

ФГБОУ
«Ставропольский государственный аграрный университет»
Электроэнергетический факультет
Кафедра электроснабжения и эксплуатации электрооборудования

В. А. Кобозев, А. И. Адошев, М. А. Мельников, Ю. С. Пименов

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ.

Часть 1. Трансформаторы

Лабораторный практикум:
учебное пособие

Ставрополь, 2019

УДК 621.3

Рецензент: к.т.н., доцент кафедры АЭС СКФУ А. В. Петров

Кобозев В. А.

Электрические машины. Часть 1. Трансформаторы: лабораторный практикум: учебное пособие / В. А. Кобозев, А. И. Адошев, М. А. Мельников, Ю. С. Пименов – Ставрополь : Сервисшкола, 2019. – 63 с.

В учебном пособии приведены методические указания к лабораторно-практическим занятиям по курсу «Электрические машины», ч. 1. «Трансформаторы», основные теоретические сведения по соответствующим темам и необходимые для выполнения работ справочные материалы.

Для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 13.03.02 – «Электроэнергетика и электротехника» (профиль подготовки «Электроснабжение») и 35.03.06 – «Агроинженерия» (профиль подготовки «Электрооборудование и электротехнологии в сельском хозяйстве»).

ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие предназначено для изучения общепрофессиональной дисциплины «Электрические машины», часть 1. «Трансформаторы», которая согласно государственному образовательному стандарту входит в систему подготовки специалистов по направлениям подготовки 13.03.02 – «Электроэнергетика и электротехника» (профиль «Электроснабжение») и 35.03.06 – «Агроинженерия» (профиль «Электрооборудование и электротехнологии в сельском хозяйстве»).

В результате выполнения лабораторного практикума студенты должны освоить:

- методику определения нормируемых параметров трансформаторов по опытам холостого хода и короткого замыкания;
- методику расчета параметров схемы замещения, внешних и энергетических характеристик трансформаторов;
- методы маркировки выводов и определения групп соединения обмоток трехфазных трансформаторов;
- методику расчета выпрямительных трансформаторов;
- методы определения сопротивления нулевой последовательности и расчета характеристик трехфазных трансформаторов при несимметричной нагрузке;
- методы определения коэффициента выгоды и оценки баланса мощностей автотрансформаторов.

Пособие построено таким образом, чтобы максимально облегчить студентам самостоятельную подготовку. С этой целью в начале методических указаний к каждому из занятий приводятся краткие теоретические сведения по соответствующей теме, а в приложениях даны справочные материалы, необходимые для выполнения работ.

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Лабораторно-практические занятия проводятся в учебной лаборатории кафедры электроснабжения и эксплуатации электрооборудования на специальных унифицированных стендах, обеспечивающих возможность фронтального выполнения работ (рис. В.1).

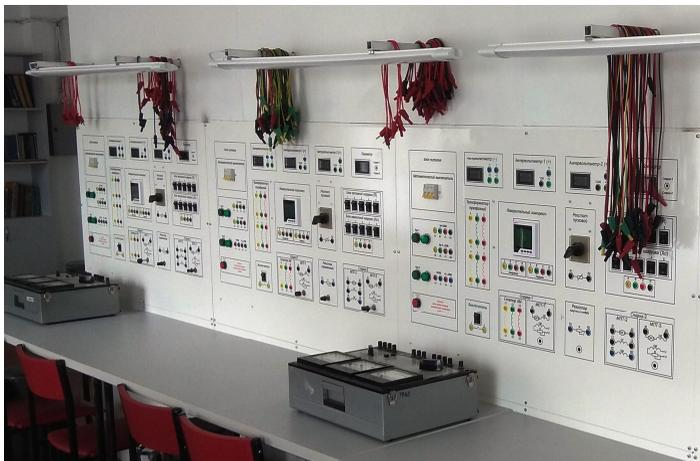


Рисунок В. 1 - Общий вид специализированных стендов

При первом знакомстве с лабораторией студентам необходимо ознакомиться с конструкцией стендов, обращая особое внимание на расположение коммутационных аппаратов, обеспечивающих включение и отключение самих стендов и отдельных модулей.

Лицевая панель стенда, на которой расположены коммутационные аппараты, выводы измерительных приборов, исследуемых электрических машин, и нагрузки, показана на рис. В. 2.

Включение и защита стенда осуществляется с помощью расположенного в верхней части блока питания трехфазного автоматического выключателя.

Кнопка «Пуск 1» служит для подключения трехфазного напряжения сети ($3\phi \sim 220 \text{ В}$), и регулируемого трехфазного напряжения ($3\phi \sim 0 \dots 220 \text{ В}$), изменение которого осуществляется с помощью расположенного непосредственно перед стендом фазорегулятора. О подключении переменного напряжения сигнализирует расположенная справа от кнопки «Пуск 1» сигнальная лампочка.

На блоке питания также расположена кнопка «Пуск 2» и сигнальная лампочка включения источника постоянного нерегулируемого ($= 230\text{ В}$) и регулируемого ($= 0 \dots 230\text{ В}$) напряжения.

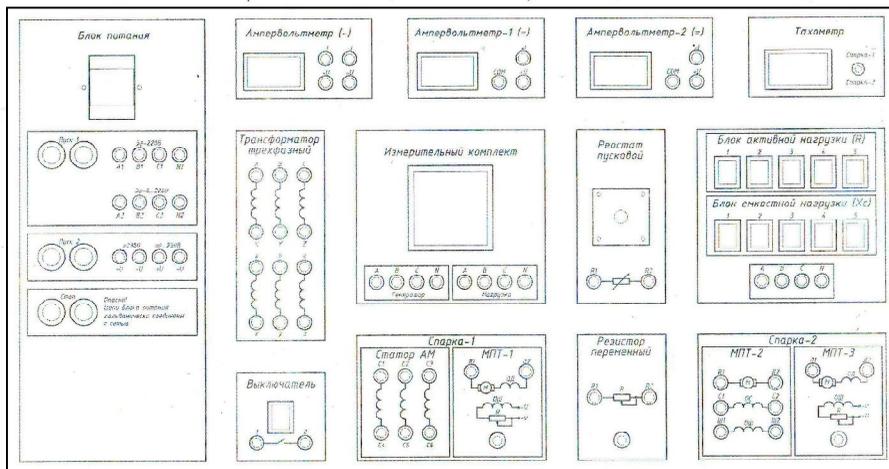


Рисунок В.2 – Лицевая панель стенда

Отключение переменного и постоянного напряжения осуществляется с помощью красной кнопки «Стоп», расположенной в нижней части блока питания.

В верхней части лицевой панели стенда расположены однофазный ампервольтметр переменного тока и два ампервольтметра постоянного тока, а также тахометр для измерения частоты вращения электрических машин с переключателем на различные спарки.

В центре панели расположен трехфазный измерительный комплект, позволяющий фиксировать токи, фазные и междуфазные напряжения, активную, реактивную и полную мощности.

Слева от трехфазного измерительного комплекта расположены выходы первичных (А-Х, В-У, С-З) и вторичных (а-х, б-у, с-з) обмоток исследуемого трехфазного трансформатора.

В правой части панели находятся блоки активной, и емкостной нагрузки с переключателями, и выходными клеммами А, В, С, N.

Кроме того, на лицевой панели расположены следующие элементы, которые используются при исследованиях электрических машин переменного и постоянного тока.

- Спарка-1: выводы обмотки статора асинхронной машины (С1-С4, С2-С5, С2-С6) и выводы обмотки якоря (Я1, Д2) связанной с ней общим валом вспомогательной машины постоянного тока МПТ-1, а также регулировочный реостат в цепи ее возбуждения.
- Спарка-2: выводы обмотки якоря (Я1, Д2), серийной (С1, С2) и шунтовой (Ш1, Ш2) обмоток возбуждения исследуемой машины постоянного тока МПТ-2, и выводы обмотки якоря (Я1, Д2) связанной с ней общим валом вспомогательной машины постоянного тока МПТ-3, а также регулировочный реостат в цепи ее возбуждения.
- Реостат пусковой, используемый для ограничения токов в цепи якоря машин постоянного тока, и резистор переменный для регулирования тока в цепях возбуждения.
- Выключатель для исследования неполнофазных режимов работы асинхронных машин.

Помимо приборов, расположенных на стенде, при проведении некоторых работ используются и другие переносные приборы. При проведении с их помощью измерений необходимо внимательно выбирать измеряемый параметр и пределы измерений.

Важно! Особое внимание перед подключением регулируемых блоков питания следует обращать на правильность начальной установки напряжения с помощью фазорегулятора, поскольку при проведении различных опытов требуется напряжение от нуля до номинального значения, и неправильная его установка может привести к выходу из строя оборудования. Напряжение следует проверять с помощью вольтметра до сборки схемы экспериментальных исследований.

На первом занятии студенты обязаны пройти инструктаж по технике безопасности и расписаться в журнале, ознакомиться с правилами поведения в лаборатории, и далее неукоснительно соблюдать их. Нарушители от занятий отстраняются.

Сборка и любые изменения схем производятся только при полностью выключенных стендах.

Категорически запрещается включать стенд без предварительной проверки ведущим занятия преподавателем!

В случае возникновения внештатной ситуации (искрение, запах горения и др.) необходимо немедленно выключить общий автоматический выключатель, и обратиться к преподавателю, не пытаясь самостоятельно устранить неисправность.

При подготовке к работе студент должен.

1. Изучить соответствующий раздел лекционного материала, и теоретические сведения, приведенные в настоящем пособии.
2. Хорошо представлять себе возможный конечный результат в виде характеристик, значений измеряемых и рассчитываемых параметров и т.д.
3. Знать принцип действия схемы установки и точный порядок выполнения всех операций.
4. Подготовить отчет, в который далее будут вноситься полученные в ходе выполнения работы данные.

Готовность студента к занятиям работы проверяется преподавателем в ходе опроса до выполнения работы.

После завершения экспериментальных исследований и расчетов оформляется окончательный отчет, который предъявляется для проверки преподавателю. Защита отчета производится путем индивидуального собеседования.

Работа № 1

Определение параметров трехфазного трансформатора по опытам холостого хода и короткого замыкания

Цель работы: освоить методы определения параметров трехфазных трансформаторов по опытам холостого хода и короткого замыкания

1. Общие теоретические положения

При анализе различных характеристик трансформаторов необходимо знать их основные параметры: коэффициент трансформации, ток и потери холостого хода, полное, активное и индуктивное сопротивление взаимной индукции (параметры ветви намагничивания), номинальные потери и номинальное напряжение короткого замыкания, ток установившегося короткого замыкания, полное, активное и индуктивное сопротивление короткого замыкания. Все эти параметры можно получить в результате проведения двух относительно простых опытов холостого хода и короткого замыкания.

Опыт холостого хода проводится с целью определения коэффициента трансформации; тока холостого хода; потерь в стали, а также параметров ветви намагничивания в схеме замещения. При проведении опыта необходимо изменять подводимое к первичным обмоткам напряжение в пределах $0,6 \dots 1,1 U_{ном}$, и измерять при этом ток, напряжение и активную мощность в каждой фазе (для трёхфазных трансформаторов). Схема проведения опыта показана на рис. 1.1.

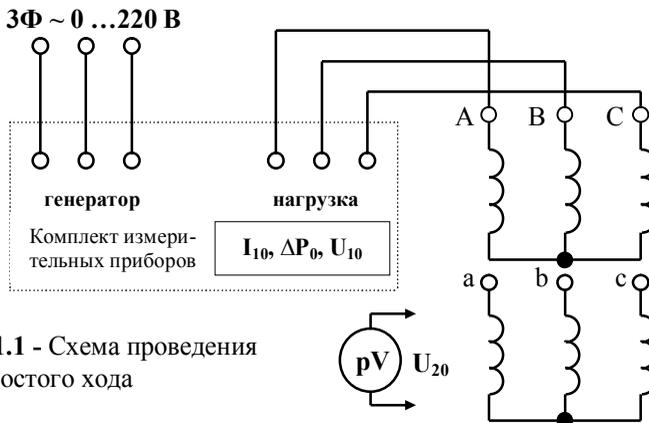
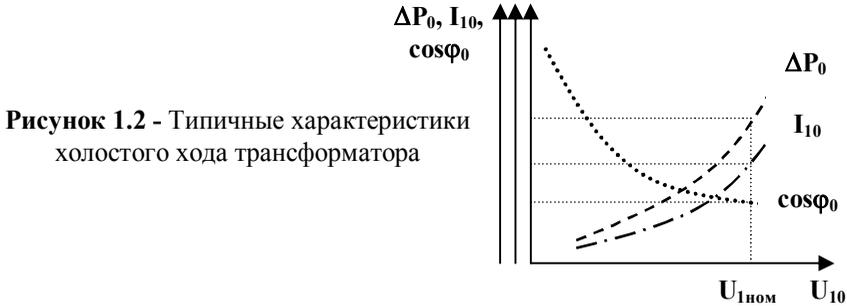


Рисунок 1.1 - Схема проведения опыта холостого хода

Сопrotивления ветви намагничивания, ток и потери мощности трансформатора в режиме холостого хода зависят от степени насыщения магнитной системы, поэтому при проведении опыта снимают зависимости: $I_{10} = f(U_{10})$, $\Delta P_0 = f(U_{10})$, $\cos\varphi_0 = \frac{\Delta P_0}{3U_{10}I_{10}} = f(U_{10})$. Типичный вид этих характеристик показан на рис. 1.2.



Следует обратить внимание на то, что в режиме холостого хода трехфазных трансформаторах вследствие несимметрии магнитной системы ток в обмотке, расположенной на среднем стержне, меньше, чем два других тока, а активные мощности в фазах не одинаковы в принципе, и при определенных условиях в какой-либо фазе мощность может иметь даже отрицательное значение. Эта фаза отдает энергию в сеть, а две другие ее потребляют. По этой причине необходимо находить средние значения напряжений и токов в фазах и сумму мощностей (обязательно учитывая их знак):

$$U_{10} = \frac{U_{A0} + U_{B0} + U_{C0}}{3}; I_{10} = \frac{I_{A0} + I_{B0} + I_{C0}}{3}; \quad (1.1)$$

$$\Delta P_0 = \Delta P_{A0} + \Delta P_{B0} + \Delta P_{C0}$$

Если это не оговорено специально, расчётные параметры относятся к номинальному напряжению. Для этого на оси абсцисс от значения $U_{1ном}$ восстанавливается перпендикуляр до пересечения с характеристиками, а проекции точек пересечения на оси ординат дадут искомые значения токов, мощностей, и $\cos\varphi_0$ (рис. 1.2).

В результате проведения опыта холостого хода находят:

- Коэффициент трансформации: $k_{mp} = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_{1ном}}{U_{20}}$. (1.2)

- Относительное значение тока холостого хода:

$$i_0, \% = \frac{I_{10\text{ном}}}{I_{1\text{ном}}} 100\% . \quad (1.3)$$

- Номинальные потери в стали: $\Delta P_{\text{ст}} \approx \Delta P_{0\text{ном}}$. Потери в стали часто называют постоянными, поскольку при неизменном первичном напряжении они практически не зависят от нагрузки. При ненасыщенной магнитной системе полное сопротивление ветви намагничивания значительно больше сопротивления первичной обмотки: $Z_0 \gg Z_1$, поэтому электрическими потерями в первичных обмотках обычно пренебрегают.
- Полное, активное и индуктивное сопротивления ветви намагничивания в схеме замещения:

$$z_0 \approx \frac{U_0}{I_0}; \quad r_0 \approx \frac{\Delta P_{\text{см}}}{3I_0^2}; \quad x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2} \quad (1.4)$$

Опыт короткого замыкания (рис. 1.3) выполняют при пониженном входном напряжении ($U_{\text{к}} = 0 \dots 0,2 U_{\text{ном}}$), и замкнутой накоротко вторичной обмотке (симметричном трёхфазном к.з. – в трёхфазных трансформаторах). Ток холостого хода пренебрежимо мал по сравнению с приведенным вторичным током короткого замыкания, поэтому с высокой точностью можно считать: $I_1 \approx I'_2 \gg I_0$.

