансформаторов?

2.1.10.5. Чем отличаются понижающий и повышающий трансформаторы?

2.1.10.6. Поясните холостой ход, как режим работы трансформатора.

2.1.10.7. Для чего проводится опыт холостого хода?

2.1.10.8. Какие оборудование и приборы необходимы для проведения опытов холостого хода и короткого замыкания?

2.1.10.9. В какой последовательности проводится опыт холостого хода?

2.1.10.10. Как может быть определен коэффициент трансформации?

2.1.10.11. Когда короткое замыкание является аварийным?

2.1.10.12. Чем отличается опыт короткого замыкания от аварийного?

2.1.10.13. Для чего проводится опыт короткого замыкания?

2.1.10.14. В какой последовательности проводится опыт короткого замыкания?

2.1.10.15. Что такое номинальное напряжение короткого замыкания?

2.1.11. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПРИ ЗАЩИТЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

2.1.11.1. Изобразите электрическую схему опыта холостого хода трехфазного трансформатора и дайте необходимые пояснения.

2.1.11.2. Перечислите условия, при соблюдении которых проводится опыт холостого хода.

2.1.11.3. Какие зависимости называют характеристиками холостого хода трансформатора, при соблюдении каких условий их получают?

2.1.11.4. Изобразите и объясните зависимость тока холостого хода трансформатора от величины подводимого напряжения.

2.1.11.5. Изобразите и объясните зависимость потерь холостого хода трансформатора от величины подводимого напряжения.

2.1.11.6. Изобразите и объясните зависимость коэффициента мощности холостого хода трансформатора от величины подводимого напряжения.

2.1.11.7. Какие величины характеристик холостого хода называют номинальными?

2.1.11.8. Какие параметры схемы замещения трансформатора определяются по результатам опыта холостого хода?

2.1.11.9. Поясните, как определяются параметры схемы замещения трансформатора по результатам опыта холостого хода?

2.1.11.10. Как определить коэффициент трансформации по результатам опыта холостого хода?

2.1.11.11. Как получить по результатам опыта холостого хода трехфазного трансформатора значение коэффициента мощности?

2.1.11.12. Изобразите электрическую схему опыта короткого замыкания трехфазного трансформатора и дайте необходимые пояснения.

2.1.11.13. Перечислите условия, при соблюдении которых проводится опыт короткого замыкания.

2.1.11.14. Какие зависимости называют характеристиками короткого замыкания трансформатора, при соблюдении каких условий они получаются?

2.1.11.15. Изобразите и объясните зависимость коэффициента мощности короткого замыкания трансформатора от величины подводимого напряжения.

2.1.11.16. Изобразите и объясните зависимость потерь короткого замыкания трансформатора от величины подводимого напряжения.

2.1.11.17. Изобразите и объясните зависимость тока короткого замыкания трансформатора от величины подводимого напряжения.

2.1.11.18. Как получить по результатам опыта короткого замыкания трехфазного трансформатора значение коэффициента мощности?

2.1.11.19. Какие параметры схемы замещения трансформатора определяются по результатам опыта короткого замыкания?

2.1.11.20. Поясните, как определяются параметры схемы замещения трансформатора по результатам опыта короткого замыкания?

2.1.11.21. Как определяется номинальное напряжение короткого замыкания трансформатора?

2.1.11.22. Изобразите зависимость КПД трансформатора от коэффициента нагрузки и дайте необходимые пояснения.

2.1.11.23. Изобразите в одних осях координат зависимость КПД трансформатора от коэффициента нагрузки при двух разных значениях коэффициента мощности и дайте необходимые пояснения.

2.1.11.24. Когда трансформатор работает с максимальным КПД и как определить коэффициент нагрузки для этого состояния?

2.1.11.25. Изобразите в одних осях координат внешние характеристики трансформатора при активной, активно–индуктивной нагрузках и дайте необходимые пояснения.

2.1.11.26. Изобразите в одних осях координат внешние характеристики трансформатора при активной, активно–емкостной нагрузках и дайте необходимые пояснения.

2.1.11.27. Изобразите в одних осях координат внешние характеристики трансформатора при активно–индуктивной, активно– емкостной нагрузках и дайте необходимые пояснения.

2.1.11.28. Изобразите схему замещения трансформатора для холостого хода и дайте необходимые пояснения.

2.1.11.29. Изобразите схему замещения трансформатора для короткого замыкания и дайте необходимые пояснения.

2.1.11.30. Каким образом и почему изменяются параметры схемы замещения трансформатора с увеличением напряжения при проведении опыта холостого хода?

2.1.11.31. Изобразите T–образную схему замещения трансформатора, работающего при нагрузке, и дайте необходимые пояснения.

2.1.11.32. Изобразите упрощенную схему замещения трансформатора, работающего при нагрузке, и дайте необходимые пояснения.

2.1.11.33. Изобразите в одних осях координат зависимости КПД трансформатора от коэффициента нагрузки при двух разных значениях коэффициента мощности и дайте необходимые пояснения.

2.1.11.34. Изобразите и поясните изменение напряжения вторичной обмотки от характера нагрузки, запишите условия, при которых она получена.

2.2. ГРУППЫ СОЕДИНЕНИЙ ОБМОТОК ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

2.2.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить группы соединений обмоток, методы их определения; исследовать влияние схем соединений и маркировки клемм обмоток на группу соединений обмоток.

2.2.2. ПРОГРАММА РАБОТЫ

2.2.2.1. Ознакомиться с лабораторной установкой.

2.2.2.2. При неизменной схеме и маркировке первичной обмотки, изменяя маркировку и схему соединения вторичной обмотки, провести 12 опытов по получению данных для построения векторных диаграмм напряжений.

2.2.2.3. Определить по векторным диаграммам напряжений группы соединений обмоток.

2.2.2.4. Сделать основные выводы по результатам исследований.

