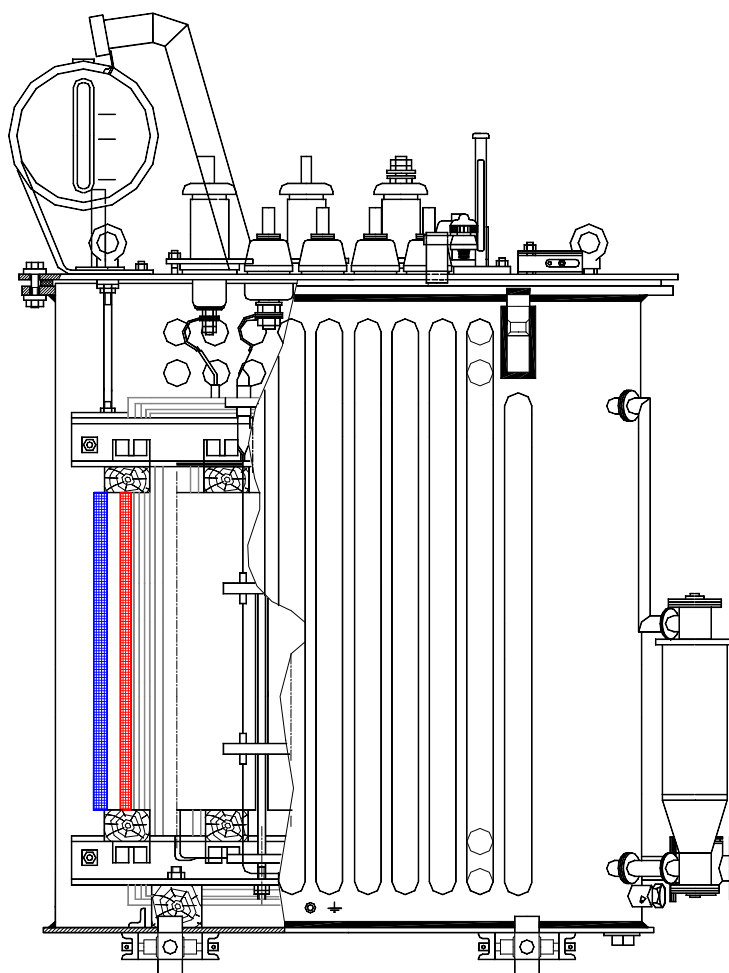


*Е.И. Забудский*

# Электрические машины

## Часть 1. ТРАНСФОРМАТОРЫ



МОСКВА \* 2002 \* МГАУ

ISBN 5-86785-104-4

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Московский государственный агроинженерный университет  
имени В.П. Горячкина

*Е.И. Забудский*

# **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ**

*Часть первая*

## **ТРАНСФОРМАТОРЫ**

*Допущено Министерством сельского хозяйства Российской Федерации  
в качестве учебного пособия для студентов  
высших сельскохозяйственных учебных заведений  
по специальности 311400 – Электрификация и автоматизация  
сельского хозяйства*

**Москва 2002**

ББК 31.261.8  
УДК 621.314  
**3 12**

Рецензенты:

кафедра “Электротехника и компьютеризированные электромеханические системы” Московской государственной Академии автомобильного и транспортного машиностроения (МАМИ), зав. кафедрой,  
Президент АЭН РФ, д-р. техн. наук, проф. *Б.И. Петленко*;  
кафедра “Энергообеспечение АПК” Орловского государственного аграрного университета, зав. кафедрой, д-р техн. наук, проф. *В.Г. Васильев*;  
академик АЭН РФ, д-р. техн. наук, проф. кафедры “Электромеханика” Московского энергетического института (ТУ) *И.П. Копылов*

**Забудский Е.И.**

312 Электрические машины. Ч. 1. Трансформаторы. Учебное пособие для вузов. – Москва: МГАУ, 2002. – 167 с.

ISBN 5-86785-104-4

Книга является первой частью учебного пособия по курсу “Электрические машины”. В ней рассматриваются в соответствии с утвержденной программой: принципы устройства и основные вопросы теории трансформаторов; режимы работы, характеристики, эксплуатационные свойства трансформаторов и их экспериментальное исследование. Также изложены устройство, основы теории и области применения специальных трансформаторов, а именно – умножителей частоты, насыщающихся и управляемых реакторов.

Предназначается для студентов электроэнергетических и электромеханических специальностей вузов. Будет полезной для аспирантов соответствующих специальностей.

ISBN 5-86785-104-4

© Забудский Е.И., 2002  
© Московский государственный  
агроинженерный университет  
имени В.П. Горячкина, 2002

## Содержание

Введение .....	4
1. Термины и определения .....	6
1.1. Общие понятия .....	6
1.2. Виды трансформаторов .....	6
1.3. Магнитная система трансформатора .....	7
1.4. Обмотки трансформатора .....	8
1.5. Изоляция трансформатора .....	8
1.6. Отдельные части трансформатора .....	9
1.7. Детали конструкции и параметры частей трансформатора .....	9
1.8. Режимы и процессы .....	11
1.9. Параметры трансформатора .....	11
1.9.1. Общие параметры .....	11
1.9.2. Номинальные данные трансформатора .....	12
2. Буквенные обозначения элементов в электрических схемах .....	13
3. Обозначение выводов и ответвлений силовых трансформаторов .....	14
4. Условное обозначение трансформаторов .....	16
5. Номинальные данные и устройство исследуемого трансформатора .....	18
6. Работа № 1. Трехфазный двухобмоточный трансформатор .....	20
7. Работа № 2. Параллельная работа трехфазных трансформаторов .....	37
8. Работа № 3. Несимметричная нагрузка трехфазных трансформаторов .....	54
9. Работа № 4. Исследование явлений, возникающих при намагничивании магнитопровода трансформатора .....	67
Список литературы .....	95
URL-адреса предприятий, производящих электрические машины и трансформаторы .....	96
URL-адрес РАО ЕЭС “Россия” .....	96
Приложение 1. Паскаль-программа “Расчет характеристик холостого хода трансформатора” .....	97
Приложение 2. Трансформаторы специального назначения * .....	100
Приложение 3. Форма отчета по лабораторной работе (образец оформления) .....	139
Пример построения графика .....	152
Приложение 4. Примерная программа дисциплины “Электрические машины” .....	153
Приложение 5. Фотографии стенда «Трансформатор» .....	166

\* Тематика данного раздела предлагается для УИРС и НИРС.

## ***Введение***

Трансформаторы – это электромагнитные статические преобразователи электрической энергии, не имеющие вращающихся частей. В принципе их действия и устройстве есть много общего с вращающимися электрическими машинами, в частности с асинхронными. Основное назначение трансформаторов – изменять напряжение переменного тока. Они применяются также для преобразования числа фаз и частоты. Наибольшее распространение имеют силовые трансформаторы напряжения.

Для передачи электрической энергии необходимо *повысить* напряжение турбогенераторов и гидрогенераторов, установленных на электростанциях, с 16...24 кВ до значений 110, 150, 220, 330, 500, 750 и 1150 кВ, используемых в линиях передачи. Затем, для распределения и использования энергии в промышленности, сельском хозяйстве и быту необходимо *понизить* напряжение до 35; 10; 6; 3; 0,66; 0,38 и 0,22 кВ. Так как в энергетических системах имеет место многократная трансформация, мощность трансформаторов в 7...10 раз превышает установленную мощность генераторов на электростанциях.

По числу фаз трансформаторы делятся на одно-, двух-, *трех-* и многофазные. Силовые трансформаторы выпускаются в основном в трехфазном исполнении на частоту 50 Гц.

Трансформаторы имеют две или несколько обмоток, индуктивно связанных друг с другом. Обмотки, потребляющие энергию из сети, называются *первичными*. Обмотки, отдающие электрическую энергию потребителю, – *вторичными*.

Трехфазные трансформаторы имеют обмотки, соединенные в трехлучевую звезду (*Y*), треугольник (*Δ*) или зигзаг (*Z*).

В зависимости от соотношения напряжений на первичной и вторичной обмотках трансформаторы делятся на *повышающие* и *понижающие*. В повышающем трансформаторе первичная обмотка имеет низкое напряжение, а вторичная – высокое. В понижающем трансформаторе, наоборот, вторичная обмотка имеет низкое напряжение, а первичная – высокое.

Трансформаторы, имеющие одну первичную и одну вторичную обмотки, называются *двухобмоточными*. Достаточно широко распространены *трехобмоточные* трансформаторы, имеющие на каждую фазу три обмотки, например: две на стороне низкого напряжения, одну – на стороне высокого напряжения (или наоборот). Многофазные трансформаторы могут иметь несколько обмоток высокого и низкого напряжения.

По конструкции силовые трансформаторы делят на два основных типа – *масляные* и *сухие*. В масляных трансформаторах магнитопровод с обмотками находится в баке, заполненном трансформаторным маслом, которое является хорошим изолятором и охлаждающим агентом. Сухие трансформаторы охлаждаются воздухом. Их используют для жилых и промышленных помещений, в которых эксплуатация масляного трансформатора является нежелательной. Трансформаторное масло является горючим, и при нарушении герметичности

бака масло может повредить другое оборудование.

Наряду с трансформаторами широко применяются **автотрансформаторы**, в которых имеется электрическая связь между первичной и вторичной обмотками. При этом мощность из одной обмотки в другую передается как магнитным полем, так и за счет электрической связи. Автотрансформаторы строятся на большие мощности и высокие напряжения и применяются в энергосистемах, а также используются для регулирования напряжения в установках небольшой мощности.

В *первом – пятом разделах* учебного пособия приведены выдержки из стандартов, касающиеся терминологии, условных обозначений трансформаторов и видов систем охлаждения, обозначений их выводов и ответвлений, номинальных данных трансформаторов, а также буквенных обозначений элементов в электрических схемах.

В *шестом – девятом разделах* рассмотрены основы теории трансформаторов и описана последовательность проведения экспериментальных исследований процессов и явлений, а также обработки результатов: при холостом ходе, коротком замыкании и при нагрузке (*разд. 6*); при параллельной работе трансформаторов, причем уделено внимание изучению групп соединения обмоток (*разд. 7*); при несимметричной нагрузке трехфазных трансформаторов (*разд. 8*); при намагничивании магнитопровода трансформатора, в том числе и при включении трансформатора в сеть (*разд. 9*).

В *списке литературы*, наряду с традиционными источниками, *приведены URL-адреса* ряда предприятий, производящих электрические машины и трансформаторы, а также *URL-адрес* РАО ЕЭС “Россия”. Использование Интернет-технологий позволит студентам непосредственно ознакомиться с номенклатурой и описанием электротехнической продукции, выпускаемой предприятиями.

В *Приложении приведены*: компьютерная Паскаль-программа для обработки экспериментальных данных, получаемых при исследовании трансформатора в опыте холостого хода (*прил. 1*); основы теории специальных трансформаторов, а именно – умножителей частоты, насыщающихся и управляемых реакторов. Этот материал предлагается в качестве возможной тематики учебно-исследовательской и научно-исследовательской работы студентов (*прил. 2*); форма отчета по лабораторной работе, предлагаемая в качестве образца (*прил. 3*); примерная программа дисциплины “Электрические машины” (*прил. 4*). Программа составлена в соответствии с Государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования по направлению подготовки дипломированного специалиста 660300 – “Агроинженерия” (специальность 311400 – Электрификация и автоматизация сельского хозяйства).

*На кафедре “Электроснабжение и электрические машины” Московского государственного агроинженерного университета разработаны и изготовлены стенды для экспериментального исследования трансформаторов. Реализован фронтальный метод проведения работ. Фотографии и описание стендов, а также электронный вариант настоящего учебного пособия, помещены на Web-странице <http://zei.narod.ru>.*

# 1. Термины и определения

(ГОСТ 16110–82)

Термин	Определение
<b>1.1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ</b>	
<b>Трансформатор (1.1) *</b>	Статическое электромагнитное устройство, имеющее две индуктивно связанные обмотки и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной системы переменного тока в другую систему переменного тока. <i>Примечание.</i> Трансформатор может иметь более двух индуктивно связанных обмоток.
<b>Магнитное поле трансформатора (1.5)</b>	Магнитное поле, <i>созданное</i> в трансформаторе <i>совокупностью магнитодвижущих сил обмоток</i> и других частей, в которых протекает <i>электрический ток</i> . <i>Примечание.</i> Для удобства анализа магнитное поле может быть <i>условно</i> разделено на взаимосвязанные части: 1) <i>основное поле</i> , 2) <i>поле рассеяния обмоток</i> , 3) поле токов нулевой последовательности и т.д.
<b>1.2. ВИДЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ</b>	
<b>Трехфазный трансформатор (2.6)</b>	Трансформатор, в магнитной системе которого создается трехфазное магнитное поле
<b>Двухобмоточный трансформатор (2.7)</b>	Трансформатор, имеющий две основные <i>гальванически не связанные</i> обмотки
<b>Масляный трансформатор (2.12)</b>	Трансформатор с жидким диэлектриком, в котором основной <i>изолирующей средой и теплоносителем</i> служит трансформаторное масло
<b>Сухой трансформатор (2.14)</b>	Трансформатор, в котором основной <i>изолирующей средой</i> служит атмосферный воздух или другой газ или твердый диэлектрик, а <i>охлаждающей средой</i> атмосферный воздух
<b>Трансформатор, регулируемый под нагрузкой. Трансформатор РПН (2.20)</b>	Регулируемый трансформатор, допускающий регулирование напряжения хотя бы одной из его обмоток <i>без перерыва нагрузки и без отключения его обмоток от сети</i>

\* В скобках указаны номера согласно ГОСТ 16110–82.

Термин	Определение
<b>Трансформатор, переключаемый без возбуждения.</b> <b>Трансформатор ПБВ (2.21)</b>	<p>Регулируемый трансформатор, допускающий регулирование напряжения путем переключения ответвлений обмоток без возбуждения <i>после отключения</i> всех его обмоток от сети</p>
<b>Автотрансформатор (2.25)</b>	<p>Трансформатор, две или более обмоток которого гальванически связаны так, что имеют общую часть</p>
<b>1.3. МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ТРАНСФОРМАТОРА</b>	
<b>Магнитная система трансформатора (3.1)</b>	<p>Комплект пластин или других элементов из электротехнической стали или другого ферромагнитного материала, собранных в определенной геометрической форме, предназначенный для локализации в нем <i>основного магнитного поля</i> трансформатора</p>
<b>Стержень (3.2)</b>	<p>Часть магнитной системы, на которой располагаются основные обмотки трансформатора</p>
<b>Диаметр стержня (3.3)</b>	<p>Диаметр окружности, в которую вписан контур ступенчатого или квадратного поперечного сечения стержня магнитной системы</p>
<b>Ярмо (3.6)</b>	<p>Часть магнитной системы трансформатора, не несущая основных обмоток и служащая для замыкания магнитной цепи</p>
<b>Боковое ярмо (3.7)</b>	<p>Ярмо, соединяющее два конца одного и того же стержня</p>
<b>Торцевое ярмо (3.8)</b>	<p>Ярмо, соединяющее концы двух и более разных стержней</p>
<b>Стержневая магнитная система (3.14)</b>	<p>Магнитная система, в которой ярма соединяют разные стержни и нет боковых ярм</p>
<b>Шихтованная магнитная система (3.17)</b>	<p>Магнитная система, в которой стержни и ярма с плоской шихтовкой собираются в <i>переплет</i> как цельная конструкция</p>
<b>Стыковая магнитная система (3.18)</b>	<p>Магнитная система, в которой стержни и ярма или отдельные части, собранные или скрепленные отдельно, при сборке системы устанавливаются встык</p>



Термин	Определение
<b>1.4. ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРА</b>	
<b>Основная обмотка (4.3)</b>	Обмотка трансформатора, к которой подводится энергия преобразуемого, или отводится энергия преобразованного переменного тока.
	Примечание. Силовой трансформатор имеет не менее двух основных обмоток
<b>Первичная обмотка трансформатора (4.5)</b>	Обмотка трансформатора, к которой подводится энергия преобразуемого переменного тока
<b>Вторичная обмотка трансформатора (4.6)</b>	Обмотка, от которой отводится энергия преобразованного переменного тока
<b>Общая обмотка автотрансформатора (4.11)</b>	Обмотка, являющаяся общей частью двух обмоток автотрансформатора
<b>Последовательная обмотка автотрансформатора (4.12)</b>	Обмотка автотрансформатора, включаемая последовательно с общей обмоткой
<b>Обмотка фазы трехфазного трансформатора (4.16)</b>	Одна из обмоток трехфазного трансформатора, образующая ее фазу
<b>Концентрические обмотки (4.18)</b>	Обмотки стержня, изготовленные в виде цилиндров и концентрически расположенные на стержне магнитопровода
<b>Группа соединения обмоток трансформатора (4.27)</b>	Угловое смещение векторов линейных <i>электродвижущих сил</i> обмотки низшего напряжения к векторам соответствующих электродвижущих сил обмотки высшего напряжения
<b>Нейтраль обмотки (4.28)</b>	Общая точка обмоток фаз трехфазного трансформатора, соединяемых в “звезду” или “зигзаг”
<b>1.5. ИЗОЛЯЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРА</b>	
<b>Междуфазная изоляция (5.4)</b>	Изоляция между обмотками разных фаз трансформатора
<b>Главная изоляция обмотки (5.5)</b>	Изоляция обмотки от частей остова и других обмоток
<b>Продольная изоляция обмотки (5.6)</b>	Изоляция между разными точками изоляции фазы трансформатора

Термин	Определение
<b>1.6. ОТДЕЛЬНЫЕ ЧАСТИ ТРАНСФОРМАТОРА</b>	
<b>Активная часть трансформатора (6.1)</b>	Единая конструкция, включающая в собранном виде остов трансформатора, обмотки с их изоляцией, отводы, части регулирующего устройства, а также все детали, служащие для их механического соединения
<b>Активные материалы трансформатора (6.2)</b>	<i>Электротехническая сталь</i> или другой ферромагнитный материал, из которого изготовлена магнитная система, а также <i>металл обмоток</i> и отводов трансформатора
<b>Остов (6.3)</b>	Единая конструкция, включающая в собранном виде магнитную систему со всеми деталями, служащими для ее соединения и крепления обмоток
<b>Отводы (6.4)</b>	Совокупность электрических проводников, служащих для соединения обмоток трансформатора с вводами, устройствами переключений ответвлений обмоток и другими токоведущими частями
<b>Бак трансформатора (6.6)</b>	Бак, в котором размещается активная часть трансформатора или трансформаторного агрегата с жидким диэлектриком, газо- или кварцenaполненного
<b>Расширитель (6.9)</b>	Сосуд, соединенный с баком трубопроводом и служащий для локализации колебаний уровня жидкого диэлектрика
<b>Термосифонный фильтр (6.12)</b>	Сосуд, сообщающийся двумя патрубками с внутренним объемом бака в верхней и нижней его части, заполненный веществом, служащим для очистки масла или другого жидкого диэлектрика от продуктов окисления и для поглощения влаги
<b>Переключатель ответвлений обмотки (6.18)</b>	Контактное устройство, служащее для переключения ответвлений обмотки в трансформаторе, переключаемом без возбуждения

Термин	Определение
<b>Радиатор трансформатора</b> (6.26)	Теплообменник, в котором происходит передача тепла от теплоносителя, заполняющего бак трансформатора и движущегося путем естественной конвекции, воздуху, охлаждающему трансформатор
<b>1.7. ДЕТАЛИ КОНСТРУКЦИИ И ПАРАМЕТРЫ ЧАСТЕЙ ТРАНСФОРМАТОРА</b> <b>1.7.1. МАГНИТНАЯ СИСТЕМА</b>	
<b>Ступенчатое сечение стержня</b> (7.1.4)	Поперечное сечение стержня, собранного из двух или более пакетов пластин <i>разной ширины</i> , имеющее форму ступенчатой фигуры, вписанной в окружность или овал
<b>Пластина магнитной системы</b> (7.1.6)	Пластина из электротехнической стали или другого ферромагнитного материала, являющаяся элементом магнитной системы трансформатора
<b>Пакет пластин</b> (7.1.7)	Стопа пластин <i>одного размера</i> в стержне или ярме магнитной системы
<b>Ярмовая прессующая балка</b> (7.1.16)	Балка, служащая в магнитной системе для прессовки ярма и в качестве торцевой опоры для обмоток или только для прессовки ярма
<b>Угол магнитной системы</b> (7.1.17)	Часть магнитной системы, ограниченная объемом, образованным пересечением боковых поверхностей или их продолжений одного из ярм и одного из стержней
<b>Стык магнитной системы</b> (7.1.18)	Место сочленения пластин стержня и ярма в шихтованной магнитной системе или пакетов пластин стержня и ярма в стыковой магнитной системе
<b>Прямой стык магнитной системы</b> (7.1.19)	Стык магнитной системы, при котором пластины сохраняют прямоугольную форму
<b>Косой стык магнитной системы</b> (7.1.20)	Стык магнитной системы, при котором пластины (пакеты) в месте сочленения срезаны под углом, близким к $45^\circ$ к продольной оси пластины
<b>Изоляция пластин магнитной системы</b> (7.1.21)	Слой изоляционного материала, наносимый на поверхность пластины или образуемый на ее поверхности

Термин	Определение
<b>1.8. РЕЖИМЫ И ПРОЦЕССЫ</b>	
<b>Номинальный режим трансформатора (8.1)</b>	Режим работы трансформатора <i>на основном ответвлении</i> при номинальных значениях напряжения, частоты, нагрузки и номинальных условиях места установки и охлаждающей среды
<b>Возбуждение трансформатора (8.17)</b>	Создание <i>основного магнитного поля</i> трансформатора путем подключения одной или нескольких обмоток к одной или нескольким сетям или другим источникам с соответствующими номинальными напряжениями и частотой
<b>Перевозбуждение трансформатора (8.18)</b>	Увеличение магнитной индукции в магнитной системе трансформатора по отношению к индукции в режиме холостого хода
<b>Естественное масляное охлаждение (8.26)</b>	Охлаждение частей масляного трансформатора путем естественной конвекции масла при охлаждении внешней поверхности бака и установленных на нем охладительных элементов посредством естественной конвекции воздуха и лучеиспускания в воздухе
<b>Дутьевое охлаждение (8.28)</b>	Охлаждение трансформатора с использованием принудительного повышения скорости движения воздуха, охлаждающего отдельные части системы охлаждения или активную часть трансформатора
<b>1.9. ПАРАМЕТРЫ ТРАНСФОРМАТОРА</b>	
<b>1.9.1 ОБЩИЕ ПАРАМЕТРЫ</b>	
<b>Коэффициент трансформации (9.1.7)</b>	<p>Отношение напряжений на зажимах двух обмоток <i>в режиме холостого хода</i>.</p> <p>Примечания:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Для двух обмоток силового трансформатора, расположенных на одном стержне, коэффициент трансформации принимается равным отношению чисел их витков.</li> <li>2. В трехфазном трансформаторе коэффициенты трансформации для фазных и междуфазных напряжений могут быть различны.</li> <li>3. В двухобмоточном трансформаторе коэффициент трансформации равен отношению высшего напряжения к низшему.</li> </ol>

Термин	Определение
<p><b>Потери трансформатора</b> (9.1.24)</p> <p><b>Магнитные потери</b> (9.1.26)</p> <p><b>Основные потери в токоведущих частях</b> (9.1.29)</p> <p><b>Суммарные потери трансформатора</b> (9.1.34)</p> <p><b>Относительные потери</b> (9.1.35)</p>	<p>Активная мощность, расходуемая в магнитной системе, обмотках и др. частях трансформатора при различных режимах работы</p> <p>Потери, возникающие в магнитной системе трансформатора в режиме холостого хода при номинальном напряжении и номинальной частоте</p> <p>Потери в обмотках и других токоведущих частях трансформатора, определяемые током данной обмотки или ее токоведущей части и ее электрическим сопротивлением, измеренным при постоянном токе</p> <p>Сумма потерь холостого хода и короткого замыкания трансформатора</p> <p>Отношение потерь холостого хода, потерь короткого замыкания или суммарных потерь трансформатора к его номинальной мощности</p>
<b>1.9.2. НОМИНАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ТРАНСФОРМАТОРА</b>	
<p><b>Номинальные данные трансформатора</b> (9.2.1)</p> <p><b>Номинальная мощность обмотки</b> (9.2.2)</p> <p><b>Номинальное напряжение обмотки трансформатора</b> (9.2.7)</p> <p><b>Номинальный ток обмотки</b> (9.2.9)</p>	<p>Указанные изготовителем параметры трансформатора (например, частота, мощность, напряжение, ток), обеспечивающие его работу в условиях, установленных нормативным документом и являющиеся основой для определения условий изготовления, испытаний, эксплуатации</p> <p>Указанное на паспортной табличке трансформатора значение <i>полной мощности</i> на основном ответвлении, гарантированное изготовителем в номинальных условиях места установки и охлаждающей среды при номинальной частоте и номинальном напряжении обмотки</p> <p>Указанное на паспортной табличке напряжение между зажимами трансформатора, связанными с обмоткой, <i>при холостом ходе</i></p> <p>Ток, определяемый по номинальной мощности обмотки, номинальному напряжению и множителю, учитывающему число фаз</p>

**2. Буквенные обозначения элементов в электрических схемах**  
(ГОСТ 2.710–81)

Код элемента	Виды элементов
<i>T</i>	Трансформаторы, автотрансформаторы
<i>M</i>	Двигатели
<i>G</i>	Генераторы
<i>TA</i>	Трансформатор тока
<i>TV</i>	Трансформатор напряжения
<i>LG</i>	Обмотка возбуждения генератора
<i>LE</i>	Обмотка возбуждения возбудителя
<i>LM</i>	Обмотка возбуждения электродвигателя
<i>GE</i>	Возбудитель генератора
<i>XA</i>	Токосъемник, контакт скользящий
<i>LR</i>	Реактор
<i>QF</i>	Выключатель автоматический в силовых цепях
<i>QS</i>	Разъединитель
<i>RR</i>	Реостат
<i>PA</i>	Амперметр
<i>PF</i>	Частотомер
<i>PV</i>	Вольтметр
<i>PW</i>	Ваттметр
<i>PS</i>	Регистрирующий прибор
<i>HL</i>	Прибор световой сигнализации

### 3. Обозначение выводов и ответвлений силовых трансформаторов

(ГОСТ 11677-85)

Наименование и схема соединения обмотки	Число выводов	Наименование фазы или вывода	Обозначение выводов	
			Начало	Конец
Первичная обмотка (ВН): открытая схема	6	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза	<i>1U1</i> <i>1V1</i> <i>1W1</i>	<i>1U2</i> <i>1V2</i> <i>1W2</i>
Первичная обмотка (ВН): соединение в «звезду» или в «зигзаг»	3 или 4	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза Нейтральный вывод	<i>1U</i> <i>1V</i> <i>1W</i> <i>1N</i>	
Вторичная обмотка (НН): соединение в «звезду» или в «зигзаг»	3 или 4	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза Нейтральный вывод	<i>2U</i> <i>2V</i> <i>2W</i> <i>2N</i>	
Первичная обмотка (ВН): соединение в «треугольник»	3	1-й линейный вывод 2-й линейный вывод 3-й линейный вывод	<i>1U</i> <i>1V</i> <i>1W</i>	
Вторичная обмотка (СН): соединение в «треугольник»	3	1-й линейный вывод 2-й линейный вывод 3-й линейный вывод	<i>2U</i> <i>2V</i> <i>2W</i>	
Третичная обмотка (НН): соединение в «треугольник»	3	1-й линейный вывод 2-й линейный вывод 3-й линейный вывод	<i>3U</i> <i>3V</i> <i>3W</i>	

#### Примечания:

1. В структуре обозначения приняты следующие условности (см. рис.1):

- a. первая цифра 1, 2, 3, ... соответствует номеру обмотки;
- b. буквы *U, V, W* соответствуют линейным выводам 1, 2 и 3-й фаз обмотки трехфазного силового трансформатора, а также самим фазам;
- c. буква *N* соответствует нейтральному выводу;
- d. вторая цифра 1 и 2 соответствует началу и концу фазы обмотки;

2. Ответвления, подводимые к устройствам РПН и ПБВ, следует обозначать группой цифр, расположенными в возрастающем порядке (см. рис.1д);

3. Исходя из методических соображений примем в дальнейшем изложении обозначение фаз, а также начал фаз трехфазного силового трансформатора символами *A, B, C* - для стороны ВН и символами *a, b, c* - для стороны НН;

4. Выводы начала фаз *U, V, W* выделяются цветами, соответственно: желтый, зеленый, красный

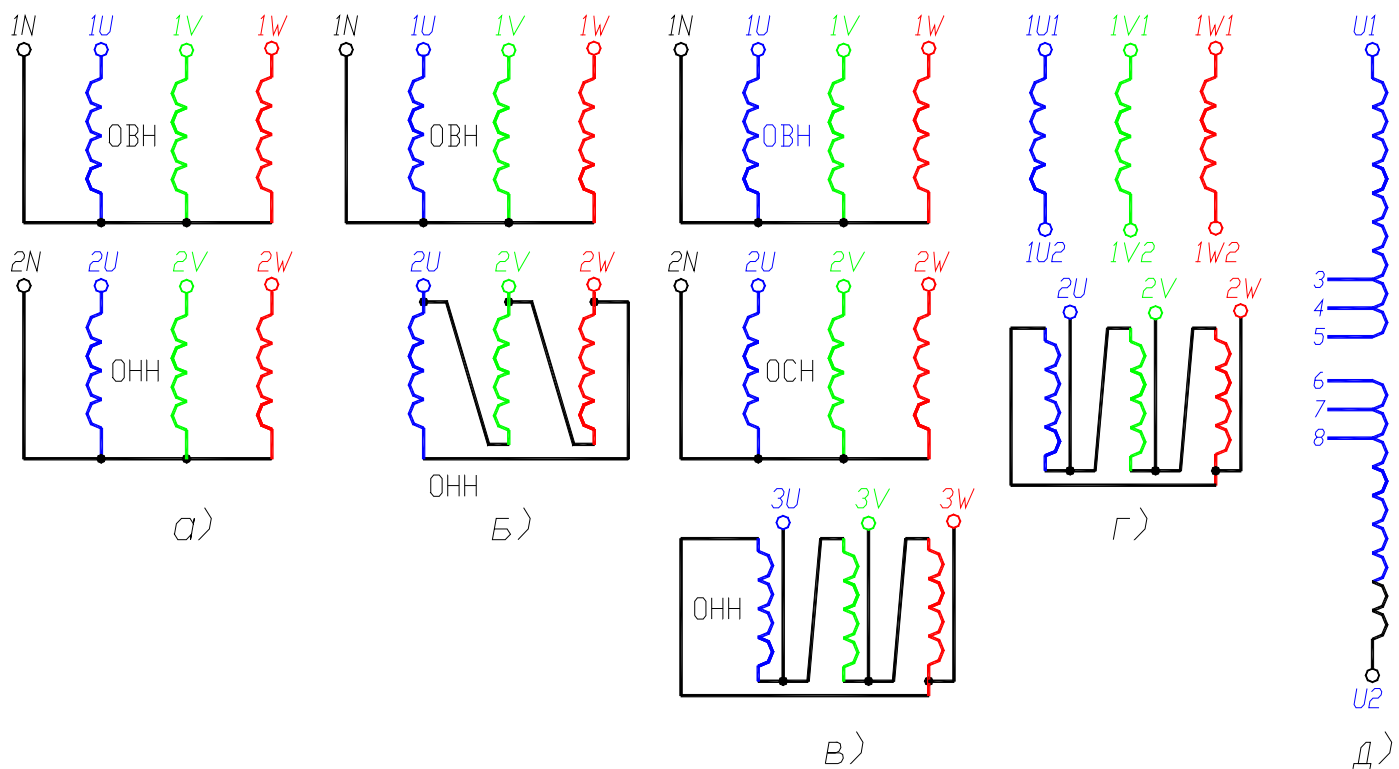


Рис.1. Маркировка выводов и ответвлений силовых трехфазных трансформаторов:  
 а) двухобмоточный,  $Y_n/Y_n-0$ ; б) двухобмоточный,  $Y_n/\Delta-11$ ; в) трехобмоточный,  $Y_n/Y_n/\Delta-0-5$ ;  
 г) линейный регулировочный трансформатор с возбуждающей обмоткой, соединенной в "треугольник";  
 д) обмотка фазы U с ответвлениями 3, 4, ..., 8 посередине



## 4. Условное обозначение трансформаторов

(ГОСТ 11677-85)

1. Структурная схема условного обозначения трансформатора.