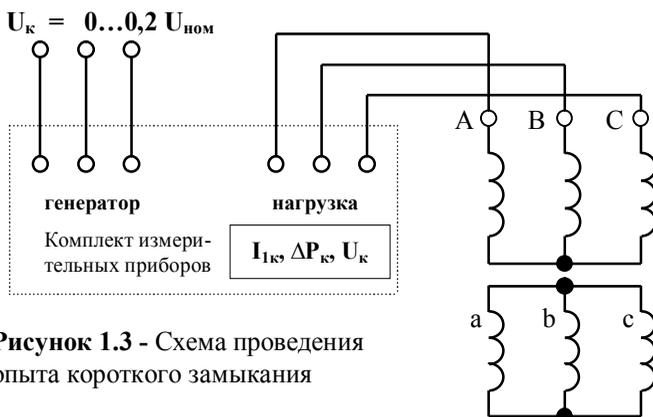
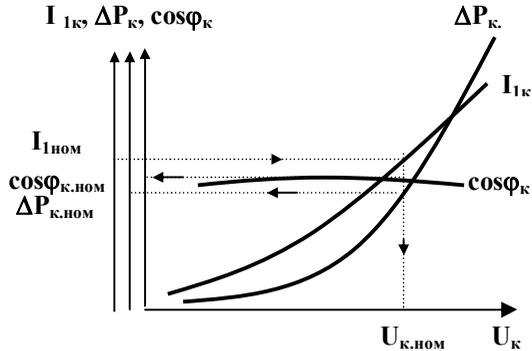


Рисунок 1.3 - Схема проведения опыта короткого замыкания

- **Важно!** Перед началом сборки схемы необходимо убедиться в том, что напряжение понижено до минимума

В процессе выполнения опыта к.з. снимаются те же самые параметры, что и в опыте холостого хода, но помечаются они индексом «к». Напряжение необходимо плавно повышать от минимально возможного до такого значения, при котором ток к.з. станет равен: $I_{1к} = (1,1...1,2)I_{1ном}$. Типичные характеристики короткого замыкания показаны на рис. 1.4.

Рисунок 1.4 - Типичные характеристики короткого замыкания



Параметры короткого замыкания определяются при значении тока короткого замыкания, равном номинальному току: $I_{1к} = I_{1ном}$. Напряжение, при котором это имеет место, является одним из важных параметров трансформатора и называется *номинальным напряжением короткого замыкания*. В результате проведения опыта к.з. находят:

- Номинальное напряжение короткого замыкания, его активную и реактивную составляющие:

$$u_{к.ном}, \% = \frac{U_{к.ном}}{U_{1ном}} 100\% ; \quad (1.5)$$

$$\cos \varphi_{к} = \frac{\Delta P_{к}}{3U_{к}I_{к}} ;$$

$$u_{к.ном.A} = u_{к.ном} \cos \varphi_{к.ном} ; \quad u_{к.ном.P} = U_{к.ном} \sin \varphi_{к.ном} \quad (1.6)$$

- Номинальные потери короткого замыкания $\Delta P_{к.ном}$, которые имеют место при токе, равном номинальному значению
- Приведённые значения полного, активного и индуктивного сопротивлений короткого замыкания в схеме замещения:

$$z'_{к} \approx \frac{U_{к.ном}}{I_{1ном}} ; \quad r'_{к} \approx \frac{\Delta P_{к.ном}}{3I_{1ном}^2} ; \quad x'_{к} = \sqrt{z_{к}^{\prime 2} - r_{к}^{\prime 2}} \quad (1.7)$$

- В первом приближении считают, что активные и индуктивные сопротивления короткого замыкания первичных и вторичных обмоток равны между собой:

$$r_1 \approx r'_2 \approx r'_{к/2}; \quad x_1 \approx x'_2 \approx x'_{к/2}. \quad (1.8)$$

- Установившийся ток короткого замыкания:

$$I_{к.уст} = \frac{U_{ном}}{U_{к.ном}} I_{ном}. \quad (1.9)$$

Расчет различных характеристик трансформаторов основан на применении схем замещения, параметры которых определяются по данным опыта холостого хода и короткого замыкания. Сопротивления r_0, x_0 образуют ветвь намагничивания и характеризуют свойства магнитной системы, а сопротивления, полученные в результате проведения опыта к.з. $r_1; r'_2; x_1; x'_2; r'_{к}; x'_{к}$ замещают обмотки трансформатора. Наиболее точно отображает физические явления в трансформаторах *T-образная схема замещения* (рис. 1.5), однако, при её использовании необходимо учитывать изменения напряжения между узловыми точками при изменении тока нагрузки вследствие падения напряжения на сопротивлениях r_1 и x_1 первичной обмотки.

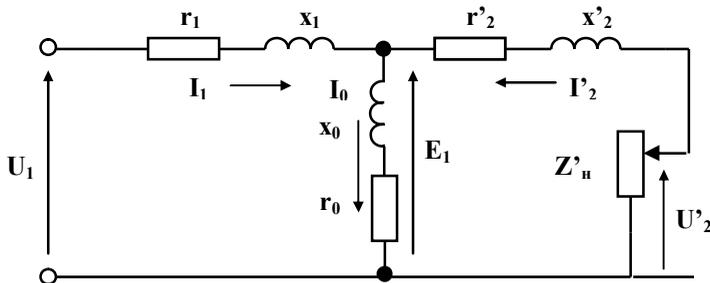


Рисунок 1.5 - T-образная схема замещения трансформатора

На практике чаще используется более удобная для расчетов *Г-образная схема замещения* (рис. 1.6).

Магнитные связи между обмотками в этих схемах заменены электрическими, поэтому к ним применимы все методы расчёта электрических цепей.

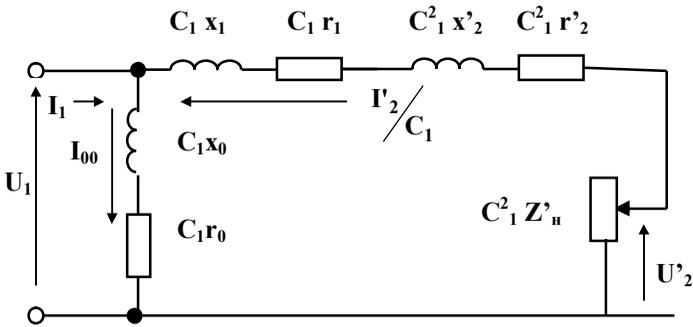


Рисунок 1.6 - Г-образная схема замещения трансформатора

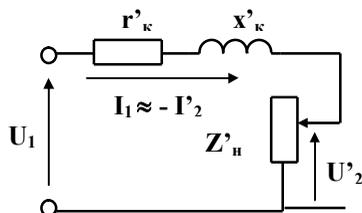
Влияние параметров первичной цепи на контур намагничивания и на вторичную цепь в Г-образных схемах учитывается с помощью комплексного множителя C_1 , который численно равен:

$$\bar{C}_1 = 1 + \frac{r_1 + jx_1}{r_0 + jx_0} \approx 1 + \frac{z_1}{z_0}. \quad (1.10)$$

Физический смысл комплексного множителя C_1 заключается в том, что э.д.с. E_1 изменяется по отношению к первичному напряжению U_1 по величине и по фазе. Угол фазового сдвига между \bar{U}_1 и \bar{E}_1 пренебрежимо мал, что существенно упрощает расчеты без заметной погрешности путем замены вектора \bar{C}_1 его модулем C_1 . В силовых трансформаторах этот модуль также весьма мал: $C_1 \leq 1,01 \dots 1,02$ и его обычно также не учитывают.

Главное достоинство Г-образной схемы замещения заключается в простоте анализа процессов, происходящих при изменении нагрузки, поскольку при этом все сопротивления, входящие в рабочий контур соединены последовательно. Ток в ветви намагничивания при этом не изменяется. Его учёт дает лишь небольшую поправку при определении тока и мощности, которые трансформатор потребляет из сети. В некоторых случаях бывает достаточно ограничиться анализом процессов изменения тока, напряжения и мощности нагрузки, при этом схема замещения может быть «свернута» и представлена в упрощенном виде только параметрами короткого замыкания трансформатора: $r'_{\kappa} \approx r_1 + r'_2$; $x'_{\kappa} \approx x_1 + x'_2$ (рис. 1.6). Расчет с использованием этой схемы наиболее прост.

Рисунок 1.6 - Упрощённая схема замещения трансформатора



2. Указания по выполнению работы

- 2.1. Записать необходимые данные трансформатора. Подготовить таблицы для записи показаний приборов в опытах холостого хода и короткого замыкания:

U_A	U_B	U_C	U_{cp}	I_A	I_B	I_C	I_{cp}	P_A	P_B	P_C	ΣP	$\cos\varphi$

- 2.2. Установить с помощью фазорегулятора напряжение, необходимое для проведения опыта холостого хода. Собрать и опробовать принципиальную схему (рис. 1.1).
- 2.3. Установить напряжение, примерно равное $1,1U_n$, и затем уменьшать его, записывая показания приборов. По полученным данным построить зависимости $I_{10} = f(U_{10})$, $\Delta P_0 = f(U_{10})$, $\cos\varphi_0 = f(U_{10})$, подобные показанным на рис. 1.2.
- **Важно!** В конце опыта х.х. снизить напряжение до минимально возможного значения!
- 2.4. По формулам (1.1) - (1.4) определить: коэффициент трансформации, ток и потери холостого хода, коэффициент мощности $\cos\varphi_0$, полное, активное и реактивное сопротивления ветви намагничивания, соответствующие номинальному напряжению.
- **Важно!** Перед выполнением опыта короткого замыкания убедиться в том, что напряжение на выходе фазорегулятора близко к нулю!
- 2.5. Собрать и опробовать схему для проведения опыта короткого замыкания (рис. 1.3).

- 2.6. Плавно увеличивать напряжение от минимального значения до тех пор, пока ток не достигнет значения $1,1 \dots 1,2 I_{\text{ном}}$, фиксируя показания приборов. По полученным данным построить зависимости $I_{\text{к}} = f(U_{\text{к}})$, $\Delta P_{\text{к}} = f(U_{\text{к}})$, $\cos \varphi_{\text{к}} = f(U_{\text{к}})$, подобные показанным на рис. 1.4.
- 2.7. По формулам (1.5) – (1.9) определить: номинальное напряжение короткого замыкания и его составляющие, номинальные потери короткого замыкания, приведенные значения полного, активного и реактивного сопротивления короткого замыкания и сопротивления первичных и вторичных обмоток, и установившийся ток короткого замыкания.
- 2.8. Изобразить Г-образную схему замещения, и указать на ней числовые значения всех полученных параметров. Оформить отчёт.

Контрольные вопросы

1. Пояснить назначение и порядок выполнения опыта холостого хода трансформатора.
2. Что такое коэффициент трансформации? Как он определяется?
3. Пояснить назначение и порядок выполнения опыта короткого замыкания трансформатора.
4. Пояснить, почему в трехфазных трансформаторах токи и потери мощности в отдельных фазах не равны между собой?
5. Дать необходимые пояснения к Т-образной, Г-образной и упрощенной схемам замещения.
6. Как классифицируются и определяются потери мощности в трансформаторах?
7. Что такое установившийся ток короткого замыкания, как он определяется, и как соотносится с номинальным током?
8. Что такое напряжение короткого замыкания и его составляющие? Как оно соотносится с номинальным напряжением?

Работа № 2

Расчет параметров схемы замещения, внешних и энергетических характеристик трансформаторов

Цель работы: освоить методы расчета параметров схемы замещения, внешних и энергетических характеристик трансформаторов

1. Расчет параметров схемы замещения

Силовые трансформаторы 6 – 10/0,4 кВ используются в электрических сетях для преобразования высокого напряжения, на котором электроэнергия передается на относительно большие расстояния по сетям 6 - 10 кВ, в напряжение 0,4 кВ, при котором осуществляется ее распределение непосредственно потребителям.

В процессе эксплуатации нагрузка трансформаторов изменяется как по величине, так и по характеру, что приводит к изменению напряжения на выводах вторичной обмотки и КПД.

Для расчета различных характеристик трансформаторов обычно используется Г-образная схема замещения (рис. 1.1), параметры которой определяются по их паспортным данным.

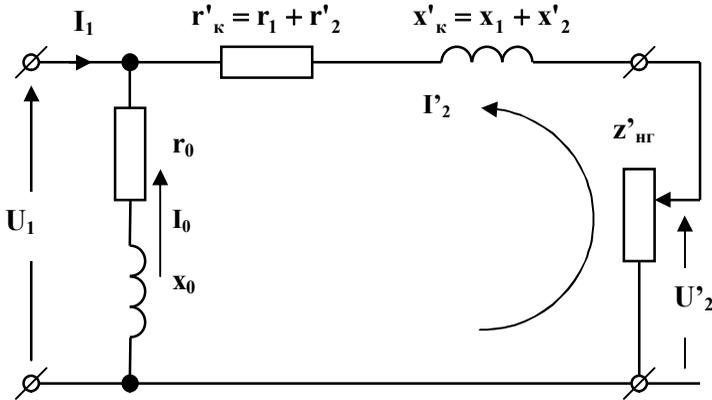


Рисунок 1.1 – Г-образная схема замещения трансформатора

В соответствии с ГОСТ Р 52719-2007 «Трансформаторы силовые. Общие технические условия» предприятиями-изготовителями указываются следующие данные трансформаторов.

- Номинальная мощность, номинальные высшее и низшее напряжения трансформатора.
- Ток $I_{0ном}^*$ (% от номинального) и потери $\Delta P_{0ном}$ холостого хода на основном ответвлении.
- Номинальные потери $\Delta P_{к.ном}$ и номинальное напряжение короткого замыкания $u_{к.ном}$ на основном ответвлении.

Полное сопротивление короткого замыкания трансформатора на основном ответвлении определяется по формуле:

$$z_k = \frac{u_{к.ном} U_{ном}^2}{100 S_{ном}}, \quad (1.1)$$

где $u_{к.ном}$ - номинальное напряжение короткого замыкания на основном ответвлении, %; $U_{ном}$ и $S_{ном}$ – номинальное напряжение и номинальная мощность трансформатора.

Активная и индуктивная составляющие полного сопротивления определяются по формулам:

$$r_k = \frac{\Delta P_{к.ном} U_{ном}^2}{S_{ном}^2}; \quad (1.2)$$

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} = \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}} \sqrt{\left(\frac{u_{к.ном}}{100}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_{к.ном}}{S_{ном}}\right)^2}. \quad (1.3)$$

Для расчета сопротивлений ветви намагничивания необходимо предварительно найти *номинальный ток трансформатора и ток холостого хода* в именованных единицах:

$$I_{1ном} = \frac{S_{ном.}}{\sqrt{3} U_{1ном}}; \quad (1.4)$$

$$I_{0ном} = \frac{I_{0ном}^*}{100} I_{1ном}. \quad (1.5)$$

Полное, активное, и индуктивное сопротивления ветви намагничивания определяются по формулам:

$$z_0 = \frac{U_{1ном}}{I_{0.ном}}; \quad r_0 = \frac{\Delta P_{0.ном}}{3I_{0.ном}^2}; \quad x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}. \quad (1.6)$$

Помимо этого определяется установившийся ток симметричного трехфазного короткого замыкания:

$$I_{1к.ном} = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{3} * z_{к}}. \quad (1.7)$$

Согласно ГОСТ 11677-85 трехфазные двухобмоточные трансформаторы с выведенной нейтралью могут иметь схемы соединения обмоток Y/Y_0 (звезда – звезда с нулем), Δ/Y_0 (треугольник – звезда с нулем), и Y/Z_0 (звезда – зигзаг с нулем), и группы соединения обмоток 0 и 11. Выводы нейтрали должны выбираться на продолжительную нагрузку током, равным (в % от номинального тока):

- при схеме соединения обмоток Y/Y_0 – 25%;
- при схеме соединения обмоток Δ/Y_0 и Y/Z_0 – 75%.

Нормируемые параметры трансформаторов приводятся в каталогах и справочной литературе. По ГОСТ 3 52119-2007 (Трансформаторы силовые. Общие технические условия) паспортные данные соответствуют «нулевому» ответвлению ПБВ и номинальному первичному напряжению. В стандартах или технических условиях на конкретные группы и типы трансформаторов допускается устанавливать дополнительные параметры.