2.2.3. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

У трехфазных обмоток трансформаторов две наиболее распространенные схемы соединения: звезда (Y), треугольник (Δ). Клеммы начала фаз обмоток высшего напряжения (ВН) принято обозначать прописными латинскими буквами A , B , C , а клеммы концы фаз – X , Y , Z . Клеммы начала и концы фаз обмоток низшего напряжения (НН) обозначаются строчными латинскими буквами: соответственно a , b , c и x , y , z . Клемма нулевой точки при соединении трехфазной обмотки в звезду с выведенной нейтралью обозначается в обмотке ВН прописной латинской буквой O , в обмотке НН строчной буквой o , а схема соединения обмотки обозначается Y_0 .

При включении на параллельную работу трансформаторов очень важное значение имеет взаимное расположение одноименных линейных векторов вторичных напряжений на нагрузке. Это обеспечивается соблюдением требования одинаковости групп соединений обмоток трансформаторов, включаемых на параллельную работу.

Группа соединений обмоток трансформатора определяется углом сдвига между одноименными первичными и вторичными линейными напряжениями, измеренным от вектора высокого напряжения по направлению часовой стрелки. За единицу группы принимается угол в 30° , на который делят выше названный угол сдвига.

Группа соединений обмоток трансформатора зависит от направления намотки, от маркировки клемм, от схемы соединения фаз обмоток.

При смене маркировки клемм трехфазной обмотки следует помнить, что меняется маркировка клемм всех трех фаз, сохраняя одинаковым чередование фаз первичной и вторичной обмоток.

Государственным стандартом рекомендуются следующие методы определения группы соединения обмоток трехфазных трансформаторов: метод фазометра (прямой метод), метод вольтметра.

Лабораторная установка предусматривает использование для определения групп соединений обмоток метода вольтметра. Для обеспечения достаточной точности измерений напряжений разных величин имеются два вольтметра. Для определения по результатам опытов групп соединений обмоток трансформатора понадобятся циркуль, линейка, транспортир.

2.2.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРУПП СОЕДИНЕНИЙ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА

Метод вольтметра может быть успешно реализован только в случае симметрии подводимого напряжения, поэтому необходимо обязательно контролировать выполнение этого условия при проведении всех опытов.

Для определения групп соединений обмоток поочередно собирают электрические схемы опытов, представленные в табл. 2.2.1, изменяя маркировку и схему соединения вторичной обмотки понижающего трансформатора. При этом электрически соединяют две одноименные клеммы A и a . На первичную обмотку подают номинальное переменное напряжение и измеряют линейные напряжения первичной и вторичной обмоток, а также напряжения между клеммами B и b , B и c , C и b , C и c .

Группа соединения обмоток определяется графически (рис. 2.2.1). Для этого в соответствии с разумно выбранным масштабом строят ΔABC линейных напряжений обмотки ВН, соблюдая чередование фаз по часовой стрелке. Построение Δabc линейных напряжений обмотки НН делают следующим образом. Местонахождение точки a совпадает с точкой A , так как клеммы A и a электрически соединены. Точку b находят на пересечении дуг окружностей, проведенных из точек B и C , как из центров, радиусами, равными соответственно U_{Bb} и U_{Cb} . Точку c находят на пересечении дуг окружностей, проведенных также из точек B и C , но радиусами, равными соответственно U_{Bc} и U_{Cc} . Группа соединений обмоток определяется углом, измеренным по часовой стрелке между одноименными линейными напряжениями U_{AB} , U_{ab} и поделенным на

30°. На рис. 2.2.1 векторная диаграмма напряжений соответствует третьей группе соединения обмоток, что оформляется записью $Y/\Delta-3$.

Все пары названных дуг окружностей имеют по две точки пересечения, поэтому для недопущения ошибок при определении местонахождения точек b и c нужно помнить, что эти точки располагаются во всех диаграммах на окружности радиусом линейного напряжения обмотки НН, проведенной из точки A , как из центра.

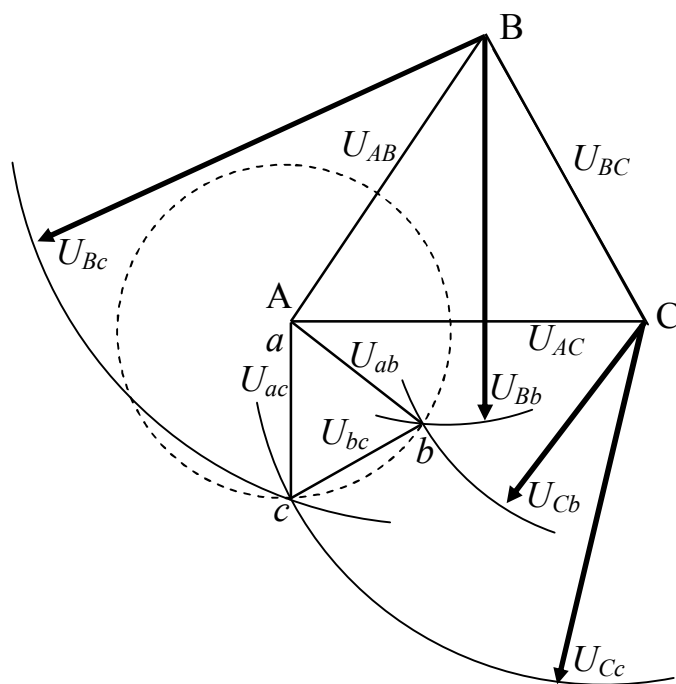


Рис. 2.2.1. Определение группы соединения обмоток

2.2.5. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

При анализе полученных результатов исследований необходимо дать в отчете следующие пояснения:

- сколько групп соединений обмоток можно получить у трехфазного трансформатора;
- от чего зависит группа соединения обмоток;
- когда можно получить только четные (нечетные) группы соединений обмоток;
- какие группы соединений обмоток имеют практическое применение и почему.