X - X / X - X

	Климатическое исполнение и категория размещения по ГОСТ 15150-69
	Класс напряжения стороны ВН, кВ
	Номинальная мощность трансформатора, кВ·А
	Буквенная часть обозначения типа согласно п. 2

Для автотрансформаторов при классах напряжения стороны СН или НН *110 кВ* и выше после класса напряжения стороны ВН через дробную черту указывают класс напряжения стороны СН или НН.

**П р и м е ч а н и е.** Для трансформаторов разработанных до 01.07.87, допускается указывать последние две цифры года выпуска рабочих чертежей.

2. Буквенная часть условного обозначения должна содержать обозначения в следующем порядке:

А – автотрансформатор;

О или Т – однофазный или трехфазный трансформатор;

Р – расщепленная обмотка НН;

Условное обозначение видов охлаждения – по табл. 1 ГОСТ 11677-85 <sup>1</sup>;

З – исполнение трансформатора с естественным масляным охлаждением или с охлаждением негорючим жидким диэлектриком с защитой при помощи азотной подушки без расширителя;

Л – исполнение трансформатора с литой изоляцией;

Т – трехобмоточный трансформатор <sup>2</sup>;

Н – трансформатор РПН;

С – исполнение трансформатора собственных нужд электростанций.

3. В стандартах или технических условиях на трансформаторы конкретных групп или типов могут предусматриваться дополнительные буквенные обозначения после букв, перечисленных выше.

4. Для трансформаторов с разными классами напряжения обмоток ВН допускается применять одинаковые условные обозначения, если эти трансформаторы различаются лишь номинальными напряжениями. В этом случае указывают наибольший из классов напряжения обмотки ВН.

5. Примеры условных обозначений.

Трансформатор **трехфазный сухой** с естественным воздушным охлаждением при **защищенном** исполнении, двухобмоточный, мощность – *100 кВ·А*, класс напряжения – *10 кВ*, климатическое исполнение – *У* категории – *3* по ГОСТ 15150-69

*ТСЗ-100/10-У3 .*

Трансформатор **трехфазный масляный** с охлаждением при естественной циркуляции воздуха и масла, двухобмоточный, **с регулированием напряжения под нагрузкой**, мощность – *2500 кВ·А*, класса напряжения – *110 кВ*, климатическое исполнение – *У* категории – *1* по ГОСТ 15150-69

*ТМН-2500/110-У1.*

Автотрансформатор **трехфазный масляный** с охлаждением при **принудительной** циркуляции воздуха и масла с **ненаправленным** потоком масла, **трехобмоточный**, с **регулированием напряжения под нагрузкой**, мощность – *20000 кВ·А*, класс напряжения обмотки ВН – *330 кВ*, класс напряжения обмотки СН – *110 кВ*, климатическое исполнение – *У* категории – *1* по ГОСТ 15150-69

*АТДЦТН-20000/330/110-У1 .*

<sup>1</sup> **Выдержки из таблицы 1 ГОСТ 11677-85**

Вид системы охлаждения трансформатора	Условное обозначение вида системы охлаждения
<b>Сухие трансформаторы</b>	
Естественное воздушное при открытом исполнении	С
Воздушное с принудительной циркуляцией воздуха	СД
<b>Масляные трансформаторы</b>	
Естественная циркуляция воздуха и масла	М
Принудительная циркуляция воздуха и естественная циркуляция масла	Д
Принудительная циркуляция воздуха и масла с ненаправленным потоком масла	ДЦ
<b>Трансформаторы с негорючим жидким диэлектриком</b>	
Естественное охлаждение негорючим жидким диэлектриком	Н
Охлаждение негорючим жидким диэлектриком с принудительной циркуляцией воздуха	НД

<sup>2</sup> Для **двухобмоточных** трансформаторов не указывают.

## 5. Номинальные данные и устройство исследуемого трансформатора

Полная мощность, на которую рассчитан трансформатор, называется *номинальной*. Все другие величины, которые характеризуют его работу при этой мощности, также называются номинальными. *Основные* номинальные величины указываются в паспортной табличке (на щитке). Силовые масляные трансформаторы обычно имеют щитки со следующими данными:

- 1) мощность трансформатора, выраженная в вольт-амперах ( $B \cdot A$ ) или киловольт-амперах ( $\kappa B \cdot A$ );
- 2) междуфазные (линейные) напряжения каждой обмотки в вольтах ( $B$ ) или киловольтах ( $\kappa B$ ) на основных выводах и ответвлениях;
- 3) линейные токи в амперах ( $A$ ) при номинальной мощности;
- 4) частота;
- 5) число фаз;
- 6) схема и группа соединения обмоток;
- 7) напряжение короткого замыкания, характеризующее падение напряжения в обмотках;
- 8) режим работы, указывающий, рассчитан ли трансформатор в отношении нагрева на длительную или кратковременную работу при номинальной мощности;
- 9) способ охлаждения.

Кроме того, на щитке указываются данные, необходимые для монтажа и эксплуатации трансформатора: полная масса трансформатора; масса масла; масса “выемной” (активной) части трансформатора, а также тип трансформатора, название завода-изготовителя, год выпуска и др.

К нормируемым параметрам трансформатора относятся: потери холостого хода, ток холостого хода, потери короткого замыкания и др.

Далее приводятся описание устройства и номинальные данные трехфазного трансформатора типа  $ТС-2,5/0,269$ . Этот трансформатор исследуется в лабораторных работах цикла “Трансформаторы”.

*Краткое описание устройства.* Активная часть трансформатора состоит из трехстержневого планарного шихтованного магнитопровода, двух concentрических обмоток – первичной и вторичной, и системы креплений. Число последовательно соединенных витков в фазе первичной обмотки  $W_1 = 240$ . Каждая фаза вторичной обмотки разделена на две части (с одинаковыми числами витков  $W_2/2 = 147$ ). Эта обмотка может быть соединена по схеме  $Y$ ,  $D$  или  $Z$ . Обмотки выполнены медным эмалированным проводом марки ПЭТВ. Диаметр провода первичной обмотки  $2,12$  мм, вторичной –  $1,5$  мм. В трансформаторе имеется добавочная трехфазная обмотка ( $W_{об} = 10; 2,12$  мм). Магнитопровод изготовлен из тонколистовой электротехнической стали. Охлаждение трансформатора – естественное воздушное при открытом исполнении.

**Номинальные данные трехфазного трансформатора  
типа *ТС-2,5/0,269***

*(Этот трансформатор исследуется в лабораторных работах)*

Наименование	Обозначение	Численное значение	Единица измерения
<b>Мощность</b>	$S_{ном}$	2,5	кВ·А
<b>Первичное напряжение</b>	$U_{1л}$	220	В
<b>Вторичное напряжение</b>	$U_{2л}$	269	В
<b>Линейный ток первичной обмотки</b>	$I_{1л}$	6,5	А
<b>Линейный ток вторичной обмотки</b>	$I_{2л}$	5,4	А
<b>Частота</b>	$f$	50	Гц
<b>Число фаз</b>	$m$	3	–
<b>Схема соединения обмоток</b>	У/У	–	–
<b>Способ охлаждения</b>	<i>Естественное воздушное при открытом исполнении</i>		
<b>Характер нагрузки</b>	<i>Длительная непрерывная</i>		
<b>Напряжение короткого замыкания*</b>	$u_k$	13	В
		5,9	%
<b>Ток холостого хода**</b>	$I_x$	0,69	А
		10,6	%

\* Напряжение короткого замыкания выражается в процентах от номинального первичного напряжения  $U_{1л}$ .

\*\* Ток холостого хода выражается в процентах от номинального первичного тока  $I_{1л}$ .

## РАБОТА №1

# ТРЕХФАЗНЫЙ ДВУХОБМОТОЧНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР

### *Оглавление*

1. Цель работы .....	21
2. Программа работы .....	21
3. Основы теории трансформатора .....	21
3.1. Устройство и принцип действия .....	22
3.2. Работа под нагрузкой .....	23
3.2.1. Т-образная и упрощенная схемы замещения .....	23
3.2.2. Уравнения равновесия ЭДС и МДС .....	25
3.2.3. Векторные диаграммы .....	26
3.2.4. Энергетические диаграммы .....	28
4. Экспериментальное исследование трансформатора .....	31
4.1. Опыт холостого хода .....	31
4.2. Опыт короткого замыкания .....	33
4.3. Опыт под нагрузкой. Внешняя характеристика .....	34
4.4. Расчет и построение внешних характеристик .....	34
4.5. Расчет зависимости КПД от коэффициента загрузки .....	35
5. Содержание отчета .....	36
6. Контрольные вопросы .....	36

## **1. Цель работы**

Ознакомиться с устройством, принципом действия и назначением трансформатора; освоить практические методы проведения опытов холостого хода (ХХ), короткого замыкания (КЗ) и под нагрузкой, а также использования опытных данных для получения параметров трансформатора и основных характеристик.

## **2. Программа работы**

2.1. Ознакомиться с устройством испытуемого трансформатора и записать его паспортные данные.

2.2. Определить коэффициент трансформации.

2.3. Провести опыт ХХ и построить характеристики

$$I_x, P_x, \cos \varphi_x = f(U_{Ix}) \text{ при } I_2 = 0.$$

2.4. Провести опыт КЗ и построить характеристики

$$I_k, P_k, \cos \varphi_k = f(U_{Ik}). \text{ при } U_2 = 0.$$

2.5. Провести опыт под нагрузкой и построить внешнюю характеристику

$$U_2 = f(I_2) \text{ при } \cos \varphi_2 = 1,0.$$

2.6. На основании данных опытов ХХ и КЗ определить параметры T-образной схемы замещения трансформатора. Вычертить ее для режима нагрузки.

2.7. Определить напряжение короткого замыкания и его активную и реактивную составляющие.

2.8. Рассчитать и построить внешние характеристики трансформатора при активной нагрузке ( $\cos \varphi_2 = 1,0$ ), активно-индуктивной ( $\cos \varphi_2 = 0,8$ ;  $\sin \varphi_2 = +0,6$ ) и активно-емкостной ( $\cos \varphi_2 = 0,8$ ;  $\sin \varphi_2 = -0,6$ ). Сравнить расчетную характеристику при  $\cos \varphi_2 = 1,0$  с опытной.

2.9. Рассчитать и построить зависимость КПД трансформатора от коэффициента загрузки  $\eta = f(\beta)$  для  $\cos \varphi_2 = 1,0$  и  $\cos \varphi_2 = 0,8$ . Определить нагрузку, соответствующую максимальному значению КПД.

## **3. Основы теории трансформатора**

Трансформатор это статический преобразователь электрической энергии, который передает электрическую энергию без изменения частоты.

При помощи трансформатора повышается или понижается напряжение. В зависимости от назначения трансформаторы подразделяются на силовые – электроэнергетического назначения и специальные – преобразовательные, измерительные, сварочные и т.п.

Ниже приводятся теоретические сведения и описываются лабораторные испытания силовых трансформаторов.

### 3.1. Устройство и принцип действия

Электромагнитная система однофазного двухобмоточного трансформатора состоит из двух обмоток первичной и вторичной, размещенных на замкнутом магнитопроводе, который выполнен из ферромагнитного материала. *Магнитопровод необходим для усиления электромагнитной связи между обмотками.* Он состоит из стержней, на которых расположены обмотки, и ярм, торцевых и, в общем случае, боковых. Торцевое ярмо соединяет концы двух или более разных стержней. Боковое ярмо соединяет концы одного и того же стержня. Первичную обмотку подключают к источнику переменного напряжения  $U_1$ , а ко вторичной обмотке присоединяют нагрузку с сопротивлением  $Z_{НГ}$  (рис.1.1).

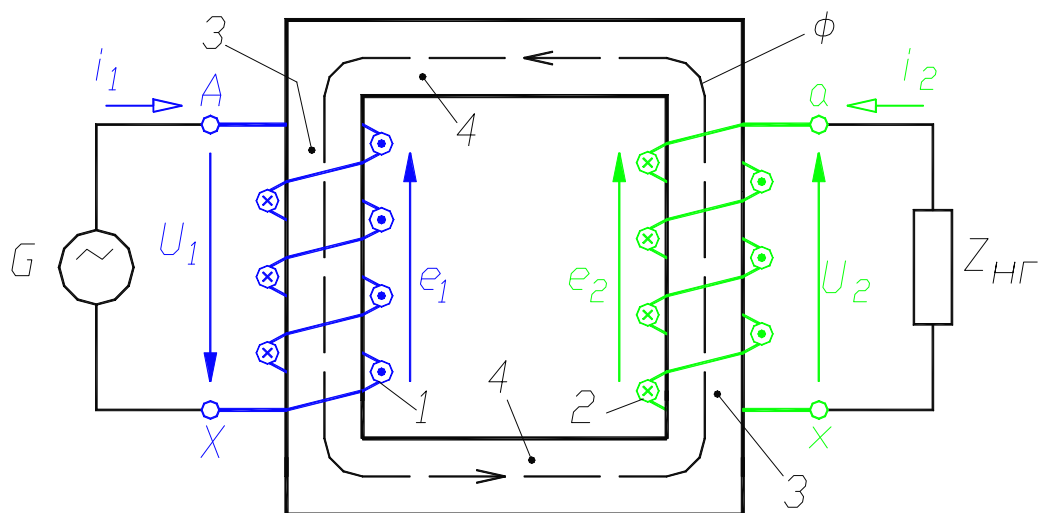


Рис.1.1. Принцип устройства трансформатора

1 – первичная обмотка ( $W_1$ ), 2 – вторичная обмотка ( $W_2$ ),  
3 – стержень магнитопровода, 4 – ярмо магнитопровода

Принцип действия трансформатора основан на законе электромагнитной индукции (закон Фарадея – Максвелла). При подключении трансформатора к сети, в его первичной обмотке возникает переменный ток  $i_1$ , создающий основной магнитный поток  $\Phi$ , замыкающийся по магнитопроводу. Поток  $\Phi$  индуцирует в обеих обмотках переменные ЭДС  $e_1$  и  $e_2$ , пропорциональные числам витков  $W_1$  и  $W_2$  соответствующих обмоток и скорости изменения потока  $d\Phi/dt$ . Таким образом, мгновенные значения ЭДС будут равны:  $e_1 = -W_1 d\Phi/dt$ ;  $e_2 = -W_2 d\Phi/dt$ , а их отношение составит:

$$e_1/e_2 = E_1/E_2 = W_1/W_2 .$$

Учитывая, что действующие значения этих ЭДС примерно равны соответствующим напряжениям, то есть  $E_1 \approx U_1$ , а  $E_2 \approx U_2$ , имеем  $U_1/U_2 \approx W_1/W_2$ . Подбирая числа витков обмоток, при заданном напряжении  $U_1$  можно получить желаемое напряжение  $U_2$ . Если  $W_2 > W_1$  – трансформатор будет повышающим, то есть напряжение  $U_2 > U_1$ . Трансформатор будет понижающим, если  $W_2 < W_1$ . У трансформатора одна из обмоток является обмоткой высшего напряжения (ВН), а другая – обмоткой низшего напряжения (НН).

По числу обмоток трансформаторы бывают двухобмоточные и трехобмоточные, а по числу фаз – однофазные и трехфазные. В двухобмоточном коэффициент трансформации равен отношению высшего напряжения к низшему на зажимах обмоток в режиме холостого хода (или отношению чисел витков этих обмоток находящихся на одном стержне), то есть  $k = U_{вн} / U_{нн} = W_{вн} / W_{нн}$ . Величина коэффициента трансформации всегда больше единицы.

В зависимости от конфигурации магнитопровода, трансформаторы подразделяются на стержневые, броневого типа и др. В трансформаторах стержневого типа торцевые ярма соединяют разные стержни и нет боковых ярем (рис.1.1). В трансформаторах броневого типа оба конца каждого стержня соединяются не менее чем двумя боковыми ярмами. *В трехфазных силовых трансформаторах магнитопровод выполняется в большинстве случаев трехстержневым.* Возможно применение и трехфазного группового трансформатора, состоящего из трех однофазных, обмотки которых соединены между собой, а магнитный поток каждой фазы локализуется в отдельном магнитопроводе

### 3.2. Работа под нагрузкой

При анализе работы трансформатора под нагрузкой имеется в виду или однофазный трансформатор или трехфазный трансформатор с симметричной нагрузкой, когда достаточно рассматривать одну фазу трансформатора. Считаем, что первичное напряжение  $U_1 = const$  и частота  $f_1 = const$ .

#### 3.2.1. T-образная и упрощенная схемы замещения

Трансформатор, у которого обмотки имеют только *магнитную* связь, может быть представлен эквивалентной *электрической* схемой, называемой T-образной схемой замещения трансформатора (рис.1.2а).

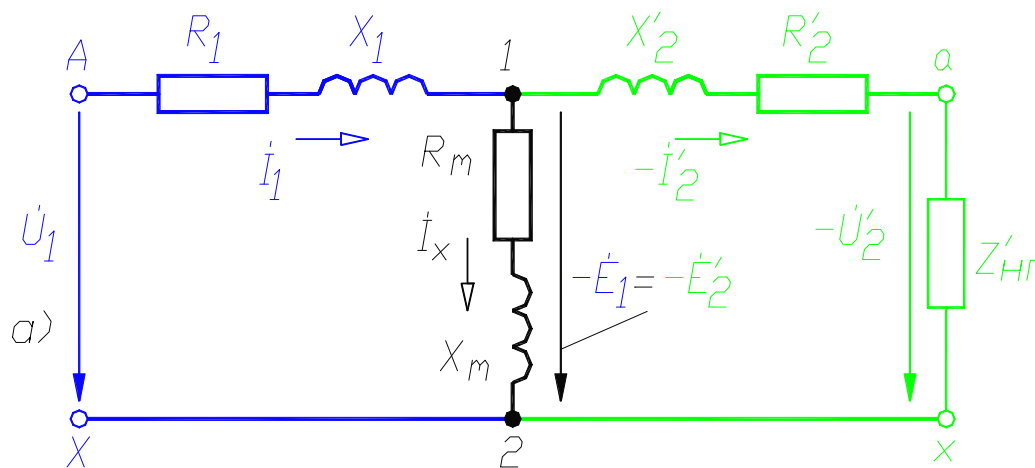


Рис.1.2а. T-образная схема замещения трансформатора:

В ней сопротивления  $R_1$  и  $X_1$  определяют *первичную обмотку*, а  $R_2'$  и  $X_2'$  – *вторичную*. Индуктивные сопротивления  $X_1$  и  $X_2'$  обусловлены магнитными потоками рассеяния обмоток. Схемы замещения обмоток объединены в точках 1 и 2 так называемым намагничивающим контуром с сопротивлениями



$R_m$  и  $X_m$ . Индуктивное сопротивление  $X_m$  обусловлено основным магнитным потоком взаимодействия обмоток, а *сопротивление  $R_m$  является фиктивным* и его величина определяется потерями мощности в стали магнитопровода. Сопротивления вторичной обмотки  $R'_2 = k^2 R_2$ ;  $X'_2 = k^2 X_2$  и нагрузки  $Z'_{нг} = k^2 Z_{нг}$  являются приведенными к числу витков первичной обмотки. Аналогично приведенными называются значения ЭДС и тока вторичной обмотки:  $E'_2 = kE_2 = E_1$ ,  $I'_2 = I_2/k$ , где  $k = W_1/W_2$  - коэффициент трансформации. Такое *приведение обеспечивает эквивалентную замену магнитно связанных цепей электрически связанными цепями и делает более удобным изображение векторных диаграмм*. Таким образом, полная мощность приведенного контура вторичной обмотки в схеме замещения, равна мощности вторичной обмотки реального трансформатора:

$$E'_2 I'_2 = E_2 k / (I_2 / k) = E_2 I_2.$$

На рис.1.2б показана упрощенная схема замещения трансформатора; сделано допущение, что сопротивление намагничивающего контура  $Z_m = \infty$ , а ток холостого хода равен нулю,  $I_x = 0$ . Такое допущение вполне справедливо, так как  $Z_m \gg Z_1$  и  $Z'_2$ , а ток холостого хода составляет несколько процентов от номинального первичного тока. Согласно схеме замещения рис.1.2б трансформатор эквивалентен сопротивлению  $Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}$ .

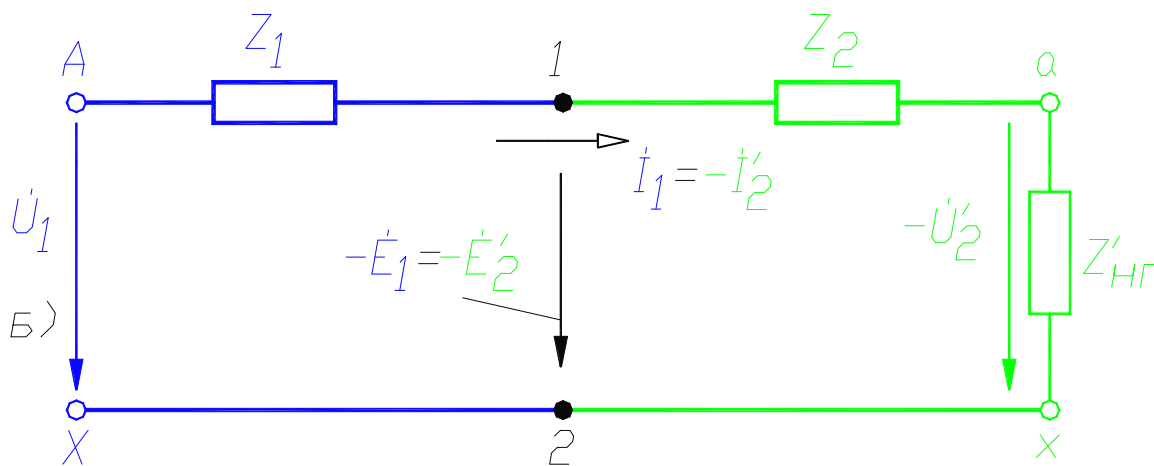


Рис.1.2б. Упрощенная схема замещения трансформатора:

Применение схем замещения трансформаторов позволяет упростить расчеты и анализ их работы. Параметры схемы замещения определяются из опытов холостого хода и короткого замыкания трансформатора.

### 3.2.2. Уравнения равновесия ЭДС и МДС

На основании *T-образной* схемы замещения рис.1.2а можно записать следующие уравнения равновесия напряжений (ЭДС) трансформатора:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(R_1 + jX_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1, \quad (1)$$

$$\dot{U}_2' = \dot{E}_2' - \dot{I}_2'(R_2' + jX_2') = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' Z_2'. \quad (2)$$

Особенностью работы трансформатора является то, что ввиду относительной малости сопротивлений  $R_1$  и  $X_1$  падение напряжения  $\dot{I}_1 Z_1$  в диапазоне нормальных нагрузок относительно мало, вследствие чего, согласно уравнению (1),  $E_1 \approx U_1$ . В свою очередь *действующее значение ЭДС  $E_1$  пропорционально амплитуде магнитного потока в магнитопроводе  $\Phi_m$*

$$U_1 \approx E_1 = 4,44 f_1 W_1 \Phi_m, \quad (3)$$

где  $W_1$  - число витков фазы первичной обмотки.

Как следует из (3) значение магнитного потока определяется в основном первичным напряжением:

$$\Phi_m \approx U_1 / 4,44 f_1 W_1 \quad (4)$$

и **при  $U_1 = const$  также  $\Phi_m \approx const$ .**

При холостом ходе трансформатор потребляет из сети такой ток  $I_x = I_1$ , который нужен для создания необходимого при данном  $U_1$  потока.

Значение потока  $\Phi_m$  всегда таково, что индуцируемая им ЭДС  $E_1$  вместе с падением напряжения  $\dot{I}_1 Z_1$  в соответствии с уравнением (1) *уравновешивают* приложенное напряжение  $U_1$ .

При подключении к вторичной обмотке нагрузки в ней протекает ток  $\dot{I}_2$ . Магнитодвижущая сила вторичной обмотки (ее число витков  $W_2$ )

$$W_2 \dot{I}_2 = W_1 \dot{I}_2' \quad (5)$$

стремится создать в магнитопроводе свой поток и изменить, таким образом, поток, существовавший в режиме холостого хода. Однако, как отмечено выше, при  $U_1 = const$  этот поток существенным образом измениться не может (см. формулу 4). Поэтому первичная обмотка будет потреблять из сети, кроме намагничивающего тока  $I_x$ , дополнительный ток  $(-\dot{I}_2')$  такой величины, что создаваемая им МДС  $(-W_1 \dot{I}_2')$  уравновесит МДС  $W_1 \dot{I}_2'$  вторичной обмотки.

**Ток  $(-\dot{I}_2')$ , уравновешивающий в магнитном отношении вторичный ток  $\dot{I}_2'$ , называется *нагрузочной составляющей* первичного тока.**

Полный первичный ток  $I_1$  состоит из намагничивающей  $I_x$  и нагрузочной  $(-I_2')$  составляющих:

$$I_1 = I_x + (-I_2'). \quad (6)$$

Равенство (6) называется уравнением равновесия МДС обмоток *приведенного* трансформатора.

Умножив равенство (6) на число витков первичной обмотки  $W_1$ , после несложных преобразований, запишем:

$$W_1 I_1 + W_2 I_2' = W_1 I_x. \quad (7)$$

На основании уравнения (7) справедливо утверждение: поток магнитопровода трансформатора создается суммой МДС первичной  $W_1 I_1$  и вторичной  $W_2 I_2'$  обмоток при нагрузке трансформатора или, что тоже, - МДС первичной обмотки  $W_1 I_x$  при холостом ходе трансформатора.

Комплексные уравнения (1), (2) и (6) являются уравнениями равновесия ЭДС (напряжений) и МДС трансформатора при установившемся симметричном режиме работы.

### 3.2.3. Векторные диаграммы

Векторные диаграммы позволяют проанализировать работу трансформатора. Эти диаграммы являются графическим изображением уравнений (1), (2) и (6).

На рис.1.3а изображена векторная диаграмма трансформатора для случая смешанной активно-индуктивной *R-L* нагрузки. Ток  $I_2'$  отстает от ЭДС  $E_2'$  на некоторый угол  $\psi_2$ , значение которого определяется характером нагрузки.

Из диаграммы рис.1.3а следует, что при  $U_1 = const$  и неизменном характере нагрузки ( $\psi_2 = const$ ) увеличение величины нагрузки (то есть тока  $I_2'$ ) вызывает уменьшение вторичного напряжения  $U_2'$ .

На рис.1.3б приведена векторная диаграмма для случая смешанной активно-емкостной *R-C* нагрузки, когда вектор тока  $I_2'$  опережает вектор  $E_2'$  на угол  $\psi_2$ .

Из диаграммы рис.1.3б следует, что при  $U_1 = const$  и неизменном характере нагрузки ( $\psi_2 = const$ ) увеличение величины нагрузки (то есть тока  $I_2'$ ) может вызвать увеличение вторичного напряжения  $U_2'$ .

Диаграммы, представленные на рис.1.3 полностью отражают рабочие процессы, происходящие в трансформаторе, однако производить расчет по этим диаграммам затруднительно. Объясняется это и тем, что индуктивные сопротивления рассеяния обмоток  $X_1$  и  $X_2$  определить опытным путем не представляется возможным. Однако опытным путем находится сумма сопротивлений  $X_K = X_1 + X_2'$ .

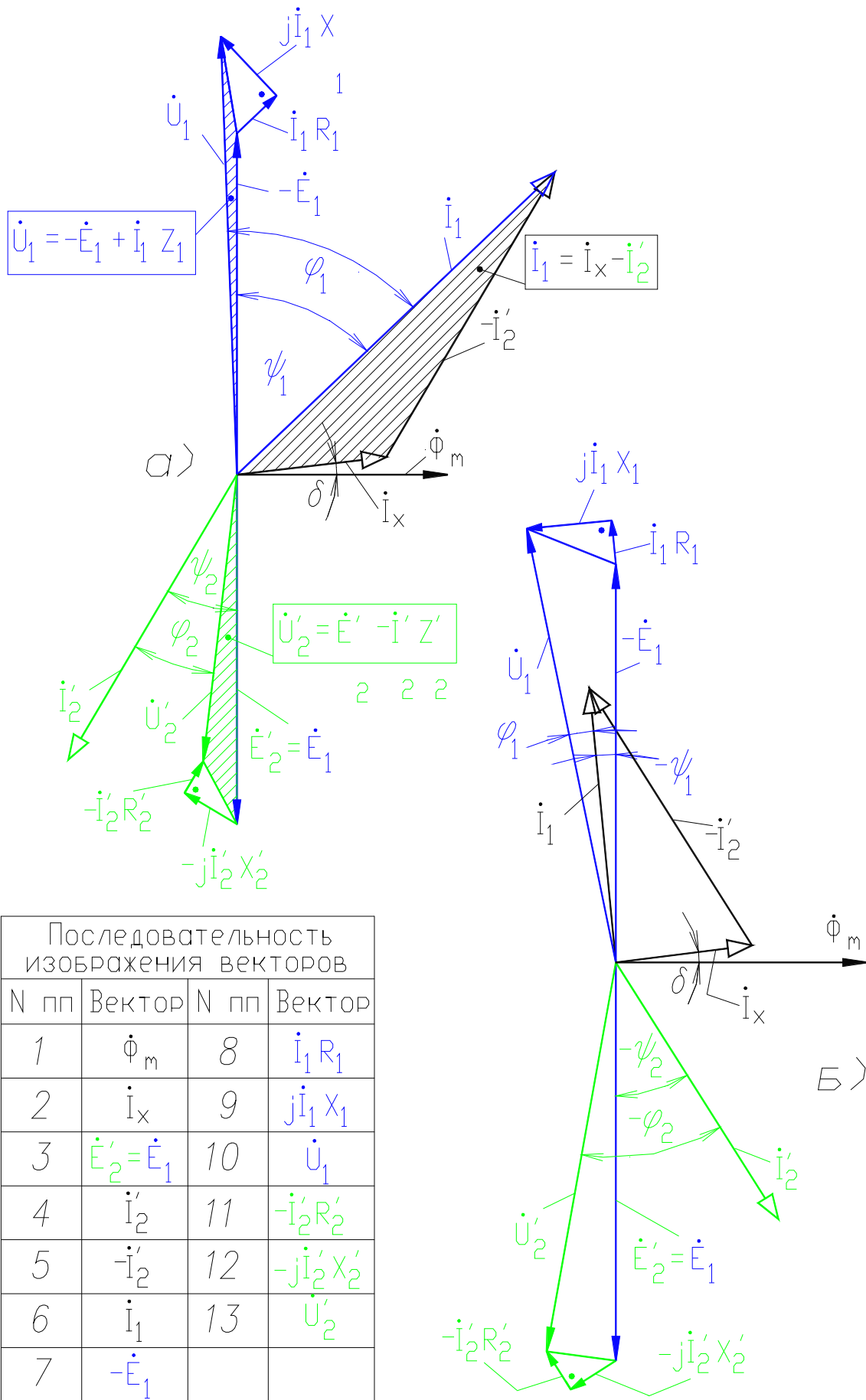


Рис.1.3. Векторные диаграммы трансформатора:  
 R-L-нагрузка - а), R-C-нагрузка - б)

*Упрощенная векторная диаграмма* соответствует упрощенной схеме замещения трансформатора (см. рис.1.2б), в которой намагничивающий ток  $I_x$  принят равным нулю (это правомерно, так как ток холостого хода  $I_x$  составляет несколько процентов от номинального первичного тока). В этой схеме трансформатор эквивалентуется сопротивлением  $Z_K = Z_1 + Z_2'$ .