2. Расчет внешних характеристик

Внешние характеристики трансформаторов представляют собой зависимость напряжения на выводах вторичной обмотки от коэффициента загрузки по току $U_2 = f(\beta)$. При характерных для двухобмоточных силовых трансформаторов 6–10/0,4 кВ значениях напряжения короткого замыкания ($u_{к} = 0,05 - 0,07$) в пределах рабочих нагрузок ($\beta \leq 2,0$) они с высокой точностью описываются уравнением:

$$U_2 = U_{20}(1 - \beta(u_{ка} \cos \varphi_2 + u_{кр} \sin \varphi_2)), \quad (2.1)$$

где U_{20} – напряжение на выводах вторичной обмотки при холостом

ходе; $\beta = \frac{I_2}{I_{2ном}}$ – коэффициент загрузки трансформатора по току;

$u_{ка}$; $u_{кр}$ – активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания (в относительных единицах); φ_2 – фазовый угол нагрузки.

Фазовый угол φ_2 при различном характере нагрузки может изменяться в пределах: $90^\circ \geq \varphi_2 \geq -90^\circ$. При этом $\cos\varphi_2$ всегда имеет положительное значение, а $\sin\varphi_2$ при активной и индуктивной нагрузке имеет положительное значение, а при емкостной – отрицательное, поэтому при активном и индуктивном характере нагрузки напряжение U_2 всегда падает, а при емкостном может не только уменьшаться, но и возрасти, если: $|u_{кр} \sin \varphi_2| \geq |u_{ка} \cos \varphi_2|$.

На практике часто используется иная форма записи уравнения (2.1), полученная путем тригонометрических преобразований с учетом того, что $u_{ка} = u_k \cos \varphi_k$; $u_{кр} = u_k \sin \varphi_k$:

$$U_2 = U_{20}(1 - \beta u_k (\cos \varphi_k \cos \varphi_2 + \sin \varphi_k \sin \varphi_2)) = U_{20}(1 - \beta u_k \cos(\varphi_k - \varphi_2)) \quad (2.2)$$

где $\varphi_k = \arctg \frac{x_k}{r_k}$ - угол короткого замыкания трансформатора.

Типичный вид внешних характеристик при индуктивном, активном и емкостном характере нагрузки показан на рис.2.1 (рабочая область выделена жирными линиями). При коротком замыкании характеристики сходятся в одной точке, соответствующей току установившегося короткого замыкания.

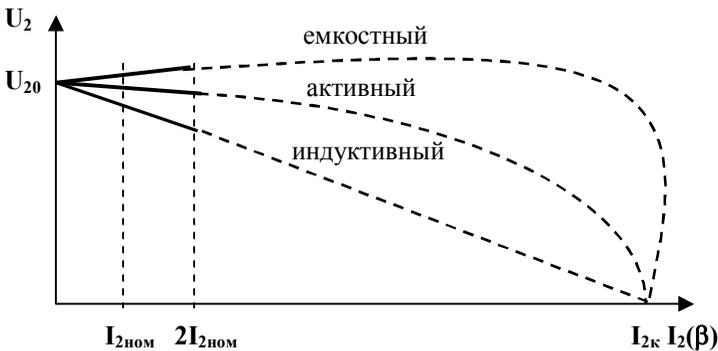


Рисунок 2.1 - Общий вид внешних характеристик трансформатора при различном характере нагрузки

3. Расчет энергетических характеристик

Основным критерием оценки энергетической эффективности трансформаторов является КПД, для вычисления которого обычно используется известная формула:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \sum \Delta P} = 1 - \frac{\Delta P_{0.\text{ном}} + \beta^2 \Delta P_{\text{к.ном}}}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + \Delta P_{0.\text{ном}} + \beta^2 \Delta P_{\text{к.ном}}}, \quad (3.1)$$

где $P_2 = \beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2$ – активная мощность нагрузки; $S_{\text{ном}}$ – номинальная мощность трансформатора; $\Delta P_{0.\text{ном}}$ – потери холостого хода; $\Delta P_{\text{к.ном}}$ – номинальные потери короткого замыкания короткого замыкания; $\beta = \frac{I_2}{I_{2\text{ном}}}$ – коэффициент загрузки; $\cos \varphi_2$ – коэффициент мощности нагрузки.

КПД достигает максимума в том случае, если потери короткого замыкания равны потерям холостого хода. Это имеет место, если коэффициент загрузки, называемый оптимальным, равен:

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{\Delta P_{0.\text{ном}}}{\Delta P_{\text{к.ном}}}}. \quad (3.2)$$

Оптимальный коэффициент загрузки в отличие от КПД не зависит от коэффициента мощности нагрузки. Обычно пределы его изменения при номинальном коэффициенте трансформации составляют $0,7 \geq \beta_{\text{опт}} \geq 0,5$, что соответствует средней загрузке силовых трансформаторов. КПД резко возрастает при малых нагрузках, и при $\beta = 0,2 - 0,3$ приближается к максимальному значению, после чего его изменения очень незначительны в широком диапазоне. Это является ценным свойством трансформаторов, поскольку позволяет обеспечить высокую эффективность их работы при значительных колебаниях нагрузки. Абсолютный максимум достигается при чисто активной нагрузке ($\cos \varphi_2 = 1$). При $\cos \varphi_2 < 1$ КПД уменьшается, поэтому при эксплуатации трансформаторов следует стремиться к высоким значениям коэффициента мощности.

Недостаток формулы (3.1) заключается в том, что в ней не учитываются изменения напряжения (принимается $U_2 \approx U_{2ном} = \text{const}$) и соответствующие изменения активной мощности P_2 :

$$P_2 = 3U_2 I_2 \cos \varphi_2 \approx 3\beta U_{2ном} I_{2ном} \cos \varphi_2 = \beta S_{ном} \cos \varphi_2.$$

В результате при $U_2 > U_{ном}$, КПД занижается, в противном случае ($U_2 < U_{ном}$) – завышается. Для повышения точности можно учитывать относительное изменение напряжения:

$$U^*_2 = f(\beta) = \frac{U_2}{U_{2ном}} U^*_2,$$

которое предварительно рассчитывается по формуле (2.2):

$$P_2 = 3U_2 I_2 \cos \varphi_2 = 3\beta U^*_2 U_{2ном} I_{2ном} \cos \varphi_2 = \beta U^*_2 S_{ном} \cos \varphi_2. \quad (3.3)$$

Типичный вид характеристик $\eta = f(\beta)$ при различных коэффициентах мощности нагрузки показаны на рисунке 3.1.

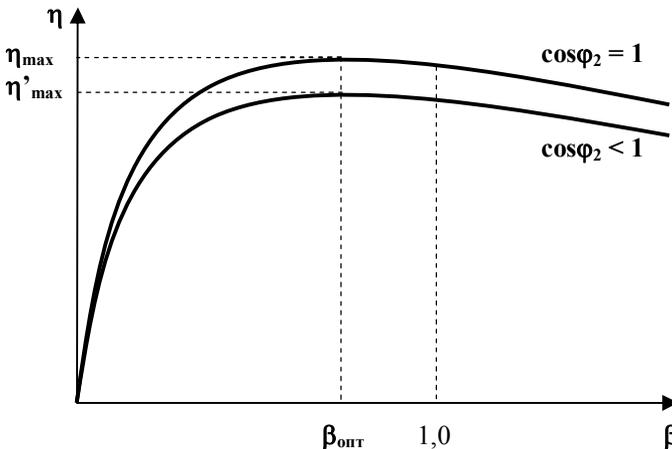


Рисунок 3.1 – Типичный вид зависимостей КПД от коэффициента загрузки при различных коэффициентах мощности нагрузки

4. Указания по выполнению работы

- Получить у преподавателя индивидуальное задание на расчет. Выписать паспортные данные трансформатора.
- Произвести расчет параметров трансформатора по формулам (1.1 – 1.7). Изобразить схему замещения и нанести на нее полученные расчетные значения.
- Рассчитать внешние характеристики трансформатора при двух значениях φ_2 . Данные занести в таблицу. Изобразить внешние характеристики в диапазоне нагрузок $\beta = 0 - 1,2$.
- Рассчитать энергетические характеристики трансформатора при двух значениях φ_2 . Данные занести в таблицу. Определить оптимальный коэффициент загрузки. Изобразить полученные характеристики в диапазоне нагрузок $\beta = 0 - 1,2$.

β	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
$U_2 (\varphi_{2(1)} =)$							
$\eta (\varphi_{2(1)} =)$							
$U_2 (\varphi_{2(2)} =)$							
$\eta (\varphi_{2(2)} =)$							

- Проанализировать полученные результаты. Сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Каким образом рассчитываются параметры схемы замещения трансформатора?
2. Как активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания влияют на выходное напряжение трансформатора? Может ли выходное напряжение трансформаторов возрастать при увеличении нагрузок?
3. Почему зависимость $\eta = f(\beta)$ рассчитывается косвенным методом? Какие параметры трансформатора необходимо знать для такого расчета?
4. Дать определение КПД трансформатора. Почему в режимах холостого хода и короткого замыкания он равен нулю? При каком условии КПД имеет максимальное значение?

Работа № 3

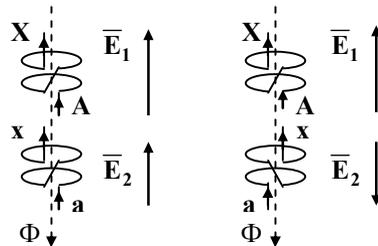
Исследование схем и групп соединения обмоток трехфазных трансформаторов

Цель работы: изучить схемы соединения, методы маркировки выводов и определения групп соединения обмоток трехфазных трансформаторов

1. Общие теоретические положения

Направление ЭДС, которые наводятся в обмотках трансформаторов одним и тем же магнитным потоком, зависит от направления намотки витков. Если уклон витков совпадает с правой резьбой винта, намотка называется «правой», если с левой резьбой – «левой». При одинаковом направлении намотки первичной и вторичной обмоток ЭДС \bar{E}_1 и \bar{E}_2 совпадают по фазе, при различном – находятся между собой в противофазе (рис. 1.1).

Рисунок 1.1 - Связь между направлениями намотки обмоток и фазами наведенных в них ЭДС



Само понятие начала и окончания обмотки условно, но их строгое взаимное согласование абсолютно необходимо при различных соединениях обмоток. Начала и концы трехфазных обмоток высшего напряжения маркируются буквами «А – X», «В – Y», «С – Z», а обмоток низшего напряжения – малыми буквами: «а – x», «b – y», «с – z». При необходимости (при наличии в обмотках ответвлений, в многообмоточных трансформаторах и в других случаях) к буквам добавляются цифровые индексы. Как первичные, так и вторичные трехфазные обмотки могут соединяться между собой по одной из следующих схем: «звезда» (Y), «треугольник» (Δ), «зигзаг» (Z). Схемы соединения «звезда» и «зигзаг» могут иметь выведенную нейтраль (Y₀, Z₀). Первичные и вторичные обмотки могут иметь как одинаковые, так и различные схемы соединения, но во всех без исключения случаях необходимо строго соблюдать маркировку их выводов. На рис.1.2 показаны схемы соединения вторичных обмоток Y и Δ.

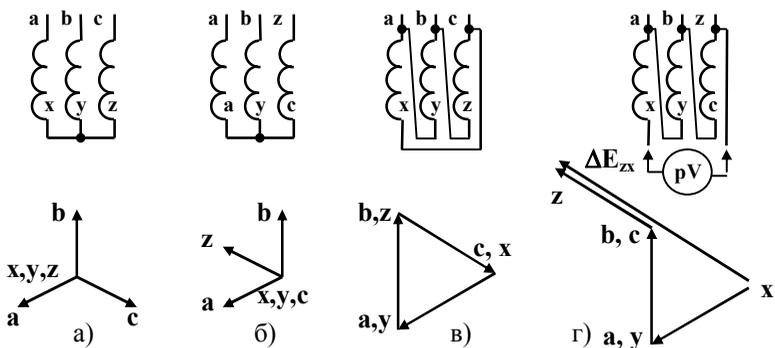
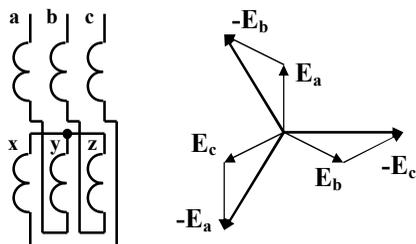


Рисунок 1.2 - Схемы соединения и векторные диаграммы ЭДС: а, б – Υ с правильной и неправильной маркировкой выводов; в, г – то же, но Δ

При правильной маркировке всех выводов ЭДС образуют симметричную трехфазную систему векторов (звезду или равносторонний треугольник). Если направление намотки какой-либо обмотки (например, в фазе «С») изменить на противоположное, векторы ЭДС также изменят направление. В результате симметричная трехфазная система искажается. Замыкать соединение обмоток в Δ в этом случае нельзя даже при холостом ходе, поскольку между выводами «z» и «x» действует разность ЭДС ΔE_{zx} , по величине равная удвоенному междуфазному напряжению. Соединение «Z» образуется путем последовательно-встречного включения двух групп обмоток по схеме, представленной на рис. 1.3.

Рисунок 1.3 - Схема и векторная диаграмма ЭДС при соединении «Z»



Соединение в «зигзаг» значительно сложнее «звезды» и «треугольника» и требует повышенного расхода материалов. Силовые трансформаторы с соединением вторичных обмоток «Z₀» применяются в системах электроснабжения с большой несимметрией нагрузки. Это соединение также используют в преобразовательной технике для увеличения числа фаз, получения различных фазовых сдвигов вторичных напряжений, исключения потоков вынужденного намагничивания в выпрямительных трансформаторах, и в других случаях.

Схемы соединения обмоток не определяют фазового смещения между векторами ЭДС первичных и вторичных обмоток, что может привести к ошибкам при включении трансформаторов на параллельную работу и в некоторых других случаях, поэтому для трехфазных трансформаторов вводится дополнительно понятие групп соединения.

Группой соединения обмоток трансформатора называется угловое смещение векторов линейных ЭДС вторичных обмоток по отношению к соответствующим векторам линейных ЭДС первичных обмоток, которое отсчитывается против часовой стрелки. Группа соединений обозначается числом, которое, будучи умножено на 30° дает полный угол между векторами линейных ЭДС. В однофазных трансформаторах возможны только две группы, поскольку векторы первичных и вторичных ЭДС могут либо совпадать по фазе, либо находиться в противофазе (рис. 1.1). Первый случай соответствует нулевой группе, а второй – шестой ($6 \times 30^\circ = 180^\circ$). За редкими исключениями это не имеет практического значения для однофазных электроприемников. Гораздо сложнее обстоит дело в трехфазных трансформаторах, для которых принято выделять двенадцать групп соединения, которые обозначаются числами 0, 1, 2 ...11. Группы 0, 2, 4 ...10 называются четными и получаются в том случае, если первичные и вторичные обмотки соединяются по одинаковым схемам (Y/Y или Δ/Δ). Группы 1, 3, 5 ...11 называются нечетными и получаются, если схемы соединения первичных и вторичных обмоток различны (Y/ Δ , Δ /Y, Y/Z). Рассмотрим образование четных групп на конкретном примере (рис. 1.4). Для наглядности на векторных диаграммах ЭДС вершины треугольников «А» и «а» совмещаются. Если первичные и вторичные обмотки имеют одинаковое направление намотки, соединены по одинаковым схемам (в данном случае – Y/Y), и имеют для каждого стержня одинаковую маркировку, все векторы первичных и вторичных ЭДС с одинаковой индексацией имеют одно направление. Фазовый сдвиг между ними равен нулю, что соответствует нулевой группе (рис. 1.4 – а). Если теперь осуществить круговую перемаркировку выводов вторичных обмоток согласно рис. 1.4 – б, направления вторичных ЭДС изменятся. Согласно с первичной ЭДС E_{AB} будет направлена вторичная ЭДС E_{ca} , а вектор ЭДС E_{ab} развернется на угол, равный: $4 \times 30^\circ = 120^\circ$. На этот же угол развернутся векторы E_{bc} – по отношению к E_{BC} и E_{ca} – по отношению к E_{CA} . Таким образом, получается четвертая группа. Если еще один раз выполнить перемаркировку согласно рис. 1.4 – в,

получим следующие пары согласно направленных ЭДС: $E_{AB} \Rightarrow E_{bc}$; $E_{BC} \Rightarrow E_{ca}$; $E_{CA} \Rightarrow E_{ab}$. Вторичные ЭДС, имеющие ту же индексацию, что и первичные, при этом поворачиваются на угол $8 \times 30^\circ = 240^\circ$. В результате получаем восьмую группу. Шестая группа получается из нулевой путем изменения направления намотки всех вторичных обмоток (практически это осуществляется взаимной перемаркировкой начал и окончаний каждой из обмоток: $a \Rightarrow x$; $b \Rightarrow y$; $c \Rightarrow z$). Из рис. 1.4 – г следует, что все векторы вторичных ЭДС при этом изменят свои направления на противоположные, и фазовый сдвиг между соответствующими векторами составит: $6 \times 30^\circ = 180^\circ$. Путем круговой перемаркировки выводов аналогично тому, как это показано на рис. 1.4 – б, в, шестую группу можно преобразовать в десятую и вторую.