Таблица 2.2.1

Результаты исследований

№ опыта	Схема соединения	U_{AB}	U_{ab}	U_{Bb}	U_{Bc}	U_{Cb}	U_{Cc}	Гр. соединения
		U_{BC}	U_{bc}					
		U_{CA}	U_{ca}	В	В	В	В	
1								
2								
3								
4								
5								
6								

Окончание табл. 2.2.1

№ опыт	Схема соединения	U_{AB}	U_{ab}	U_{Bb}	U_{Bc}	U_{Cb}	U_{Cc}	Гр. соединения
		$=$ U_{BC} $=$ U_{CA}	$=$ U_{bc} $=$ U_{ca}					
		В	В	В	В	В	В	
7								
8								
9								
10								
11								
12								

2.2.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПРИ ДОПУСКЕ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

2.2.6.1. Что понимают под группой соединения обмоток трехфазного трансформатора?

2.2.6.2. Какие методы определения групп соединений обмоток трехфазных трансформаторов рекомендует государственный стандарт?

2.2.6.3. Какой метод определения групп соединений обмоток используется при выполнении лабораторной работы? Поясните, как им пользоваться.

2.2.6.4. От чего зависит группа соединения обмоток трехфазного трансформатора?

2.2.6.5. Назовите схемы соединений обмоток трехфазных трансформаторов и поясните, что нужно сделать для получения каждой из них.

2.2.6.6. Как принято обозначать клеммы обмоток ВН и НН?

2.2.6.7. Поясните назначения всех измерений, проводимых в любом из 12 опытов.

2.2.6.8. Поясните, как выполняется построение векторной диаграммы при определении группы соединения обмоток.

2.2.6.9. Поясните, как по векторной диаграмме определяется группа соединения обмоток.

2.2.7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПРИ ЗАЩИТЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

2.2.7.1. Сколько и какие группы соединений обмоток можно получить у трехфазного трансформатора?

2.2.7.2. Когда можно получить только четные (нечетные) группы соединений обмоток у трехфазного трансформатора?

2.2.7.3. Как определяется группа соединения обмоток однофазного трансформатора?

2.2.7.4. Изобразите электрическую схему и векторные диаграммы напряжений первичной и вторичной обмоток трехфазного трансформатора для указанной преподавателем группы соединения.

2.2.7.5. Изобразить электрическую схему трехфазной обмотки ВН (НН), соединенной по схеме треугольник.

2.2.7.6. Изобразить электрическую схему трехфазной обмотки ВН (НН), соединенной по схеме звезда.

2.3. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХОБМОТОЧНЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКЕ

2.3.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить типы магнитных систем, схемы соединения обмоток и исследовать их влияние на искажение вторичных фазных напряжений при несимметричной нагрузке, получив экспериментальное подтверждение теоретических знаний.

2.3.2. ПРОГРАММА РАБОТЫ

2.3.2.1. Ознакомиться с лабораторной установкой.

2.3.2.2. Испытать двухобмоточный трехфазный трансформатор со стержневой магнитной системой при несимметричной нагрузке:

- при соединении обмоток Y/Y_0 ;
- при соединении обмоток Δ/Y_0 .

2.3.2.3. Испытать двухобмоточный трехфазный трансформатор с групповой магнитной системой при несимметричной нагрузке:

- при соединении обмоток Y/Y_0 ;
- при соединении обмоток Δ/Y_0 .

2.3.2.4. Сделать основные выводы по результатам исследований.

2.3.3. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Трехфазные трансформаторы имеют стержневые, броневые, броне-стержневые типы магнитных систем, а также групповые. Обмотки трехфазных трансформаторов наиболее часто соединяются по схемам: звезда (Y), звезда с выведенной нейтралью (Y_0), треугольник (Δ).

Несимметричная нагрузка фаз трансформатора возможна в следующих случаях:

- при неравномерном распределении однофазных приемников нагрузки,
- при аварийных режимах, возникающих при 1-фазных и 2-фазных коротких замыканиях,
- при обрыве одной из фаз линии электропередачи.

Если возникает ощутимая несимметрия вторичных напряжений трансформатора, то это неблагоприятно отражается как на потребителях, так и на самом трансформаторе. Например, у ламп накаливания при пониженном напряжении существенно уменьшается сила света, а при повышенном напряжении резко уменьшается срок службы. У транс-

форматора при несимметричной нагрузке происходит перегрузка отдельных его фаз, чрезмерные повышения фазных напряжений и насыщения магнитной системы.

Перед проведением исследований обязательно проверяйте симметрию трехфазного напряжения, подаваемого на первичную обмотку трансформатора.

Кнопкой «Трехфазный режим» (SA2) подключается двухобмоточный трехфазный трансформатор со стержневой магнитной системой. Кнопкой «Однофазный режим» (SA1) подключаются три двухобмоточных однофазных трансформатора, образующих двухобмоточный трехфазный трансформатор с групповой магнитной системой. Регулируемое активное сопротивление R1 используется для нагружения одной из трех фаз.

Измерительные приборы лабораторной установки имеют переключатель, позволяющий использовать каждый из них вместо двух одностипных для контроля соизмеримых величин.

Переменное напряжение от источника питания подается на первичную обмотку трехфазного трансформатора только после включения кнопки «Трехфазный режим» или «Однофазный режим».

2.3.4. НЕСИММЕТРИЧНАЯ НАГРУЗКА ТРАНСФОРМАТОРА СО СТЕРЖНЕВОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ ПРИ РАЗНЫХ СХЕМАХ СОЕДИНЕНИЙ ПЕРВИЧНОЙ ОБМОТКИ

Сначала проводят испытания трансформатора при схемах соединения обмоток Y/Y_0 , рис. 2.3.1. У трансформатора, работающего на холостом ходу при номинальном напряжении первичной обмотки, измеряют линейные и фазные напряжения на клеммах вторичной обмотки. Затем у трансформатора при несимметричной нагрузке (нагружена только одна из фаз, фаза C) измеряют линейные и фазные напряжения этой же обмотки. Нагрузка фазы должна быть создана по возможности близкой к номинальной, но не более $1,2 I_{2H}$, чтобы получить наиболее ощутимые последствия несимметричной нагрузки. Результаты этих и всех последующих испытаний представляются в виде табл. 2.3.1.