Комплексные уравнения равновесия ЭДС (напряжений) и МДС трансформатора при установившемся симметричном режиме работы для упрощенной схемы замещения записываются в виде:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1, \quad (1)$$

$$\dot{U}_2' = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' Z_2', \quad (2)$$

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}_2'. \quad (6a)$$

Перепишем уравнение (2) с учетом (6a):

$$-\dot{E}_2' = -\dot{E}_1 = -\dot{U}_2' + \dot{I}_1 Z_2'. \quad (8)$$

Подставив (8) в (1), получим комплексное уравнение в соответствии с которым строится упрощенная векторная диаграмма трансформатора:

$$\dot{U}_1 = -\dot{U}_2' + \dot{I}_1 Z_2' + \dot{I}_1 Z_1 = -\dot{U}_2' + \dot{I}_1 (Z_1 + Z_2') = -\dot{U}_2' + \dot{I}_1 Z_K, \quad (9)$$

где  $Z_K = R_K + jX_K = (R_1 + R_2') + j(X_1 + X_2')$  - сопротивления обмоток трансформатора; сопротивления  $Z_K$ ,  $R_K$ ,  $X_K$  определяются из опыта короткого замыкания трансформатора.

На рис.1.4 изображена упрощенная векторная диаграмма трансформатора при активно-индуктивной  $R$ - $L$  нагрузке. Из этой диаграммы нетрудно сделать вывод о влиянии характера нагрузки (угол  $\varphi_2$ ) на величину напряжения  $U_2'$ .

### 3.2.4. Энергетические диаграммы

*Преобразование активной мощности трансформатора происходит согласно энергетической диаграмме рис.1.5а*, соответствующей схеме замещения рис.1.2а и векторным диаграммам рис.1.3.

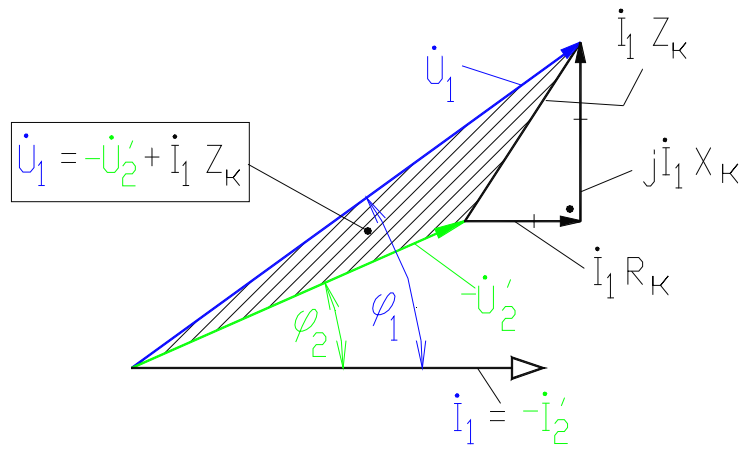


Рис.1.4. Упрощенная векторная диаграмма трансформатора при R-L-нагрузке

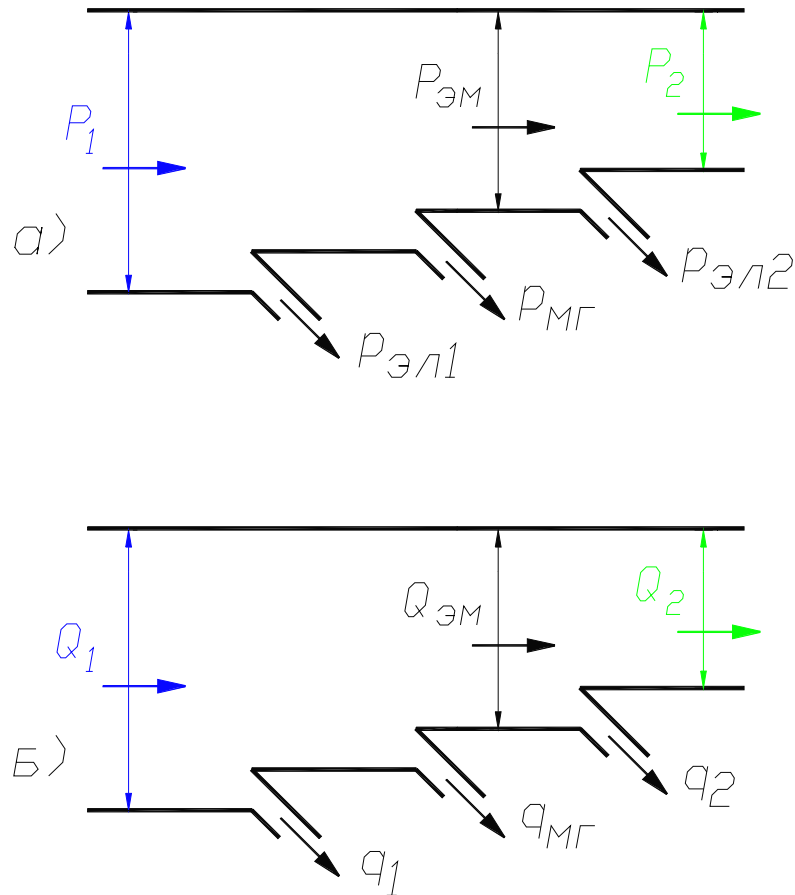


Рис.1.5. Энергетические диаграммы трансформатора: активной мощности - а); реактивной мощности - б)

На рис.1.5а символом  $P_{эм}$  обозначена внутренняя электромагнитная мощность трансформатора, определяемая как:

$$P_{эм} = P_1 - p_{эл1} - p_{мг},$$

где  $P_1 = 3U_1I_1 \cos \varphi_1$  – активная мощность поступающая в первичную обмотку из сети;  $p_{эл1}$  – электрические потери мощности в первичной обмотке трансформатора;  $p_{мг}$  – магнитные потери в трансформаторе (потери в стали).

Мощность  $P_2$  отдаваемая трансформатором нагрузке меньше внутренней электромагнитной мощности на величину  $p_{эл2}$ , которая соответствует электрическим потерям мощности во вторичной обмотке трансформатора, то есть

$$P_2 = P_{эм} - p_{эл2} = 3U_2I_2 \cos \varphi_2 = 3U_2'I_2' \cos \varphi_2.$$

Коэффициент полезного действия (КПД) трансформатора равен:

$$\eta = P_2/P_1.$$

*Преобразование реактивной мощности происходит согласно энергетической диаграмме рис.1.5б.* Из первичной реактивной мощности

$$Q_1 = 3U_1I_1 \sin \varphi_1$$

мощность

$$q_1 = 3I_1^2 X_l$$

расходуется на *создание магнитного поля рассеяния первичной обмотки*, а мощность

$$q_{мг} = 3I_x^2 X_m$$

- на *создание магнитного поля взаимной индукции* (поля в магнитопроводе).

Реактивная мощность

$$q_2 = 3(I_2')^2 X_2'$$

расходуется на *создание магнитного поля рассеяния вторичной обмотки*, а оставшаяся мощность

$$Q_2 = Q_1 - q_1 - q_{мг} - q_2 = 3U_2I_2 \sin \varphi_2 = 3U_2'I_2' \sin \varphi_2$$

передается потребителю.

При активно-емкостной нагрузке  $\varphi_2 < 0$ , а также  $Q_2 < 0$ . Изменение знака  $Q_2$  означает изменение направления передачи реактивной мощности. Если при этом также

$$Q_1 = Q_2 + q_2 + q_{мг} + q_1 < 0,$$

то реактивная мощность передается с вторичной стороны на первичную. Если же  $Q_2 < 0$ , а  $Q_1 > 0$ , то реактивная мощность потребляется как с первичной, так и с вторичной стороны и расходуется на намагничивание трансформатора.

**Общий вывод - реактивная мощность в электрических машинах и трансформаторах расходуется на создание магнитного поля устройств.**

Коэффициент мощности трансформатора равен:

$$\cos \varphi_I = P_I / S_I = P_I / \sqrt{P_I^2 + Q_I^2}.$$

#### 4. Экспериментальное исследование трансформатора

Записать паспортные данные исследуемого трансформатора и определить его первичный номинальный ток  $I_{I_{ном}}$  (см. термин 9.2.9 на с.12), оценить пределы измерений приборов, используемых в опытах.

##### 4.1. Опыт холостого хода

Собирают схему, приведенную на рис.1.6. При выборе амперметров следует иметь в виду, что ток холостого хода  $I_x \approx 0,1 I_{I_{ном}}$ . Перед подключением схемы к сети автотрансформатор  $TV$  устанавливают в положение, обеспечивающее минимальное напряжение  $U_{I_x}$  на зажимах трансформатора. Затем включают автомат  $QF$ .

При проведении опыта следует получить характеристики холостого хода  $I_x, P_x, \cos \varphi_x = f(U_{I_x})$  при  $I_2 = 0$ , изменяя автотрансформатором  $TV$  первичное напряжение  $U_{I_x}$  в пределах  $(0,5 \dots 1,25) U_{I_{фном}}$ . Опытные данные (6...7 точек, причем одна из них должна соответствовать  $U_{I_x} = U_{I_{фном}}$ ) записываются в табл.1.1.

Таблица 1.1

Измерение							Расчет				Расчет при $U_{I_x} = U_{I_{фном}}$		
$U_{I_x}$	$U_{2x}$	$I_{Ax}$	$I_{Bx}$	$I_{Cx}$	$P_{Ax}$	$P_{Cx}$	$I_x$	$P_x$	$\cos \varphi_x$	$k$	$Z_m$	$R_m$	$X_m$
$B$	$B$	$A$	$A$	$A$	дел	дел	$A$	$Bm$	-	-	$Om$	$Om$	$Om$
					$Bm$	$Bm$							

**Примечание.** Все расчеты, предусмотренные таблицей 1.1, выполняются на компьютере в соответствии с Pascal-программой, приведенной в Прил.1, см. с.97,сл.

В табл.1.1  $U_{I_x}, U_{2x}$  - фазные напряжения, соответствующие одноименным зажимам первичной и вторичной обмоток, например,  $A-X$  и  $a-x$ ;  $I_x = (I_{Ax} + I_{Bx} + I_{Cx})/3$  - среднее арифметическое значение токов фаз;  $P_x = C_w (P_{Ax} - P_{Cx})$  - мощность потребляемая трансформатором из сети при холостом ходе,  $C_w$  - цена деления ваттметра;  $\cos \varphi_x = P_x / 3 U_{I_x} I_x$  - коэффициент мощности;  $k = U_{2x} / U_{I_x} = U_{ВН} / U_{НН}$  - коэффициент трансформации.



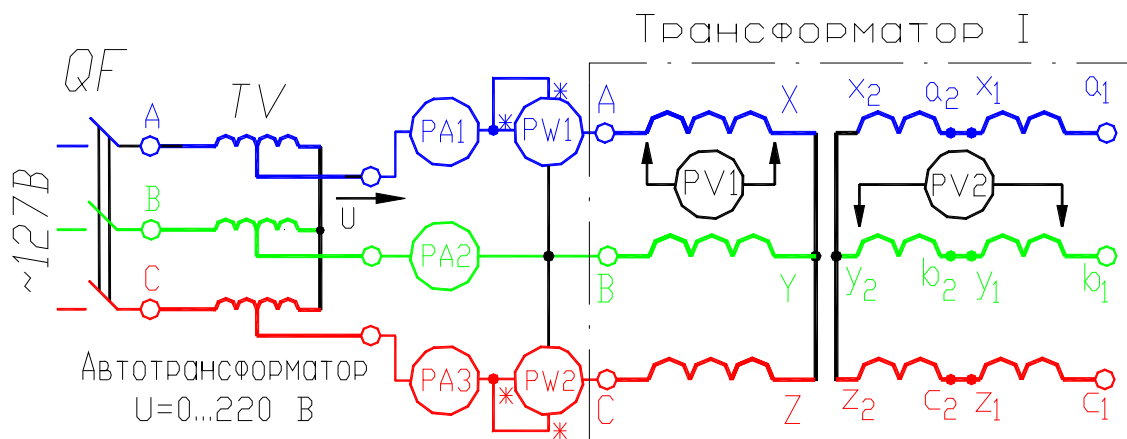


Рис.1.6. Схема лабораторной установки для исследования трансформатора в опыте холостого хода

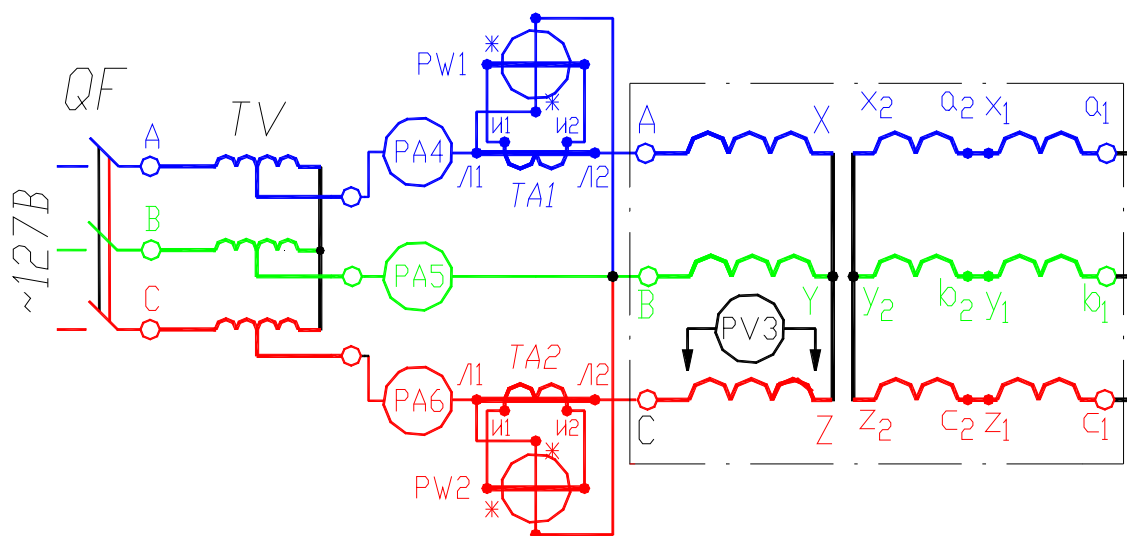


Рис.1.7. Схема лабораторной установки для исследования трансформатора в опыте короткого замыкания

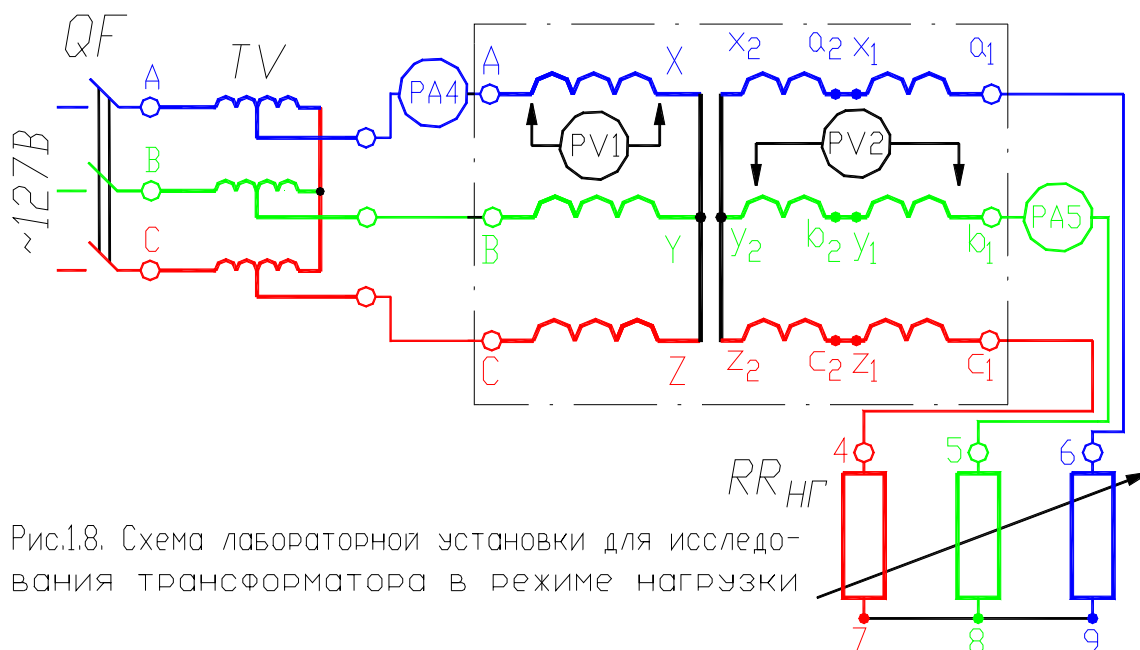


Рис.1.8. Схема лабораторной установки для исследования трансформатора в режиме нагрузки

Рассчитываются параметры  $R_m$ ,  $X_m$ , и  $Z_m$  намагничивающего контура схемы замещения трансформатора:

$$Z_x = Z_I + Z_m = U_{I\phi_{ном}} / I_x \approx Z_m,$$

$$R_x = R_I + R_m = P_x / 3I_x^2 \approx R_m, \quad X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}.$$

#### 4.2. Опыт короткого замыкания

Опыт короткого замыкания проводится по схеме, приведенной на рис.1.7, при замкнутой накоротко вторичной обмотке.

К трансформатору подводят пониженное напряжение  $U_{Iк} = (5...10)\%$  от номинального напряжения  $U_{I\phi_{ном}}$ , чтобы ток короткого замыкания  $I_{Iк}$  был равен или несколько превышал (не более, чем на 20%) номинальный ток первичной обмотки. Затем, постепенно снижая автотрансформатором  $TV$  первичное напряжение, записывают показания приборов для 4...5 значений  $U_{Iк}$ . При этом одному из значений  $U_{Iк}$  должно соответствовать значение тока  $I_{Iк} = I_{Iном}$ . По результатам опытов, которые заносят в табл.1.2, строят характеристики короткого замыкания трансформатора  $I_k$ ,  $P_k$ ,  $\cos \varphi_k = f(U_{Iк})$ .

Таблица 1.2

Измерение				Расчет	
$U_{Iк}$	$I_{Iк}$	$P_{Ак}$	$P_{Ск}$	$P_k$	$\cos \varphi_k$
$B$	$A$	дел	дел	$Вт$	-
		$Вт$	$Вт$		

→ продолжение табл. 1.2

Расчет при $I_{Iк} = I_{Iном}$								
$Z_k$	$R_k$	$X_k$	$Z_{к75}$	$R_{к75}$	$U_k$	$U_{к75}$	$U_{а75}$	$U_p$
$Ом$	$Ом$	$Ом$	$Ом$	$Ом$	$\%$	$\%$	$\%$	$\%$

В табл.1.2  $U_{Iк}$ ,  $I_{Iк}$  - фазные напряжение и ток,  $P_k = C_w k_t (P_{Ак} + P_{Ск})$  - мощность потребляемая трансформатором из сети при коротком замыкании,  $C_w$  - цена деления ваттметра;  $k_t$  - коэффициент трансформации трансформатора тока;  $\cos \varphi_k = P_k / 3U_{Iк} I_{Iк}$  - коэффициент мощности.

Рассчитываются параметры схемы замещения трансформатора:

$$Z_k = Z_I + Z'_2 = U_{Iк} / I_{Iном},$$

$$R_k = R_I + R'_2 = P_k / 3I_{Iном}^2, \quad X_k = X_I + X'_2 = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2},$$

а также напряжение короткого замыкания трансформатора по формуле:

$$u_{к\%} = 100U_{Iк} / U_{I\phi_{ном}} = 100I_{Iном} Z_k / U_{I\phi_{ном}}.$$

Для  $T$ -образной схемы замещения исследуемого трансформатора можно принять  $R_1 \approx R'_2 = R_k/2$ ,  $X_1 \approx X'_2 = X_k/2$ .

Активное сопротивление  $R_k$  следует привести к расчетной рабочей температуре трансформатора, равной  $75^\circ\text{C}$  для трансформаторов с изоляцией классов  $A$ ,  $E$ ,  $B$ . С этой целью можно воспользоваться приближенной формулой  $R_{k75} \approx 1,2R_k$ . Тогда, с учетом приведения, полное сопротивление двух обмоток  $Z_{k75} = \sqrt{R_{k75}^2 + X_k^2}$ , а напряжение короткого замыкания  $u_{k75\%} = 100I_{\text{ном}}Z_{k75}/U_{1\text{фном}}$ . Активная и реактивная составляющие напряжения КЗ будут соответственно равны:  $u_{a75\%} = 100I_{\text{ном}}R_{k75}/U_{1\text{фном}}$   
 $u_{p\%} = 100I_{\text{ном}}X_k/U_{1\text{фном}}$

По значению напряжения короткого замыкания  $U_{k\%}$  и его составляющих  $U_{a\%}$  и  $U_{p\%}$  можно судить о возможности параллельной работы трансформаторов, об изменении вторичного напряжения при изменении нагрузки, о величине установившегося тока трехфазного КЗ на зажимах вторичной обмотки в условиях эксплуатации.

#### 4.3. Опыт под нагрузкой. Внешняя характеристика

Схема опыта приведена на рис.1.8, ко вторичной обмотке подсоединена активная нагрузка. Порядок проведения опыта следующий. Трансформатор без нагрузки через автотрансформатор  $TV$  подключают к питающей сети с напряжением  $U_1$  и устанавливают значение напряжения  $U_{1x}$  таким, чтобы  $U_{2x} = U_{2\text{фном}}$ . Затем трансформатор загружают равномерно, по всем фазам, постепенно меняя ток  $I_2$  в пределах от  $(0...1,2)I_{2\text{ном}}$  и поддерживая при этом постоянным напряжение  $U_{1x}$ . В качестве нагрузки используется реостат  $RR_{\text{нз}}$ . Результаты опытов (5...6 точек) заносятся в табл.1.3.

Таблица 1.3

$U_{1\phi}$	$U_{2\phi}$	$I_{1\phi}$	$I_{2\phi}$	$\beta$
$B$	$B$	$A$	$A$	-

В табл.1.3  $\beta = I_2/I_{2\text{ном}}$  - коэффициент загрузки трансформатора.

По опытным данным строится внешняя характеристика трансформатора  $U_{2\phi} = f(\beta)$  {или  $U_{2\phi} = f(I_{2\phi})$ } при  $U_1 = \text{const}$ ,  $\cos \varphi_2 = 1,0$ .

#### 4.4. Расчет и построение внешних характеристик

Внешние характеристики можно получить аналитическим, то есть расчетным путем. При любой нагрузке вторичное напряжение определяется как:

$$U_{2\phi} = U_{2\text{фном}}(1,0 - 0,01\Delta U\%),$$

где  $U_{2\text{фном}}$  - номинальное фазное напряжение вторичной обмотки трансфор-

матора;  $\Delta U_{\%}$  - изменение вторичного напряжения при нагрузке, равное

$$\Delta U_{\%} = 100(U_{2\text{фном}} - U_{2\text{ф}}) / U_{2\text{фном}}.$$

При номинальной нагрузке величина  $\Delta U_{\%}$  составляет 2...5%. С достаточной точностью изменение напряжения можно определить по выражению:

$$\Delta U_{\%} = \beta(U_{a75\%} \cos \varphi_2 + U_{p\%} \sin \varphi_2).$$

Следует задаться значениями коэффициента загрузки трансформатора  $\beta = 0; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25$  и при заданных значениях  $\cos \varphi_2$  и  $\sin \varphi_2$  (см. пункт 2.8) рассчитать  $\Delta U_{\%}$  и  $U_{2\text{ф}}$ . Результаты расчетов сводят в табл.1.4.

Таблица 1.4

		Характер нагрузки					
		активная, $\cos \varphi_2 = 1,0$		активно-индуктивная, $\cos \varphi_2 = 0,8; \sin \varphi_2 = +0,6$		активно-емкостная, $\cos \varphi_2 = 0,8; \sin \varphi_2 = -0,6$	
$\beta$		$\Delta U_{\%}$	$U_{2\text{ф}}$	$\Delta U_{\%}$	$U_{2\text{ф}}$	$\Delta U_{\%}$	$U_{2\text{ф}}$
	-	%	B	%	B	%	B

Используя полученные данные строят расчетные внешние характеристики  $U_{2\text{ф}} = f(\beta)$  в одних координатах с опытной внешней характеристикой и сравнивают их между собой (для  $\cos \varphi_2 = 1,0$ ).

#### 4.5. Расчет и построение зависимости КПД от коэффициента загрузки

ГОСТ рекомендует определять КПД косвенным методом, используя значения потерь мощности в трансформаторе, получаемых из опытов ХХ и КЗ. Расчетное выражение для определения КПД приведено ниже

$$\eta = 1,0 - \left( P_{\text{хном}} + \beta^2 P_{\text{кном75}} \right) / \left( \beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_{\text{хном}} + \beta^2 P_{\text{кном75}} \right),$$

где  $P_{\text{хном}}$  – магнитные потери мощности в магнитопроводе, равные мощности ХХ при  $U_{1\text{x}} = U_{1\text{фном}}$ ;  $P_{\text{кном75}}$  – электрические потери в обмотках, равные мощности потерь КЗ при  $I_{1\text{k}} = I_{1\text{ном}}$  и температуре  $75^{\circ}\text{C}$ , т.е.  $P_{\text{кном75}} = 3I_{1\text{ном}}^2 R_{\text{k75}}$ ;  $S_{\text{ном}}$  – номинальная мощность трансформатора.

Используя данные опытов ХХ и КЗ и задавшись рядом значений коэффициента загрузки  $\beta$ , необходимо рассчитать КПД при заданном значении коэффициента мощности и построить зависимости  $\eta = f(\beta)$ . Результаты расчетов сводятся в табл.1.5.

Таблица 1.5

		$\beta$	0	0,05	0,1	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25
$\eta$	$\cos \varphi_2 = 1,0$									
	$\cos \varphi_2 = 0,8$									

**Коэффициент полезного действия максимален при равенстве электрических потерь в обмотках и магнитных потерь в стали.**

Наиболее вероятная нагрузка, при которой  $\eta = \eta_{max}$  имеет место при значении  $\beta = 0,5...0,7$ .

Значение коэффициента нагрузки  $\beta$ , которое соответствует максимальному значению КПД  $\eta_{max}$  может быть определено по формуле:  $\beta_{opt} = \sqrt{P_{хном}/P_{кном75}}$ . Тогда максимальное значение КПД определится как  $\eta_{max} = 1,0 - (P_{хном}) / (0,5\beta_{opt}S_{ном} \cos \varphi_2 + P_{хном})$ . Значения КПД  $\eta_{max}$ , рассчитанные для  $\cos \varphi_2 = 1,0$  и  $\cos \varphi_2 = 0,8$ , необходимо сопоставить с данными, полученными на основе зависимостей  $\eta = f(\beta)$ .

### **5. Содержание отчета**

Отчет должен содержать программу лабораторной работы, паспортные данные используемого трансформатора, схемы испытаний и Т-образную схему замещения трансформатора, результаты опытных и расчетных данных испытаний, сведенных в соответствующие таблицы и представленных графически (Форма отчета по Лабораторной работе (*образец оформления*) приведена в Прил.3, см. с.139, сл. и с.152).

### **6. Контрольные вопросы**

1. Объяснить назначение, устройство и принцип действия трансформатора.
2. Что такое коэффициент трансформации?
3. Почему токи ХХ в обмотке трехфазного трансформатора не одинаковы по фазам?
4. Чем обусловлена необходимость проведения опытов ХХ и КЗ при испытаниях силовых трансформаторов?
5. В чем смысл определения параметров и построения схемы замещения трансформатора?
6. Дать понятие напряжения КЗ трансформатора и пояснить его важность для целей практики.
7. Почему мощность потребляемую из сети в режиме ХХ принимают за магнитные потери, а в режиме КЗ – за электрические потери?
8. Какие потери для трансформатора считаются постоянными, а какие – переменными?
9. Что называется изменением вторичного напряжения трансформатора, отчего оно зависит и в каких единицах выражается?
10. Чем объяснить, что у трехфазного трехстержневого трансформатора магнитная система несимметрична? Отражается ли это обстоятельство на рабочем режиме трансформатора?
11. Дать понятие о коэффициенте полезного действия и коэффициенте мощности трансформатора. Сопоставить эти коэффициенты.

## РАБОТА № 2

# ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

### *Оглавление*

1. Цель работы .....	38
2. Программа работы .....	38
3. Основы теории трансформатора .....	38
3.1. Понятия о началах и концах и направлениях ЭДС обмоток трехфазных трансформаторов .....	38
3.2. Схемы и группы соединения обмоток .....	40
3.3. Условия включения трансформаторов на параллельную работу ..	45
4. Экспериментальное исследование трансформатора .....	46
4.1. Проверка маркировки выводов обмоток .....	46
4.2. Проверка схем и групп соединения обмоток .....	47
4.3. Исследование распределения нагрузки между параллельно работающими трансформаторами .....	49
4.4. Анализ уравнивающего тока параллельно работающих трансформаторов .....	51
5. Содержание отчета .....	52
6. Контрольные вопросы .....	52
<b>Приложение.</b>	
Формулы для расчета значений напряжений $U_{bB}$ , $U_{bC}$ , $U_{cB}$ .....	53

## **1. Цель работы**

Овладеть методикой определения (маркировки) начал и концов обмоток трехфазных трансформаторов. Научиться опытным путем определять группы соединений обмоток. Усвоить условия параллельной работы трансформаторов и уметь теоретически проверить распределение нагрузки между ними.

## **2. Программа работы**

**2.1.** Проверить маркировку выводов обмоток двух трехфазных трансформаторов, предназначенных для параллельной работы.

**2.2.** Реализовать для трехфазного трансформатора схемы и группы соединений обмоток  $Y/Y-11$  и  $D/D-0$  и проверить правильность соединения опытным путем (*студентам предлагается осуществить и проверить также и другие схемы и группы соединений*).

**2.3.** Подключить трансформаторы, соединенные по схеме  $D/D-0$ , параллельно к питающей сети. Подключить нагрузку к трансформаторам и экспериментально определить распределение ее между ними. Построить зависимость вторичных токов трансформаторов от общего тока нагрузки, а также внешние характеристики трансформаторов. Проверить распределение мощности и токов между параллельно работающими трансформаторами.

**2.4.** В режиме холостого хода параллельно работающих трансформаторов измерить уравнивающий ток, протекающий по их обмоткам. Определить величину уравнивающего тока аналитически.

## **3. Основы теории трансформатора**

### **3.1. Понятия о началах и концах и направлениях ЭДС обмоток трехфазных трансформаторов**

Обмотка каждой фазы трансформатора имеет начало и конец. Обозначение выводов и ответвлений силовых трансформаторов осуществляется в соответствии с ГОСТ 11677-85 (см. разд. 3 на с. 14). Исходя из методических соображений начала обмоток ВН будем обозначать латинскими буквами  $A, B, C$ , а концы -  $X, Y, Z$ . Для обмоток НН - соответственно  $a, b, c$  и  $x, y, z$ .

В трансформаторах фазные ЭДС двух обмоток ВН и НН, расположенных на одном стержне магнитопровода, могут или совпадать по фазе или быть в противофазе. Это зависит от направления намотки обмоток или от обозначения их выводов, т.е. от маркировки. На рис.2.1а показаны обмотки одной фазы трансформатора, намотанные по левой винтовой линии и называемые поэтому “левыми”, причем у обеих обмоток начала  $A$  и  $a$  находятся сверху, а концы  $X$  и  $x$  – снизу. Положительным направлением ЭДС, индуктируемой в обмотке магнитным потоком, условно считается *направление ее от конца обмотки к началу*.