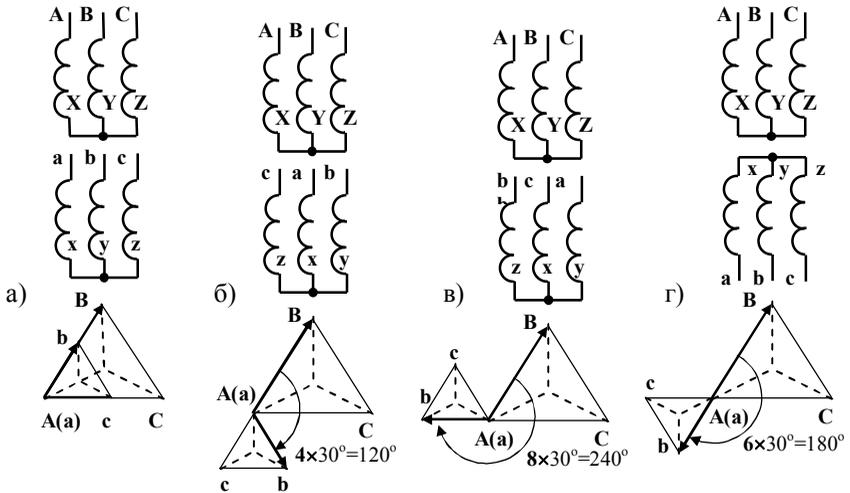


Рисунок 1.4 - Маркировка выводов и диаграммы ЭДС четных групп соединения обмоток: а – 0; б – 4; в – 8; г – 6

Аналогичные результаты получаются и в том случае, когда обмотки трансформатора соединяются по схеме Δ/Δ . Нулевая и шестая группы называются основными, а группы 2; 4; 8; 10 – производными.

При перемаркировке выводов следует обращать особое внимание на то, что порядок чередования фаз должен оставаться неизменным: $a \Rightarrow b \Rightarrow c$; $b \Rightarrow c \Rightarrow a$; $c \Rightarrow a \Rightarrow b$.

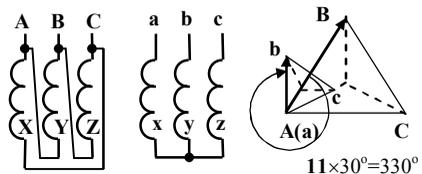
В таблице 1.1 приведены основные варианты схем соединения обмоток, при которых получаются четные группы и соответствующие им векторные диаграммы ЭДС.

Таблица 1.1 - Схемы соединения обмоток и векторные диаграммы ЭДС для четных групп

Схемы соединения и маркировка выводов обмоток						
первичных	вторичных					
Группа соединения, угловое смещение и векторные диаграммы Э.Д.С.	0	4	8	6	10	2
	0°	120°	240°	180°	300°	60°

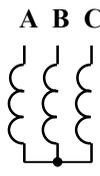
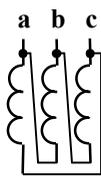
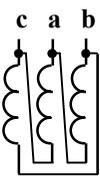
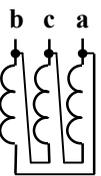
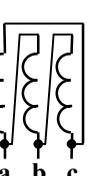
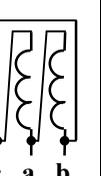
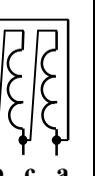
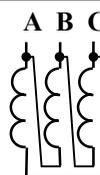
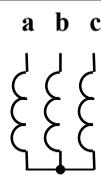
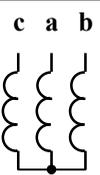
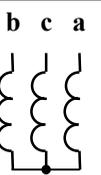
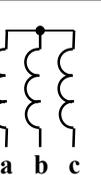
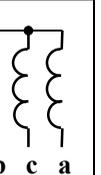
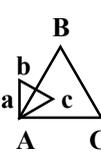
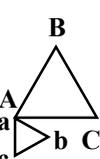
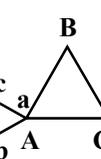
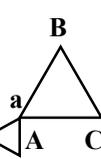
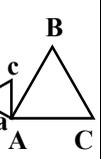
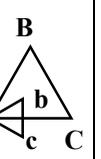
Наиболее важное значение среди нечетных групп имеет одиннадцатая группа со схемой соединения обмоток Δ/Y (рис. 1.5). Для этой группы совпадают направления следующих векторов междуфазных первичных и фазных вторичных ЭДС: E_{AB} и E_a ; E_{BC} и E_b ; E_{CA} и E_c . Междуфазные вторичные ЭДС сдвинуты по фазе от соответствующих им первичных ЭДС на угол $11 \times 30^\circ = 330^\circ$.

Рисунок 1.5 - Маркировка выводов и векторная диаграмма ЭДС для 11-й группы соединения обмоток



Если выводы вторичных обмоток перемаркировать таким же образом, как и для четных групп, получим третью и седьмую группы. Изменение полярности всех первичных обмоток на противоположную даст пятую группу, а дальнейшая их перемаркировка – девятую и первую группы. Основные варианты схем соединения обмоток, при которых получаются нечетные группы и соответствующие им векторные диаграммы ЭДС приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Схемы соединения обмоток и векторные диаграммы ЭДС для нечетных групп

Схемы соединения и маркировка выводов обмоток						
первичных	вторичных					
						
						
Группа соединения, угловое смещение и векторные диаграммы ЭДС.	11	3	7	5	9	1
	330°	90°	210°	150°	270°	30°
						

Нечетные группы соединения обмоток могут быть реализованы также при соединении обмоток по схеме Y/Z.

2. Маркировка выводов обмоток

Маркировка выводов первичной обмотки. С помощью тестера, омметра или другого прибора необходимо определить все пары выводов, принадлежащих отдельным обмоткам. Начало и окончание одной из обмоток маркируется произвольно. Если это возможно, визуально определяется обмотка, расположенная на среднем стержне. К ее окончанию присоединяются по одному выводу других обмоток, предположительно – также окончания. Затем к базовой обмотке подводится напряжение U_1 , не превышающее номинальное. Возникший в результате этого магнитный поток Φ_B замыкается по двум крайним стержням. Потоки в этих стержнях направлены по отношению к обмоткам в противоположную сторону, а по величине равны примерно половине полного потока: $\overline{\Phi}_A = \overline{\Phi}_C = -0,5\overline{\Phi}_B$. В результате в обмотках «А» и «С» наводится ЭДС, равная половине приложенного напряжения. При встречном включении обмоток (соединены одноименные выводы) ЭДС суммируются, и напряжения между свободными выводами обмоток будут равны: $U_{BA} = U_{BC} = 1,5U_B = 1,5U_1$ (рис. 2.1 – а). Это свидетельствует о правильности маркировки.

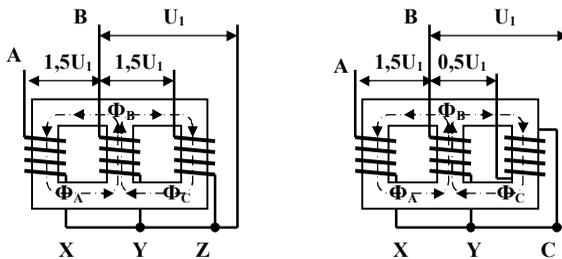


Рисунок 2.1 - Маркировка выводов первичных обмоток трехфазного трансформатора

Если выводы какой-либо обмотки (например, в фазе «С») определены неверно, соответствующая ЭДС будет вычитаться, и контрольное напряжение составит: $U_{BC} = 0,5U_1$ (рис. 2.1 – б). Если базовая обмотка располагается на одном из крайних стержней, ЭДС, наводимая в обмотке среднего стержня, будет больше ЭДС в обмотке второго крайнего стержня, что объясняется различием путей замыкания магнитных потоков. Однако, и в этом случае при правильной маркировке контрольное напряжение увеличивается по сравнению с U_1 , а при неправильной – уменьшается.

Маркировку выводов вторичной обмотки начинают с определения принадлежности каждой из вторичных обмоток к определенной фазе. Для этого к каждой из первичных обмоток последовательно прикладывается напряжение, как и в первом случае. Вследствие различия магнитных потоков в стержнях напряжения на вторичных обмотках различны. Наибольшее напряжение получается в том случае, если первичная и вторичная обмотки расположены на одном стержне. Для маркировки начал и окончаний один из выводов вторичной обмотки соединяется с окончанием соответствующей ей первичной обмотки. Если напряжение между оставшимися выводами будет уменьшаться, соединенные выводы имеют одинаковую маркировку (рис. 2.2 – а), если увеличиваться – различную (рис. 2.2 – б).



Рисунок 2.2 - Маркировка выводов вторичных обмоток

3. Определение группы соединения обмоток

Чтобы определить группу соединения обмоток, необходимо соединить между собой выводы первичной и вторичной обмоток с маркировками «А» и «а». К выводам первичной обмотки подводится симметричная система напряжений (рис. 3.1). Каждой группе соответствуют строго определенные напряжения $U_{Вв}$ и $U_{Вс}$, называемые характеристическими, которые измеряются с помощью вольтметра.

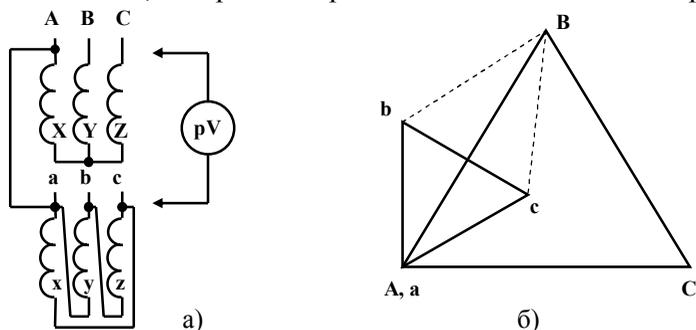


Рисунок 3.1 - Схема измерений (а) и векторная диаграмма напряжений (б) для 11-й группы соединений обмоток

Далее в масштабе строится векторная диаграмма напряжений. Стороны треугольников первичных и вторичных напряжений в масштабе равны соответствующим междуфазным напряжениям, а угол поворота треугольника вторичных напряжений определяется в зависимости от группы соединения. По диаграмме находятся отрезки, в масштабе равные характеристическим напряжениям: $m_U L_{Bb} = U_{Bb}$; $m_U L_{Bc} = U_{Bc}$. Выполнение этих условий подтверждает правильность выбора группы. В качестве примера на рис. 3.1 показаны схема соединения обмоток и векторная диаграмма для 11-й группы.

Характеристические напряжения можно определить и аналитически по формулам, приведенным в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Аналитическое определение характеристических напряжений

$U_{Bb} = U_{Cc}$	U_{Bc}	Группа
$U_{2м.ф.} (k - 1)$	Больше	0
$U_{2м.ф.} \sqrt{1 - \sqrt{3k} + k^2}$	Больше	1
$U_{2м.ф.} \sqrt{1 - k + k^2}$	Больше	2
$U_{2м.ф.} \sqrt{1 + k^2}$	Больше	3
$U_{2м.ф.} \sqrt{1 + k + k^2}$	Больше	4
$U_{2м.ф.} \sqrt{1 + \sqrt{3k} + k^2}$	Равно	5
$U_{2м.ф.} (k + 1)$	Меньше	6
$U_{2м.ф.} \sqrt{1 + \sqrt{3k} + k^2}$	Меньше	7
$U_{2м.ф.} \sqrt{1 + k + k^2}$	Меньше	8
$U_{2л} \sqrt{1 + k^2}$	Меньше	9
$U_{2м.ф.} \sqrt{1 - k + k^2}$	Меньше	10
$U_{2м.ф.} \sqrt{1 - \sqrt{3k} + k^2}$	Равно	11

Для идентификации группы достаточно U_{Bc} сравнить с напряжением U_{Bb} . Результаты расчета сравниваются с показаниями вольтметра, и делается вывод о выборе группы соединений.

4. Указания по выполнению работы

- 4.1. Ознакомиться с основными теоретическими положениями и экспериментальными методами маркировки выводов и определения групп соединения обмоток
 - 4.2. Выполнить согласно указаниям и схемам, приведенным в п. 2. маркировку выводов первичных и вторичных обмоток
 - 4.3. Изобразить схемы трансформатора для 0 – й (Y/Y) и 11 - й (Y/Δ) групп соединения, а также их производные (по заданию преподавателя). Для этих схем выполнить замеры характеристических напряжений, построить векторные диаграммы напряжений и произвести аналитические расчеты, подтверждающие правильность идентификации групп.
- **Примечание:** при построении диаграмм и определении характеристических напряжений удобно пользоваться масштабом 1В/мм. Для этого надо с помощью фазорегулятора подвести к первичным обмоткам междуфазные напряжения, равные 100 В.

Контрольные вопросы

1. Объяснить, почему в трехфазных трансформаторах необходимо однозначно маркировать начала и окончания обмоток.
2. Пояснить порядок маркировки выводов первичных и вторичных обмоток.
3. Чем группы соединения отличаются от схем соединения обмоток? Дать определение.
4. При каких схемах соединения можно получить четные и нечетные группы?
5. Как из основных групп соединения обмоток получить производные? Привести примеры.
6. Пояснить порядок экспериментального определения групп соединения обмоток. Привести примеры.

Работа № 4

Расчет трансформатора для сварочного выпрямителя

Цель работы: освоить методику расчета выпрямительных трансформаторов (на примере трансформатора для сварочного выпрямителя)

1. Схема сварочного выпрямителя

Источник сварочного тока для механизированной сварки в среде защитных газов (рис. 1.1) выполняется по схеме двухполупериодного выпрямителя со средней точкой и содержит автоматический выключатель QF, пакетный переключатель SA1, трансформатор T1, вентили VD1, VD2, дроссель L и сварочную горелку. Первичная обмотка W_1 имеет дополнительные секции W_{12} , W_{13} которые последовательно подключаются к сети с помощью переключателя SA1, что позволяет регулировать напряжение холостого хода на вторичной обмотке трансформатора T1. Выпрямление вторичного напряжения осуществляется с помощью вторичных полуобмоток W_{21} и W_{22} и вентилях VD1 и VD2. Дроссель L сглаживает пульсации выпрямленного тока, стабилизируя течение сварочного процесса.

Источники питания для механизированной сварки имеют жесткие или полого падающие внешние характеристики. Наилучшие массо-габаритные показатели при этом обеспечивают трансформаторы с тороидальными сердечниками. Регулирование тока сварки производится путем переключения дополнительных витков первичной обмотки W_{12} и W_{13} и изменения скорости подачи электродной проволоки.