Несимметричная нагрузка трансформатора при схемах соединения обмоток Y/Y_0 примечательна тем, что ток нулевой последовательности имеется только во вторичной обмотке. Магнитодвижущая сила этого тока не уравновешивается первичной обмоткой и является чисто намагничивающей. Она создает магнитный поток нулевой последовательности фаз, замыкающийся по стержню магнитной системы и затем, минуя ярма, по пути потока рассеяния.

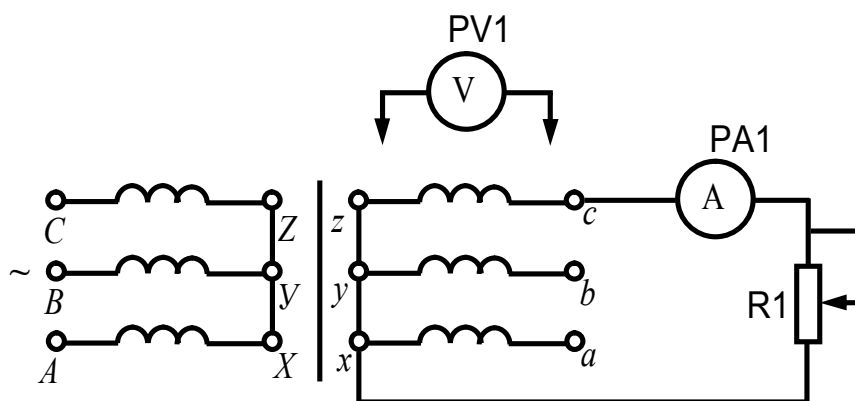


Рис. 2.3.1. Электрическая схема исследований при соединении обмоток Y/Y_0

Затем повторяют два предыдущих опыта при схемах соединения обмоток Δ/Y_0 , рис. 2.3.2. В этом случае при несимметричной нагрузке ток нулевой последовательности вторичной обмотки будет трансформироваться в первичную, представляющую для фазных токов нулевой последовательности замкнутый контур.

Таблица 2.3.1

Результаты исследований при несимметричной нагрузке

№ опыта	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}	U_a	U_b	U_c	Магнитная система	Соединение обмоток	Примечание
	В	В	В	В	В	В			
1							стержневая	Y/Y_0	$I_{C2} = 0$
2									$I_{C2} = A$
3								Δ/Y_0	$I_{C2} = 0$
4									$I_{C2} = A$
5							групповая	Y/Y_0	$I_{C2} = 0$
6									$I_{C2} = A$
7								Δ/Y_0	$I_{C2} = 0$
8									$I_{C2} = A$

2.3.5. НЕСИММЕТРИЧНАЯ НАГРУЗКА ТРАНСФОРМАТОРА С ГРУППОВОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ ПРИ РАЗНЫХ СХЕМАХ СОЕДИНЕНИЙ ПЕРВИЧНОЙ ОБМОТКИ

Испытания трансформатора с групповой магнитной системой подобны испытаниям трансформатора со стержневой магнитной системой. При их проведении можно зафиксировать влияние на искажение вторичных фазных напряжений того, что магнитная система немагнитносвязанная, как в стержневом, а является обособленной по фазам. Магнитодвижущая сила тока нулевой последовательности фаз вторичной обмотки не уравновешивается первичной обмоткой и является чисто намагничивающей. Она создает магнитный поток нулевой последовательности фаз, замыкающийся по пути основного магнитного потока, по магнитной системе.

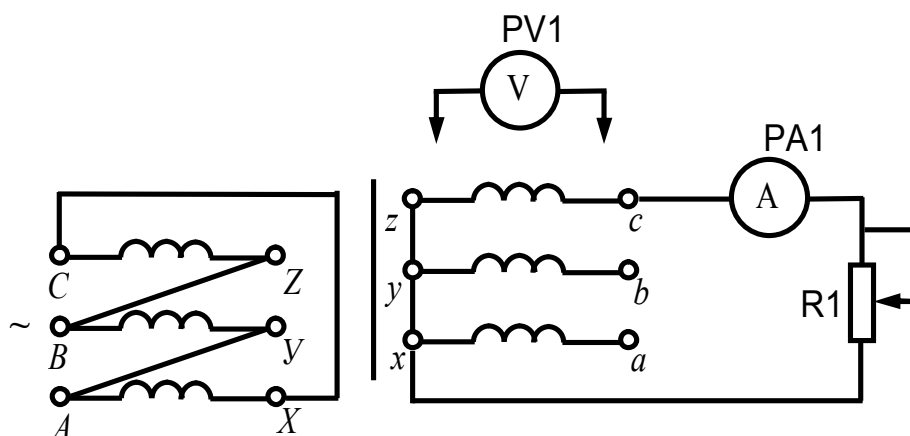


Рис. 2.3.2. Электрическая схема исследований при соединении обмоток Δ/Y_0

2.3.6. ПОСТРОЕНИЕ ВЕКТОРНЫХ ДИАГРАММ

Используя результаты проведенных испытаний, выполняют построение восьми попарно совмещенных векторных диаграмм, каждая пара из которых выполняется следующим образом. Сначала строят треугольник линейных напряжений вторичной обмотки трансформатора по результатам опыта холостого хода. Масштаб выбирают таким, чтобы изображение треугольника занимало примерно половину страницы отчета по лабораторной работе. В названный треугольник вписывают звезду фазных напряжений холостого хода, делая засечки из вершин треугольника в направлении его центра тяжести. Вследствие погрешностей измерений напряжений возможна ситуация, что не будет единой

точки пересечения дуг с радиусами фазных напряжений. Тогда в качестве этой точки нужно выбрать такую точку, от которой одинаково удалены дуги фазных напряжений.

Затем с диаграммой, соответствующей холостому ходу трансформатора, совмещают изображение векторной диаграммы вторичной обмотки трансформатора с той же магнитной системой, с той же схемой соединения обмотки, но при несимметричной нагрузке. Построение векторной диаграммы делают в последовательности и с рекомендациями, подобными для диаграммы опыта холостого хода.