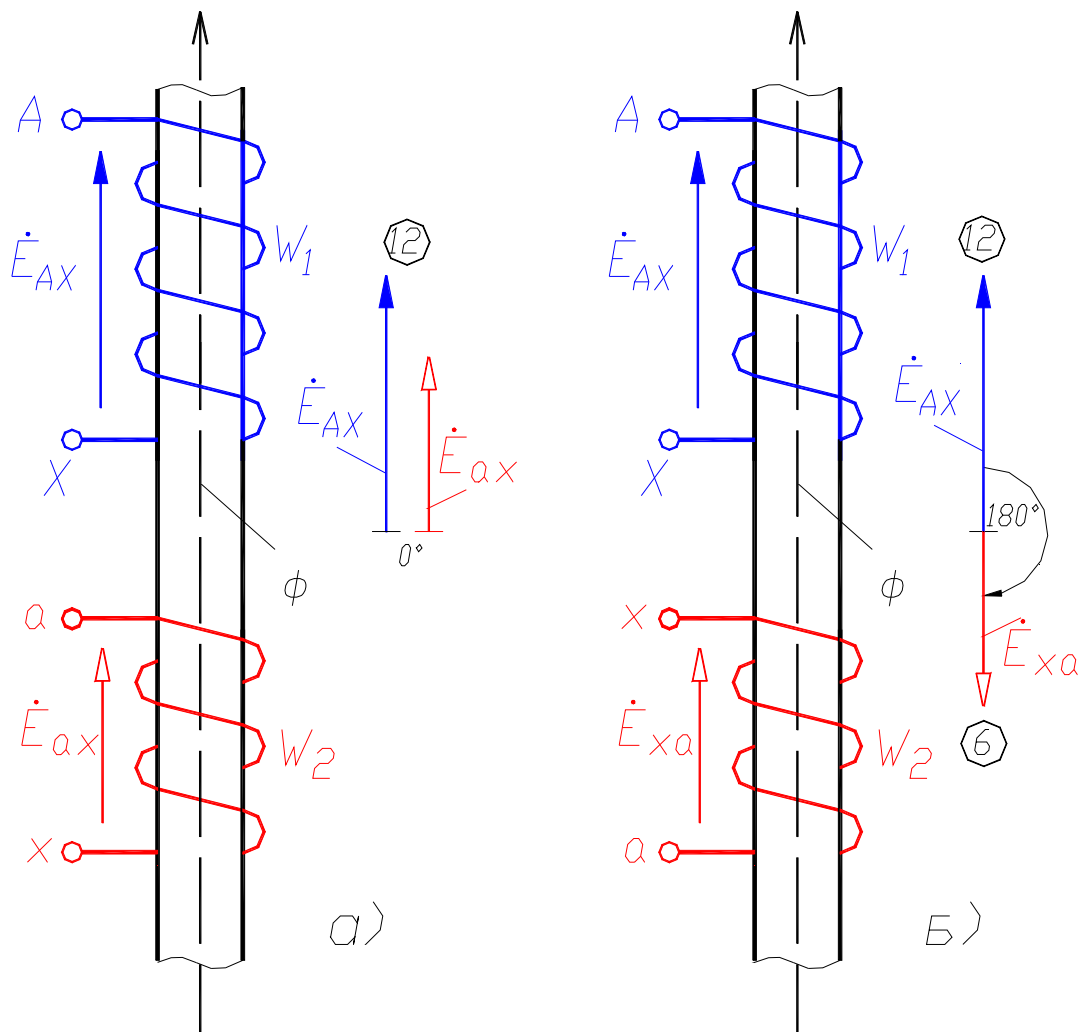


Рис.2.1. К иллюстрации сдвига векторов ЭДС обмоток при различной маркировке их зажимов

Обмотки на рис.2.1а сцепляются с одним и тем же магнитным потоком  $\Phi$ . Вследствие этого ЭДС этих обмоток в каждый момент времени действуют в одинаковых направлениях – от концов к началам или наоборот, то есть они одновременно или положительны или отрицательны. Поэтому ЭДС  $E_{AX}$  и  $E_{ax}$  совпадают по фазе, как показано на рис.2.1а. Если же у одной из обмоток поменять начало и конец (рис.2.1б), то направление ее ЭДС изменится на обратное (относительно выводов) и ЭДС  $E_{AX}$  и  $E_{ax}$  будут иметь сдвиг на  $180^\circ$ . Такой же результат получится, если на рис.2.1а одну из обмоток выполнить “правой”.



### 3.2. Схемы и группы соединения обмоток

Понятия о схемах и группах соединения обмоток трехфазных трансформаторов имеют важное значение при эксплуатации. Фазные обмотки трехфазных трансформаторов могут быть соединены в схемы "звезда" (условное обозначение  $Y$ ) или "треугольник" ( $D$ ) или "зигзаг" ( $Z$ ). В схемах соединений "звезда" и "зигзаг" можно вывести нейтральную точку ( $Y_n, Z_n$ ). В зависимости от схемы соединения обмоток и порядка соединения их начал и концов (направление намотки обмоток предполагается одинаковым) получают различные группы соединения обмоток.

*Группа соединения обмоток трансформатора определяется углом сдвига между векторами одноименных линейных ЭДС (например,  $\dot{E}_{AB}$  и  $\dot{E}_{ab}$  или  $\dot{E}_{BA}$  и  $\dot{E}_{ba}$ ) обмоток высшего и низшего напряжений.*

Для обозначения группы (и соответственно угла сдвига) векторы линейных ЭДС уподобляют стрелкам часового циферблата. Вектор линейной ЭДС обмотки ВН совмещают с минутной стрелкой часов и устанавливают неподвижно против цифры 12 (0). Вектор линейной ЭДС обмотки НН, совмещают с часовой стрелкой, и устанавливают против той цифры часового циферблата, которая определяет номер группы соединения, причем угол между стрелками равен углу сдвига между векторами одноименных линейных ЭДС. Возможно получение следующих групп соединения обмоток трехфазных трансформаторов: 0, 1, 2, ... и 11-я группы. Этим группам соответствуют углы сдвига между векторами одноименных линейных ЭДС обмоток ВН и НН:  $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, \dots, 330^\circ$ .

ГОСТ 11677-85 предусматривает изготовление трехфазных двухобмоточных трансформаторов имеющих следующие схемы и группы соединения обмоток:  $Y/Y_n-0, Y/D-11, Y_n/D-11, Y/Z_n-11, D/Y_n-11, D/D-0$ . При этом первым обозначено соединение обмотки ВН, вторым – соединение обмотки НН. Однофазные двухобмоточные трансформаторы изготавливаются со схемой и группой соединения  $I/I-0$  (см. рис.2.1а).

На рис.2.2 – рис.2.8 приведены схемы соединения обмоток трехфазных трансформаторов и векторные диаграммы ЭДС, которые соответствуют следующим схемам и группам соединения обмоток:  $Y/Y-0, Y/Y-4, Y/D-11, Y/D-5, D/D-0, D/Y-11$  и  $Y/Z-11$ .

Для маркировки выводов обмотки НН согласно заданной схеме и группе соединения обмоток необходимо:

- 1) вычертить заданную схему соединения обмоток ВН и НН и произвольно промаркировать выводы обмотки ВН;
- 2) построить векторные диаграммы линейных и фазных ЭДС обмоток ВН и НН (см. например, рис.2.2 и рис.2.4);
- 3) анализировать угол сдвига между векторами **фазных** ЭДС обмоток ВН и НН;
- 4) промаркировать выводы обмотки НН с учетом того факта, что *на одном стержне магнитопровода могут быть расположены только те фазные обмотки НН и ВН, которым соответствуют векторы фазных ЭДС этих обмоток совпадающие по фазе или находящиеся в противофазе.*

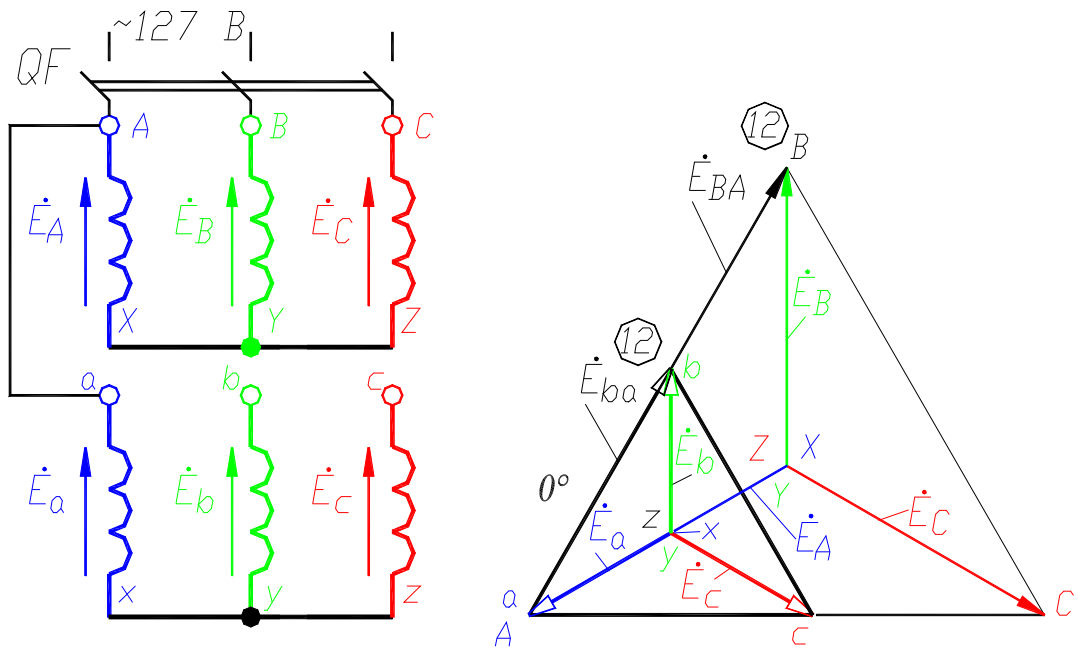


Рис.2.2. Трехфазный трансформатор со схемой и группой соединения У/У-0

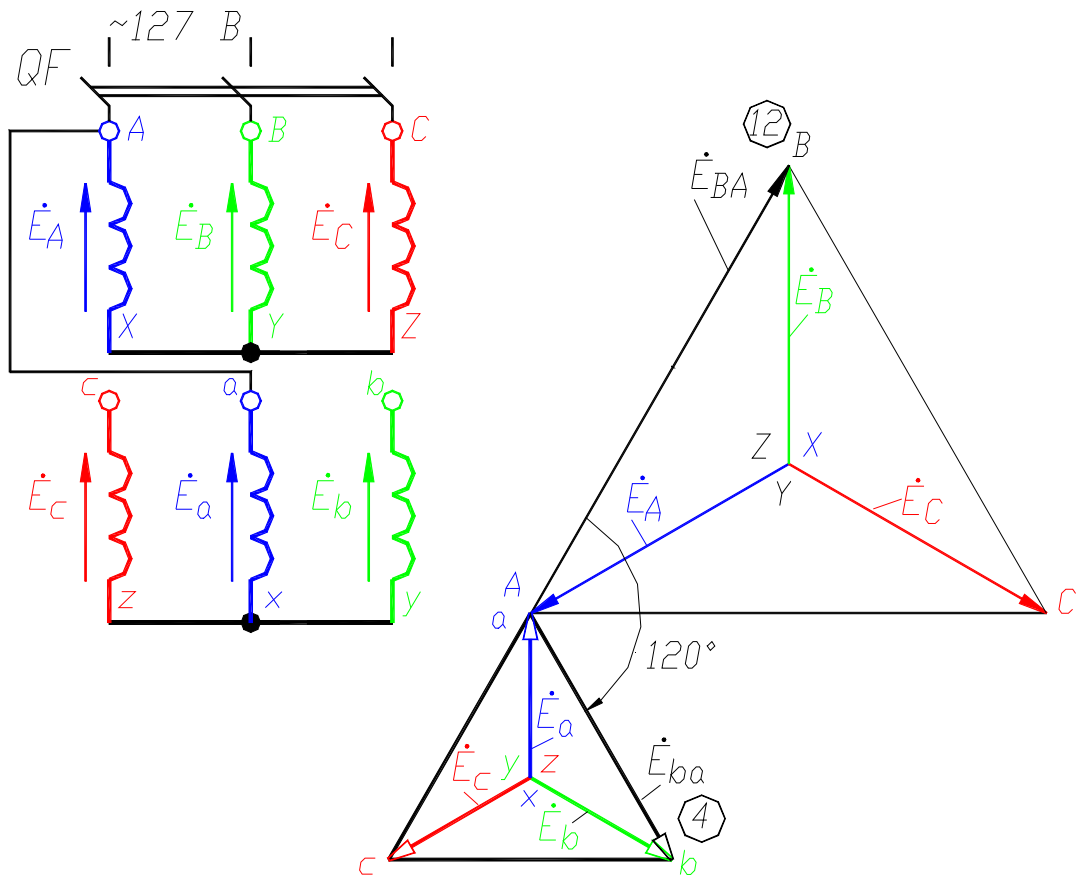


Рис.2.3. Трехфазный трансформатор со схемой и группой соединения У/У-4

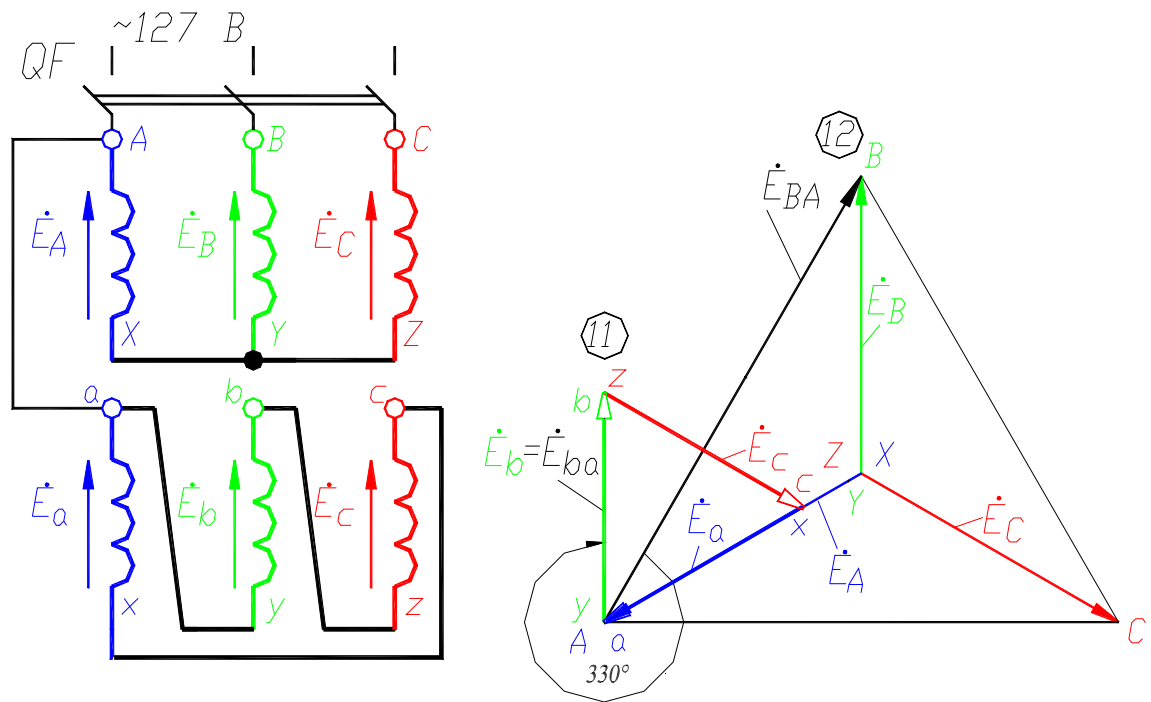


Рис.2.4. Трехфазный трансформатор со схемой и группой соединений У/Д-11

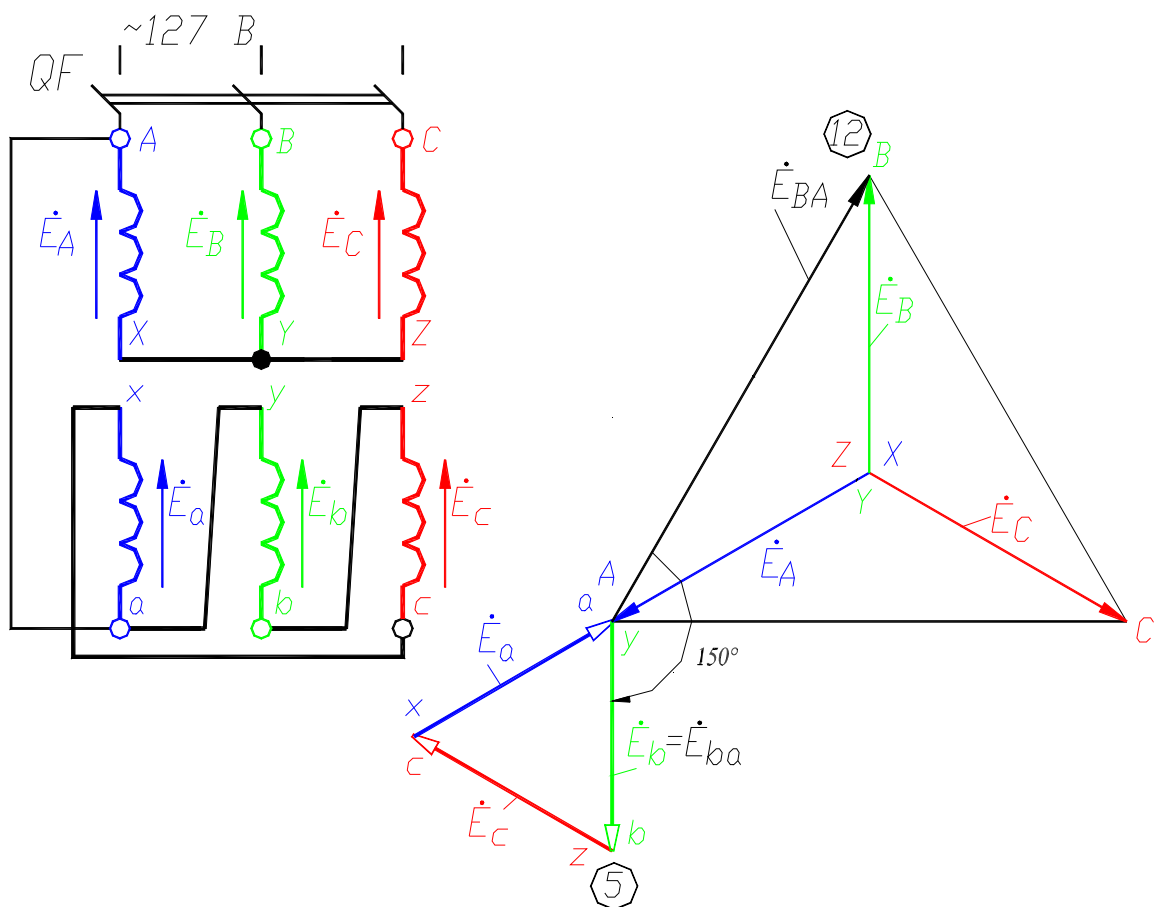


Рис.2.5. Трехфазный трансформатор со схемой и группой соединений У/Д-5

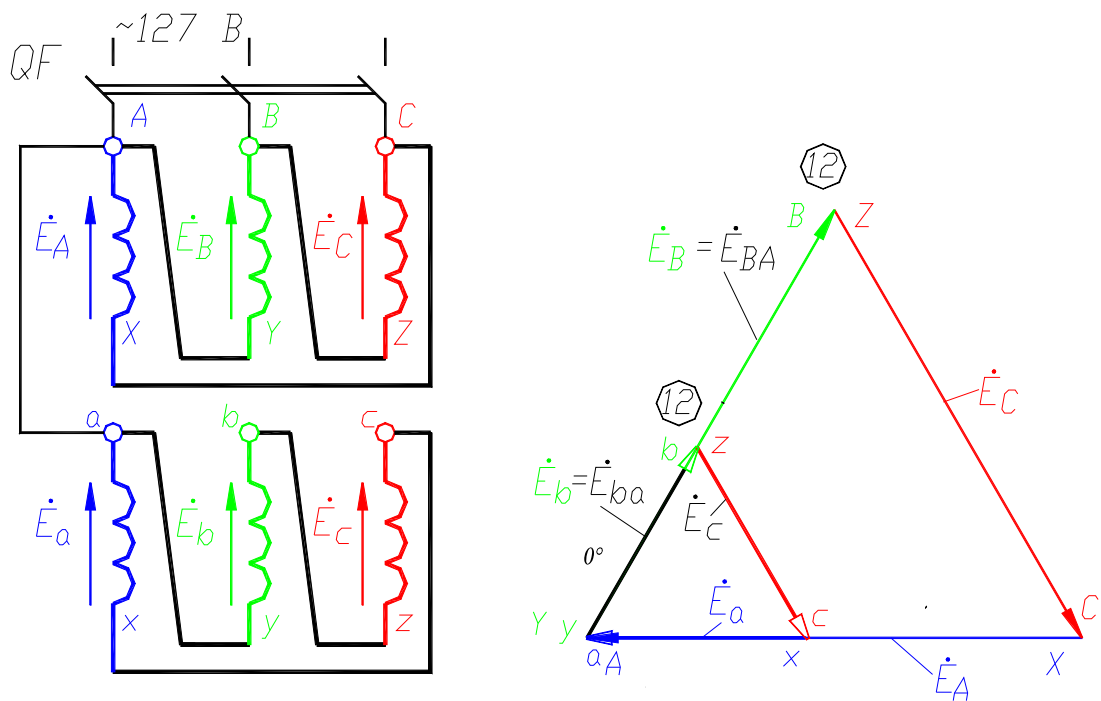


Рис.2.6. Трехфазный трансформатор со схемой и группой соединения Д/Д-0

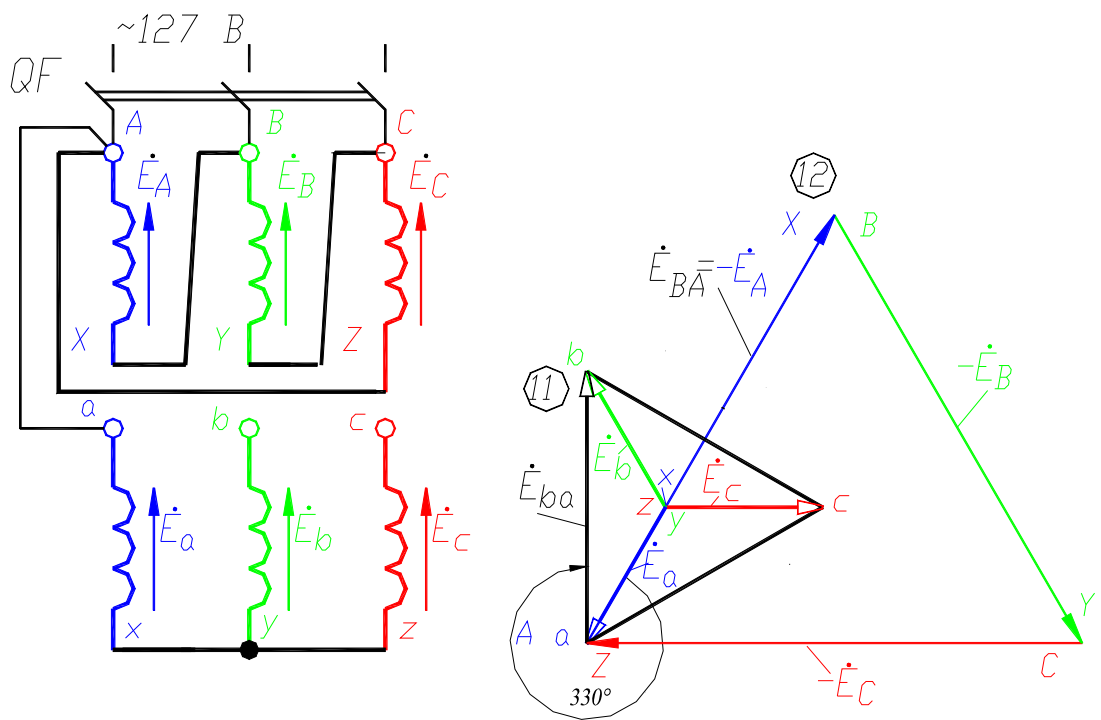


Рис.2.7. Трехфазный трансформатор со схемой и группой соединения Д/У-11

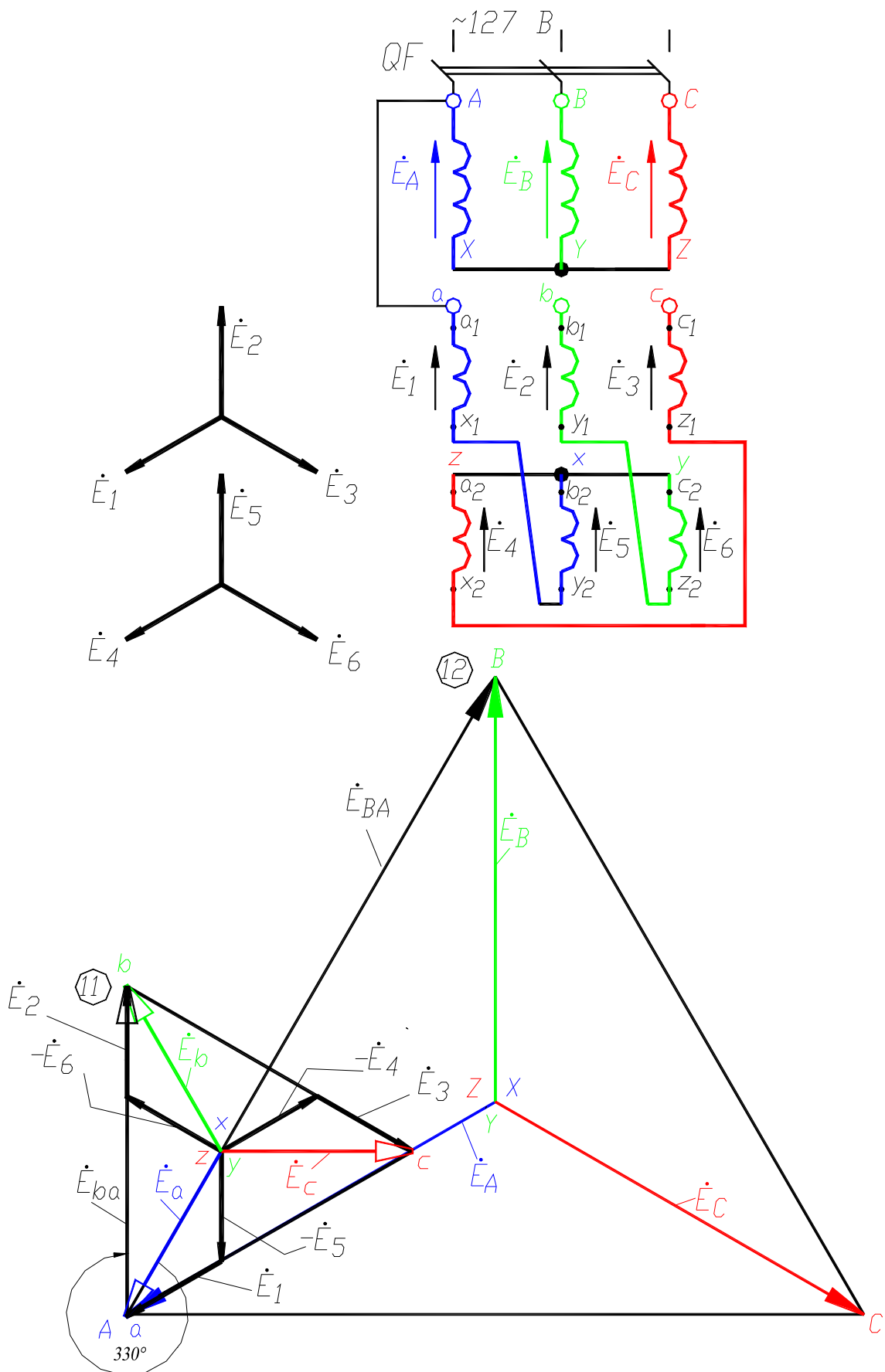


Рис.2.8. Трехфазный трансформатор со схемой и группой соединения Y/Z-11

### 3.3. Условия включения трансформаторов на параллельную работу

В некоторых электроустановках трансформаторы работают параллельно на общую нагрузку. При этом проще решаются вопросы надежного электроснабжения потребителей; при сезонных и суточных изменениях нагрузки можно отключить часть трансформаторов, снижая потери электрической энергии; упрощается организация профилактических ремонтных работ и т.п.

При включении трансформаторов на параллельную работу необходимо, чтобы в режиме холостого хода в их обмотках не возникали уравнивающие токи, а при нагрузке общая нагрузка распределялась между ними пропорционально их номинальным мощностям. Для этого требуется соблюдение следующих условий:

1) равенство номинальных первичных и вторичных напряжений, например, для двух параллельно работающих трансформаторов.

$$U_{1I} = U_{1II}, \quad U_{2I} = U_{2II},$$

т.е. трансформаторы должны иметь одинаковые коэффициенты трансформации  $k_I = k_{II}$ . Практически допускается разница в коэффициентах трансформации не более  $\pm 1,0\%$ ;

2) тождественность групп соединения обмоток, что обеспечивает совпадение по фазе одноименных вторичных напряжений;

3) равенство напряжений короткого замыкания  $U_{кI\%} = U_{кII\%}$ . Допускается отклонение напряжения короткого замыкания  $U_{к\%}$  каждого трансформатора от среднеарифметического значения напряжений короткого замыкания всех трансформаторов не более чем на  $\pm 10\%$ ;

4) рекомендуется включать на параллельную работу трансформаторы, отличающиеся по мощности не более чем в 3 раза.

При соблюдении первых двух условий исключается появление уравнивающего тока при холостом ходе параллельно работающих трансформаторов

$$\dot{I}_{ур} = \Delta \dot{U} / (Z_{кI} + Z_{кII}), \quad (1)$$

где  $\Delta \dot{U}$  - векторная разность вторичных напряжений трансформаторов при холостом ходе;  $Z_{кI}, Z_{кII}$  - сопротивления короткого замыкания трансформаторов.

Уравнивающий ток обуславливает неравномерную нагрузку трансформаторов, сопровождающуюся увеличением потерь мощности и нагрева.

Третье условие необходимо соблюдать для распределения нагрузки между трансформаторами пропорционально их номинальным мощностям. Если напряжения  $U_{к\%}$  трансформаторов не равны, то перегружается трансформатор с меньшим значением  $U_{к\%}$ , т.е. с меньшим сопротивлением  $Z_{к}$ . Распределение нагрузки между двумя трансформаторами можно оценить из выражения:

$$(S_I / S_{II}) = (S_{номI} / S_{номII}) \cdot (U_{кII\%} / U_{кI\%}), \quad (2)$$

где  $S_I, S_{II}$  - мощности нагрузки параллельно работающих трансформаторов;  $S_{номI}, S_{номII}$  - номинальные мощности трансформаторов.

Таким образом, как следует из (2), мощность нагрузки  $S_I$  и  $S_{II}$  между параллельно работающими трансформаторами распределяется обратно пропорционально их напряжениям короткого замыкания  $U_{KI\%}$  и  $U_{KII\%}$ . Мощность нагрузки параллельно работающего трансформатора можно определить по формуле:

$$S_I = S_{H2} S_{НОМ I} U_{KII\%} / (S_{НОМ I} U_{KII\%} + S_{НОМ II} U_{KI\%}), \quad (3)$$

где  $S_{H2} = S_I + S_{II}$  - мощность общей нагрузки трансформаторов.

## 4. Экспериментальное исследование трансформатора

### 4.1. Проверка маркировки выводов обмоток

У трехфазных трансформаторов, предназначенных для включения на параллельную работу, маркировка выводов обмоток указана, поэтому необходимо только убедиться, что она выполнена правильно.