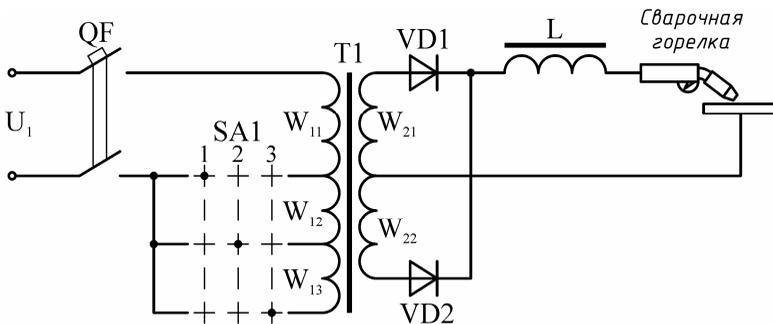


Рисунок 1.1 – Схема источника сварочного тока

Особенностью расчета выпрямительных трансформаторов является применение специальных коэффициентов, характеризующих отношения токов и напряжений на элементах схемы выпрямления, к выпрямленному напряжению и току, значения которых будут даны по ходу методики расчета.

Исходными данными для расчета являются: минимальный $I_{д.мин}$ и максимальный $I_{д.маx}$ токи сварочной дуги, напряжение питающей сети, и продолжительность нагрузки $\Pi\text{Н}, \%$ при максимальном токе.

2. Расчет основных параметров обмоток

Расчет начинаем с определения напряжения сварочной дуги в режимах максимального и минимального тока, В:

$$U_{д.маx} = 18 + 0,04I_{д.маx} ; \quad (2.1)$$

$$U_{д.мин} = 18 + 0,04I_{д.мин} . \quad (2.2)$$

Напряжение холостого хода источника, В:

$$U_{д0.маx} = U_{д.маx} + (\rho_u \cdot I_{д.маx}) ; \quad (2.3)$$

$$U_{д0.мин} = U_{д.мин} + (\rho_u \cdot I_{д.мин}) . \quad (2.4)$$

где $\rho_u = (0,04 \dots 0,08)$, В/А - жесткость внешней характеристики сварочного выпрямителя.

Напряжение холостого хода трансформатора, В:

$$U_{20.маx} = 1,11U_{д0.маx} ; \quad (2.5)$$

$$U_{20.мин} = 1,11U_{д0.мин} , \quad (2.6)$$

где $1,11 = \frac{U_2}{U_d}$ - коэффициент схемы однофазного двухполупериодного выпрямителя по напряжению.

Мощность трансформатора в режимах максимального и минимального токов, кВт:

$$S_{мин} = U_{20.мин} I_{д.мин} \cdot 10^{-3} ; \quad (2.7)$$

$$S_{маx} = U_{20.маx} I_{д.маx} \sqrt{\frac{\Pi\text{Н}}{100\%}} \cdot 10^{-3} , \quad (2.8)$$

Далее ведем расчет только по большему из S_{\max} и S_{\min} .

Определяем ЭДС одного витка, В:

$$e = 0,55 + 0,095S, \quad (2.9)$$

где S , кВт – большая из мощностей, определенных по 2.7, 2.8.

Число витков в первичной и вторичной обмотках в режиме максимальных токов

$$W_{11} = U_1 / e; \quad (2.10)$$

$$W_{21} = W_{22} = U_{20.\max} / e. \quad (2.11)$$

Коэффициент трансформации:

$$k_{\text{тр}} = W_{11} / W_{21}. \quad (2.12)$$

Число витков первичной обмотки в режиме минимальных токов:

$$W_1 = W_{11} + W_{12} + W_{13} = \left(\frac{U_1}{U_{20.\min}} \right) W_{21} \quad (2.13)$$

Количество витков в дополнительных первичных обмотках:

$$W_{12} = W_{13} = \frac{W_1 - W_{11}}{2} \quad (2.14)$$

Расчетные сечения проводников первичной и вторичной обмоток без изоляции, мм²:

$$q_{1p} = 1,11 \frac{I_{d.\text{дл}}}{k_{\text{тр}} j}; \quad (2.15)$$

$$q_{2p} = 0,707 \frac{I_{d.\text{дл}}}{j}, \quad (2.16)$$

где j , А/мм² - предварительное значение плотности тока, выбираемое в зависимости от условий охлаждения и класса нагревостойкости изоляции. Для медных проводов: $J=2,5 \dots 5,0$ А/мм²; $I_{d.\text{дл}}$ – длительно допустимый выпрямленный ток, А:

$$\text{При } S_{\max} > S_{\min}: \quad I_{d.\text{дл}} = I_{d.\max} \sqrt{\frac{\text{ПН}}{100\%}}. \quad (2.17)$$

$$\text{При } S_{\max} < S_{\min}: \quad I_{d.\text{дл}} = I_{d.\min}. \quad (2.18)$$

По расчетным сечениям q_{1p} и q_{2p} выбираем обмоточные провода из стандартного ряда (таблицы 2.1, 2.2 приложения 2).

При отсутствии провода нужного сечения для вторичной обмотки она выполняется из нескольких проводов меньшего сечения, число которых определяется по формуле:

$$n_2 = \frac{q_{2p}}{q_2}, \quad (2.19)$$

где q_2 – сечение выбранного провода.

Результаты расчета и выбора сводим в таблицу 2.

Таблица 2.1 – Параметры обмоточных проводов

Параметр	Обознач.	W_1	W_2
Марка провода	–		
Сечение голого проводника, мм ²	q_i		
Диаметр голого проводника, мм	d_i		
Диаметр проводника в изоляции, мм	$d_{i.из}$		
Сечение проводника в изоляции, мм ²	$q_{i.из}$		
Число элементарных проводников	-	1	

3. Расчет параметров магнитопровода

Основное сечение стержня магнитопровода, см²:

$$Q_c = \frac{U_1}{4,44 k_c f W_{11} B_m} 10^4, \quad (3.1)$$

где $k_c = 0,95...0,97$ – коэффициент заполнения сечения сталью; f – частота, Гц; B_m , – амплитуда магнитной индукции, Тл, (таблица 2.4 приложения 2).

Ширина магнитопровода (см. рис. 2.1), мм:

$$a_c = Q_c / b_c, \quad (3.2)$$

где b_c – ширина ленты из стандартного ряда: 54, 64, 72 мм.

Площадь окна магнитопровода, мм²:

$$Q_{ок} = \frac{q_{1из} W_1 + n_2 q_{2из} (W_{21} + W_{22})}{k_{ок}} \quad (3.3)$$

где $k_{ок} = 0,3 ... 0,4$ – коэффициент заполнения сечения окна.

Эскиз разреза трансформатора с указанием основных элементов конструкции приведен на рис. 3.1.

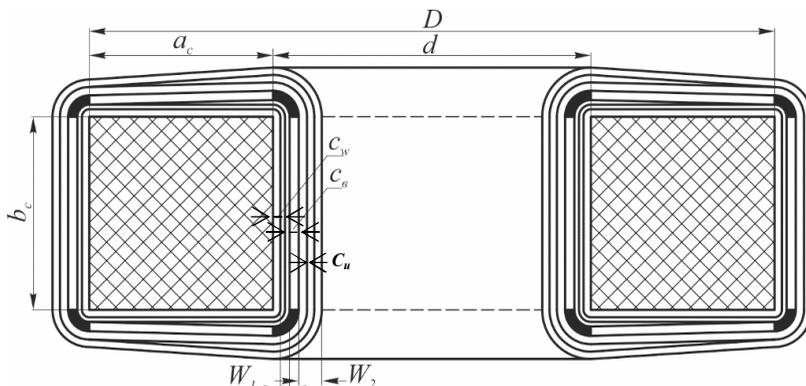


Рисунок 2.1 – Эскиз разреза трансформатора: b_c – принятая ширина ленты; a_c – ширина магнитопровода; c_w – толщина каркаса (расстояние между магнитопроводом и обмоткой); $c_в$ – ширина вентиляционных каналов; $c_{из}$ – толщина межслоевой изоляции

Внутренний и внешний диаметры сердечника, мм:

$$d = \sqrt{\frac{4Q_{ок}}{\pi}}; \quad D = d + 2a_c. \quad (3.4)$$

Вес тороидального сердечника, кг:

$$G_{ст} = k_c Q_{ст} \gamma_{ст} l_{cp} \cdot 10^{-3}, \quad (3.5)$$

где $\gamma_{ст} = 7,6 \text{ г/см}^3$ – удельный вес стали; $l_{cp} = \pi(D - a_c)$ – средняя длина магнитной линии сердечника, см.

Геометрические размеры различных элементов конструкции трансформатора сводим в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Геометрические размеры элементов конструкции

Параметр	Обозначение	Значение
Ширина ленты, мм	b_c	
Ширина магнитопровода, мм	a_c	
Толщина каркаса обмотки, мм	c_w	1,5 ... 2,0 мм
Межслоевая изоляция обмоток, мм	$c_{из}$	0,5 ... 1,0
Вентиляционные каналы, мм	$c_в$	6 ... 8

4. Расчет потерь и КПД трансформатора

Для расчета потерь и КПД трансформатора необходимо произвести расчет конструкции обмоток, определить их длину, сопротивление и вес меди. Кроме того, необходимо рассчитать вес магнитопровода, ток и потери холостого хода.

Эффективные (проводящие) суммарные сечения первичной и вторичной обмоток трансформатора, мм²:

$$Q_{м.1} = q_1 W_1; \quad (4.1)$$

$$Q_{м.2} = q_2 n_2 (W_{21} + W_{22}). \quad (4.2)$$

Количество витков во внутреннем и наружном слоях первичной обмотки:

$$N_{w1.внутр} = 0,95 \frac{\pi(d - 2c_w)}{d_{1.из}}; \quad (4.3)$$

$$N_{w1.наруж} = 0,95 \frac{\pi(D + 2c_w)}{d_{1.из}}. \quad (4.4)$$

Количество слоев внутренней и наружной частей первичной обмотки:

$$N_{сл.1.внутр} = \frac{W_1}{N_{w1.внутр}} \quad (4.5)$$

$$N_{сл.1.наруж} = \frac{W_1}{N_{w1.наруж}} \quad (4.6)$$

Длина внутренних и наружных витков первичной обмотки, мм:

$$l_{внутр.1} = 2(b_c + a_c) + 2\pi c_w; \quad (4.7)$$

$$l_{наруж.1} = l_{внутр.1} + 2\pi \left(d_{1.из} \left(\frac{N_{сл.1.внутр} + N_{сл.1.наруж}}{2} \right) + c_{из} \right). \quad (4.8)$$

Средняя длина витка первичной обмотки, мм:

$$l_{ср.1} = \frac{l_{внутр.1} + l_{наруж.1}}{2}. \quad (4.9)$$

Количество витков во внутреннем и наружном слоях вторичной обмотки:

$$N_{w2.внутр} = 0,95 \frac{\pi (d - 2(c_w + N_{сл.1.внутр} d_{1.из} + c_{из} + c_v))}{n_2 d_{2.из}}; \quad (4.10)$$

$$N_{w2.наруж} = 0,95 \frac{\pi (D + 2(c_w + N_{сл.1.наруж} d_{1.из} + c_{из} + c_v))}{n_2 d_{2.из}}. \quad (4.11)$$

Количество слоев внутренней и наружной частей вторичной обмотки:

$$N_{сл.2.внутр} = \frac{W_{21} + W_{22}}{N_{w2.внутр}}; \quad (4.12)$$

$$N_{сл.2.наруж} = \frac{W_{21} + W_{22}}{N_{w2.наруж}}. \quad (4.13)$$

Длина внутренних и наружных витков вторичной обмотки, мм:

$$l_{внутр.2} = l_{наруж.1} + 2\pi c_v. \quad (4.14)$$

$$l_{наруж.2} = l_{внутр.2} + 2\pi \left(d_{2.из} \left(\frac{N_{сл.2.внутр} + N_{сл.2.наруж}}{2} \right) + c_{из} \right). \quad (4.15)$$

Средняя длина витка вторичной обмотки, мм:

$$l_{ср.2} = \frac{l_{внутр.2} + l_{наруж.2}}{2}. \quad (4.16)$$

Вес первичной и вторичной обмоток трансформатора, кг:

$$\begin{aligned} G_{м.1} &= \gamma_m Q_{м.1} I_{ср.1} \cdot 10^{-6}; & G_{м.2} &= \gamma_m Q_{м.2} I_{ср.2} \cdot 10^{-6}; \\ G_m &= G_{м.1} + G_{м.2}. \end{aligned} \quad (4.17)$$

где $\gamma_m = 8,89$ г/см³ – удельный вес меди.

Активное сопротивление первичной обмотки в режимах максимального и минимального токов, Ом:

$$r_{1(max)} = 1,05 \frac{\rho_{cu} l_{ср.1} W_{11}}{q_1} 10^{-3}; \quad (4.18)$$

$$r_{1(min)} = 1,05 \frac{\rho_{cu} l_{ср.1} (W_{11} + W_{12} + W_{13})}{q_1} 10^{-3}. \quad (4.19)$$

Активное сопротивление одной вторичной обмотки, Ом:

$$r_2 = r_{21} = r_{22} = 1,05 \frac{\rho_{\text{cu}} I_{\text{cp},2} W_{21}}{n_2 q_2} \cdot 10^{-3}. \quad (4.20)$$

где $\rho = 0,02135$, Ом*мм²/м – удельное сопротивление меди.

Потери в обмотках трансформатора в расчетном режиме, Вт:

$$\Delta P_{\text{эл.1(дл)}} = \left(\frac{I_{\text{д.дл}}}{k_{\text{тр(дл)}}} \right)^2 r_{1(\text{дл})} \quad (4.21)$$

Потери во вторичных обмотках трансформатора в режимах максимального и минимального токов, Вт:

$$\Delta P_{\text{эл.21}} = \Delta P_{\text{эл.22}} = (0,707 I_{\text{д.дл}})^2 r_2. \quad (4.23)$$

Потери в стали, Вт:

$$\Delta P_{\text{ст}} = \Delta P_{B_n} G_{\text{ст}} \left(\frac{B_m}{B_n} \right)^2. \quad (4.25)$$

ΔP_{B_n} – удельные потери в стали при нормируемой индукции B_n , (таблица 2.4 приложения 2), Вт/кг; B_m - принятое значение магнитной индукции, Тл.

Коэффициент полезного действия трансформатора в режиме максимального тока:

$$\eta = \frac{S_{\text{max}}}{S_{\text{max}} + \Delta P_{\text{эл.1(дл)}} + 2\Delta P_{\text{эл.21(дл)}} + \Delta P_{\text{ст}}}. \quad (4.26)$$

Активная и реактивная составляющие тока холостого хода, А:

$$I_{\text{xx.a}} = \frac{\Delta P_{\text{ст}}}{U_1}; \quad I_{\text{xx.p}} = \frac{H_m I_{\text{cp}}}{\sqrt{2} W_{11}}, \quad (4.27)$$

где H_m – напряженность магнитного поля при выбранной индукции, А/см (таблица 2.4 приложения 2); I_{cp} – средняя длина магнитной линии сердечника, см (п. 3.5).

Полный ток холостого хода, и его относительное значение, %:

$$I_{\text{xx}} = \sqrt{I_{\text{xx.a}}^2 + I_{\text{xx.p}}^2}; \quad I_{\text{xx}} \% = \frac{I_{\text{xx}} k_{\text{тр}}}{I_{\text{д.дл}}} 100\%. \quad (4.28)$$

Работа № 5

Исследование характеристик трехфазного трансформатора при несимметричной нагрузке

Цель работы: освоить методы определения сопротивления нулевой последовательности и расчета характеристик трехфазных трансформаторов при несимметричной нагрузке

1. Общие теоретические положения

Нагрузка трехфазных трансформаторов в электрических сетях характеризуется значительной несимметрией, которая отрицательно влияет на их характеристики и качество электроэнергии.