Для большей наглядности векторные диаграммы холостого хода и несимметричной нагрузки изобразите или линиями разных цветов, или сплошными и штриховыми линиями. Обозначьте вершины треугольников линейных напряжений при холостом ходе a, b, c , при несимметричной нагрузке a', b', c' .

Выявленное смещение потенциала нулевой точки oo' , выражают в вольтах, используя длину этого отрезка и масштаб построения векторной диаграммы. Пример векторных диаграмм фазных и линейных напряжений представлен на рис. 2.3.3.

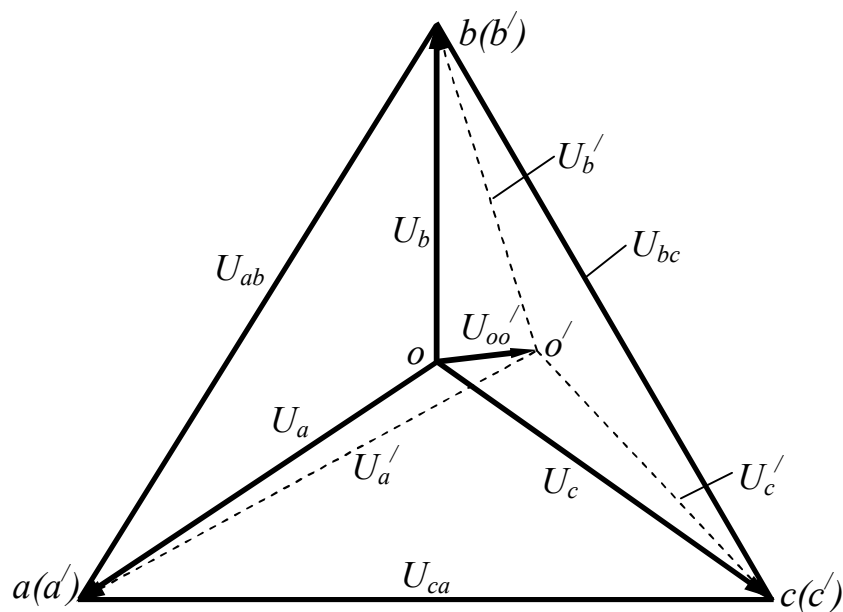


Рис. 2.3.3. Векторные диаграммы фазных и линейных напряжений

2.3.7. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

При анализе полученных результатов исследований необходимо дать в отчете следующие пояснения:

- сравните влияние несимметричной нагрузки на фазные и линейные напряжения вторичной обмотки трансформатора с однотипной магнитной системой, но при разных схемах соединений обмоток;
- сравните влияние несимметричной нагрузки на фазные и линейные напряжения вторичной обмотки трансформатора с одинаковыми схемами соединений обмоток, но при разных типах магнитных систем.

Полученные результаты сравнений необходимо объяснить, и сделать заключение о типе магнитной системы и схеме соединения первичной обмотки, как наиболее целесообразных у трансформаторов при несимметричной нагрузке.

2.3.8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПРИ ДОПУСКЕ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

2.3.8.1. Перечислите возможные причины несимметричной нагрузки трехфазных трансформаторов.

2.3.8.2. Какие типы магнитных систем применяются в трехфазных трансформаторах?

2.3.8.3. Поясните конструкцию стержневой магнитной системы трехфазного трансформатора.

2.3.8.4. Поясните конструкцию групповой магнитной системы трехфазного трансформатора.

2.3.8.5. Какие опыты и в какой последовательности проводятся при исследовании трансформаторов при несимметричной нагрузке?

2.3.8.6. Какими могут быть последствия работы трехфазного трансформатора при несимметричной нагрузке для потребителей электроэнергии и для самого трансформатора?

2.3.8.7. Поясните метод симметричных составляющих, используемый для анализа несимметричных режимов работы трансформаторов.

2.3.8.8. Когда в трехфазной обмотке протекает ток нулевой последовательности?

2.3.8.9. В чем состоит отличие систем токов прямой и обратной последовательностей?

2.3.8.10. Что представляет собой система токов нулевой последовательности?

2.3.8.11. По какому пути замыкаются потоки, созданные магнитодвижущими силами токов нулевой последовательности в трансформаторе, имеющем стержневую (групповую) магнитную систему и на что они влияют?

2.3.8.12. Когда токи нулевой последовательности протекают в первичной обмотке трехфазного трансформатора при несимметричной нагрузке?

2.3.9. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПРИ ЗАЩИТЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

2.3.9.1. Поясните конструкцию стержневой магнитной системы трехфазного трансформатора.

2.3.9.2. Поясните конструкцию групповой магнитной системы.

2.3.9.3. Как влияет тип магнитной системы трансформатора при несимметричной нагрузке на фазные и линейные напряжения вторичной обмотки?

2.3.9.4. Какой тип магнитных систем трансформаторов наиболее целесообразен при несимметричной нагрузке и почему?

2.3.9.5. Назовите путь, по которому замыкаются силовые линии магнитного потока, создаваемого магнитодвижущими силами токов нулевой последовательности при стержневой магнитной системе.

2.3.9.6. Назовите путь, по которому замыкаются силовые линии магнитного потока, создаваемого магнитодвижущими силами токов нулевой последовательности при групповой магнитной системе.

2.3.9.7. Какая схема соединения первичной обмотки наиболее благоприятна при несимметричной нагрузке и почему?

2.3.9.8. Как влияет схема соединения первичной обмотки трансформатора при несимметричной нагрузке на фазные и линейные напряжения вторичной обмотки?

2.3.9.9. Назовите методы уменьшения искажений фазных напряжений вторичной обмотки трансформатора при несимметричной нагрузке?

2.3.9.10. Какое соединение обмотки трансформатора и какая магнитная система (стержневая, групповая) являются наиболее целесообразными для обеспечения минимальных искажений фазных напряжений вторичной обмотки при несимметричной нагрузке?

2.3.9.11. Поясните, как обеспечивается несимметричная нагрузка при проведении лабораторной работы?

2.4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОДНОФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

2.4.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить условия, которые позволяют включать трансформаторы на параллельную работу, и исследовать распределение нагрузки между трансформаторами при выполнении всех условий, а так же при нарушении отдельных условий.