Прежде всего следует проверить обозначения начал и концов обмотки ВН. Для этого фазные обмотки ВН соединяют “звездой”, подключают фазу  $B - Y$  к сети с напряжением  $127 В$  (рис.2.9а) и измеряют напряжения и ЭДС  $U_{BY}, E_{AX}, E_{CZ}, U_{AB}, U_{BC}$ . Так как магнитный поток в среднем стержне трансформатора, где расположена обмотка фазы  $B - Y$ , будет в два раза больше чем магнитные потоки в крайних стержнях и имеет противоположное им направление, то измеренные при правильной маркировке обмоток напряжения и ЭДС будут равны:  $E_{BY} \approx U_{BY}, E_{XA} = U_{ZC} \approx 0,5U_{BY}, U_{AB} = U_{BC} = 1,5U_{BY}$ .

Если маркировка обмоток выполнена неправильно, то одно из напряжений  $U_{AB}$  или  $U_{BC}$  (или оба) будут равны  $0,5U_{BY}$ . Например, для рис.2.9б

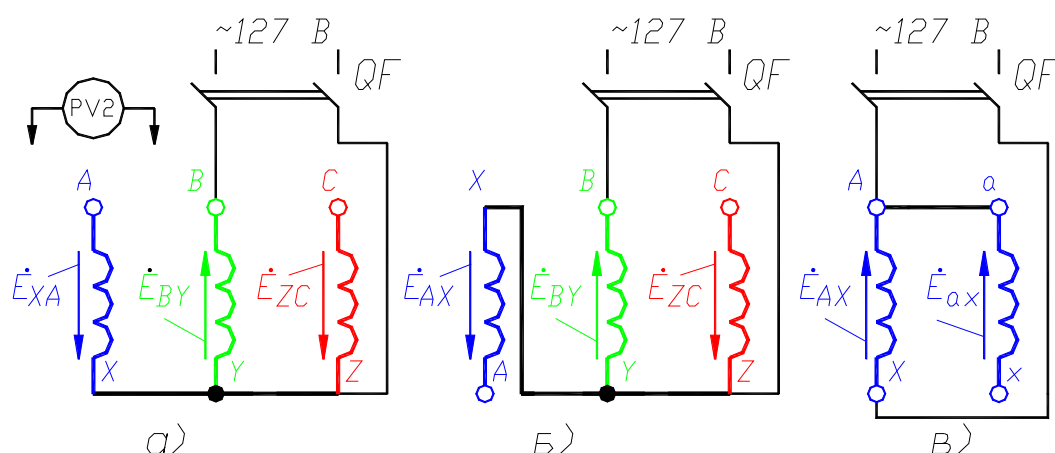


Рис.2.9. Проверка маркировки зажимов обмоток:

а) б) - высокого напряжения; в) - низкого напряжения

$U_{AB} = 0,5U_{BY}, U_{BC} = 1,5U_{BY}$ . Результаты измерений и заключение по ним записываются в табл. 2.1.

Таблица 2.1

	$U_{bB}$	$U_{AX}$	$U_{CZ}$	$U_{AB}$	$U_{BC}$	Заключение
	$B$	$B$	$B$	$B$	$B$	
Трансформатор I						
Трансформатор II						

Маркировку обмоток НН проверяют поочередно для каждой фазы. На рис.2.9в приведена схема для проверки маркировки фазы  $a-x$  обмотки НН (аналогично и для других фаз). При правильной маркировке фазы  $a-x$  напряжение  $U_{Xx} = U_{AX} - U_{ax}$ . Результаты измерений записываются в табл.2.2.

Таблица 2.2

	Фаза А - X			Фаза В - У			Фаза С - Z			Заключение
	$U_{ax}$	$U_{AX}$	$U_{Xx}$	$U_{by}$	$U_{BY}$	$U_{Yy}$	$U_{cz}$	$U_{Cz}$	$U_{Zz}$	
	$B$	$B$	$B$	$B$	$B$	$B$	$B$	$B$	$B$	
Т-р I										
Т-р II										

#### 4.2. Проверка схем и групп соединений обмоток

На практике проверку схем и групп соединения обмоток трехфазных трансформаторов выполняют по методу двух вольтметров, который основан на измерении напряжений между соответствующими выводами обмоток трансформатора с последующим их сравнением с расчетными значениями (рис.2.10 и табл.П.1) Измеренные напряжения должны быть равны расчетным для заданной группы соединений.

В данной работе следует проверить две схемы и группы соединения  $У/Д-11$  и  $Д/Д-0$  (студентам может быть предложено осуществить и проверить другие схемы и группы соединений). Расчетные напряжения определяются по формулам (см. табл.П.1):

а) для группы  $У/Д-11$

$$U_{bB} = U_{cB} = U_{ab} (1 - k_l(3)^{1/2} + k_l^2)^{1/2}, \quad U_{bC} = U_{ab} (1 + k_l^2)^{1/2};$$

б) для группы  $Д/Д-0$

$$U_{bC} = U_{cB} = U_{ab} (1 - k_l + k_l^2)^{1/2}, \quad U_{bB} = U_{ab} (k_l - 1),$$

где  $k_l = U_{AB} / U_{ab}$  – линейный коэффициент трансформации.

Схема измерений для трансформаторов со схемой и группой соединения обмоток  $У/Д-11$  и  $Д/Д-0$  приведена соответственно на рис.2.4 и на рис.2.6. Первичная обмотка (обмотка ВН) подключается к трехфазной сети с напряжением 127 В. Результаты измерений и расчетов сводятся в табл. 2.3.



Таблица 2.3

Схема и группа соединения	Трансформатор I <sup>1)</sup>					Трансформатор II <sup>1)</sup>				
	$U_{AB}$	$U_{ab}$	$U_{bB}$	$U_{bC}$	$U_{cB}$	$U_{AB}$	$U_{ab}$	$U_{bB}$	$U_{bC}$	$U_{cB}$
	$B$	$B$	$B$	$B$	$B$	$B$	$B$	$B$	$B$	$B$
У/Д-11										
Д/Д-0										
.....										

<sup>1)</sup> Примечание. В верхнюю часть ячеек записываются измеренные значения напряжения, а в нижнюю их часть - расчетные.

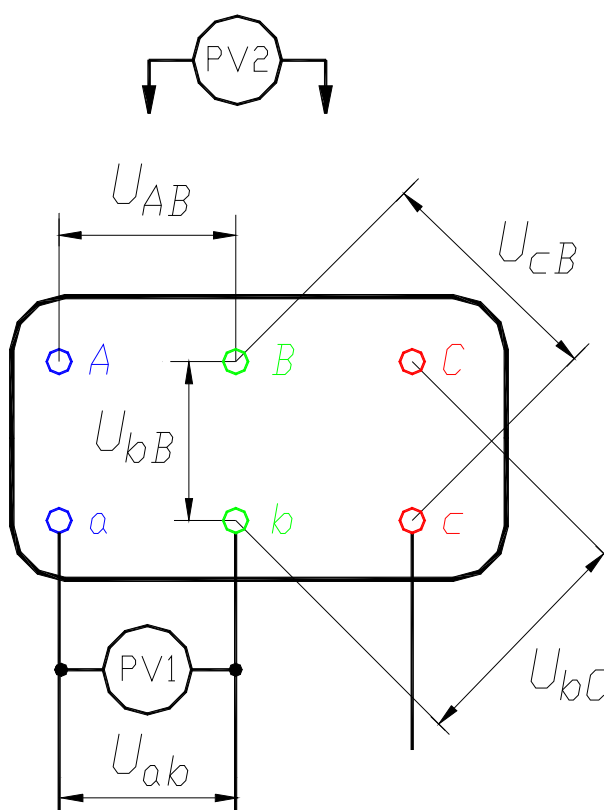


Рис.2.10. К иллюстрации метода двух вольтметров проверки схем и групп соединений обмоток

### 4.3. Исследование распределения нагрузки между параллельно работающими трансформаторами

Схема включения трансформаторов на параллельную работу приведена на рис.2.11. Перед включением трансформаторов необходимо проверить равнопотенциальность выводов обмоток, к которым подключены зажимы выключателя *QS1*.

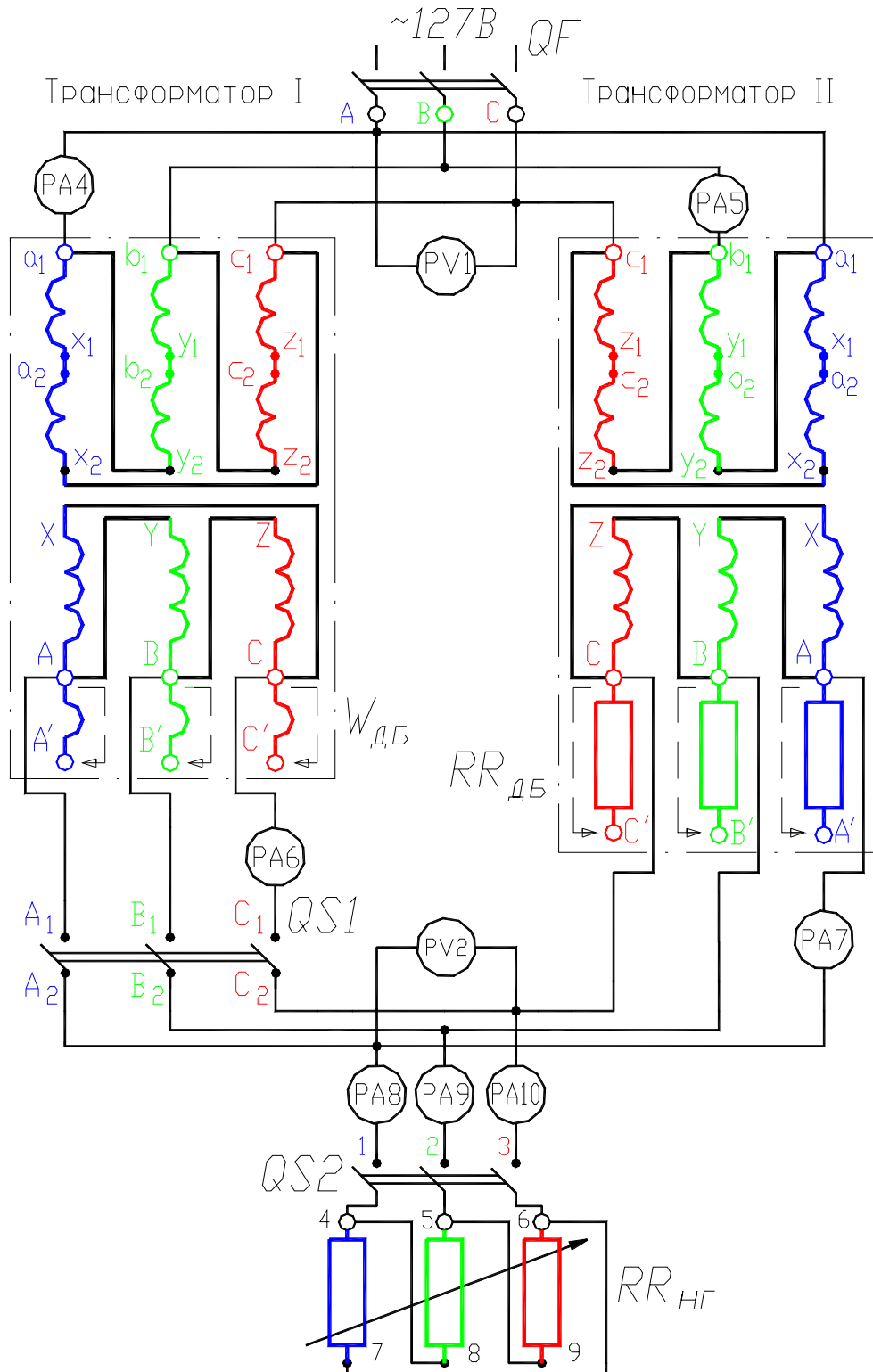


Рис.2.11. Схема лабораторной установки для исследования трансформаторов при параллельной работе

Для этого при отключенных автомате  $QF$  и выключателях  $QS2$  и  $QS1$  замыкают перемычкой зажимы (например  $C_1$  и  $C_2$ ) выключателя  $QS1$ . Далее включают автомат  $QF$  и измеряют напряжение между парами выводов  $A_1, A_2$ , затем -  $B_1, B_2$ . Если фазы напряжений вторичных обмоток трансформаторов совпадают, то напряжения между этими парами выводов будут равны нулю, что имеет место при одинаковых группах соединений и коэффициентах трансформации. Если напряжения не равны нулю, то это означает, что схема собрана неправильно. *До устранения неисправностей включать трансформаторы на параллельную работу нельзя.*

Убедившись в правильности фазировки, следует отключить автомат  $QF$  и снять перемычку. Далее для включения трансформаторов I и II на параллельную работу на общую активную нагрузку  $RR_{н2}$  необходимо последовательно (один за другим) включить автомат  $QF$ , выключатель  $QS1$  и выключатель  $QS2$ .

После этого, постепенно увеличивая нагрузку, записывают значения: первичных токов  $I_{I1}$  и  $I_{I2}$  (показания амперметров  $PA4$  и  $PA5$ ), вторичных токов  $I_{21}$  и  $I_{22}$  (показания амперметров  $PA6$  и  $PA7$ ), общего тока нагрузки  $I_{н2}$  (среднее арифметическое значение показаний амперметров  $PA8, PA9$  и  $PA10$ ), первичного и вторичного напряжений  $U_1$  и  $U_2$  (показания вольтметров  $PV1$  и  $PV2$ ) Трансформаторы загружают до номинального тока.

**Опыт проводят три раза при следующих условиях:**

**1)** равенство коэффициентов трансформации ( $k_I = k_{II}$ ) и напряжений короткого замыкания ( $U_{кI} = U_{кII}$ ) (при этом добавочные витки  $W_{дб}$  и добавочное сопротивление  $RR_{дб}$  отключены);

**2)** равенство коэффициентов трансформации ( $k_I = k_{II}$ ) и неравенство напряжений короткого замыкания ( $U_{кI} \neq U_{кII}$ ) (при этом добавочные витки  $W_{дб}$  отключены, а добавочное сопротивление  $RR_{дб}$  включено);

**3)** неравенство коэффициентов трансформации ( $k_I \neq k_{II}$ ) и равенство напряжений короткого замыкания ( $U_{кI} = U_{кII}$ ) (при этом добавочные витки  $W_{дб}$  включены, а добавочное сопротивление  $RR_{дб}$  отключено).

Результаты измерений для случаев **1), 2)** и **3)** записывают соответственно в табл.2.4а, табл.2.4б и табл.2.4в (снимаются 5 точек при различных значениях общего тока нагрузки  $I_{н2}$ , в том числе фиксируется точка при номинальных токах трансформаторов).

Таблица 2.4а

1) ( $k_I = k_{II}$ ) ( $U_{кI} = U_{кII}$ )										
Нагрузка			Трансформатор I				Трансформатор II			
$U_2$	$I_{н2}$	$P_{н2}$	$U_1$	$I_{I1}$	$I_{21}$	$S_I$	$U_1$	$I_{I2}$	$I_{22}$	$S_{II}$
<i>B</i>	<i>A</i>	<i>Bm</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>B·A</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>B·A</i>

Таблица 2.4б

2) ( $k_I = k_{II}$ ) ( $U_{KI} \neq U_{KII}$ )										
Нагрузка			Трансформатор I				Трансформатор II			
$U_2$	$I_{н2}$	$P_{н2}$	$U_I$	$I_{II}$	$I_{2I}$	$S_I$	$U_I$	$I_{II}$	$I_{2II}$	$S_{II}$
$B$	$A$	$Bm$	$B$	$A$	$A$	$B \cdot A$	$B$	$A$	$A$	$B \cdot A$

Таблица 2.4в

3) ( $k_I \neq k_{II}$ ) ( $U_{KI} = U_{KII}$ )										
Нагрузка			Трансформатор I				Трансформатор II			
$U_2$	$I_{н2}$	$P_{н2}$	$U_I$	$I_{II}$	$I_{2I}$	$S_I$	$U_I$	$I_{II}$	$I_{2II}$	$S_{II}$
$B$	$A$	$Bm$	$B$	$A$	$A$	$B \cdot A$	$B$	$A$	$A$	$B \cdot A$

Значения мощностей рассчитываются по формулам:  $P_{н2} = (3)^{1/2} U_2 I_{н2}$ ,  $S_I = (3)^{1/2} U_I I_{II}$ ,  $S_{II} = (3)^{1/2} U_I I_{II}$ . Для каждого из случаев 1), 2), 3) строят зависимости  $I_{2I}$ ,  $I_{2II} = f(I_{н2})$ , а также внешние характеристики трансформаторов  $U_2 = f(I_{2I}, I_{2II})$ . Для режима номинальной нагрузки следует выполнить, используя выражение (3), теоретическую проверку распределения нагрузки между трансформаторами при неравенстве их напряжений короткого замыкания (сравнить результаты расчета с данными табл.2.4б).

#### 4.4. Анализ уравнительного тока параллельно работающих трансформаторов

Для оценки величины уравнительных токов, протекающих в обмотках при неравенстве коэффициентов трансформации ( $k_I \neq k_{II}$ ), проводят опыты:

1) при параллельной работе трансформаторов и отключенной нагрузке  $RR_{н2}$  (выключатель  $QS2$  отключен). В процессе опыта добавочное сопротивление  $RR_{дб}$  отключено, а добавочные витки  $W_{дб}$  включены;

2) при холостом ходе трансформаторов (выключатели  $QS1$  и  $QS2$  отключены). В процессе этого опыта добавочные витки  $W_{дб}$  включены.

Измерение проводят при номинальном значении напряжения  $U_I = 127B$ , их результаты для случаев 1) и 2) записывают соответственно в табл.2.5а и в табл.2.5б.

Таблица 2.5а

1) нагрузка $RR_{н2}$ отключена. ( $k_I \neq k_{II}$ ) ( $U_{KI} = U_{KII}$ )					
$U_I$	$U_2$	Трансформатор I		Трансформатор II	
		$I_{II}$	$I_{2ypI}$	$I_{II}$	$I_{2ypII}$
$B$	$B$	$A$	$A$	$A$	$A$
127					

Таблица 2.5б

2) холостой ход. ( $k_I \neq k_{II}$ )					
$U_I$	$\Delta U$	Трансформатор I		Трансформатор II	
		$I_{IxI}$	$I_{2ypI}$	$I_{IxII}$	$I_{2ypII}$
$B$	$B$	$A$	$A$	$A$	$A$
127			0		0

В табл.2.5б величина  $\Delta U$  - значение напряжения между зажимами, например  $C_1$  и  $C_2$ , разомкнутого выключателя  $QSI$ . Оно используется при расчете значения уравнильного тока по формуле (1).

Из сопоставления первичных токов измеренных в опыте 1) и 2) (сравнить данные в табл.2.5а и в табл.2.5б) следует, что они не равны. Это объясняется тем, что вторичный уравнильный ток трансформируется в первичные обмотки и геометрически складывается с токами холостого хода.

При параллельной работе трансформаторов на общую нагрузку  $RR_{н2}$  уравнильный ток обусловит их неравномерную загрузку (сравнить данные в табл.2.4а и в табл.2.4в).

Теоретическая проверка уравнильного тока выполняется по выражению (1), где  $Z_{KI} = U_{KI\%} (U_{2I})^2 / 100 S_{номI}$ , Ом ;  $Z_{KII} = U_{KII\%} (U_{2II})^2 / 100 S_{номII}$ , Ом (сравнить результаты расчета с данными табл.2.5а).

## 5. Содержание отчета

Отчет должен содержать программу лабораторной работы, паспортные данные трансформаторов, схемы испытаний, результаты опытных и теоретических исследований в соответствующих таблицах, графические зависимости.

## 6. Контрольные вопросы

1. Назовите условия включения трансформаторов на параллельную работу.
2. В каких случаях при включении трансформаторов на параллельную работу будет протекать значительный уравнильный ток?
3. Почему трансформатор с меньшим значением напряжения короткого замыкания больше перегружается при параллельной работе, чем остальные трансформаторы?
4. Почему не рекомендуется включать на параллельную работу трансформаторы, у которых номинальные мощности отличаются более чем в 3 раза?
5. Что означает номер группы соединения обмоток трансформатора? Как он определяется опытным путем?
6. Как опытным путем выполнить маркировку обмоток трансформатора?
7. Осуществить маркировку выводов обмотки НН согласно заданной схеме и группе соединения обмоток трехфазного двухобмоточного трансформатора.

**Приложение**

**Формулы для расчета значений напряжений,  
используемых для проверки схем и групп соединения обмоток**

Таблица П.1

Группа соединения	Угловое смещение ЭДС	Возможные схемы соединения обмоток	$U_{bB} (U_{xx})$	$U_{bC}$	$U_{cB}$
0	0°	Y/Y D/D D/Z	$U_{ab}(k_l-1)$	$U_{ab} (1-k_l+k_l^2)^{1/2}$	
1	30°	Y/D D/Y Y/Z	$U_{ab} (1-k_l(3)^{1/2}+k_l^2)^{1/2}$		$U_{ab} (1+k_l^2)^{1/2}$
2	60°	Y/Y D/D D/Z	$U_{ab} (1-k_l+k_l^2)^{1/2}$	$U_{ab}(k_l-1)$	$U_{ab} (1+k_l+k_l^2)^{1/2}$
3	90°	Y/D D/Y Y/Z	$U_{ab} (1+k_l^2)^{1/2}$	$U_{ab} (1-k_l(3)^{1/2}+k_l^2)^{1/2}$	$U_{ab} (1+k_l(3)^{1/2}+k_l^2)^{1/2}$
4	120°	Y/Y D/D D/Z	$U_{ab} (1+k_l+k_l^2)^{1/2}$	$U_{ab} (1-k_l+k_l^2)^{1/2}$	$U_{ab}(1+k_l)$
5	150°	Y/D D/Y Y/Z	$U_{ab} (1+k_l(3)^{1/2}+k_l^2)^{1/2}$	$U_{ab} (1+k_l^2)^{1/2}$	$U_{ab} (1+k_l(3)^{1/2}+k_l^2)^{1/2}$
6	180°	Y/Y D/D D/Z	$U_{ab}(1+k_l)$	$U_{ab} (1+k_l+k_l^2)^{1/2}$	
7	210°	Y/D D/Y Y/Z	$U_{ab} (1+k_l(3)^{1/2}+k_l^2)^{1/2}$		$U_{ab} (1+k_l^2)^{1/2}$
8	240°	Y/Y D/D D/Z	$U_{ab} (1+k_l+k_l^2)^{1/2}$	$U_{ab}(1+k_l)$	$U_{ab} (1-k_l+k_l^2)^{1/2}$
9	270°	Y/D D/Y Y/Z	$U_{ab} (1+k_l^2)^{1/2}$	$U_{ab} (1+k_l(3)^{1/2}+k_l^2)^{1/2}$	$U_{ab} (1-k_l(3)^{1/2}+k_l^2)^{1/2}$
10	300°	Y/Y D/D D/Z	$U_{ab} (1-k_l+k_l^2)^{1/2}$	$U_{ab} (1+k_l+k_l^2)^{1/2}$	$U_{ab}(k_l-1)$
11	330°	Y/D D/Y Y/Z	$U_{ab} (1-k_l(3)^{1/2}+k_l^2)^{1/2}$	$U_{ab} (1+k_l^2)^{1/2}$	$U_{ab} (1-k_l(3)^{1/2}+k_l^2)^{1/2}$

## РАБОТА № 3

# НЕСИММЕТРИЧНАЯ НАГРУЗКА ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

### Оглавление

1. Цель работы .....	55
2. Программа работы .....	55
3. Основы теории трансформатора.....	55
3.1. Трансформатор со схемой соединения $Y/Y_n$ .....	57
3.2. Трансформатор со схемой соединения $D/Y_n$ .....	60
3.3. Трансформатор со схемой соединения $Y/Z_n$ .....	61
4. Экспериментальное исследование трансформатора .....	63
4.1. Исследование трехфазного трансформатора при несимметричной (однофазной) нагрузке .....	63
4.2. Определение величины сопротивления нулевой последовательности трансформатора .....	63
4.3. Аналитическое определение распределения токов трехфазного трансформатора при несимметричной (однофазной) нагрузке .....	65
4.4. Определение величины смещения нейтрали на основе векторной диаграммы .....	65
4.5. Аналитическое определение величины смещения нейтрали .....	65
5. Содержание отчета .....	66
6. Контрольные вопросы .....	66

## 1. Цель работы

Провести сравнительный анализ влияния схемы соединения трехфазного двухобмоточного трансформатора на искажение симметрии первичных и вторичных линейных и фазных напряжений. Овладеть методикой определения сопротивления нулевой последовательности трансформаторов со схемами соединения  $Y/Y_n$ ,  $D/Y_n$ ,  $Y/Z_n$ .

## 2. Программа работы

2.1. Собрать на лабораторном стенде, поочередно, схемы соединения обмоток трансформатора  $Y/Y_n$ ,  $Y/Z_n$ ,  $D/Y_n$ , нагрузить трансформатор однофазной нагрузкой, измерить распределение токов в обмотках, линейные и фазные напряжения.

2.2. Определить опытным путем для всех вышеуказанных схем величину сопротивления нулевой последовательности трансформатора в целом.

2.3. Рассчитать распределение токов в первичных обмотках и сравнить с результатами эксперимента (п. 2.1).

2.4. Построить в масштабе векторные диаграммы вторичных напряжений, на основании экспериментальных данных (п. 2.1). Определить из диаграмм величину смещения *нейтрали* ( $E_n$ ).

2.5. Рассчитать величину смещения *нейтрали* для всех вышеуказанных схем. При расчете использовать экспериментальные данные (п.п. 2.1 и 2.2). Сравнить результаты расчета со значением  $E_n$  (п. 2.4).

## 3. Основы теории трансформатора

В трансформаторе со схемой соединения обмоток  $Y/Y_n$ ,  $Y/Z_n$ ,  $D/Y_n$  при несимметричной нагрузке в токах вторичной обмотки имеют место составляющие нулевой последовательности. При отсутствии в первичной обмотке контуров для протекания токов нулевой последовательности (схемы  $Y/Y_n$ ,  $Y/Z_n$ ) они не трансформируются в эту обмотку. Поэтому токи нулевой последовательности вторичной обмотки, не уравновешенные аналогичными токами первичной обмотки, являются намагничивающими, т.е. создают *основное магнитное поле нулевой последовательности*. Оно наводит в фазах первичной и вторичной обмоток электродвижущие силы нулевой последовательности, которые, накладываясь на ЭДС, обусловленные *основным магнитным потоком прямой последовательности*, искажают симметрию фазных напряжений.

В зависимости от устройства магнитопровода (*трехстержневой или групповой*) и схемы соединения обмоток ( $Y$ ,  $D$  или  $Z$ ), а также от режима нейтрали обмоток (*нейтральная точка изолирована или заземлена*) искажение симметрии различно.

На рис.3.1 показаны симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательности трехфазного тока протекающего во вторичной обмотке трансформатора при несимметричной однофазной нагрузке (загружена



фаза  $a$  -  $x$ ). На рис.3.2 приведена система трехфазного тока  $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$  вторичной обмотки трансформатора при этой нагрузке. Как известно, метод симметричных составляющих основан на принципе наложения. Далее предполагаем, что магнитная система исследуемого трансформатора ненасыщена (линейна), что обуславливает возможность применения этого принципа.

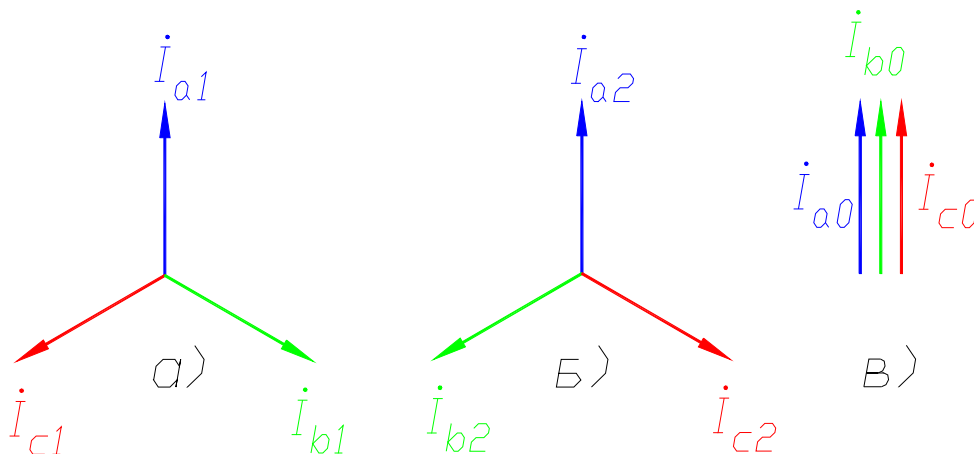


Рис.3.1. Симметричные составляющие несимметричной трехфазной системы вторичных токов  $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$  при однофазной нагрузке трансформатора: прямая (а), обратная (б) и нулевая (в) последовательность

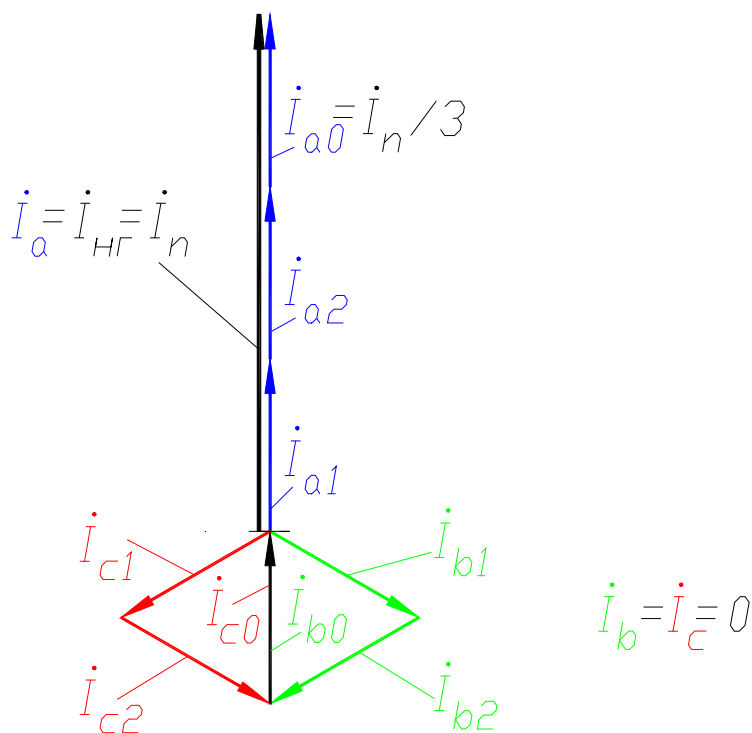


Рис.3.2. Несимметричная трехфазная система токов  $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$  вторичной обмотки трансформатора при однофазной нагрузке (см. рис.3.1)

### 3.1. Трансформатор со схемой соединения $Y/Y_n$ (рис. 3.3а)

Для упрощения анализа влияния схемы соединения на проявление составляющих нулевой последовательности будем рассматривать трансформатор с коэффициентом трансформации  $k = 1,0$  и током холостого хода  $I_x = 0,0$ .