Анализ несимметричных режимов основан на *методе симметричных составляющих* (МСС), согласно которому несимметричную систему любых трехфазных переменных $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}$ можно представить в виде симметричных систем прямой $(\bar{A}_1, \bar{B}_1, \bar{C}_1)$, обратной $(\bar{A}_2, \bar{B}_2, \bar{C}_2)$, и нулевой $(\bar{A}_0, \bar{B}_0, \bar{C}_0)$ последовательностей. Векторы прямой последовательности равны по модулю, сдвинуты по фазе на $\pm 120^\circ$, вращаются в прямом направлении, и равны:

$$\begin{cases} \bar{A}_1 = \frac{1}{3}(\bar{A} + a\bar{B} + a^2\bar{C}) \\ \bar{B}_1 = \frac{1}{3}(\bar{B} + a\bar{C} + a^2\bar{A}) \\ \bar{C}_1 = \frac{1}{3}(\bar{C} + a\bar{A} + a^2\bar{B}) \end{cases} \quad (1.1)$$

Векторы обратной последовательности также равны по модулю и сдвинуты между собой по фазе на $\pm 120^\circ$, но вращаются в обратном направлении. Они определяются следующим образом:

$$\begin{cases} \bar{A}_2 = \frac{1}{3}(\bar{A} + a^2\bar{B} + a\bar{C}) \\ \bar{B}_2 = \frac{1}{3}(\bar{B} + a^2\bar{C} + a\bar{A}) \\ \bar{C}_2 = \frac{1}{3}(\bar{C} + a^2\bar{A} + a\bar{B}) \end{cases} \quad (1.2)$$

Векторы нулевой последовательности всех фаз равны по модулям, совпадают по фазе, и определяются по формуле:

$$\bar{\mathbf{A}}_0 = \bar{\mathbf{B}}_0 = \bar{\mathbf{C}}_0 = \frac{1}{3}(\bar{\mathbf{A}} + \bar{\mathbf{B}} + \bar{\mathbf{C}}). \quad (1.3)$$

Все величины в выражениях (1.1) – (1.3) представляют собой комплексные числа. Умножение любого вектора на единичный оператор поворота $\mathbf{a} = \mathbf{e}^{j\frac{2\pi}{3}}$ равносильно его повороту на 120° против часовой стрелки, а умножение на $\mathbf{a}^2 = \mathbf{e}^{-j\frac{2\pi}{3}}$ – по часовой.

Для полного определения любой из симметричных систем достаточно вычислить симметричные составляющие каждой из последовательностей только для одной фазы.

Формулы обратных преобразований позволяют вычислить по известным симметричным составляющим векторы исходной системы:

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{A}} = \bar{\mathbf{A}}_1 + \bar{\mathbf{A}}_2 + \bar{\mathbf{A}}_0 \\ \bar{\mathbf{B}} = \bar{\mathbf{B}}_1 + \bar{\mathbf{B}}_2 + \bar{\mathbf{B}}_0 \\ \bar{\mathbf{C}} = \bar{\mathbf{C}}_1 + \bar{\mathbf{C}}_2 + \bar{\mathbf{C}}_0 \end{cases}. \quad (1.4)$$

Для каждой из симметричных систем напряжения, токи, сопротивления, активные, реактивные и полные мощности связаны между собой вполне определенным образом. Отношения симметричных составляющих фазных напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей к соответствующим симметричным составляющим токов называются комплексными сопротивлениями прямой, обратной и нулевой последовательностей. Каждая из симметричных систем токов вызывает соответствующие падения напряжения, которые равны:

$$\Delta\bar{\mathbf{U}}_1 = \bar{\mathbf{I}}_1 \mathbf{Z}_1; \quad \Delta\bar{\mathbf{U}}_2 = \bar{\mathbf{I}}_2 \mathbf{Z}_2; \quad \Delta\bar{\mathbf{U}}_0 = \bar{\mathbf{I}}_0 \mathbf{Z}_0. \quad (1.5)$$

где $\mathbf{Z}_1; \mathbf{Z}_2; \mathbf{Z}_0$ – сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей.

В общем случае: $\mathbf{Z}_1 \neq \mathbf{Z}_2 \neq \mathbf{Z}_0$, а значения их зависят от вида элемента системы электроснабжения или потребителя ЭЭ.

В трансформаторах: $\mathbf{Z}_1 = \mathbf{Z}_2 = \mathbf{Z}_k \neq \mathbf{Z}_0$. Сопротивление нулевой последовательности \mathbf{Z}_0 зависит от схемы соединения обмоток и конструкции трансформатора.

Вследствие несимметрии нагрузки система вторичных напряжений трансформатора искажается. Вторичные напряжения нагруженно трансформатора равны алгебраической разности напряжений в режиме холостого хода (которые считаем симметричными) и падений напряжения $\Delta\bar{U}_1$, $\Delta\bar{U}_2$ и $\Delta\bar{U}_0$ в каждой из фаз :

$$\begin{cases} \bar{U}_{2a} = \bar{U}_{20a} - \Delta\bar{U}_{2a(1)} - \Delta\bar{U}_{2a(2)} - \Delta\bar{U}_{2(0)} \\ \bar{U}_{2b} = \bar{U}_{20b} - \Delta\bar{U}_{2b(1)} - \Delta\bar{U}_{2b(2)} - \Delta\bar{U}_{2(0)} \\ \bar{U}_{2c} = \bar{U}_{20c} - \Delta\bar{U}_{2c(1)} - \Delta\bar{U}_{2c(2)} - \Delta\bar{U}_{2(0)} \end{cases} . \quad (1.6)$$

Симметричные составляющие падений напряжения по-разному действуют на исходную симметричную трехфазную систему напряжений \bar{U}_{20a} , \bar{U}_{20b} , \bar{U}_{20c} .

Симметричные составляющие прямой последовательности $\Delta\bar{U}_{2a(1)}$, $\Delta\bar{U}_{2b(1)}$, $\Delta\bar{U}_{2c(1)}$. одинаково изменяют напряжения всех фаз, не нарушая их симметрии (рис. 1.1 – а).

Симметричные составляющие обратной последовательности $\Delta\bar{U}_{2a(2)}$, $\Delta\bar{U}_{2b(2)}$, $\Delta\bar{U}_{2c(2)}$ искажают треугольник междуфазных напряжений, но не вызывают смещения нейтрали, которая совпадает с точкой пересечения его медиан (рис. 1.1 - б).

Составляющие нулевой последовательности $\Delta\bar{U}_{20}$ не влияют на междуфазные напряжения, но смещают нейтраль из точки «N» в точку «N'» и изменяют фазные напряжения (рис. 1.1 - в).

Второе следствие несимметрии нагрузки заключается в дополнительных потерях от протекания токов обратной и нулевой последовательностей, в результате чего суммарные потери увеличиваются:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_0 = 3I_1^2 r_1 + 3I_2^2 r_2 + 3I_0^2 r_0 . \quad (1.7)$$

Поскольку в трансформаторах $r_1 = r_2$ относительное увеличение суммарных потерь по сравнению симметричным режимом составляет:

$$\Delta P_{\Sigma}^* = \frac{\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_0}{\Delta P_1} = 1 + k_{21}^2 + k_{01}^2 \frac{r_0}{r_1} , \quad (1.8)$$

$k_{21} = I_2 / I_1$; $k_{01} = I_0 / I_1$ – модули коэффициентов несимметрии токов по обратной и нулевой последовательностям.

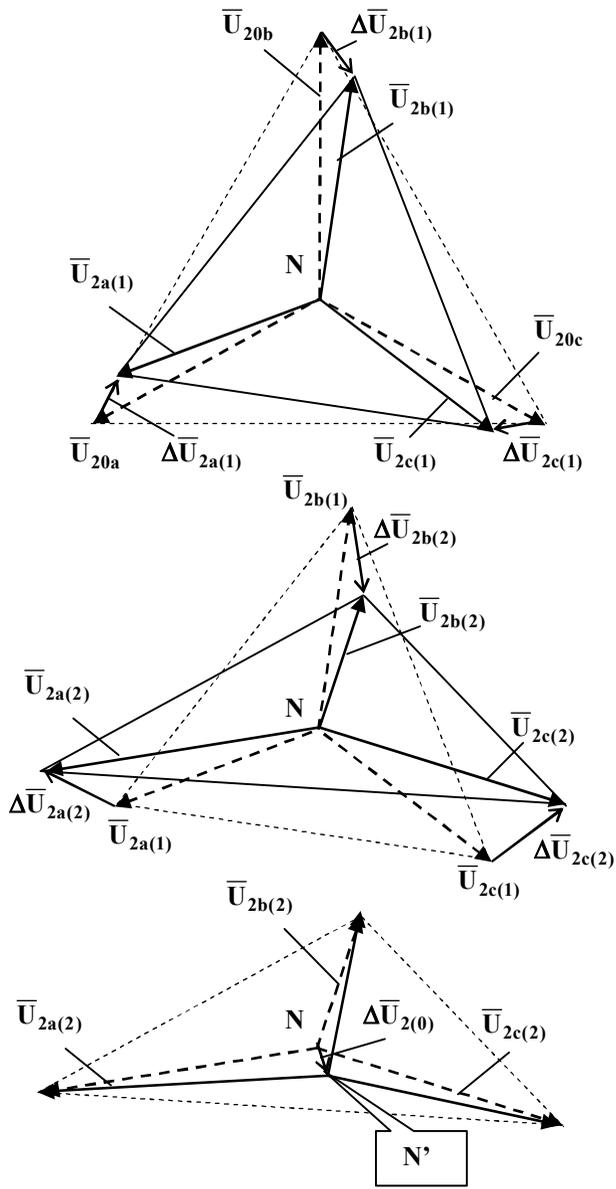


Рисунок 1.1 – Действие симметричных составляющих прямой (а), обратной (б), и нулевой последовательностей на исходную трехфазную симметричную систему напряжений

2. Экспериментальное определение сопротивлений нулевой последовательности

Поле нулевой последовательности трехфазных трансформаторов имеет сложную конфигурацию, поскольку совпадающие по фазе магнитные потоки не могут замыкаться по стержням, и пути их протекания зависят от конструкции бака, воздушных промежутков между различными элементами трансформатора, и других конструктивных параметров. По этой причине расчет сопротивлений нулевой последовательности сложен и дает неточные результаты. Значения сопротивлений нулевой последовательности силовых трансформаторов не приводятся в паспортных данных, и для их определения приходится прибегать к экспериментальным методам.

Определение сопротивлений нулевой последовательности опытным путем заключается в следующем. Три фазы вторичной обмотки, соединенной нормально в звезду с нулевым проводом, соединяют последовательно по схеме «открытого треугольника», к свободным выводам которого подводится напряжение U_0 (рис. 2.1).

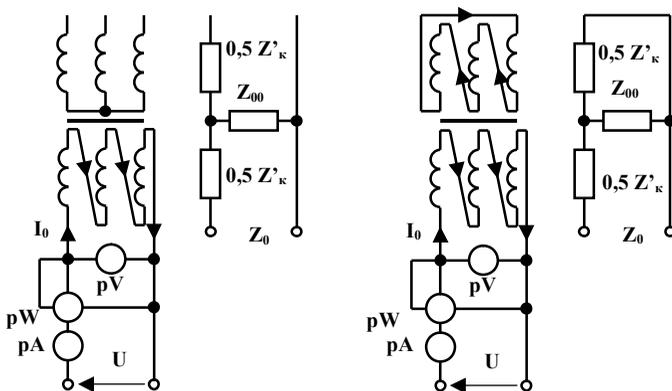


Рисунок 2.1 – Опытное определение сопротивлений нулевой последовательности и схемы замещения: а – соединение обмоток Y/Y_0 ; б – соединения обмоток Δ/Y_0

При соединении первичных обмоток в звезду (рис. 2.1 – а) однофазные токи нулевой последовательности в них не протекают. Из схемы замещения для этого случая видно, что полное сопротивление нулевой последовательности Z_0 определяется в основном сопротивлением контура намагничивания Z_{00} и потому весьма велико.

При соединении обмоток по схеме Δ/Y_0 (рис. 2.1 – б) токи нулевой последовательности протекают в первичных обмотках, и потому практически полностью уравнивают намагничивающие силы, создаваемые токами во вторичных обмотках. Характер поля в этом случае близок к полю при коротком замыкании. Из схемы замещения видно, что сопротивление контура намагничивания Z_{00} шунтируется малым сопротивлением короткого замыкания первичной обмотки, и полное сопротивление нулевой последовательности Z_0 невелико.

Полное, активное и индуктивное сопротивления нулевой последовательности приборов определяются на основании показаний приборов по формулам:

$$Z_0 \approx \frac{U_0}{3I_0}; \quad r_0 \approx \frac{P_0}{3I_0^2}; \quad x_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2}. \quad (2.1)$$

3.	Расчет внешних и энергетических характеристик при несимметрии нагрузки
----	--

При несимметричной нагрузке напряжения в фазах неодинаковы, особенно в трансформаторах со схемой соединения обмоток Y/Y_0 , имеющих большое сопротивление нулевой последовательности.

Расчет по уравнениям 1.5, 1.6 сложен, поскольку все входящие в них составляющие имеют комплексный характер.

Существенно упростить расчеты можно за счет допущения о том, что падения напряжения обратной последовательности пренебрежимо малы по сравнению с другими составляющими, что вполне оправдано при типичных для сельских электрических сетей значениях коэффициентов несимметрии токов $k_{21} \approx k_{01} = 0,2 \dots 0,3$.

Падения напряжения $\Delta U_{(0)}$, называемые также *смещением нейтральной*, во всех фазах равны между собой. При их расчете удобно пользоваться формулой:

$$\Delta \bar{U}_0 = \bar{I}_0 Z_0 = \bar{k}_{01} z^* \Delta \bar{U}_1, \quad (3.1)$$

где ΔU_1 – падение напряжения прямой последовательности (в симметричном режиме); $\bar{k}_{01} = \frac{\bar{I}_0}{\bar{I}_1}$, $z^* = \frac{Z_0}{Z_1}$ коэффициент несимметрии токов и сопротивление нулевой последовательности, выраженные в относительных единицах.

Падение напряжения прямой последовательности является функцией коэффициента загрузки β и определяется по формуле:

$$\Delta U_1 = U_{20} u_k \cos(\varphi_k - \varphi_2) \beta, \quad (3.2)$$

где $U_{20} = \frac{U_{20\text{м.ф.}}}{\sqrt{3}}$ - фазное напряжение на выводах вторичной обмотки при холостом ходе; u_k и $\varphi_k = \arctg \frac{x_k}{r_k}$ - номинальное напряжение и фазовый угол короткого замыкания трансформатора; φ_2 - фазовый угол нагрузки; $\beta = \frac{I_2}{I_{2\text{ном}}}$ - коэффициент загрузки.

В симметричном режиме внешняя характеристика, которая представляет собой зависимость напряжения на выводах вторичной обмотки от коэффициента загрузки, описывается уравнением:

$$U_{2(1)} = U_{20}(1 - \beta u_k \cos(\varphi_k - \varphi_2)) = U_{20} - \Delta U_1. \quad (3.3)$$

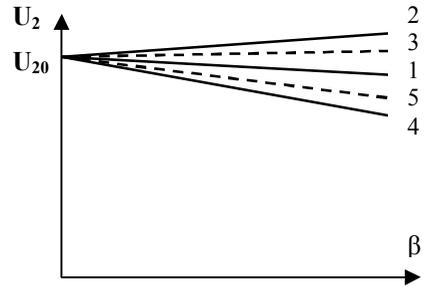
При расчете внешних характеристик в несимметричном режиме необходимо вновь учитывать комплексный характер падений напряжения $\Delta \bar{U}_1$ и $\Delta \bar{U}_0$, однако, задачу можно упростить, если рассчитать пределы, в которых могут изменяться наибольшее (нб), среднее (ср), и наименьшее (нм) из фазных напряжений:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{2(1)} + \Delta U_0 \geq U_{2\text{нб}} \geq \sqrt{U_{2(1)}^2 + \Delta U_0^2 + U_{2(1)} \Delta U_0} \\ \sqrt{U_{2(1)}^2 + \Delta U_0^2 + U_{2(1)} \Delta U_0} \geq U_{2\text{ср}} \geq \sqrt{U_{2(1)}^2 + \Delta U_0^2 - U_{2(1)} \Delta U_0} \\ \sqrt{U_{2(1)}^2 + \Delta U_0^2 - U_{2(1)} \Delta U_0} \geq U_{2\text{нм}} \geq U_{2(1)} - \Delta U_0 \end{array} \right. \quad (3.4)$$

Если по формулам 3.1, 3.2 рассчитать ΔU_1 и ΔU_0 , а по формуле 3.3 – внешнюю характеристику в симметричном режиме, то, с помощью системы уравнений 3.4 можно изобразить внешние характеристики при несимметричной нагрузке в виде интервалов возможных значений наибольшего, среднего и наименьшего из фазных напряжений. Т.о. устраняется необходимость в использовании аргумента, что существенно упрощает задачу.