2.4.2. ПРОГРАММА РАБОТЫ

2.4.2.1. Ознакомиться с лабораторной установкой.

2.4.2.2. Проверить выполнение условий включения на параллельную работу трансформаторов.

2.4.2.3. Исследовать распределение нагрузки у параллельно работающих трансформаторов при выполнении всех условий.

2.4.2.4. Исследовать распределение нагрузки у параллельно работающих трансформаторов при неодинаковых коэффициентах трансформации.

2.4.2.5. Исследовать распределение нагрузки у параллельно работающих трансформаторов при неодинаковых номинальных напряжениях короткого замыкания.

2.4.2.6. Сделать основные выводы по результатам исследований.

2.4.3. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Параллельная работа двух и более трансформаторов – работа при параллельном соединении как первичных, так и вторичных обмоток. При параллельном соединении одноименные клеммы обмоток трансформаторов присоединяют к одному и тому же проводу сети.

Параллельная работа трансформаторов обеспечивает бесперебойное энергоснабжение потребителей в случае аварии или ремонта одного из трансформаторов. Варьируя количеством параллельно работающих трансформаторов, обеспечивается наибольший КПД.

Однофазные трансформаторы наиболее эффективно функционируют при параллельной работе в том случае, когда общая нагрузка распределяется между ними пропорционально их номинальным мощностям. Это достигается при выполнении следующих условий:

- одинаковые группы соединений обмоток,
- равные первичные и вторичные номинальные напряжения (равные коэффициенты трансформации),

- равные номинальные напряжения короткого замыкания.
Обязательным является выполнение первого условия, а второе и третье могут не соблюдаться с определенными допусками, устанавливаемыми государственным стандартом.
Допускается включение на параллельную работу трансформаторов с различными коэффициентами трансформации, если их отличие относительно среднего геометрического значения не превышает:
 $\pm 1\%$ для трансформаторов с коэффициентом трансформации меньше трех, $\pm 0,5\%$ - для всех прочих трансформаторов.
Допускается включение на параллельную работу трансформаторов с различными номинальными напряжениями короткого замыкания, если их отличие, относительно среднего арифметического значения не превышает $\pm 10\%$.
Пара однофазных трансформаторов для проведения исследований указывается преподавателем, как и трансформатор, у которого будет изменяться коэффициент трансформации или номинальное напряжение короткого замыкания.
Коэффициент трансформации изменяется изменением числа витков вторичной обмотки.
Номинальное напряжение короткого замыкания изменяется включением дросселя L в электрическую цепь вторичной обмотки трансформатора, указанного преподавателем.

2.4.4. ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНИЯ УСЛОВИЙ ВКЛЮЧЕНИЯ НА ПАРАЛЛЕЛЬНУЮ РАБОТУ

2.4.4.1. ПРОВЕРКА ПРИНАДЛЕЖНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ К ОДНОЙ И ТОЙ ЖЕ ГРУППЕ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК

У однофазных трансформаторов возможны только нулевая или шестая группы соединения обмоток, зависящие от направления намотки и маркировки клемм фаз. На лабораторной установке изменить группу соединения обмоток можно только путем изменения маркировки клемм фаз.

Начало и конец однофазной обмотки высокого напряжения (ВН) обозначают прописными латинскими буквами, соответственно A и X . Начало и конец однофазной обмотки низкого напряжения (НН) обозначаются строчными латинскими буквами, соответственно a и x .

Клеммы вторичных обмоток не имеют маркировки, поэтому для определения одноименных (однопотенциальных) клемм проводится следующий опыт. Собирается электрическая схема, рис. 2.4.1, где элек-

трически соединены между собой по одной произвольно выбранной клемме вторичных обмоток. К двум оставшимся клеммам подключают вольтметр.

Если при подаче напряжения на первичные обмотки, вольтметр фиксирует напряжение равное нулю, то это соответствует одноименности (однопотенциальности) пары произвольно выбранных клемм и клемм, к которым подключен вольтметр.

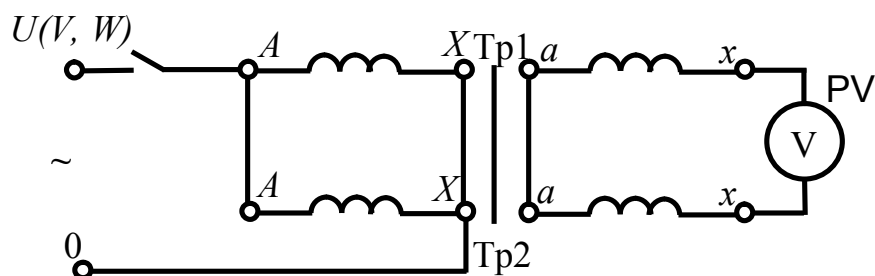


Рис. 2.4.1. Электрическая схема определения одноименных (однопотенциальных) клемм обмоток

Если при подаче напряжения на первичные обмотки, вольтметр фиксирует напряжение не более 1% от номинального напряжения вторичных обмоток (U_{2H}), то вывод вновь подобен предыдущему. А показание вольтметра более 1% от U_{2H} объясняется тем, что не обеспечено равенство коэффициентов трансформации.

2.4.4.2. ПРОВЕРКА КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРАНСФОРМАЦИИ

Для проверки равенства коэффициентов трансформации измеряют напряжения на первичных и вторичных обмотках каждого трансформатора.

Рассчитывают коэффициенты трансформации, как отношение измеренных напряжений.

$$k \approx U_{1H} / U_{2H} . \quad (2.4.1)$$

2.4.4.3. ПРОВЕРКА НОМИНАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Номинальные напряжения короткого замыкания трансформаторов обеспечены равными. Равенство номинальных напряжений короткого замыкания не будет выполняться, если последовательно со вторичной обмоткой одного из трансформаторов включить дроссель L. Индуктивное сопротивление вторичной цепи увеличилось, следовательно, увели-

чилось и номинальное напряжение короткого замыкания, но коэффициент трансформации остался неизменным.