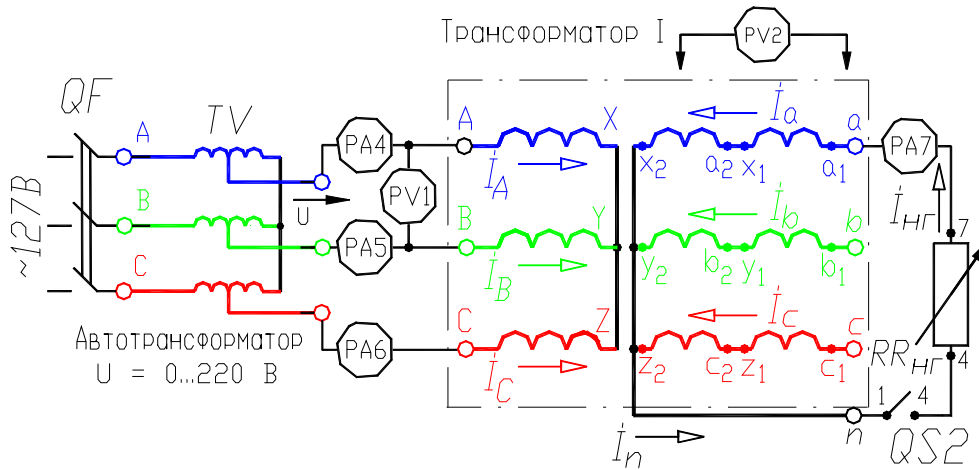


Рис.3.3а. Схема лабораторной установки для исследования трансформатора со схемой соединения  $Y/Y_n$  при однофазной нагрузке

В лабораторной установке все опыты проводятся на одном и том же трансформаторе, вторичная обмотка которого секционирована на две равные части, например,  $a_1 - x_1$  и  $a_2 - x_2$ . Токи первичной обмотки обозначим  $I_A, I_B, I_C$ , токи вторичной обмотки -  $I_a, I_b, I_c$ , ток в нейтральном проводе вторичной обмотки -  $I_n$ .

В соответствии со 2-м законом Кирхгофа для магнитной цепи с учетом принятых допущений можно записать (обход по замкнутому контуру)

$$I_A - I_a + I_b - I_B = 0, \quad (1)$$

$$I_A - I_a + I_c - I_C = 0. \quad (2)$$

На основании (1) и (2) получаем

$$I_A - I_a = I_B - I_b = I_C - I_c. \quad (3)$$

В соответствии с 1-м законом Кирхгофа для электрической цепи имеем

$$I_A + I_B + I_C = 0, \quad (4)$$

$$I_a + I_b + I_c - I_n = 0. \quad (5)$$

Вычитая (5) из (4) запишем с учетом (3):

$$I_A = I_a - I_n / 3 = I_a - I_{a0}. \quad (6)$$

Аналогично получим:

$$I_B = I_b - I_n / 3 = I_b - I_{b0}, \quad (7)$$

$$I_C = I_c - I_n / 3 = I_c - I_{c0}. \quad (8)$$

Из выражений (6), (7), (8) следует, что вторичные токи  $I_a, I_b, I_c$  не полностью трансформируются на первичную сторону трансформатора.

Некоторая доля, а именно ток  $\dot{I}_n/3 = \dot{I}_{a0} = \dot{I}_{b0} = \dot{I}_{c0}$ , являющийся током нулевой последовательности протекает только во вторичной обмотке и замыкается через нейтральный провод. Токи нулевой последовательности  $\dot{I}_{a0}$ ,  $\dot{I}_{b0}$ ,  $\dot{I}_{c0}$  совпадают во времени во всех фазах (см. рис.3.1в).

В частном случае, когда нагружена только одна фаза вторичной обмотки (например, фаза  $a = x$ ), то токи в фазах этой обмотки равны (см. рис.3.3а):

$$I_a = I_{н2} = I_n \quad I_b = I_c = 0,$$

а фазные (линейные) токи первичной обмотки определяются из выражений:

$$I_A = 2I_{н2}k_{21}/3, \quad I_B = -I_{н2}k_{21}/3, \quad I_C = -I_{н2}k_{21}/3, \quad (9)$$

где  $k_{21} = U_{ab}/U_{AB}$  - линейный коэффициент трансформации.

Схема замещения трансформатора для тока нулевой последовательности  $I_{a0}$  приведена на рис.3.4а. (см. также рис 1.2 в описании Лабораторной работы №1). На схеме замещения приняты следующие обозначения:  $Z_2 = R_2 + jX_2$  - полное сопротивление вторичной обмотки;  $X_{m0}$  - индуктивное сопротивление нулевой последовательности, обусловленное основным магнитным потоком нулевой последовательности  $\Phi_0$ ;  $R_{m0}$  - активное сопротивление нулевой последовательности, обусловленное потерями в стали и в баке, вызванными потоком  $\Phi_0$ ;  $Z_{m0} = R_{m0} + jX_{m0}$  - полное сопротивление нулевой последовательности намагничивающей ветви 1 - 2 схемы замещения.

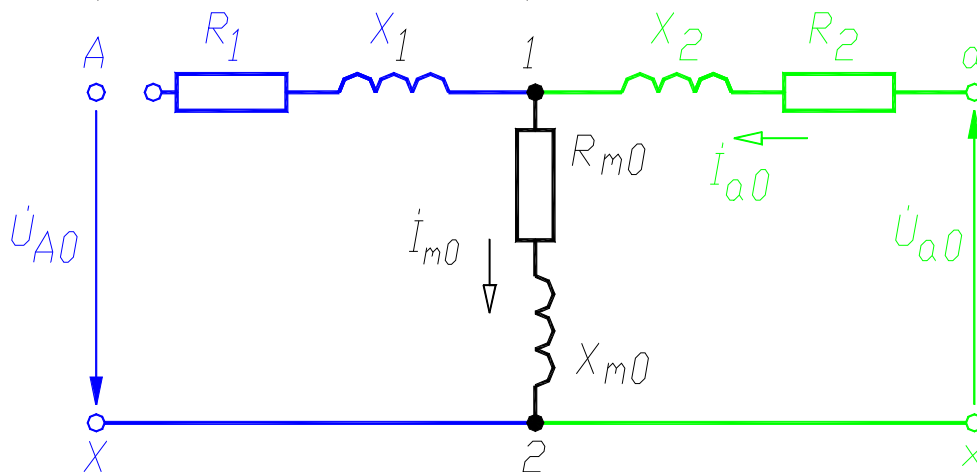


Рис.3.4а. Схема замещения трансформатора для токов нулевой последовательности; схема соединения обмоток  $Y/Y_n$

Сопротивление нулевой последовательности  $Z_{0n}$  трансформатора току нулевой последовательности  $I_{a0}$  в целом равно сумме сопротивлений  $Z_2$  и  $Z_{m0}$ , то есть  $Z_{0n} = Z_2 + Z_{m0}$ , что составляет значительную величину.

Основной магнитный поток  $\Phi_0$ , созданный намагничивающим током нулевой последовательности  $I_{a0} = I_{m0}$ , замыкается в трехстержневом трансформаторе от ярма к ярму и наводит в фазах первичной и вторичной обмоток ЭДС

нулевой последовательности, соответственно,  $\dot{E}_{A0} = \dot{E}_{B0} = \dot{E}_{C0}$  и  $\dot{E}_{a0} = \dot{E}_{b0} = \dot{E}_{c0}$  (рис.3.5). Фазные напряжения в этом случае будут равны (например, для фазы  $A = X$  первичной обмотки и фазы  $a = x$  вторичной обмотки):

$$\dot{U}_A = -\dot{E}_A - \dot{E}_{A0} + \dot{I}_A Z_1, \quad \dot{U}_a = \dot{E}_a + \dot{E}_{a0} - \dot{I}_a Z_2. \quad (10)$$

ЭДС нулевой последовательности, направленные во всех фазах на комплексной плоскости в одну сторону вызывают искажение симметрии системы фазных напряжений как первичной, так и вторичной обмоток. Векторная диаграмма напряжений вторичной обмотки при однофазной нагрузке представлена на рис.3.6. При построении векторных диаграмм (рис.3.5 и рис.3.6) не учитывались потери в стали, обусловленные магнитным потоком нулевой последовательности.

Таким образом, в трансформаторе с соединением обмоток  $Y/Y_n$  токи нулевой последовательности могут вызвать сильные искажения значений фазных напряжений, что неприемлемо и опасно для потребителей.

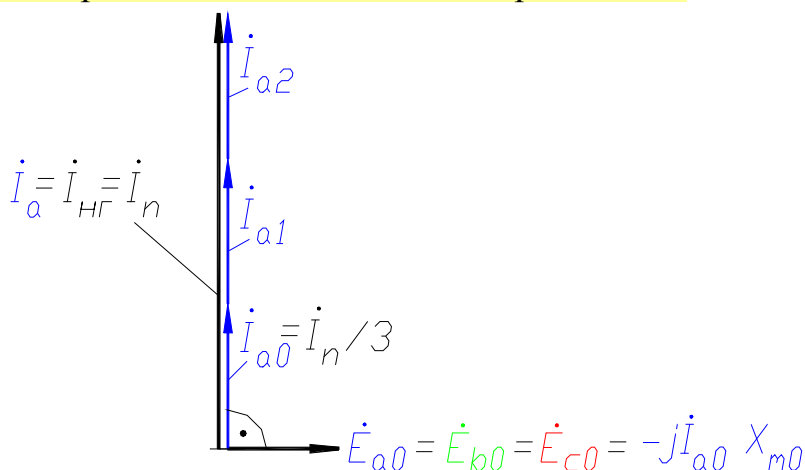


Рис.3.5. К иллюстрации возникновения ЭДС нулевой последовательности (см. рис.3.2)

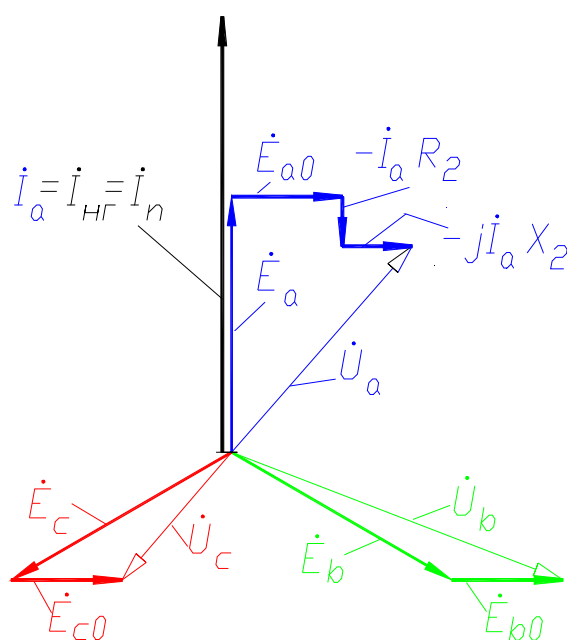


Рис.3.6. Векторная диаграмма напряжений вторичной обмотки трансформатора при однофазной нагрузке (см. рис.3.2, рис. 3.3а и рис.3.5)

### 3.2. Трансформатор со схемой соединения Д/У<sub>n</sub> (рис. 3.3б)

Схема Д/У<sub>n</sub> позволяет существенно уменьшить величину основного магнитного потока нулевой последовательности  $\Phi_0$  и, следовательно, величину ЭДС нулевой последовательности. В замкнутом контуре первичной обмотки могут протекать токи нулевой последовательности (они индуцируются со вторичной стороны) и поэтому магнитодвижущие силы нулевой последовательности вторичной и первичной обмоток практически уравниваются.

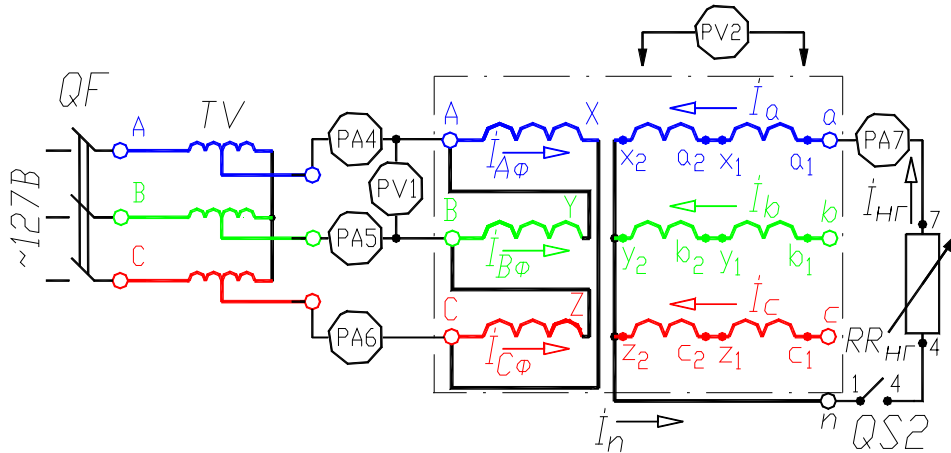


Рис.3.3б. Схема лабораторной установки для исследования трансформатора со схемой соединения Д/У<sub>n</sub> при однофазной нагрузке

С учетом допущения, что ток холостого хода равен нулю, фазные и линейные токи определяются из выражений:

$$\dot{I}_{A\phi} = -k_{21}\dot{I}_a, \quad \dot{I}_A = \dot{I}_{A\phi} - \dot{I}_{B\phi}, \quad (11)$$

$$\dot{I}_{B\phi} = -k_{21}\dot{I}_b, \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{B\phi} - \dot{I}_{C\phi}, \quad (12)$$

$$\dot{I}_{C\phi} = -k_{21}\dot{I}_c, \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{C\phi} - \dot{I}_{A\phi}. \quad (13)$$

В частном случае, при однофазной нагрузке (нагружена фаза  $a = x$  вторичной обмотки) имеем  $\dot{I}_a = \dot{I}_{H2} = \dot{I}_n$ ,  $\dot{I}_b = \dot{I}_c = 0$  (см. рис.3.3б), тогда фазные и линейные токи определяются из выражений:

$$\dot{I}_{A\phi} = -k_{21}\dot{I}_{H2}, \quad \dot{I}_A = -k_{21}\dot{I}_{H2}, \quad (14a)$$

$$\dot{I}_{B\phi} = 0, \quad \dot{I}_B = 0, \quad (14б)$$

$$\dot{I}_{C\phi} = 0, \quad \dot{I}_C = +k_{21}\dot{I}_{H2}. \quad (14в)$$

Схема замещения трансформатора для токов нулевой последовательности приведена на рис.3.4б. (см. также рис 1.2 в описании Лабораторной работы №1). Намагничивающий ток нулевой последовательности в этой схеме пренебрежимо мал, так как сопротивление  $Z_{m0}$  существенно больше сопротивления  $Z_K = Z_1 + Z_2$  (для трехстержневого трансформатора  $Z_{m0} \approx (7 \dots 15)Z_K$ ). Также малы магнитный поток  $\Phi_0$  и ЭДС нулевой последовательности.

Сопротивление нулевой последовательности  $Z_{0n}$  трансформатора току нулевой последовательности в целом примерно равно сумме сопротивлений  $Z_1$  и  $Z_2$ , то есть  $Z_{0n} \approx Z_K$ , что составляет относительно небольшую величину.

Несимметрия напряжения невелика и определяется падениями напряжения на сопротивлениях  $Z_1$  и  $Z_2$  обмоток трансформатора. Поскольку напряжения на фазах трансформатора при несимметричной нагрузке сравнительно симметричны, схема  $\Delta/Y_n$  предпочтительнее при преобладании однофазных нагрузок. Недостатком схемы является то, что непосредственно к фазной обмотке трансформатора прикладывается линейное напряжение сети, что повышает требования к фазной изоляции.

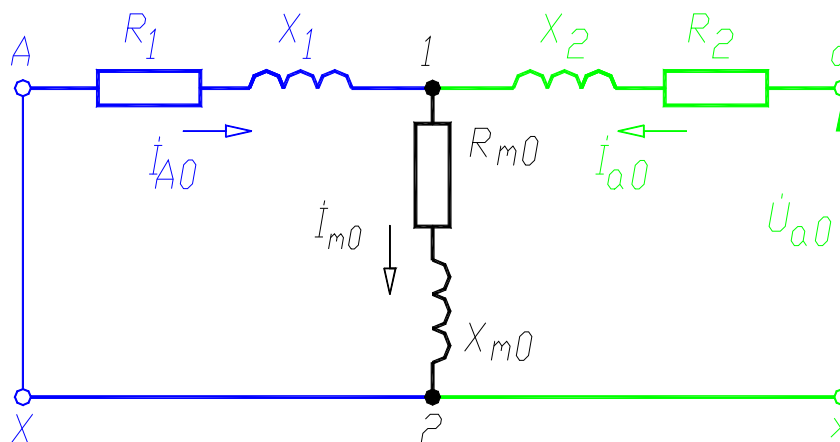


Рис.3.4б. Схема замещения трансформатора для токов нулевой последовательности; схема соединения обмоток  $\Delta/Y_n$

### 3.3. Трансформатор со схемой соединения $Y/Z_n$ (рис. 3.3в)

Особенностью схемы “зигзаг” является то, что каждую фазу обмотки разделяют на две равные части (полуфазы), которые располагают на разных стержнях магнитопровода и соединяют между собой последовательно и встречно. ЭДС фазы обмотки, соединенной в “зигзаг”, равна геометрической разности ЭДС полуфаз, которые сдвинуты на  $120^\circ$  (см. рис.2.8 в описании Лабораторной работы №2). Поэтому для достижения равенства фазных ЭДС обмотки, соединенной по схеме “звезда”, и обмотки, соединенной по схеме “зигзаг”, число витков последней должно быть увеличено в  $2/(3)^{1/2} \approx 1,15$  раза. Это является недостатком схемы “зигзаг”, так как при таком соединении увеличивается расход обмоточного провода.

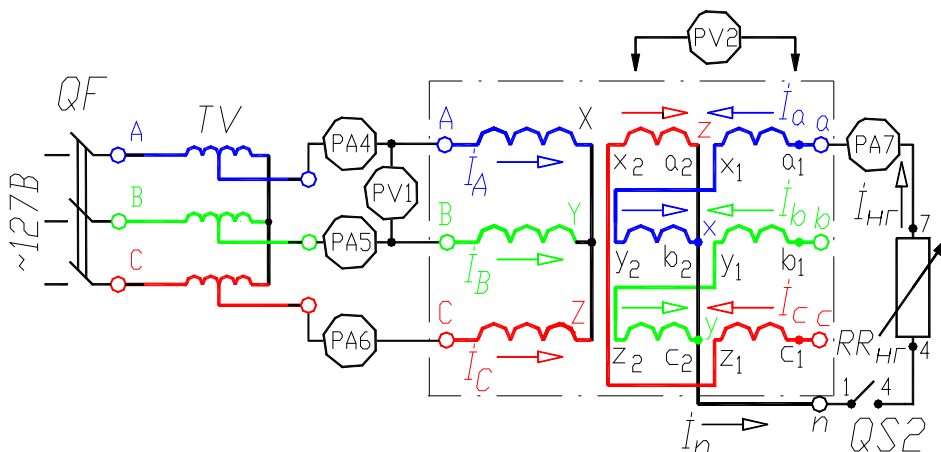


Рис.3.3в. Схема лабораторной установки для исследования трансформатора со схемой соединения  $Y/Z_n$  при однофазной нагрузке

Первичные токи трансформатора, с учетом коэффициента трансформации, определяются по выражениям:

$$I_A = k_{21} (I_a - I_c) / 3^{1/2}, \quad (15)$$

$$I_B = k_{21} (I_b - I_a) / 3^{1/2}, \quad (16)$$

$$I_C = k_{21} (I_c - I_b) / 3^{1/2}. \quad (17)$$

В частном случае для однофазной нагрузки (например, нагружена фаза  $a$ -х вторичной обмотки) имеем  $I_a = I_{H2} = I_n$ ,  $I_b = I_c = 0$ , тогда фазные (линейные) токи определяются из выражений (см. рис.3.3в):

$$I_A = k_{21} I_{H2} / 3^{1/2}, \quad I_B = -k_{21} I_{H2} / 3^{1/2}, \quad I_C = 0. \quad (18)$$

В трансформаторе со схемой соединения обмоток  $Y/Z_n$  токи нулевой последовательности вторичной обмотки в первичную не трансформируются (так как в первичной обмотке для них нет проводящего контура). Магнитодвижущие силы нулевой последовательности полуфаз вторичной обмотки, расположенных на каждом стержне, направлены навстречу друг к другу и в значительной степени взаимно компенсируются (см. рис.3.3в). Поэтому основной магнитный поток  $\Phi_0$  и ЭДС нулевой последовательности, а также сопротивление нулевой последовательности  $Z_{m0}$  сравнительно невелики.

Сопротивление нулевой последовательности  $Z_{0n}$  трансформатора току нулевой последовательности в целом несколько меньше сопротивления  $Z_k$  трансформатора, что составляет относительно небольшую величину.

Несимметрия напряжения невелика и определяется падениями напряжения на сопротивлениях обмоток трансформатора. Рассматриваемая схема применяется при наличии однофазных токоприемников, влияющих на несимметрию нагрузки. *В частности трансформаторы со схемой соединения обмоток  $Y/Z_n$  рекомендуется применять для сельской электрификации.*

Согласно ГОСТ 11677-85 *двухобмоточный трансформатор должен быть рассчитан на продолжительную нагрузку нейтрали обмотки НН не более:*

*для схемы  $Y/Y_n$  - 25%;*

*для схемы  $D/Y_n$  - 75%;*

*для схемы  $Y/Z_n$  - 75%*

*номинального тока обмотки НН; при этом ни в одной из фаз ток не должен превышать 1,05 номинального значения.*

*Практически симметричная трехфазная система напряжений* – такая трехфазная система напряжений, для которой напряжение обратной последовательности не превышает 1% от напряжения прямой последовательности при разложении данной трехфазной системы напряжений на системы прямой и обратной последовательности.

*Практически симметричная трехфазная система токов* – такая трехфазная система токов, для которой ток обратной последовательности не превышает 5% от тока прямой последовательности при разложении данной трехфазной системы токов на системы прямой и обратной последовательности.

## 4. Экспериментальные исследования

Работа выполняется на одном трехстержневом трехфазном трансформаторе, на котором изменяются только схемы соединения обмоток.

### 4.1. Исследование трехфазного трансформатора при несимметричной (однофазной) нагрузке

Поочередно соединяют обмотки трансформатора в соответствии со схемами, представленными на рис. 3.3а, рис.3.3б и рис.3.3в. В качестве нагрузки используется одна фаза трехфазного реостата. На первичной обмотке трансформатора с помощью автотрансформатора устанавливают напряжение равное примерно половине номинального и нагружают трансформатор однофазной нагрузкой так, чтобы ток во вторичной обмотке был примерно равен номинальному значению ( $I_a = I_{H2} = 6 \text{ A}$ ). Показания амперметров и значения линейных и фазных напряжений обмоток записывают в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Схема	Первичная обмотка								Вторичная обмотка						
	Измерение				Расчет				Измерение						
	$U_{AB}$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$\kappa_{21}$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$U_{ab}$	$U_{bc}$	$U_{ca}$	$U_{af}$	$U_{bf}$	$U_{cf}$	$I_{H2} = I_a$
	B	A	A	A	-	A	A	A	B	B	B	B	B	B	A
$Y/Y_n$															6
$D/Y_n$															6
$Y/Z_n$															6

### 4.2. Определение величины сопротивления нулевой последовательности трансформатора

Для определения величины сопротивления нулевой последовательности поочередно собирают схемы, приведенные на рис.3.7а, рис.3.7б и рис.3.7в.

Поскольку при несимметричной нагрузке ток нулевой последовательности возникает во вторичной обмотке трансформатора, последнюю при определении опытным путем сопротивления нулевой последовательности  $Z_{0n}$  используют в качестве питающей обмотки, подводя к ней напряжение  $U$  однофазного переменного тока. Однофазный ток  $I$  при этом будет соответствовать току нулевой последовательности (см. рис.3.7).

Величина сопротивления нулевой последовательности  $Z_{0n}$  и его составляющих рассчитывается по формулам:

$$Z_{0n} = U/3I, \quad R_{0n} = P/3I^2, \quad X_{0n} = (Z_{0n}^2 - R_{0n}^2)^{1/2},$$

где  $P$  - активная мощность потребляемая трансформатором из сети

Перед включением схемы необходимо автотрансформатором установить минимально возможное напряжение.



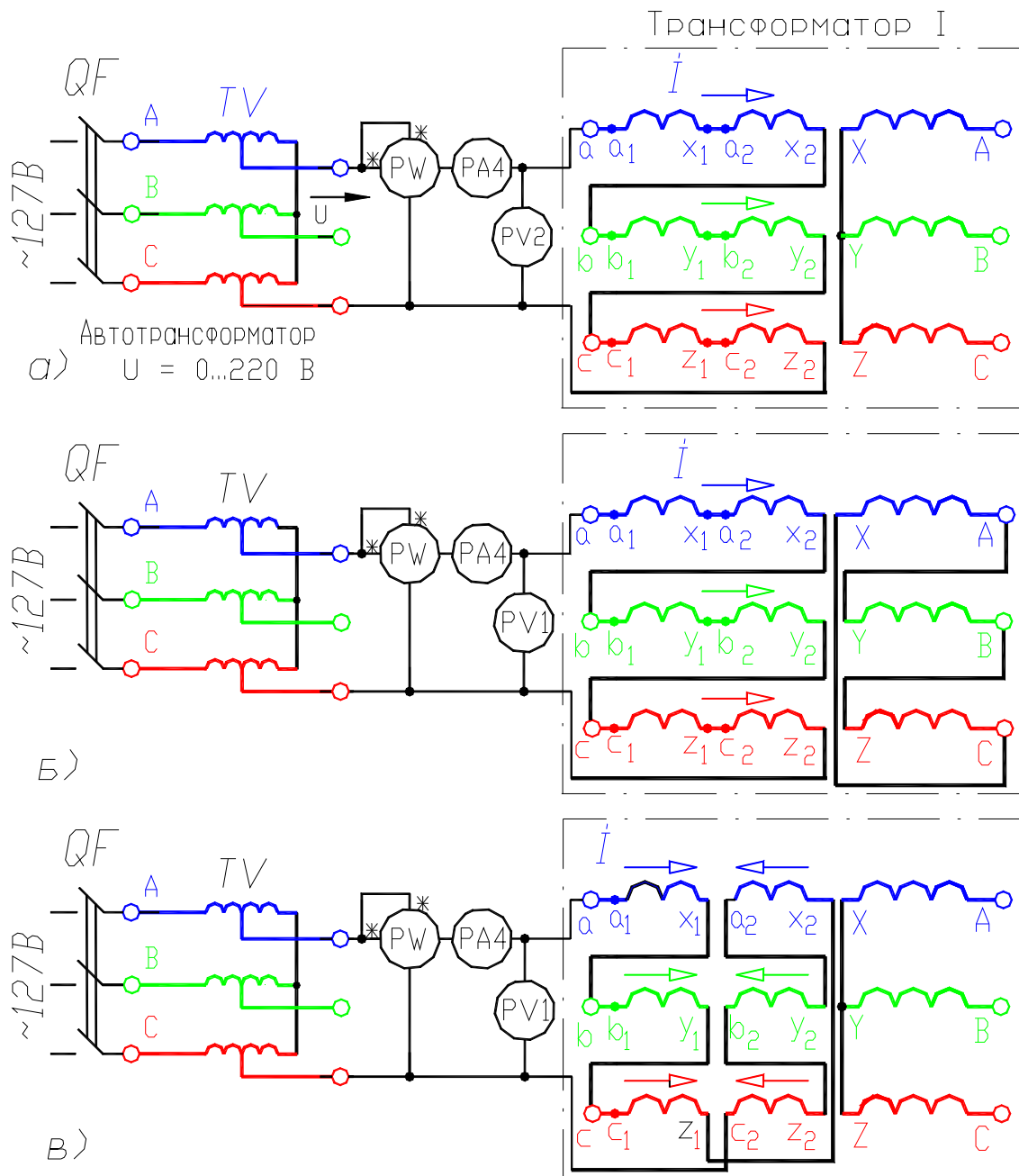


Рис.3.7. Схема лабораторной установки для определения сопротивления нулевой последовательности трансформатора со схемой соединения  $Y/Y_n$  (а),  $D/Y_n$  (б),  $Y/Z_n$  (в)

После включения схемы, регулируя напряжение автотрансформатором, установить ток  $I$  в схеме равным току однофазной нагрузки  $I_a = I_{н2} = 6 \text{ A}$  по п. 4.1 (см. табл. 3.1). Результаты измерений и расчетов занести в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Схема	Измерение				Расчет				
	$U$ В	$P$ Вт	$I$ А	$E_n$ В	$Z_{0n}$ Ом	$R_{0n}$ Ом	$X_{0n}$ Ом	$I_{0n} = I_{н2}/3$ А	$E_{0n}$ В
$Y/Y_n$			6					2	
$D/Y_n$			6					2	
$Y/Z_n$			6					2	

### **4.3. Аналитическое определение распределения токов трехфазного трансформатора при несимметричной (однофазной) нагрузке**

Распределение линейных токов  $I_A, I_B, I_C$  первичной обмотки рассчитывается для схемы  $Y/Y_n$  по формулам (9), для схемы  $D/Y_n$  по формулам (14), для схемы  $Y/Z_n$  по формулам (18) раздела 3. Результаты расчетов заносят в табл. 2.1 (графа Расчет) и сравнивают с распределением токов, полученным из опыта (табл. 2.1, графа Измерение). При сравнении необходимо учитывать, что при выводе формул (9), (14) и (18) величина тока холостого хода принималась равной нулю.

### **4.4. Определение величины смещения нейтрали на основе векторной диаграммы**

Для анализа величины смещения нейтрали (ЭДС  $E_n$ ) при схемах соединения обмоток  $Y/Y_n, Y/Z_n, D/Y_n$  необходимо построить векторную диаграмму линейных  $U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$  и фазных  $U_{af}, U_{bf}, U_{cf}$  напряжений вторичной обмотки для каждой из указанных схем. На миллиметровой бумаге, в масштабе, (например,  $10 \text{ В/см}$ ) с помощью циркуля строится треугольник линейных напряжений и звезда фазных напряжений (данные из табл. 2.1, графа Вторичная обмотка). Для определения величины ЭДС  $E_n$  необходимо найти центр тяжести (точка пересечения медиан) треугольника линейных напряжений и измерить расстояние между центром тяжести и нейтральной точкой звезды фазных напряжений. Полученная величина, в масштабе, является ЭДС  $E_n$ . Результаты записываются в табл. 2.2 (графа Измерение).

### **4.5. Аналитическое определение величины смещения нейтрали**

Величина смещения нейтрали может быть также определена по формуле:

$$E_{0n} \approx I_{0n} Z_{0n},$$

где величина тока нулевой последовательности определяется как

$$I_{0n} = I_n/3 = I_{нз}/3 = 2 \text{ А},$$

здесь  $I_{нз} = I_a = 6 \text{ А}$  есть ток однофазной нагрузки (см. табл. 2.1).

Расчетные значения ЭДС  $E_{0n}$  для рассматриваемых схем заносятся в табл. 2.2. (графа Расчет) и сравниваются со значениями ЭДС  $E_n$ , полученными из векторных диаграмм (табл. 2.2, графа Измерение).

## **5. Содержание отчета**

Отчет должен содержать программу лабораторной работы, паспортные данные трансформатора, схемы испытаний, результаты опытных и теоретических исследований в табл. 2.1 и табл. 2.2, векторные диаграммы вторичных напряжений трансформатора.

## **6. Контрольные вопросы**

1. Какая схема соединения обмоток трансформатора обуславливает неуравновешенность его магнитной системы (по отношению к основному потоку нулевой последовательности)?

2. Как влияет конструкция магнитной системы на работу трансформатора при несимметричной нагрузке?

3. С какой целью в силовых трансформаторах стремятся уменьшить величину потоков нулевой последовательности, каким образом это делается?

4. Из каких соображений ограничивается величина тока в нейтральном проводе? Какова его допустимая величина, если на подстанции установлен трансформатор со схемой соединения обмоток  $Y/Y_n$ ? Какова величина допустимой несимметрии напряжений?

5. Что такое сопротивление нулевой последовательности трансформатора в целом, почему схема соединения обмоток влияет на его величину?