Примерный вид внешних характеристик трехфазного трансформатора при несимметричной нагрузке показан на рис. 3.1.

Рисунок 3.1 - Примерный вид внешних характеристик трансформатора при несимметричной нагрузке: 1 – в симметричном режиме; 2 - 3 – диапазон изменения наибольшего из напряжений; 4 - 5 – диапазон изменения наименьшего из напряжений



Основной энергетической характеристикой трансформаторов является зависимость КПД от коэффициента загрузки: $\eta = f(\beta)$.

При симметричной нагрузке эта зависимость выражается известной формулой:

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P_0 + \beta^2 \Delta P_{\text{к.ном}}}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + \Delta P_0 + \beta^2 \Delta P_{\text{к.ном}}}, \quad (3.5)$$

где ΔP_0 и $\Delta P_{\text{к.ном}}$ – номинальные потери холостого хода и короткого замыкания соответственно; $S_{\text{ном}}$ – номинальная мощность трансформатора; $\cos \varphi_2$ – коэффициент мощности нагрузки.

При несимметрии нагрузочные потери возрастают в соответствии с выражением 1.8, и формула для определения КПД изменяется:

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P_0 + \left(1 + k_{21}^2 + k_{20}^2 \frac{r_0}{r_1}\right) \beta^2 \Delta P_{\text{к.ном}}}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + \Delta P_0 + \left(1 + k_{21}^2 + k_{20}^2 \frac{r_0}{r_1}\right) \beta^2 \Delta P_{\text{к.ном}}}, \quad (3.6)$$

Примерный вид энергетических характеристик трансформатора при несимметричной нагрузке показан на рис. 3.2.

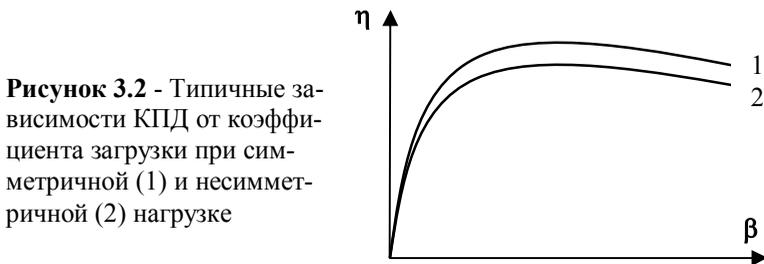


Рисунок 3.2 - Типичные зависимости КПД от коэффициента загрузки при симметричной (1) и несимметричной (2) нагрузке

4. Указания по выполнению работы

- 4.1. Выписать необходимые для расчета данные трансформатора. Подготовить таблицу для записи показаний приборов и расчетных значений при определении сопротивления нулевой последовательности для схем соединения обмоток Y/Y_0 и Δ/Y_0

Y/Y_0						Δ/Y_0					
U_0	I_0	P_0	Z_0	r_0	x_0	U_0	I_0	P_0	Z_0	r_0	x_0

- 4.2. Установить с помощью фазорегулятора минимальное напряжение. Собрать схему, приведенную на рис. 2.1 – а. Плавно увеличивая напряжение, снять несколько замеров в диапазоне токов $0,5 - 1,5 I_{ном}$. Рассчитать по формулам (2.1) сопротивления нулевой последовательности для схемы соединения обмоток Y/Y_0 .
- 4.3. Установить с помощью фазорегулятора минимальное напряжение. Собрать схему, приведенную на рис. 2.1– б). Плавно увеличивая напряжение, снять несколько замеров в диапазоне токов $0,5 - 1,5 I_{ном}$. Рассчитать по формулам (2.1) сопротивления нулевой последовательности для схемы Δ/Y_0 .
- 4.4. Сравнить значения сопротивлений нулевой последовательности для схем соединения обмоток Y/Y_0 и Δ/Y_0 . Сделать вывод.
- 4.5. Получить у преподавателя индивидуальное задание на расчет. Выписать из приложения П. 1 необходимые для расчета данные.
- 4.6. Рассчитать по формулам 3.1 – 3.4 падения напряжения ΔU_1 , ΔU_0 , и внешние характеристики в симметричном режиме, максимальные и минимальные значения наибольшего и наименьшего из напряжений при несимметричной нагрузке. Результаты расчета занести в таблицу. Построить внешние характеристики.

β		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
ΔU_1								
ΔU_0								
$U_{2(I)}$								
$U_{2нб}$	max							
	min							
$U_{2нм}$	max							
	min							

- 4.7. Рассчитать по формулам 3.5 и 3.6 энергетические характеристики трансформатора при симметричной и при несимметричной нагрузке. Результаты расчета занести в таблицу. Построить энергетические характеристики.

β	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
$\eta_{\text{сим.}}$							
$\eta_{\text{несм.}}$							

- 4.8. Проанализировать полученные результаты. Сделать выводы. Оформить отчет.

Контрольные вопросы

1. Пояснить суть метода симметричных составляющих.
2. Почему расчет несимметричных режимов необходимо производить для каждой из симметричных систем отдельно?
3. Как несимметрия нагрузки влияет на междуфазные и фазные напряжения во вторичных обмотках трансформатора?
4. Как несимметрия нагрузки влияет на потери мощности в трансформаторах?
5. Что такое смещение нейтрали? От чего оно зависит и каким образом влияет на фазные напряжения?
6. Каким образом определяются сопротивления нулевой последовательности по результатам экспериментальных исследований?
7. Почему и каким образом схемы соединения обмоток трехфазных трансформаторов влияют на сопротивление нулевой последовательности?
8. В чем заключаются особенности внешних характеристик трехфазных трансформаторов при несимметричной нагрузке?
9. Как влияет на КПД трансформатора несимметрия нагрузки?
10. Почему сопротивление нулевой последовательности оказывает наибольшее влияние на падения напряжения и КПД трансформаторов со схемой соединения обмоток Y/Y_0 ?

Работа № 6

Исследование трехфазного автотрансформатора

Цель работы: определить коэффициент выгодности автотрансформатора и проверить выполнение баланса мощностей

1. Общие теоретические сведения

Автотрансформатором (АТ) называется трансформатор, у которого обмоткой низкого напряжения является часть обмотки высокого напряжения. У понижающих АТ обмоткой высокого напряжения (ВН) является первичная обмотка, а вторичное напряжение снимается с части ее витков (рис.1.1-а), у повышающих АТ к части витков подводится первичное напряжение, а обмоткой ВН является вторичная обмотка (рис. 1.1-б). Гальваническая связь обмоток является главной особенностью АТ, определяющей их основные особенности и характеристики.

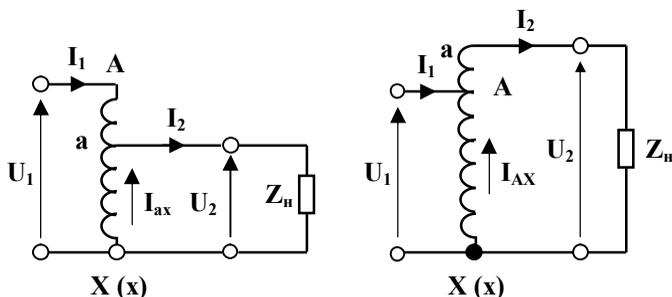


Рисунок 1.1 – Схемы понижающего (а) и повышающего (б) автотрансформаторов

Режим холостого хода автотрансформаторов ничем не отличается от режима холостого хода обычных трансформаторов, а коэффициент трансформации равен:

$$k_{AT} = \frac{W_{AX}}{W_{ax}} = \frac{U_1}{U_{2(0)}} = \frac{U_{2(0)} \pm \Delta U}{U_{2(0)}}, \quad (1.1)$$

где $U_{2(0)}$ - вторичное напряжение в режиме холостого; ΔU - надбавка напряжения (положительная для понижающих, и отрицательная - для повышающих АТ).

Главное достоинство автотрансформаторов заключается в том, что они рассчитываются не на всю мощность нагрузки, а только на ее часть, которая называется *типовой*, или *расчетной* мощностью, и представляет собой мощность, сообщаемую нагрузке посредством электромагнитного поля. Расчетная мощность АТ определяется произведением напряжения на ток в общей части обмотки.

Для понижающих АТ:

$$S_{ЭМ} = U_{ax} I_{ax} = U_2 I_{ax}, \quad (1.2)$$

для повышающих АТ:

$$S_{ЭМ} = U_{AX} I_{AX} = U_1 I_{AX} \quad (1.3)$$

Проходная мощность АТ, равная мощности нагрузки, передается не только посредством электромагнитного поля, но и за счет гальванической связи между обмотками, и состоит из двух частей:

$$S_{прох} = U_2 I_2 = U_2 (I_1 + I_{ax}) = U_2 \frac{I_2}{k_{АТ}} + U_2 I_2 \left(1 - \frac{1}{k_{АТ}} \right). \quad (1.4)$$

Первая часть этого уравнения представляет собой электрическую мощность, а вторая часть – электромагнитную мощность, которая и является расчетной мощностью АТ. Величина, равная отношению расчетной мощности к мощности нагрузки называется коэффициентом выгоды:

$$\frac{S_{АТ}}{S_{нагр.}} = \left(1 - \frac{1}{k_{АТ}} \right) = 1 - \frac{U_{2(0)}}{U_{2(0)} \pm \Delta U}. \quad (1.5)$$

Чем меньше это отношение, тем меньше расчетная мощность, а следовательно и расход материалов, и массо-габаритные показатели АТ. При $k_{АТ} = 1$ ($\Delta U = 0$) вся мощность сообщается нагрузке непосредственно из сети, и расчетная мощность АТ равна нулю.

Коэффициент выгоды определяет и другие параметры автотрансформаторов. Ток в общей части обмотки (I_{ax} или I_{AX}) является частью тока нагрузки:

$$I_{ax} = I_2 \left(1 - \frac{1}{k_{АТ}} \right), \quad (1.6)$$

поэтому сечение провода в ней можно выбирать меньше, чем во вторичной обмотке обычного трансформатора. Пропорционально коэффициенту выгоды изменяются также сопротивления, потери, и напряжение короткого замыкания автотрансформатора по сравнению с обычными трансформаторами:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{r}'_{кАТ} = \mathbf{r}'_к \left(1 - \frac{1}{k_{АТ}} \right) \\ \mathbf{x}'_{кАТ} = \mathbf{x}'_к \left(1 - \frac{1}{k_{АТ}} \right) \\ \Delta P_{к.АТ} = \Delta P_к \left(1 - \frac{1}{k_{АТ}} \right) \\ \mathbf{u}_{кАТ} = \mathbf{u}_к \left(1 - \frac{1}{k_{АТ}} \right) \end{array} \right. \quad (1.7)$$

Главными достоинствами автотрансформаторов, которые имеют место при $k_{АТ} = 1,0 - 2,0$, являются их меньшие вес, стоимость, и более высокий КПД по сравнению с обычными трансформаторами.

В то же время они обладают существенными недостатками. Вследствие гальванической связи между обмотками расчет изоляции обмотки низшего напряжения должен производиться по высшему напряжению. При обрыве цепи на общем участке обмотки, а также при коротком замыкании части первичной обмотки на участке «А» - «а» вторичное напряжение резко возрастает, что исключает возможность их применения для питания низковольтных потребителей. Автотрансформаторы крайне чувствительны к коротким замыканиям, поскольку ток к.з. увеличивается по сравнению с обычными трансформаторами обратно пропорционально коэффициенту выгоды. Вследствие этого в системах электроснабжения необходимо применять специальные дополнительные меры для их защиты.

Автотрансформаторы применяются в системах электроснабжения при относительно близких уровнях первичного и вторичного напряжений, в электроприводе, в лабораторных источниках питания (ЛАТРы – лабораторные автотрансформаторы), и других случаях.

2. Указания по выполнению работы

- 2.1. Собрать принципиальную схему (рис. 2.1) и, не подключая нагрузки измерить междуфазные первичные и вторичные напряжения. Рассчитать по формулам 1.1 и 1.4 коэффициент трансформации и коэффициент выгоды.

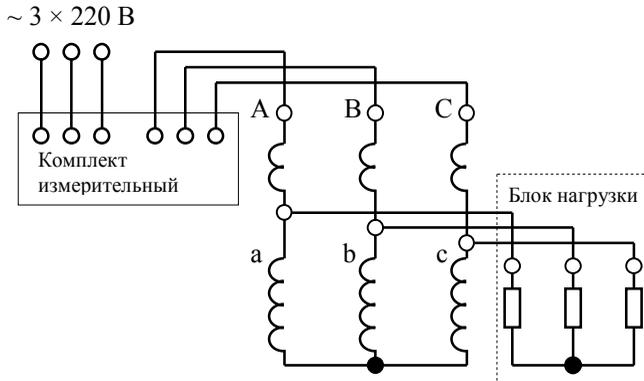


Рисунок 2.1 – Схема измерения входных параметров

- 2.2. Подготовить таблицу для записи показаний приборов

№ схемы	U_{cp}	I_{cp}	P_{Σ}
Рис. 2.1			
Рис. 2.2			
Рис. 2.3			

- 2.3. Подключить нагрузку и произвести измерения напряжения, тока и мощности на входе автотрансформатора.
- 2.4. Изменить схему подключения измерительного комплекта согласно схеме рис. 2.2 и произвести измерения напряжения, тока и электромагнитной мощности.
- 2.5. Подключить измерительный комплект согласно схеме рис. 2.3 и произвести измерения напряжения, тока и мощности нагрузки.
- 2.6. Пользуясь полученным в п. 2.1 значением коэффициента выгоды и формулами 1.4 – 1.6, проверить расчетным путем соответствие результатов измерений теоретическим положениям.
- 2.7. Сделать выводы. Оформить отчет о работе.

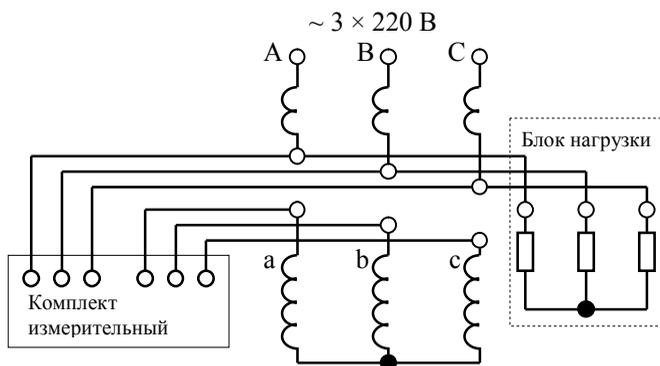


Рисунок 2.2 – Схема измерения электромагнитной мощности

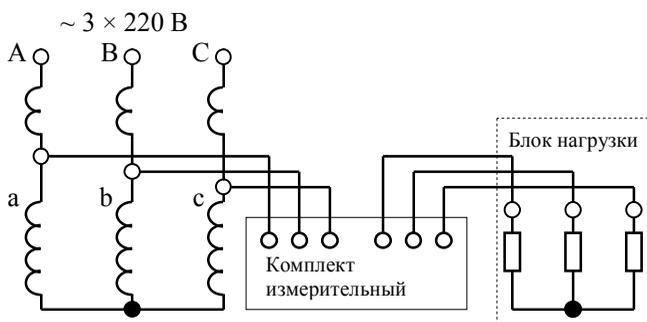


Рисунок 2.3 – Схема измерения параметров нагрузки

Контрольные вопросы

1. В чем заключаются основные отличия автотрансформаторов от трансформаторов?
2. Каким образом в автотрансформаторах происходит передача мощности от сети к нагрузке?
3. Что такое коэффициент выгоды и расчетная мощность автотрансформатора?
4. В чем заключаются преимущества автотрансформаторов перед трансформаторами?
5. В чем заключаются главные недостатки автотрансформаторов?
6. Где и при каких коэффициентах выгоды целесообразно применять автотрансформаторы?