2.4.5. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ У ПАРАЛЛЕЛЬНО РАБОТАЮЩИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ВСЕХ УСЛОВИЙ

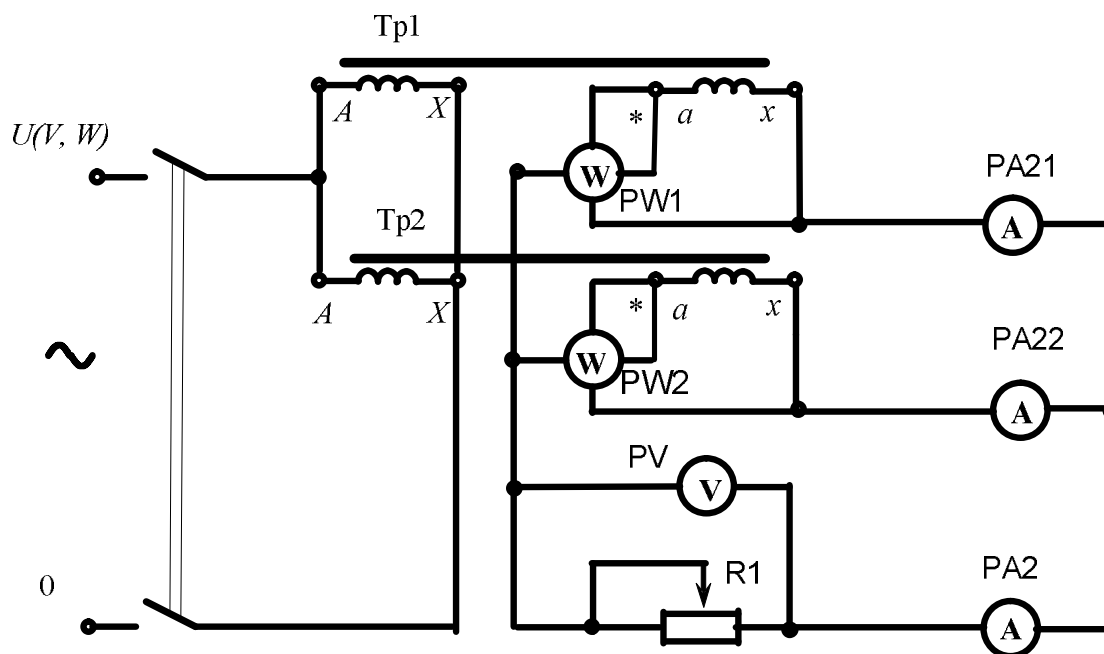


Рис. 2.4.2. Параллельная работа однофазных трансформаторов при выполнении всех условий и при неодинаковых коэффициентах трансформации

Собирают электрическую схему в соответствии с рис. 2.4.2. Затем подают напряжение на первичные обмотки и, изменяя сопротивление нагрузки, нагружают трансформаторы до тока не более 1,2 номинального. Результаты исследования представляют в виде табл.2.4.1 и строят внешние характеристики трансформаторов в одних осях координат

$$U_2 = f(I_{21}), U_2 = f(I_{22}) \text{ и } U_2 = f(I_2),$$

где U_2 – напряжение на клеммах вторичных обмоток трансформаторов (напряжение на клеммах нагрузки);

I_{21}, I_{22} – токи нагрузки соответственно первого и второго трансформаторов;

I_2 – ток нагрузки.

Таблица 2.4.1

*Результаты исследований параллельной работы
трансформаторов*

№ опыта	U_1	U_2	Тр1		Тр2		Нагрузка		Примечание
			I_{21}	P_{21}	I_{22}	P_{22}	I_2	P_2	
	В	В	А	Вт	А	Вт	А	Вт	
1÷6									Все условия выполняются
1÷6									$I_{ур} = A,$ $k_1 \neq k_2$
1÷6									$U_{K1} \neq U_{K2}$

2.4.6. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ У ПАРАЛЛЕЛЬНО РАБОТАЮЩИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С НЕОДИНАКОВЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ ТРАНСФОРМАЦИИ

По указанию преподавателя измените коэффициент трансформации трансформатора. Ограничения по нагрузке трансформаторов остаются без изменения. Для измерения уравнивающего тока $I_{ур}$ нужно разомкнуть электрическую цепь нагрузки.

Уравнивающий ток вызван неодинаковыми значениями ЭДС вторичных обмоток, а направление его определяет большая из них, т.е. ЭДС вторичной обмотки трансформатора с большим числом витков (с меньшим коэффициентом трансформации). В трансформаторе с большим числом витков вторичной обмотки уравнивающий ток будет суммироваться с током нагрузки, поэтому записывается со знаком «+». В трансформаторе с меньшим числом витков вторичной обмотки уравнивающий ток будет вычитаться из тока нагрузки, разгружая его, и записывается со знаком «-». Таким образом, до подключения нагрузки в обмотках трансформаторов протекают уравнивающие токи.

При этом во вторичных обмотках возможна одна из 2-х ситуаций: $I_{21} = I_{ур}, I_{22} = -I_{ур}, I_2 = 0$ или $I_{21} = -I_{ур}, I_{22} = I_{ур}, I_2 = 0$. Показания ваттметров имеют подобные знаки.

После этого подключают нагрузку и постепенно повышают ее до тех пор, пока во вторичной обмотке самого нагруженного трансформатора не установится ток не более 1,2 номинального. Результаты иссле-

дования представляются в виде табл. 2.4.1 и строят внешние характеристики трансформаторов в одних осях координат.