## РАБОТА №4

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ НАМАГНИЧИВАНИИ МАГНИТОПРОВОДА ТРАНСФОРМАТОРА

### Оглавление

1. Цель работы .....	68
2. Программа работы .....	68
3. Основы теории трансформатора .....	68
3.1. Холостой ход однофазного трансформатора .....	68
3.2. Холостой ход трехфазного <b>группового</b> трансформатора .....	74
3.2.1. Схема соединения обмоток <b>У/У</b> .....	74
3.2.2. Схема соединения обмоток <b>Д/У</b> .....	78
3.2.3. Схема соединения обмоток <b>У/Д</b> .....	78
3.3. Холостой ход трехфазного <b>трехстержневого</b> трансформатора ..	78
3.3.1. Схема соединения обмоток <b>У/У</b> .....	78
3.3.2. Схема соединения обмоток <b>У/Д</b> .....	82
3.3.3. Схема соединения обмоток <b>Д/У</b> .....	82
4. Экспериментальное исследование трансформатора .....	84
4.1. Трансформатор со схемой соединения обмоток <b>У/У</b> .....	85
4.2. Трансформатор со схемой соединения обмоток <b>У/Д</b> .....	87
4.3. Трансформатор со схемой соединения обмоток <b>Д/У</b> .....	88
5. Содержание отчета .....	89
6. Контрольные вопросы .....	89
<b>Приложение: Переходный процесс при включении         трансформатора на холостой ход .....</b>	<b>90</b>

## 1. Цель работы

Изучить причины возникновения высших гармоник тока, потока и ЭДС в трансформаторах, влияние конструкции магнитопровода, схемы соединения обмоток и величины питающего напряжения на уровень и частотный спектр тока, потока и ЭДС, а также отрицательное воздействие высших гармоник на режимы работы электротехнического оборудования. Исследовать способы устранения высших гармоник или исключения их влияния.

## 2. Программа работы

Собрать **трехфазный групповой** трансформатор по заданной схеме, используя три однофазных **броневых** трансформатора и в режиме холостого хода измерить линейные, фазные напряжения и токи первичной и вторичной обмоток, снять копии осциллограмм всех измеряемых величин, для каждой схемы определить величину **третьей** гармоники тока или ЭДС. Также провести указанное исследование для **трехстержневого** трехфазного трансформатора.

## 3. Основы теории трансформатора

Процесс намагничивания магнитной системы трансформатора сопровождается рядом явлений, которые могут оказывать влияние на его работу. Характер этих явлений зависит от конструкции магнитопровода, числа фаз и схем соединения обмоток трансформатора. Кроме того, **особый характер намагничивания магнитной системы трансформатора имеет место при включении трансформатора в сеть на холостой ход.**

### 3.1. Холостой ход однофазного трансформатора

При рассмотрении процесса намагничивания будем исходить из того, что приложенное к трансформатору напряжение является синусоидальным, а трансформатор работает в режиме холостого хода (ХХ). Если пренебречь относительно небольшим значением падения напряжения  $I_x Z_I$ , то уравнение равновесия напряжений  $u_1$  первичной обмотки трансформатора записывается в виде:

$$u_1 = -e_1 = W_1 d\Phi/dt, \quad (1)$$

где  $W_1$  - число витков первичной обмотки;  $\Phi$  – мгновенное значение **основного** магнитного потока.

Поэтому при синусоидальном напряжении сети магнитный поток  $\Phi$  также должен изменяться во времени  $t$  практически по синусоидальному закону:

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t, \quad (2)$$

где  $\Phi_m$  - амплитудное значения магнитного потока;  $\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 50$ , рад/с - угловая частота напряжения сети.

Мгновенное значение фазной ЭДС  $e_1$ , индуцируемой основным магнитным потоком в обмотке трансформатора, определяется как

$$e_1 = -W_1 d\Phi/dt = -W_1 d(\Phi_m \sin \omega t)/dt = \omega W_1 \Phi_m \sin(\omega t - \pi/2), \quad (4)$$

где  $\omega W_1 \Phi_m = 2\pi f W_1 \Phi_m$  - амплитудное значение ЭДС первичной обмотки, а ее действующее значение составляет:

$$E_1 = (\omega W_1 \Phi_m) / \sqrt{2} = 4,44 f W_1 \Phi_m. \quad (5)$$

Из сопоставления (2) и (4) следует, что *фазная ЭДС отстает от магнитного потока на угол  $\pi/2$  рад.*

На рис.4.1 приведена векторная диаграмма трансформатора при ХХ, которая интерпретирует графически уравнение равновесия напряжений первичной обмотки трансформатора:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_x Z_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_x R_1 + j \dot{I}_x X_1, \quad (6)$$

где  $R_1$  - активное сопротивление фазы первичной обмотки,  $X_1$  - индуктивное сопротивление рассеяния фазы первичной обмотки. Оно обусловлено ее магнитным потоком рассеяния  $\Phi_{1\sigma}$ .

Трансформатор, работая в режиме ХХ, потребляет из сети ток холостого хода  $I_x$ , который имеет две составляющие: активную -  $I_{x.a}$  и реактивную -  $I_{x.p}$ . Активной составляющей тока ХХ соответствует активная мощность, потребляемая трансформатором из сети, и затрачиваемая на покрытие магнитных потерь в стали (электрические потери в обмотке при ХХ пренебрежимо малы); *реактивной составляющей тока ХХ соответствует реактивная мощность, потребляемая трансформатором из сети, и затрачиваемая на создание магнитного поля.* Ток холостого хода называется *намагничивающим* током.

Подчеркнем, что *во всех трансформаторах и электрических машинах переменного тока реактивная мощность затрачивается на создание магнитного поля устройства.*

Как следует из рис.4.1 вектор тока  $I_x$  опережает вектор основного магнитного потока на угол  $\delta$ . *Угол  $\delta$  обусловлен магнитными потерями в стали и называется углом магнитного запаздывания.*

Очевидно, что при синусоидальном первичном напряжении активная составляющая намагничивающего тока, также синусоидальна.

*Пренебрегая потерями в стали,* потребляемый из сети намагничивающий ток холостого хода можно принять чисто реактивным:  $i_x = i_{x.p}$ . Между мгновенными значениями реактивной составляющей намагничивающего тока  $i_{x.p}$  и магнитного потока  $\Phi$  первичной обмотки существует *нелинейная* зависимость, определяемая свойствами электротехнической стали, размерами и конструкцией магнитной системы. Примерный вид этой зависимости, носящей название *магнитной характеристики*, представлен на рис.4.2. Она может быть аппроксимирована<sup>1</sup> выражением вида:

$$i_{x.p} = a \Phi + b \Phi^\beta, \quad (7)$$

где  $a$ ,  $b$  и показатель степени  $\beta$ , называемые коэффициентами аппроксимации, могут быть найдены по двум точкам характеристики и ее начальному наклону к оси абсцисс.

<sup>1</sup> *approximatio (лат.)* - приближение

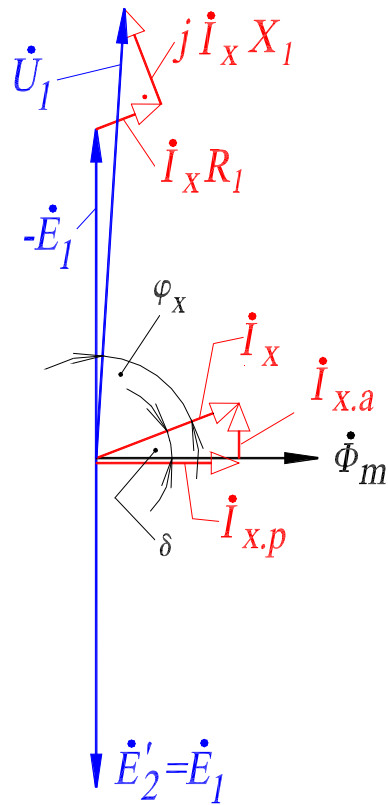


Рис. 4.1. Векторная диаграмма для режима ХХ трансформатора

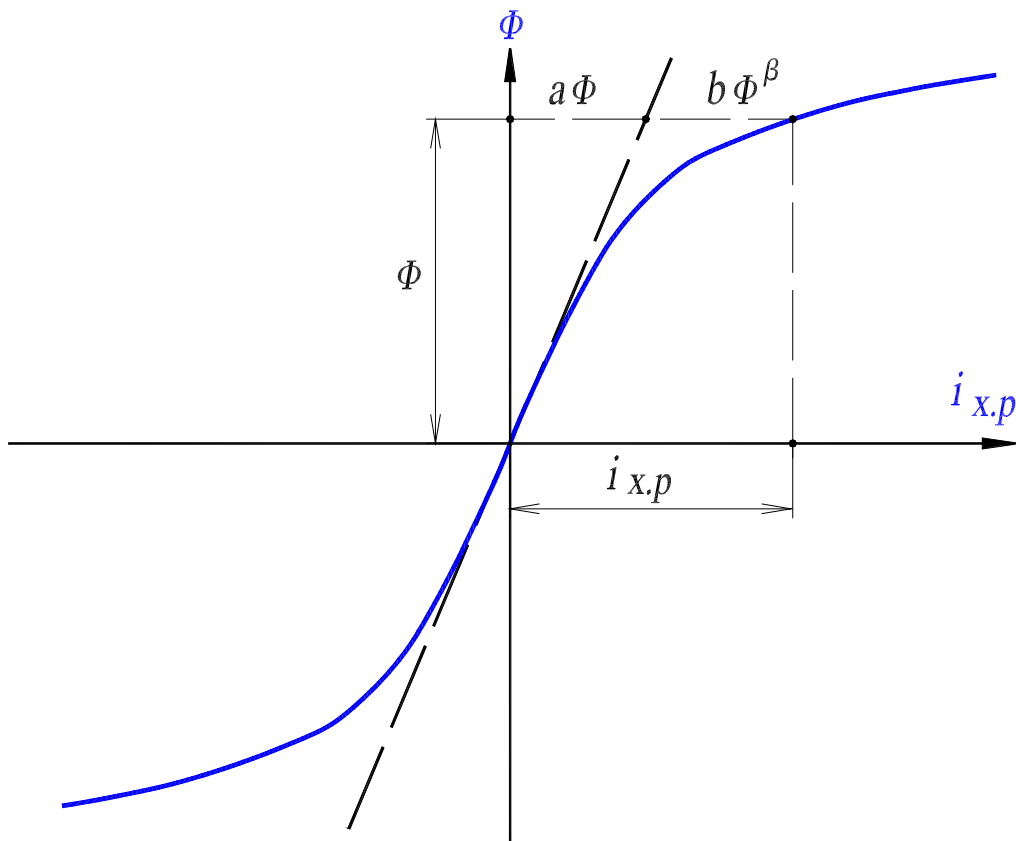


Рис. 4.2. Магнитная характеристика магнитопровода

Подставив формулу (2) в (7), после ряда преобразований, получим выражение для реактивной составляющей намагничивающего тока:

$$\begin{aligned} i_{x.p} &= a\Phi_m \sin \omega t + b\Phi_m^\beta \sin^\beta \omega t = \\ &= I_{1x.p} \sin \omega t - I_{3x.p} \sin 3\omega t + I_{5x.p} \sin 5\omega t - I_{7x.p} \sin 7\omega t + I_{9x.p} \sin 9\omega t - \\ &- I_{11x.p} \sin 11\omega t + I_{13x.p} \sin 13\omega t - I_{15x.p} \sin 15\omega t + \dots \end{aligned} \quad (8)$$

где  $I_{1x.p}$  - амплитуда 1-й гармоники реактивной составляющей намагничивающего тока;  $\mu = 3, 9, \dots$  - порядок высшей гармоники реактивной составляющей тока, кратной трем.  $\mu = m(2 \cdot k - 1)$ ,  $m = 3$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots$ ;  $\nu = 5, 7, \dots$  - порядок высшей гармоники реактивной составляющей тока.  $\nu = 6 \cdot k \mp 1$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots$ ;  $I_{\mu x.p}$ ,  $I_{\nu x.p}$  - амплитуда гармоник порядка  $\mu$ ,  $\nu$ ;  $\mu\omega$ ,  $\nu\omega$  - угловая частота колебаний гармоник. Угловая частота 3-й гармоники ( $\mu = 3$ ) составляет  $3\omega = 3 \cdot 2\pi f = 2\pi \cdot 150$ , рад/с.

Как следует из (8), реактивная составляющая намагничивающего тока содержит кроме первой гармоники спектр нечетных высших гармоник порядков  $\mu = 3, 9, 15, \dots$  и  $\nu = 5, 7, 11, 13, \dots$  (напомним, что активная составляющая тока изменяется по синусоидальному закону и не содержит высших гармоник). В реактивной составляющей тока наиболее сильно выражена 3-я гармоника, причем *амплитуда ее зависит от насыщения стали магнитопровода и от формы магнитной характеристики*. Амплитуда 3-й гармоники может достигь примерно 30 % от амплитуды 1-й гармоники, а у 5-й гармоники – 15 %.

Форма кривой тока  $i_{x.p}$ , указывающая на наличие в ней высших гармоник, может быть легко найдена графически, как показано на рис.4.3а. Координаты точки искомой зависимости  $i_{x.p} = f(t)$  определяются по кривым  $\Phi = f(i_{x.p})$  и  $\Phi = f(t)$  при одном и том же значении потока  $\Phi$ . На рис.4.3б показана кривая намагничивающего тока  $i_x$  однофазного трансформатора как результат сложения его активной  $i_{x.a}$  и реактивной  $i_{x.p}$  составляющих. Активная составляющая  $i_{x.a}$  невелика и обусловлена магнитными потерями в стали. Наличие именно этой составляющей приводит к сдвигу тока  $i_x$  относительно потока  $\Phi$  на угол  $\delta$  (см. рис.4.1).

На рис.4.4 показана кривая намагничивающего тока  $i_{x.p}$ , а также кривые 1-й, 3-й и 5-й гармоник этого тока. Гармоники более высокого порядка имеют относительно малые амплитуды и в первом приближении могут не учитываться..

Подчеркнем, что при построении векторной диаграммы рис.4.1 считается, что ток  $I_x$  и его составляющие  $I_{x.a}$  и  $I_{x.p}$  являются синусоидальными; их действующие значения приняты равными действующим значениям реальных токов.

Таким образом, намагничивающий ток  $I_x$  однофазного трансформатора при насыщении стали магнитопровода *не является синусоидальным, а имеет ярко выраженный остроугольный характер*.



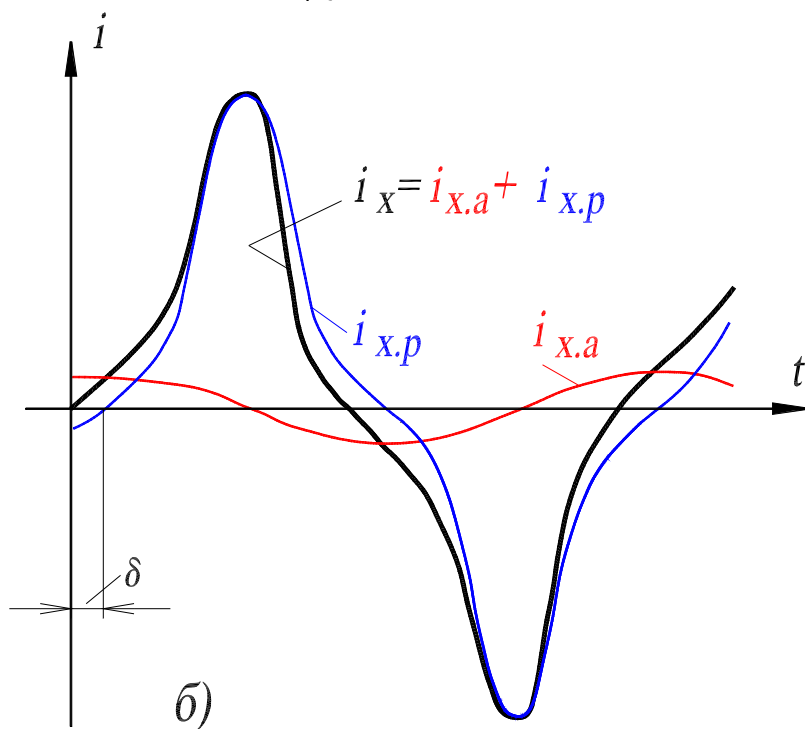
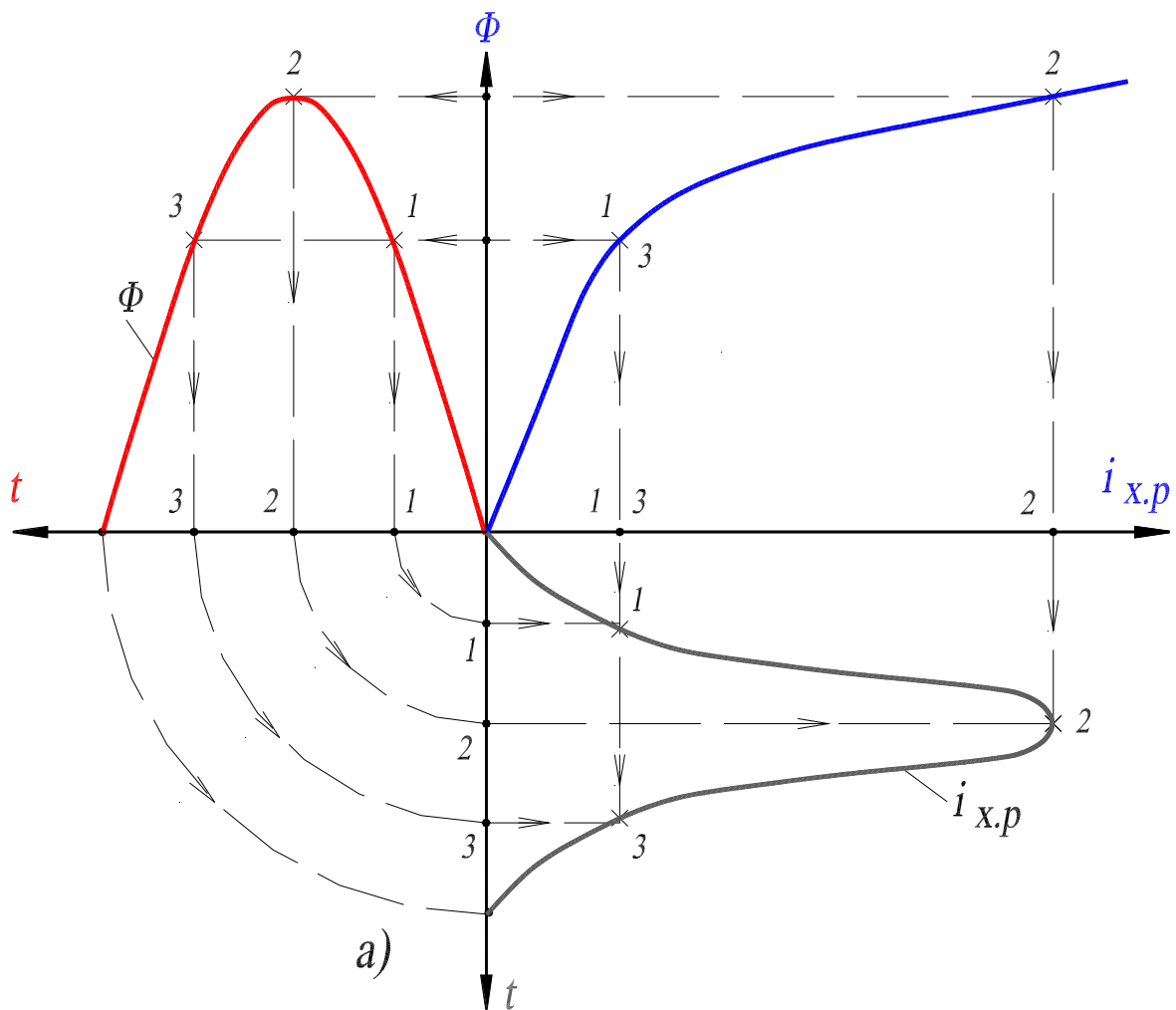


Рис. 4.3. Определение формы кривой: а) — реактивная составляющая тока холостого хода  $i_{x.p}$ ; б) — ток холостого хода  $i_x$

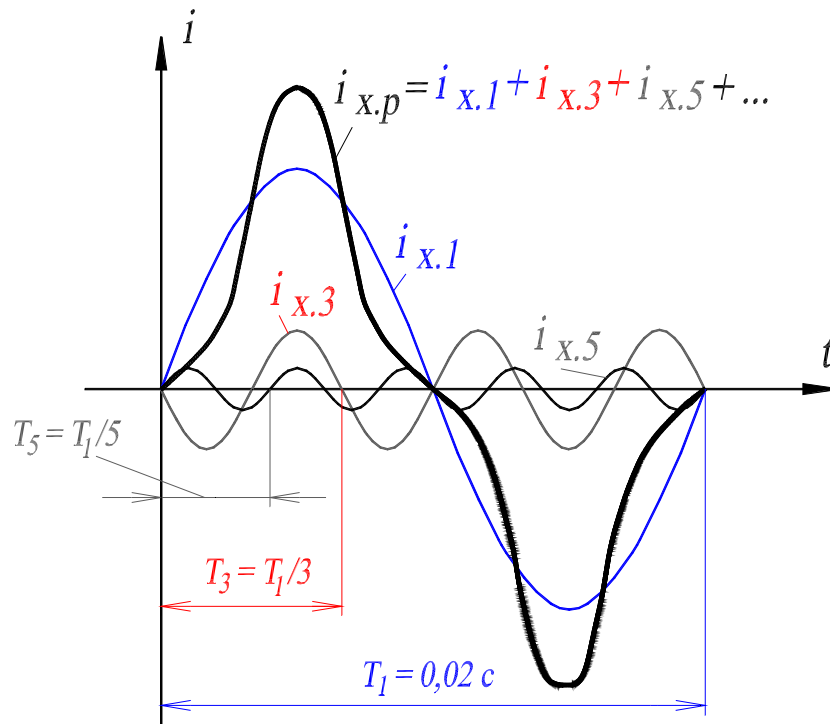


Рис. 4.4. Гармонический состав реактивной составляющей тока холостого хода однофазного трансформатора; 7, 9, 11, ... гармоники не показаны

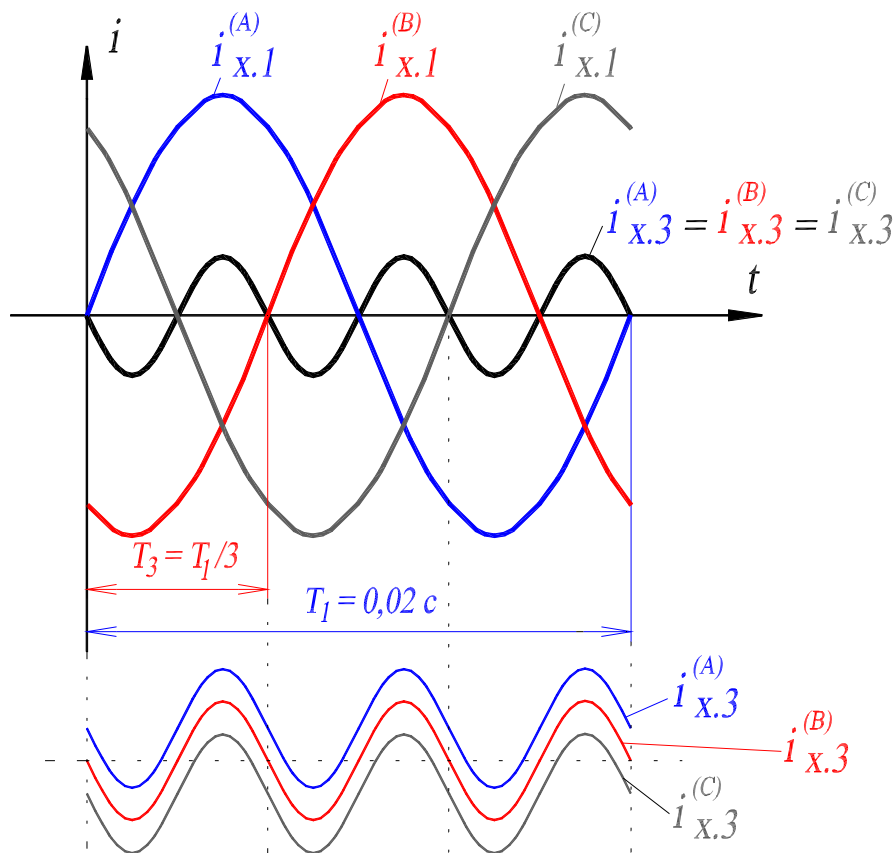


Рис. 4.5. К иллюстрации совпадения по фазе третьих гармоник в трехфазной системе

## 3.2. Холостой ход трехфазного группового трансформатора

### 3.2.1. Схема соединения обмоток У/У

Как в этом, так и последующих случаях при рассмотрении процесса намагничивания считаем, что первичные обмотки трехфазного трансформатора присоединены к сети с трехфазной симметричной системой синусоидальных напряжений и что трансформатор находится в режиме холостого хода.

Напомним, что трехфазный групповой трансформатор представляет собой трехфазную группу однофазных трансформаторов. Их обмотки соединены между собой (рассматривается схема У/У), а магнитопроводы отдельные; магнитный поток каждой фазы замыкается в пределах своего магнитопровода.

Как известно, третьи гармоники в трехфазной системе совпадают по фазе во всех фазах (см. рис.4.5), поэтому в первичной обмотке, соединенной по схеме У с изолированной нейтральной точкой (нейтральный провод отсутствует), третьи гармоники тока и кратные им исключены. Это приводит к тому, что форма кривой фазного намагничивающего тока  $I_x$  улучшается, то есть приближается к синусоиде.

Исключение 3, 9, 15-й, ... гармоник из намагничивающего тока приводит к появлению третьих и кратных им гармоник в магнитном потоке  $\Phi$  и, следовательно, в фазных ЭДС. Отметим, что другие гармоники (5, 7, 11, 13-я, ...) в фазных ЭДС и соответственно в магнитном потоке  $\Phi$  невозможны, так как синусоидальны линейные напряжения сети к которой подключен трансформатор.

Форма кривой магнитного потока  $\Phi$ , указывающая на наличие в ней высших гармоник, может быть легко найдена графически, как показано на рис.4.6а. Координаты точки искомой зависимости  $\Phi = f(t)$  определяются по кривым  $\Phi = f(i_{x.p})$  и  $i_{x.p} = f(t)$  при одном и том же значении тока  $i_{x.p}$ . На рис.4.6б показана кривая магнитного потока  $\Phi$ , а также кривые 1-й и 3-й гармоник потока (9, 15-я, ... гармоник не показаны в силу их малости). Для наглядности при построении зависимости  $\Phi = f(t)$  принят синусоидальный характер намагничивающего тока  $i_x$ , то есть пренебрегли 5, 7, 11, 13-й, ... гармониками тока. Как следует из рис.4.6 кривая потока  $\Phi$  вследствие насыщения принимает уплощенную, как бы затупленную сверху форму.

Таким образом, магнитный поток фазы А-Х определяется выражением вида:

$$\Phi^{(A)} = \Phi_{1m} \sin \omega t + \Phi_{3m} \sin 3\omega t + \dots \quad (9)$$

Для фаз В-У и С-З выражения для магнитных потоков записываются с учетом сдвига по фазе 1-х гармоник:

$$\Phi^{(B)} = \Phi_{1m} \sin(\omega t - 2\pi/3) + \Phi_{3m} \sin 3\omega t + \dots, \quad (10)$$

$$\Phi^{(C)} = \Phi_{1m} \sin(\omega t - 4\pi/3) + \Phi_{3m} \sin 3\omega t + \dots \quad (11)$$

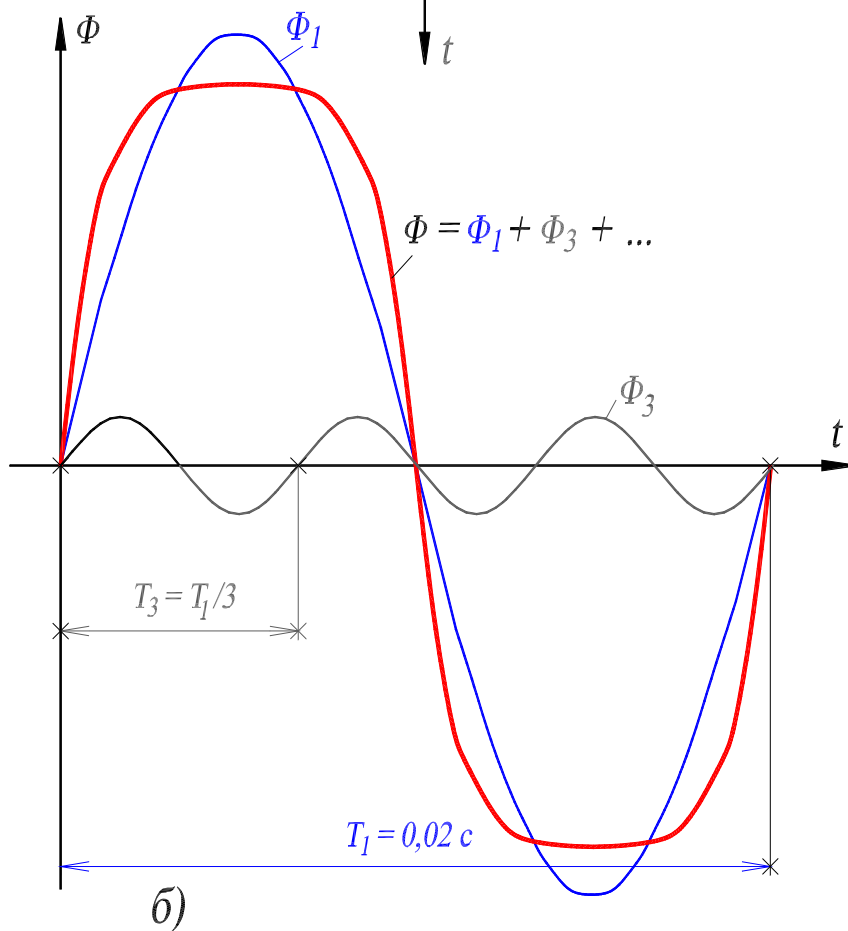
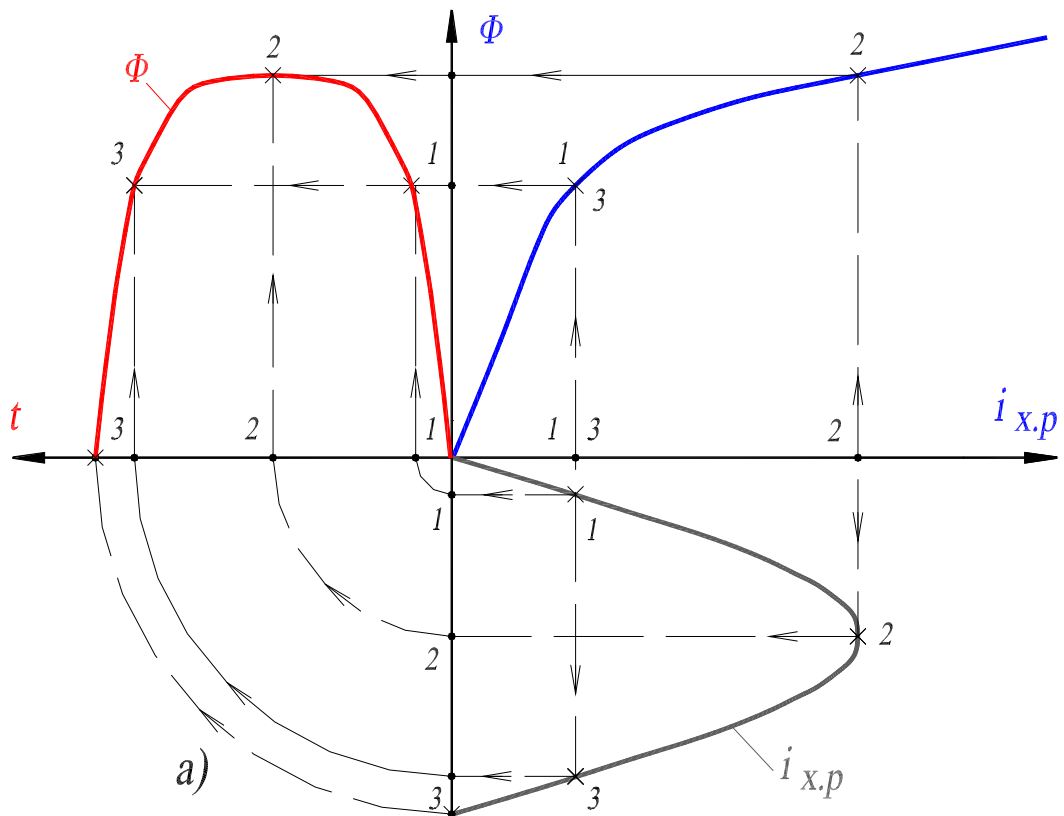


Рис.4.6. Определение формы кривой магнитного потока: а) — при синусоидальном токе; б) — разложение в гармонический ряд. Гармоники порядка  $\mu > 3$  не показаны

Третьи гармоники потока  $\Phi_3$  в каждом из трех магнитопроводов группового трансформатора, в любой момент времени одинаковы по величине и направлению и индуцируют в фазах обмоток равные по величине и совпадающие по фазе третьи гармоники ЭДС.