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 3484.1 – 88. Трансформаторы силовые. Методы электромагнитных испытаний // М.: Изд-во стандартов, 1989.
2. ГОСТ Р 52719 – 2007. Трансформаторы силовые. Общие технические условия // М.: Стандартиформ, 2007.
3. ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения». М.: Стандартиформ, 2013.
4. Кобозев В.А. Электрические машины. Часть 1. Машины постоянного тока. Трансформаторы: учебное пособие /В.А. Кобозев. – Ставрополь: Сервисшкола, 2015. – 200 с.
5. Кобозев В.А. Расчет параметров и характеристик трансформаторов с ПБВ: учебное пособие для выполнения курсового проекта по дисциплине «Электрические машины» / В.А. Кобозев, М.А. Мельников. – Ставрополь: Сервисшкола. 2017. – 60 с.
6. Мельников М. А. Расчет трансформатора для сварочного выпрямителя : учебное пособие для выполнения курсового проекта по дисциплине «Электрические машины» / М.А. Мельников, В.А. Кобозев. – Ставрополь: Сервисшкола. 2017. – 64 с.
7. Параметры трансформаторов – Портал электриков // www.electricsite.net
8. Петров Г.И. Электрические машины. В 3-х частях. Ч.1. Введение. Трансформаторы / учебник для ВУЗов. М.: Энергия, 1974.
9. Расчет характеристик трансформаторов и электрических машин. Контрольные вопросы, расчетные задания и методические указания по дисциплине «Электрические машины» для студентов электроэнергетического факультета / составители В.В. Шевченко, Е.Ю. Юрьева, Д.В. Потоцкий / Под ред. проф. В.И. Милых – Харьков: НТУ «ХПИ», 2015.
10. Силовые трансформаторы: АБС Электро // www.abselectro.com
11. Электронный учебник «Электрические машины» / Кафедра электромеханики Московского энергетического института (технического университета). – 452 с. // [elmech.mpei.ac.ru > em/EM/EM_cont_ohtm](http://elmech.mpei.ac.ru/em/EM/EM_cont_ohtm)
12. Юндин М.А. Токовые защиты электрооборудования / Учебное пособие. Зерноград: РИО ФГОУ ВПО АЧГАА, 2004. – 212 с.

Приложение 1. Технические данные силовых трансформаторов

Таблица П.1.1 – Технические данные трансформаторов типа ТМ [5]

Тип трансформатора	Мощность, кВА	Сочетание напряжений, кВ		Потери, Вт			Иск, %	Ток ХХ, %
		ВН	НН	ХХ	КЗ	Суммарные		
ТМ-63	63	6; 10; 20	0,23; 0,4	255	1450	1705	4,0	2,5
		27,5; 35		265	1400	1665	4,5	
ТМ-100	100	6; 10; 20		320	1750	2070	4,0	2,3
		27,5; 35		320	1700	2020	4,5	
ТМ-160	160	6; 10; 20		460	2450	2910	4,0	2,1
		27,5; 35		460	2450	2910	4,5	
ТМ-250	250	6; 10; 20		650	3250	3900	4,0	2,0
		27,5; 35		650	3250	3900	4,5	
ТМ-400	400	6; 10; 20		930	4600	5530	4,0	1,9
		27,5; 35		930	4900	5830	4,5	
ТМ-630	630	6; 10; 20		1300	6500	7800	4,0	1,7
		27,5; 35		1160	6500	7660	6,0	
ТМ-1000	1000	6; 10; 20		1700	10500	12200		1,3
		27,5; 35		1400	10800	12200		
ТМ-1600	1600	6; 10; 20; 27,5; 35		2600	17000	19600		1,1
ТМ-2500	2500	6; 10; 20; 27,5; 35		2800	24000	26800	1,0	
ТМ-4000	4000	6; 10; 20; 27,5; 35	4200	29000	33200	0,9		

Примечания

1. ВН – обмотки высшего напряжения.
2. НН – обмотки низшего напряжения.
3. Значения потерь холостого хода (ХХ) и напряжения короткого замыкания (КЗ) указаны на основном ответвлении.

Таблица П.1.2 – Технические данные трансформаторов типа ТМГ [5]

Тип трансформатора	Мощность, кВА	Сочетание напряжений, кВ		Потери, Вт			Укз, %	Ток ХХ, %	
		ВН	НН	ХХ	КЗ	Суммарные			
ТМГ-63	63	6; 10; 20		0,23; 0,4	210	1300	1510	4,0	2,5
ТМГ-63		27,5; 35			265	1400	1665	4,5	
ТМГ-100	100	6; 10; 20			210	1750	1960	4,0	2,3
ТМГ-100		27,5; 35			320	1700	2020	4,5	
ТМГ-160	160	6; 10; 20			300	2000	2300	4,0	2,1
ТМГ-160		27,5; 35			460	2450	2910	4,5	
ТМГ-250	250	6; 10; 20			425	2750	3175	4,0	2,0
ТМГ-250		27,5; 35			650	3250	3900	4,5	
ТМГ-400	400	6; 10; 20			610	3850	4460	4,0	1,9
ТМГ-400		27,5; 35			930	4900	5830	4,5	
ТМГ-630	630	6; 10; 20			1240	7600	8840	5,5	1,7
ТМГ-630		27,5; 35			1160	6500	7660		
ТМГ-1000	1000	6; 10; 20; 27,5; 35			1600	10800	12400	5,5	1,3
ТМГ-1600	1600	6; 10; 20; 27,5; 35			2300	16500	18800	6,0	1,1
ТМГ-2500	2500	6; 10; 20; 27,5; 35			2800	24000	26800	6,0	1,0
ТМГ-4000	4000	6; 10; 20; 27,5; 35			4200	29000	33200	6,0	0,9

Примечания

1 ВН – обмотки высшего напряжения.

2 НН – обмотки низшего напряжения.

3 Значения потерь холостого хода (ХХ) и напряжения короткого замыкания (КЗ) указаны на основном ответвлении.

Таблица П.1.3 – Технические данные трансформаторов типа ТС и ТСЗ [5]

Тип трансформатора	Номинальная мощность, кВА	Номинальное напряжение, кВ		Схема и группа соединения обмоток	Коэффициент трансформации	Потери холостого хода	Потери короткого замыкания, Вт	Суммарные потери, Вт	Напряжение короткого замыкания, %	Ток холостого хода, %																														
		ВН	НН																																					
ТС-63	63	6; 10	0,4;	Y/Ун-0;	15;	280	1050	1330	4,0	2,4																														
ТСЗ-63																																								
ТС-100	100																																							
ТСЗ-100																																								
ТС-160	160																																							
ТСЗ-160																																								
ТС-250	250										0,23	Y/Δ-11;	25	950	3200	4150	4,0	1,7																						
ТСЗ-250																																								
ТС-400	400																		Y/ZN-11	26,09;	1300	4600	5900	4,0	1,4															
ТСЗ-400																																								
ТС-630	630	43,48			1750	6600	8350	6,0	1,2																															
ТСЗ-630																																								
ТС-1000	1000																											2200	10800	13000	6,0	0,9								
ТСЗ-1000																																								
ТС-1600	1600																																			3100	15600	18700	6,0	0,8
ТСЗ-1600																																								

Примечания

1. ВН – обмотки высшего напряжения.
2. НН – обмотки низшего напряжения.
3. Значения потерь холостого хода (ХХ) и напряжения короткого замыкания (КЗ) указаны на основном ответвлении.

Таблица П.1.4 – Отношения сопротивлений нулевой и прямой последовательности трансформаторов с различными схемами соединения обмоток [12]

Схема соединения обмоток	Средние значения $r^* = \frac{r_0}{r_1}$	Средние значения $x^* = \frac{x_0}{x_1}$
«Треугольник – звезда с нулем»	1	0,95
«Треугольник – зигзаг с нулем» и «звезда - зигзаг с нулем»	0,4	0,1
«Звезда – звезда с нулем»	9 - 11	6 - 8

Приложение 2. Параметры обмоточных проводов и характеристики магнитных материалов

Таблица 2.1 - Размеры и сечения круглых обмоточных проводов [6]

Сечение голого провода, q , мм ²	Диаметр голого провода, d , мм	Диаметр провода в изоляции, $d_{из}$, мм			
		ПЭЛ, ПЭТ	ПЭВ-2, ПЭТВ	ПБД	ПБ
0,785	1,00	1,070	1,11	1,27	1,30
0,850	1,04	1,115	1,15	1,31	1,34
0,916	1,08	1,155	1,19	1,35	1,38
0,985	1,12	1,195	1,23	1,39	1,42
1,057	1,16	1,235	1,27	1,43	1,46
1,130	1,20	1,280	1,31	1,47	1,50
1,210	1,25	1,330	1,36	1,52	1,55
1,330	1,30	1,380	1,41	1,57	1,60
1,430	1,35	1,430	1,46	1,62	1,65
1,540	1,40	1,480	1,51	1,67	1,70
1,650	1,45	1,530	1,56	1,72	1,75
1,770	1,50	1,580	1,61	1,77	1,80
1,910	1,56	1,640	1,67	1,83	1,86
2,060	1,62	1,700	1,73	1,89	1,92
2,210	1,68	1,760	1,79	1,95	1,98
2,370	1,74	1,820	1,85	2,01	2,04
2,570	1,81	1,890	1,93	2,08	2,11
2,770	1,88	1,960	2,00	2,15	2,18
2,990	1,95	2,030	2,07	2,22	2,25
3,200	2,02	2,100	2,14	2,29	2,32
3,460	2,10	2,180	2,23	2,37	2,40
4,020	2,26	2,340	2,39	2,53	2,56
4,650	2,44	2,520	2,57	2,71	2,74
5,480	2,63	–	–	–	2,93
6,290	2,83	–	–	–	3,13
7,310	3,05	–	–	–	3,35
8,410	3,28	–	–	–	3,58
9,690	3,58	–	–	–	3,88
11,34	3,80	–	–	–	4,10
13,20	4,10	–	–	–	4,40
15,90	4,50	–	–	–	4,80
18,09	4,80	–	–	–	5,10
19,63	5,00	–	–	–	5,30
21,22	5,20	–	–	–	5,50

Таблица 2.2 – Размеры и сечения прямоугольных обмоточных проводов [6]

a b	1,35	1,45	1,56	1,68	1,81	1,95	2,1	2,26	2,44	2,63	2,83
3,8	5,32	5,7	6,08	6,46	6,84	7,6	7,98	8,74	9,12	9,88	10,64
4,1	5,74	6,15	6,56	6,97	7,38	8,2	8,61	9,43	9,84	10,66	11,48
4,4	6,16	6,6	7,04	7,48	7,92	8,8	9,24	10,12	10,56	11,44	12,32
4,7	6,58	7,05	7,52	7,99	8,46	9,4	9,87	10,81	11,28	12,22	13,16
5,1	7,14	7,65	8,16	8,67	9,18	10,2	10,71	11,73	12,24	13,26	14,28
5,5	7,7	8,25	8,8	9,35	9,9	11	11,55	12,65	13,2	14,3	15,4
5,9	8,26	8,85	9,44	10,03	10,62	11,8	12,39	13,57	14,16	15,34	16,52
6,4	8,96	9,6	10,24	10,88	11,52	12,8	13,44	14,72	15,36	16,64	17,92
6,9	9,66	10,35	11,04	11,73	12,42	13,8	14,49	15,87	16,56	17,94	19,32
7,4	10,36	11,1	11,84	12,58	13,32	14,8	15,54	17,02	17,76	19,24	20,72
8,0	11,2	12	12,8	13,6	14,4	16	16,8	18,4	19,2	20,8	22,4
8,6	12,04	12,9	13,76	14,62	15,48	17,2	18,06	19,78	20,64	22,36	24,08
9,3	13,02	13,95	14,88	15,81	16,74	18,6	19,53	21,39	22,32	24,18	26,04
10,0			16	17	18	20	21	23	24	26	28
10,8					19,44	21,6	22,68	24,84	25,92	28,08	30,24
11,6							24,36	26,68	27,84	30,16	32,48
12,5							26,25	28,75	30	32,5	35
13,5									32,4	35,1	37,8
14,5									34,8	37,7	40,6
15,6											43,68
16,8											47,04

Примечания.

1. Медный провод имеет размеры *a* и *b* от 1,35×3,8 до 5,5×14,5 мм, а алюминиевый провод – от 1,81×4,1 до 7,0×18,0 мм.

2. Провода с эмалевой изоляцией марок ПЭВП, ПЭТВП, ПЭТП-155 выпускаются со следующими размерами: ПЭВП - от 0,5(0,63)×2,1(2,25) до 2,83(2,96)×5,3(5,47); ПЭТВП - от 0,8(0,94)×2,0(2,16) до 3,55(3,71)×12,5(12,7); ПЭТП-155 - от 0,8(0,94)×2,0(2,16) до 2,0(2,16)×5,6(5,8). В скобках указаны размеры проводов в изоляции.

3. Провода со стекловолоконистой изоляцией выпускаются со следующими размерами: ПСД - от 0,9×2,1 до 5,5×12,5 при толщине изоляции 0,135 – 0,2; ПСД-Л - от 0,9×2,1 до 5,5×12,5 при толщине изоляции 0,17 – 0,25; ПСДКТ - от 0,9×2,1 до 3,55×10,0 при толщине изоляции 0,11 – 0,16.

Таблица 2.3 - Характеристики изотропных электротехнических сталей [6]

Марка стали	Толщина листа, мм	Удельные потери, Вт/кг		Магнитная индукция, Т, при напряжённости поля, кА/м				
		P _{1,0/50}	P _{1,5/50}	1,0	2,5	5,0	10,0	30,0
1212	1,0	5,4	12,5	-	1,53	1,62	1,76	2,0
	0,65	3,4	8,0	-	1,5	1,62	1,75	1,98
	0,5	3,1	7,2	-	1,5	1,62	1,75	1,98
1213	0,5	2,8	6,5	-	1,5	1,62	1,75	1,98
1313	0,5	2,1	4,6	-	1,48	1,59	1,73	1,95
1413	0,5	1,55	3,5	-	1,48	1,59	1,73	1,94
	0,35	1,35	3,0	-	1,48	1,59	1,73	1,94
1513	0,5	1,25	2,9	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89
	0,35	1,05	2,05	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89
2112	0,5	2,6	6,0	1,46	1,6	1,68	1,77	2,02
2212	0,5	2,2	5,0	1,42	1,6	1,68	1,77	2,0
2312	0,5	1,75	4,0	1,4	1,56	1,66	1,74	1,96
2412	0,5	1,3	3,1	1,35	1,5	1,6	1,7	1,95
	0,35	1,15	2,5	1,35	1,5	1,6	1,7	1,95

Таблица 2.4 - Характеристики холоднокатаных анизотропных электротехнических сталей [6]

Марка стали	Толщина листа, мм	Удельные потери, Вт/кг			Магнитная индукция, Т, при напряжённости поля, кА/м		
		P _{1,0/50}	P _{1,5/50}	P _{1,7/50}	0,1	0,25	2,5
3411	0,5	1,1	2,45	3,2	-	-	1,75
	0,35	0,8	1,75	2,5	-	-	1,75
3412	0,5	0,95	2,1	2,8	-	-	1,85
	0,35	0,7	1,5	2,2	-	-	1,85
3413	0,5	0,8	1,75	2,5	-	-	1,85
	0,35	0,6	1,3	1,9	-	-	1,85
	0,3	-	1,19	1,75	-	-	1,85
3414	0,5	0,7	1,5	2,2	1,6	1,7	1,85
	0,35	0,5	1,1	1,6	1,6	1,7	1,85
	0,3	-	1,03	1,5	1,6	1,7	1,85
3415	0,35	0,46	1,03	1,5	1,61	1,71	1,85
	0,3	-	0,97	1,4	1,61	1,71	1,85

СО Д Е Р Ж А Н И Е

Введение	3
Общие методические указания	4
Работа №1. Определение параметров трехфазного трансформатора по опытам холостого хода и короткого замыкания	8
Работа № 2. Расчет параметров схемы замещения, внешних и энергетических характеристик трансформаторов	16
Работа № 3. Исследование схем и групп соединения обмоток трехфазных трансформаторов	23
Работа № 4. Расчет трансформатора для сварочного выпрямителя	33
Работа № 5. Исследование характеристик трехфазного трансформатора при несимметричной нагрузке	41
Работа № 6. Исследование трехфазного автотрансформатора	51
Литература	56
Приложение 1. Технические данные силовых трансформаторов	57
Приложение 2. Параметры обмоточных проводов и характеристики магнитных материалов	61