2.4.7. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ У ПАРАЛЛЕЛЬНО РАБОТАЮЩИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С НЕОДИНАКОВЫМИ НОМИНАЛЬНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

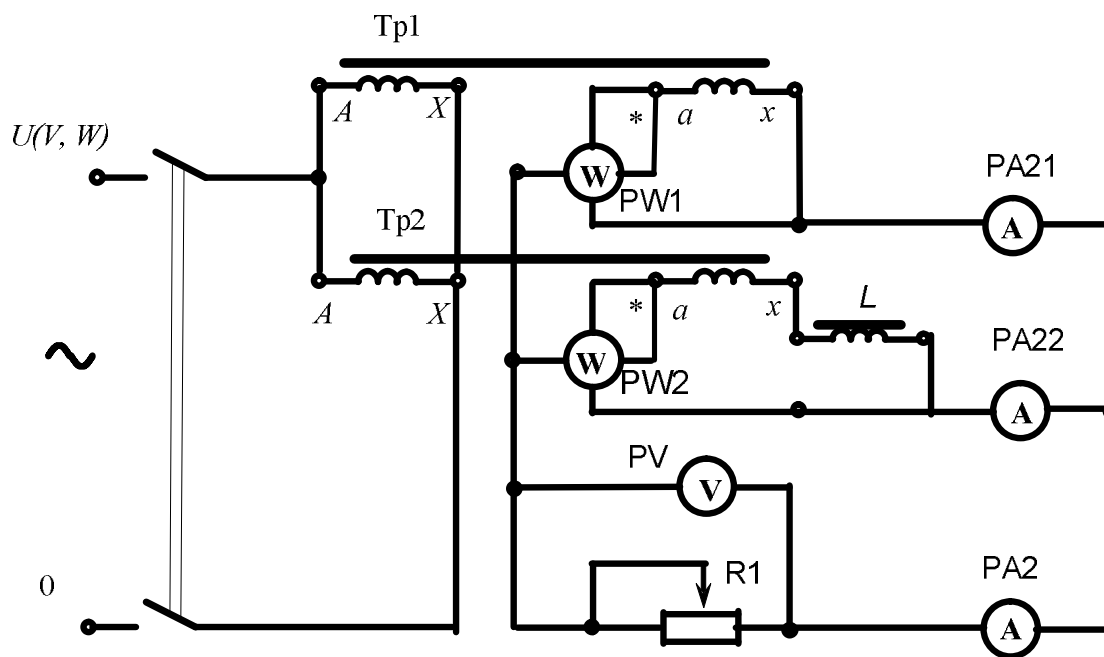


Рис. 2.4.3. Параллельная работа однофазных трансформаторов при неодинаковых номинальных напряжениях короткого замыкания

Собрать электрическую схему в соответствии с рис. 2.4.3. Исследования проводятся также, как при выполнении всех условий включения на параллельную работу. Результаты исследования представляют в виде табл. 2.4.1 и строят внешние характеристики трансформаторов в одних осях координат.

2.4.8. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

При анализе полученных результатов исследований необходимо в отчете пояснить, почему внешние характеристики трансформаторов, полученные в результате проведенных исследований, отличаются друг от друга как при выполнении всех условий включения на параллельную работу, так и при нарушении.

При анализе полученных результатов исследований необходимо ответить на такие вопросы:

- - какой трансформатор (с большим или меньшим коэффициентом трансформации) дополнительно нагружается уравнительным током и почему;
- - какой трансформатор (с большим или с меньшим напряжением короткого замыкания) будет более нагружен и почему.

2.4.9. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПРИ ДОПУСКЕ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

2.4.9.1. Для чего необходима параллельная работа трансформаторов?

2.4.9.2. Как подключают первичные и вторичные обмотки трансформаторов на параллельную работу?

2.4.9.3. Назовите условия включения однофазных трансформаторов на параллельную работу.

2.4.9.4. Поясните определение коэффициентов трансформации у исследуемых трансформаторов.

2.4.9.5. Назовите допускаемое отличие коэффициентов трансформации у трансформаторов, включаемых на параллельную работу.

2.4.9.6. Назовите допускаемое отличие номинальных напряжений короткого замыкания у трансформаторов, включаемых на параллельную работу.

2.4.9.7. Как определяют одноименные (однопотенциальные) клеммы вторичных обмоток однофазных трансформаторов?

2.4.9.8. Выполнение, какого из условий включения на параллельную работу является обязательным?

2.4.9.9. Поясните, как проверяют выполнение условий включения на параллельную работу?

2.4.9.11. Как убедиться в наличии уравнительного тока, возникающего при параллельной работе трансформаторов с неодинаковыми коэффициентами трансформации?

2.4.9.12. Назовите допускаемое соотношение мощностей трансформаторов, включаемых на параллельную работу, и поясните, чем оно обусловлено.

2.4.10. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПРИ ЗАЩИТЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

2.4.10.1. Для чего нужна параллельная работа трансформаторов и когда она необходима?

2.4.10.2. Перечислите условия включения на параллельную работу трансформаторов.

2.4.10.3. Как определяются одноименные (однопотенциальные) клеммы вторичных обмоток двух трансформаторов?

2.4.10.4. Изобразите электрическую схему для определения одноименных (однопотенциальных) клемм двух однофазных трансформаторов.

2.4.10.5. Изобразите электрическую схему для исследования параллельной работы двух однофазных трансформаторов при выполнении всех условий.

2.4.10.6. Изобразите электрическую схему для исследования параллельной работы двух однофазных трансформаторов при разных номинальных напряжениях короткого замыкания.

2.4.10.7. Как нормируют допустимые отклонения коэффициентов трансформации при параллельной работе?

2.4.10.8. Какие изменения делают в электрической схеме при исследовании параллельной работы двух однофазных трансформаторов с разными коэффициентами трансформации?

2.4.10.9. Как нормируется допустимое отклонение напряжений короткого замыкания трансформаторов при параллельной работе?

2.4.10.10. Назовите причину и величину допускаемого соотношения мощностей трансформаторов, включаемых на параллельную работу.

2.4.10.11. Сколько и какие группы соединения обмоток могут быть получены у однофазного трансформатора?

2.4.10.12. Почему не допускается параллельная работа трансформаторов с разными группами соединения обмоток?

2.4.10.13. Изобразите в одних осях координат внешние характеристики двух трансформаторов с разными напряжениями короткого замыкания и дайте необходимые пояснения.

2.4.10.14. Изобразите в одних осях координат внешние характеристики двух трансформаторов с разными коэффициентами трансформации и дайте необходимые пояснения.