Выражение для результирующей фазной ЭДС фазы  $A-X$  определится дифференцированием (9):

$$e^{(A)} = -W_1 d\Phi^{(A)}/dt = \omega W_1 \Phi_{1m} \sin(\omega t - \pi/2) - 3\omega W_1 \Phi_{3m} \sin 3(\omega t - \pi/2) \dots, \quad (12)$$

где  $\omega W_1 \Phi_{1m}$  и  $3\omega W_1 \Phi_{3m}$  - амплитудные значения 1-й и 3-й гармоник фазной ЭДС а их действующие значения составляют:

$$E_1 = (\omega W_1 \Phi_{1m})/\sqrt{2} = 4,44 f W_1 \Phi_{1m}, \quad (13)$$

$$E_3 = (3\omega W_1 \Phi_{3m})/\sqrt{2} = 4,44 f_3 W_1 \Phi_{3m}, \quad (14)$$

причем частота изменения 3-й гармоники  $f_3 = 3f$ .

Поскольку в трехфазном групповом трансформаторе третьи гармоники потока проходят по замкнутому сердечнику каждого из трансформаторов, величина их может составлять 0,15...0,2 значения потока основной гармоники и даже больше,  $\Phi_{3m} \approx (0,15...0,2)\Phi_{1m}$ . Так как третьи гармоники потока изменяются с трехкратной частотой, величины третьих гармоник фазных ЭДС могут быть значительными, например уже при  $\Phi_{3m} = 0,1\Phi_{1m}$  действующее значение ЭДС  $E_3$  составит 30% от  $E_1$ . Линейная ЭДС при соединении обмотки звездой представляет собой разность фазных ЭДС, например  $\dot{E}_l^{(AB)} = \dot{E}_f^{(A)} - \dot{E}_f^{(B)}$ . Третьи гармоники в фазных ЭДС (а также 9, 15, ... гармоники), будучи равными между собой, в линейных ЭДС отсутствуют.

*В условиях эксплуатации следует избегать наличие 3-й гармоники в фазной ЭДС и в магнитном потоке по следующим причинам.* Наличие третьей гармонической в фазной ЭДС искажает ее форму (рис.4.7), повышает максимальное значение ЭДС, возрастает напряженность электрического поля в изоляции. При заземлении нейтральной точки первичной обмотки в линии высокого напряжения могут возникнуть токи тройной частоты, замыкающиеся через емкости линии на землю и создающие электромагнитные помехи в линиях связи (рис.4.8). Эти токи могут вызвать резонансные явления и нарушить правильное действие релейной защиты. Наличие третьей гармонической в магнитном потоке приводит к увеличению потерь в стали и снижению КПД трансформатора.

По этим причинам обмотки трехфазного группового трансформатора избегают соединять по схеме звезда – звезда и, как правило, соединяют обмотку низшего напряжения в треугольник, то есть схема соединения обмоток - У/Д.

*Подчеркнем, что 3-я гармоника может выполнять и полезную функцию, в частности в утроителе частоты (см. разд.П.1. Умножители частоты, с.103...112).*

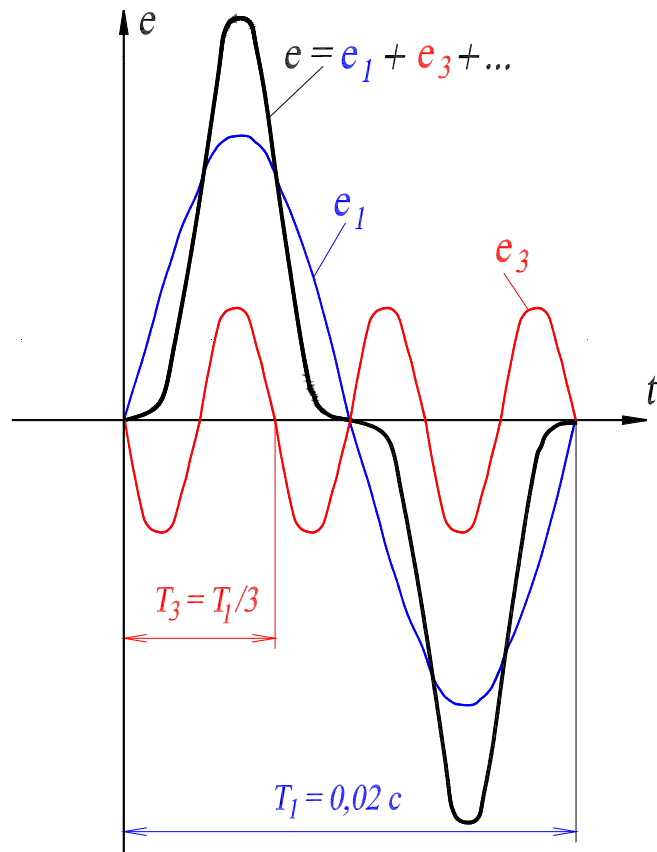


Рис. 4.7. Форма кривой фазной ЭДС при наличии третьей гармонической в магнитном потоке стержня

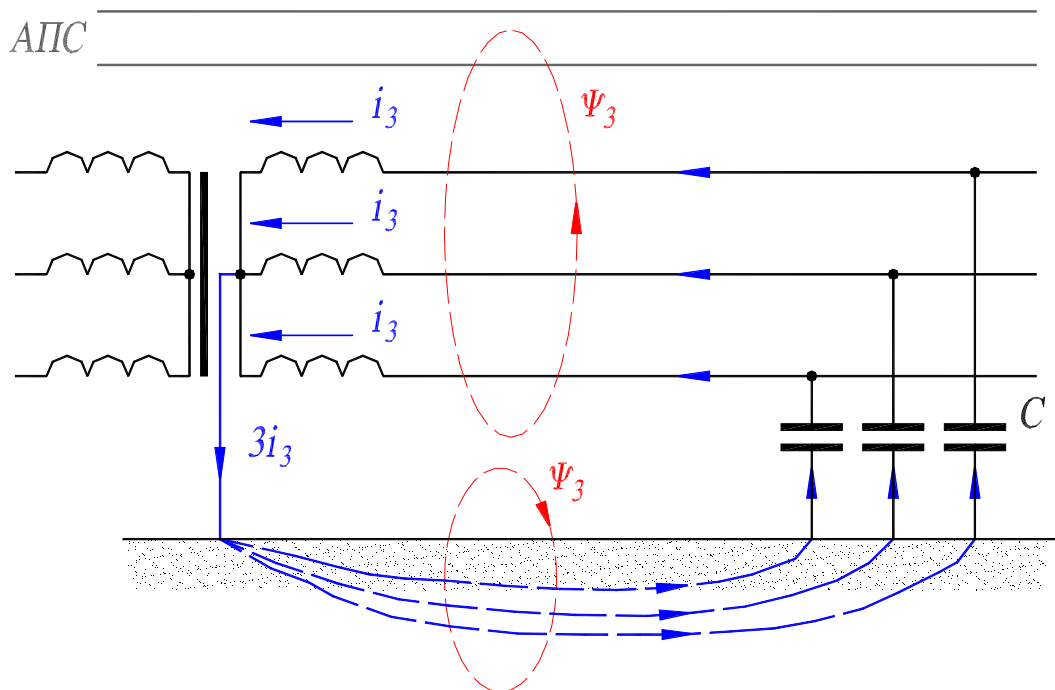


Рис. 4.8. Возникновение потокосцепления  $\Psi_3$ , обусловленного токами  $i_3$  тройной частоты, создающего электромагнитные помехи в линиях связи.

$C$  — емкость проводов относительно земли; АПС — аппаратура проводной связи

### 3.2.2. Схема соединения обмоток $\Delta/Y$

При намагничивании со стороны **треугольника** каждая фаза трехфазного группового трансформатора может рассматриваться как независимый однофазный трансформатор. В этом случае реактивная составляющая намагничивающего **фазного** тока  $i_{x.p}$  имеет форму, показанную на рис.4.3а, причем третьи и кратные им гармоники, будучи в любой момент времени равными по величине и совпадая по направлению, циркулируют внутри замкнутого треугольника, образуя общий ток утроенной частоты, рис.4.9а. Реактивная составляющая намагничивающего **линейного** тока не содержит третьих гармоник и имеет характерную седлообразную форму, рис.4.9б.

Так как третьи гармоники и кратные им проявляются в фазных токах, то они отсутствуют в магнитных потоках фаз и в фазных ЭДС, а, следовательно, исключены неблагоприятные явления, которые имеют место при соединении обмоток по схеме  $Y/Y$  (см. разд.3.2.1)

### 3.2.3. Схема соединения обмоток $Y/\Delta$

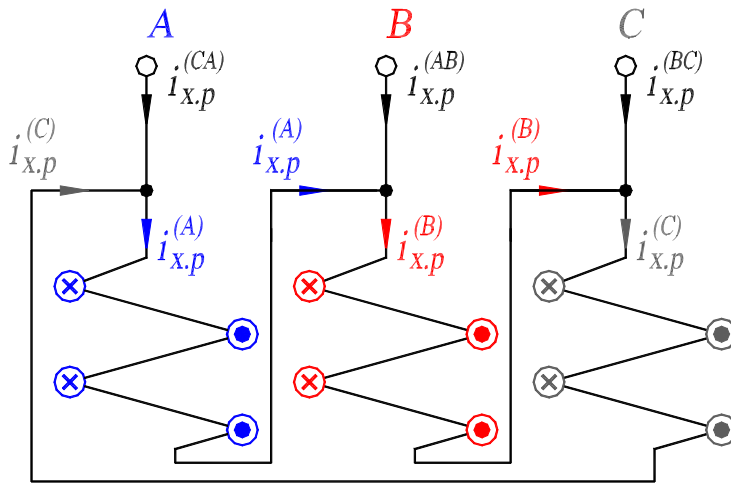
При намагничивании со стороны **звезды** третья гармоника магнитного потока  $\Phi_3$ , обусловленная насыщением стали магнитопровода, индуцирует ЭДС утроенной частоты  $E_3$  в фазах треугольника. В результате в треугольнике протекает ток утроенной частоты  $I_3$ , который создает свой магнитный поток  $\Phi_3^{(1)}$ , сдвинутый по фазе относительно потока  $\Phi_3$  на угол близкий к  $180^\circ$ . Результирующий магнитный поток утроенной частоты  $\Phi_{3p}$  практически отсутствует (это иллюстрирует векторная диаграмма рис.4.10а), а, следовательно, исключены неблагоприятные явления, которые имеют место при схеме соединения обмоток  $Y/Y$  (см. разд.3.2.1).

При схеме соединения обмоток  $Y/\Delta$  реактивную составляющую намагничивающего тока в первичной обмотке ( $Y$ ) можно рассматривать как разность реактивной составляющей намагничивающего тока однофазного трансформатора (рис.4.3а) и ее 3-й гармонической, которая теперь протекает не по первичной, а по вторичной обмотке ( $\Delta$ ), создавая то же намагничивающее действие (рис.4.10б).

## 3.3. Холостой ход трехфазного **трехстержневого** трансформатора

### 3.3.1. Схема соединения обмоток $Y/Y$

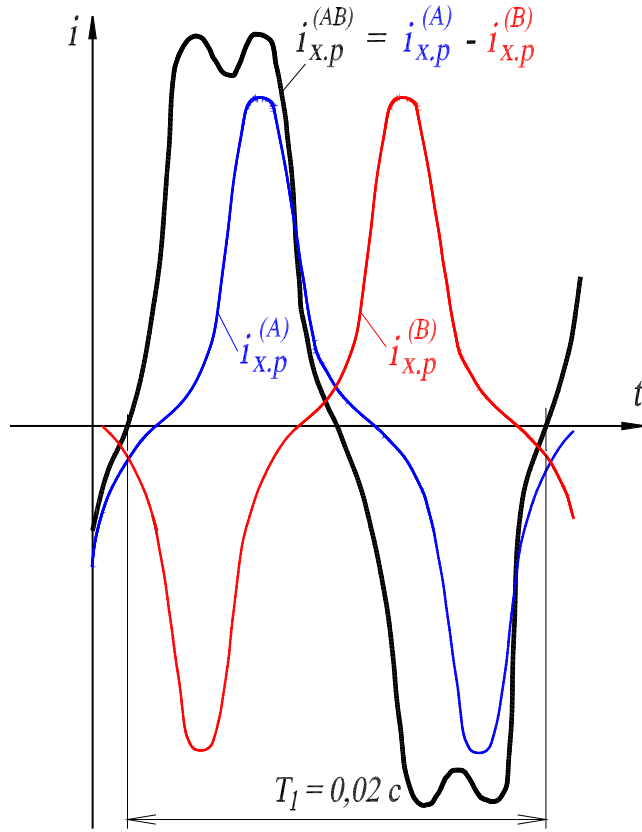
Как было показано в разд.3.2.1, в трансформаторе с соединением обмоток  $Y/Y$  третьи гармоники в намагничивающем токе первичной обмотки существовать не могут, и вследствие этого в магнитном потоке наряду с основной гармоникой  $\Phi_1$  будет и третья гармоника потока  $\Phi_3$ . Магнитопровод трехфазного трехстержневого трансформатора представляет собой магнитную систему, в которой стержни посредством ярм как бы соединены в звезду. Поэтому рассуждения, касающиеся прохождения третьих гармоник потоков, схожи с рассуждениями относительно прохождения третьих гармоник токов в обмотках, соединенных в звезду. А именно, третьи гармоники потока, будучи в любой момент времени одинаковыми и направленными одновременно вверх или вниз, пройдя вдоль стержней вытесняются из магнитопровода и замыкаются от одного ярма к другому через трансформаторное масло (или воздух в сухом трансформаторе) и вдоль стенки бака (рис.4.11).



$$i_{x,p}^{(A)} = i_{x,1}^{(A)} + i_{x,3}^{(A)} + i_{x,5}^{(A)} + \dots ; \quad i_{x,p}^{(B)} = i_{x,1}^{(B)} + i_{x,3}^{(B)} + i_{x,5}^{(B)} + \dots \quad - \text{ фазные токи ;}$$

$$i_{x,p}^{(AB)} = i_{x,1}^{(AB)} + i_{x,5}^{(AB)} + \dots \quad - \text{ линейный ток}$$

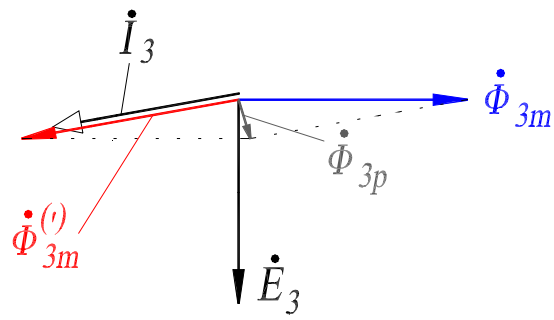
а)



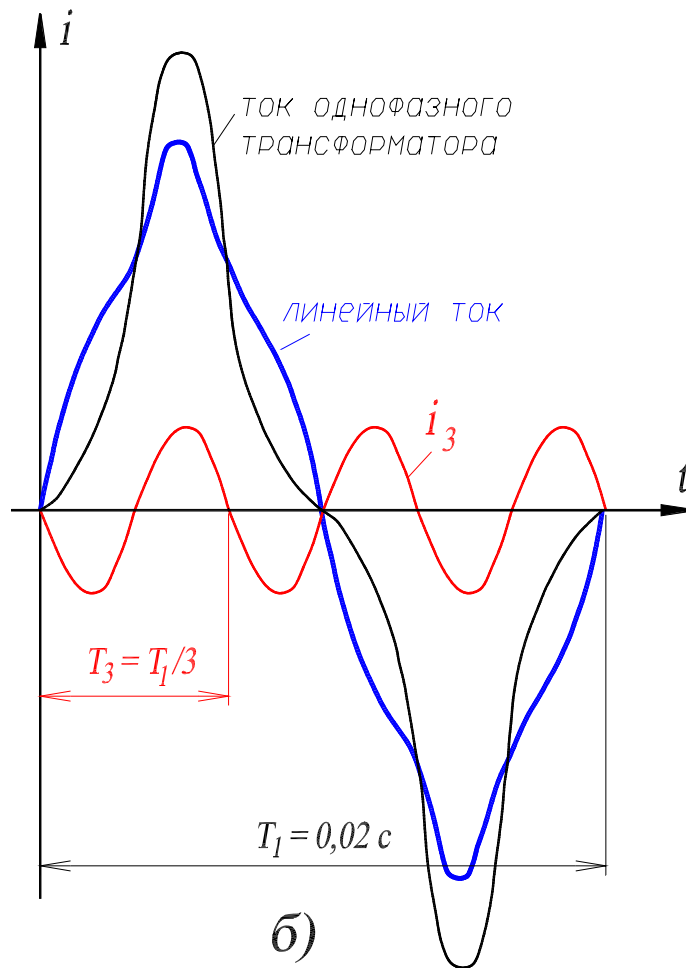
б)

Рис. 4.9. Намагничивающие токи при соединении первичной обмотки треугольником, вторичной – звездой (на рисунке вторичная обмотка не показана) — а); определение реактивной составляющей линейного намагничивающего тока в группе однофазных трансформаторов. Первичная обмотка соединена в треугольник, вторичная в звезду — б)





а)



б)

Рис. 4.10. Векторная диаграмма потоков и токов третьей гармоники — а); определение реактивной составляющей линейного намагничивающего тока в группе однофазных трансформаторов со схемой соединения обмоток У/Д — б)

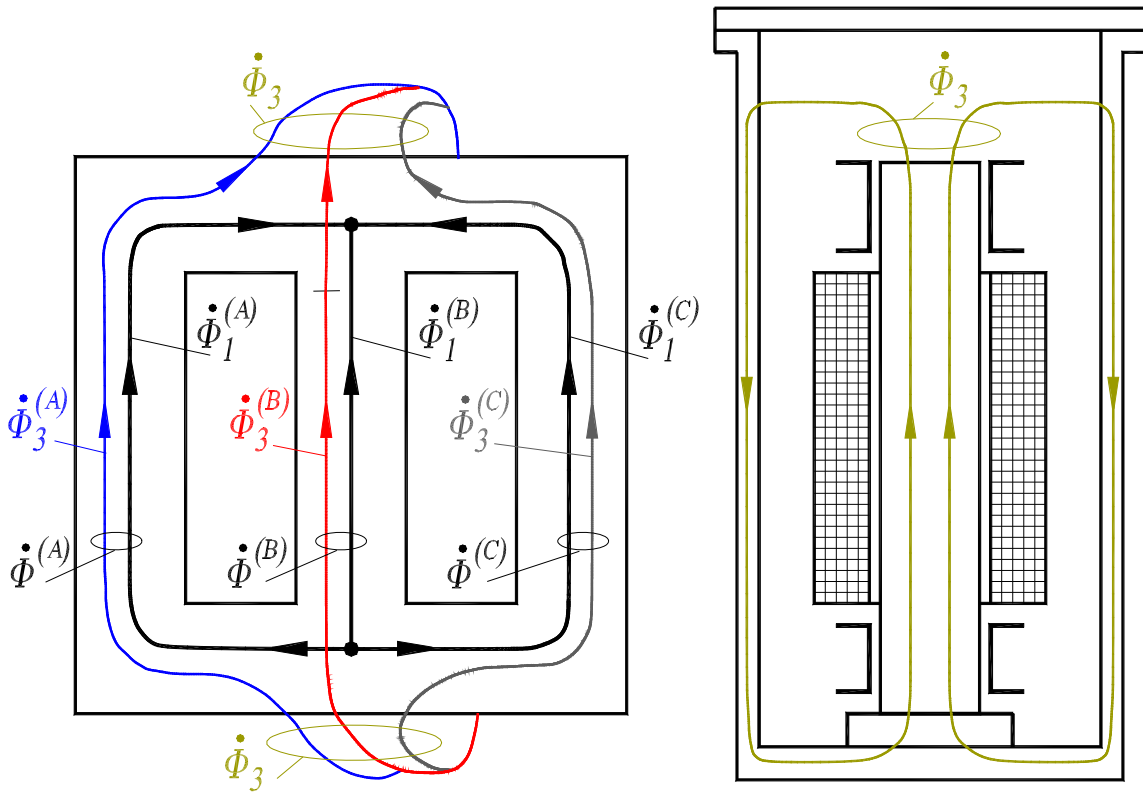


Рис. 4.11. Магнитное поле в трехфазном трехстержневом трансформаторе

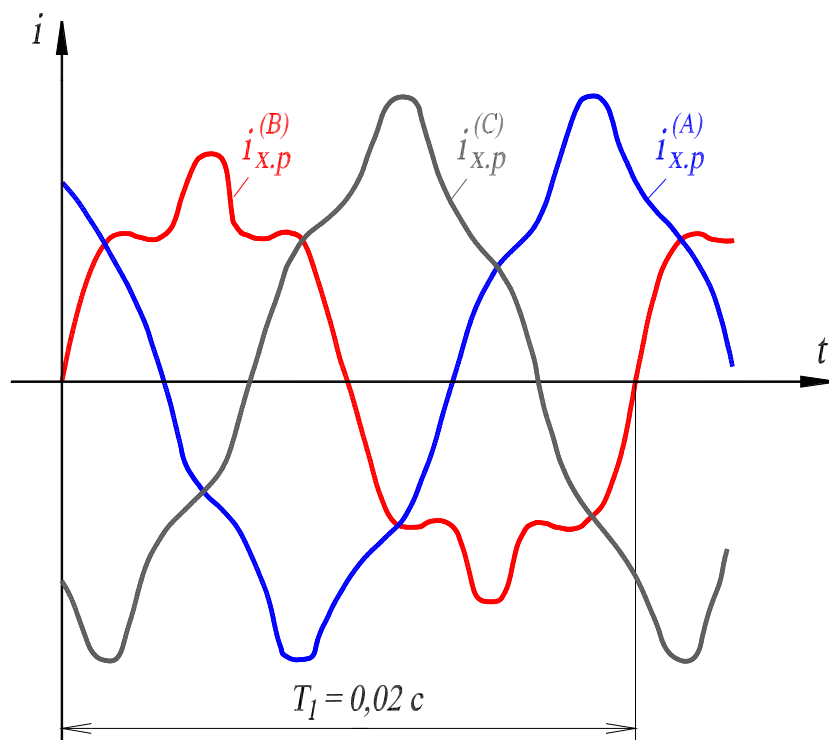


Рис. 4.12. Форма кривых реактивных составляющих намагничивающих токов трехстержневого трансформатора при схеме соединения обмоток У/У

Потоки третьих гармоник, проходя по пути относительно большого магнитного сопротивления, заметно ослабляются. Обычно амплитуда третьих гармоник ЭДС, вызванных этими полями, не превышает 5...7%. Вместе с тем, замыкание потока, пульсирующего частотой  $150 \text{ Гц}$ , через стенки бака и другие металлические конструкции трансформатора, ведет к образованию вихревых токов в них, нагреву и увеличению добавочных потерь.

Как видно из рис.4.11 магнитное сопротивление путей по которым замыкаются потоки крайних фаз  $A-X$  и  $C-Z$  больше магнитного сопротивления пути по которому замыкается магнитный поток средней фазы  $B-Y$ . Так как предполагается, что трансформатор питается от сети симметричным трехфазным напряжением, то указанная несимметрия магнитной цепи приведет к несимметрии реактивной составляющей намагничивающего фазного тока, протекающего в фазах обмотки. Эти составляющие будут взаимно равны в фазах  $A-X$  и  $C-Z$ , но больше реактивной составляющей намагничивающего фазного тока в фазе  $B-Y$ . На рис.4.12 показано изменение во времени реактивной составляющей намагничивающего фазного (линейного) тока трехфазного трехстержневого трансформатора со схемой соединения обмоток  $Y/Y$ .

### **3.3.2. Схема соединения обмоток $Y/D$**

Схема отличается от предыдущей соединением вторичной обмотки. Первичная же обмотка по-прежнему соединена в звезду, и, следовательно, в намагничивающем токе первичной обмотки не может быть третьих гармоник, поэтому возникают третьи гармоники в магнитном потоке.

Процесс намагничивания трехфазного трехстержневого трансформатора происходит практически также как и трехфазного группового трансформатора (см. *разд. 2.2.3* и рис.4.9). Отличие определяется магнитной несимметрией трехстержневого магнитопровода. В результате в контуре треугольника будет протекать не только 3-я гармоника тока, обусловленная насыщением магнитопровода, но и незначительная 1-я гармоника, вызванная несимметрией магнитопровода (рис.4.13).

На рис.4.14 показано изменение во времени реактивной составляющей намагничивающего фазного (линейного) тока трехфазного трехстержневого трансформатора со схемой соединения обмоток  $Y/D$ .

Третьи гармоники и кратные им в магнитном потоке будут практически скомпенсированы и потоки в стержнях можно считать синусоидальными. Следовательно, исключены неблагоприятные явления, которые имеют место при схеме соединения обмоток  $Y/Y$  (см. *разд.3.2.1* и *3.3.1*).

### **3.3.3. Схема соединения обмоток $D/Y$**

В этом случае каждая фаза первичной обмотки присоединена к синусоидальному напряжению сети. Потоки каждой фазы также синусоидальны, а намагничивающие токи фаз, как и в случае однофазного трансформатора, содержат третьи гармоники, циркулирующие внутри замкнутого треугольника,

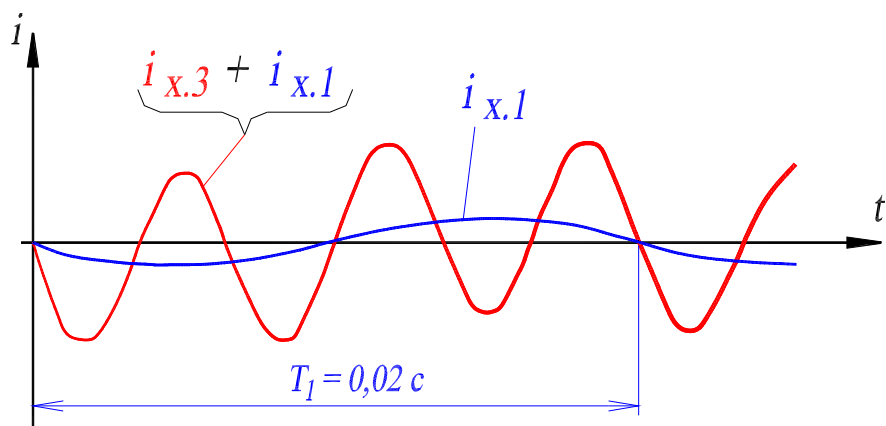


Рис. 4.13. Форма кривой намагничивающего тока, протекающего во вторичной обмотке, соединенной треугольником

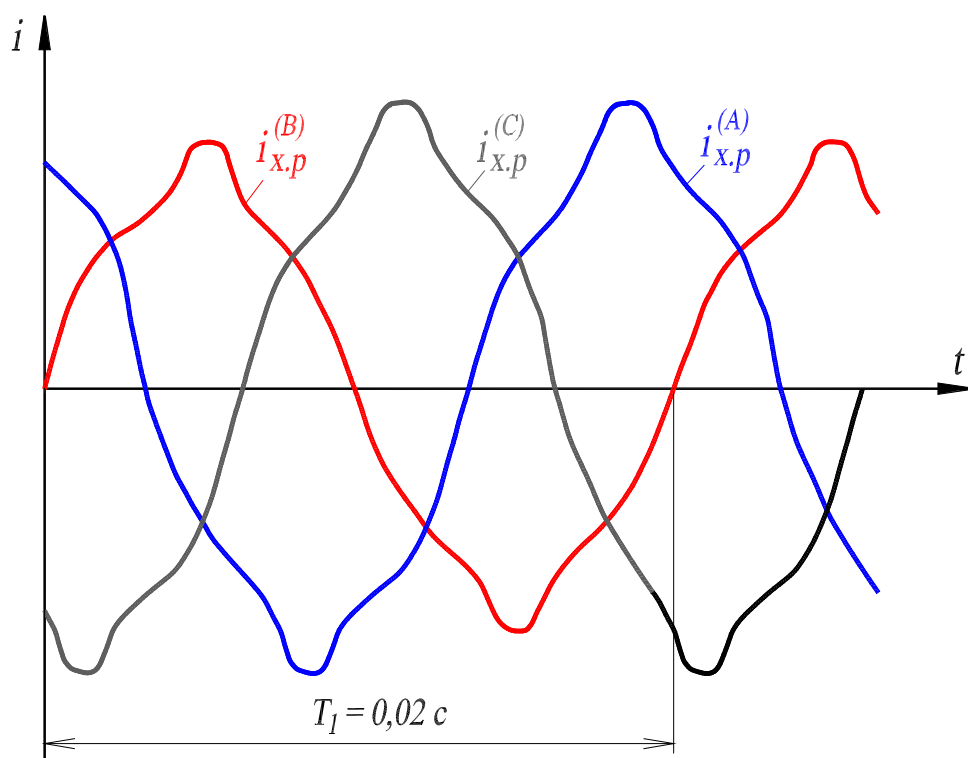


Рис. 4.14. Форма кривых реактивных составляющих намагничивающих токов трехстержневого трансформатора при схеме соединения обмоток У/Д

причем, будучи в любой момент времени равными по величине и совпадая по направлению, они образуют общий ток тройной частоты. В линейных токах, которые представляют разность токов соответствующих фаз, трети гармоники отсутствуют (рис.4.15).

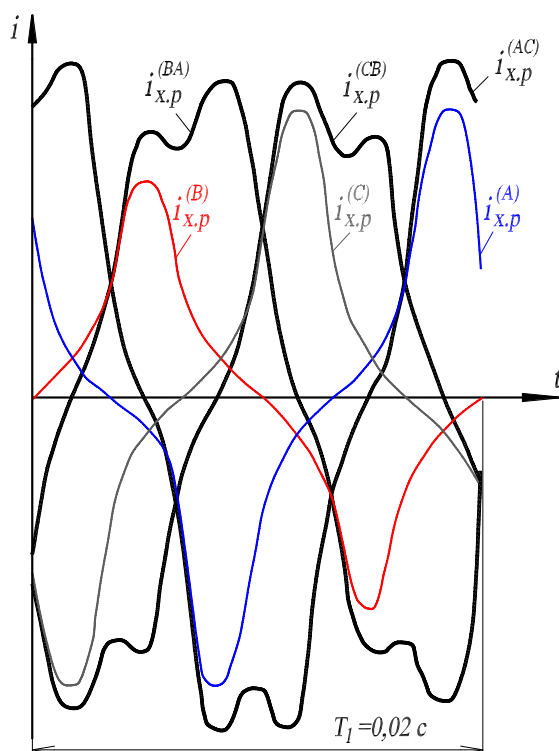


Рис.4.15. Форма кривых реактивных составляющих намагничивающих токов трехстержневого трансформатора при схеме соединения обмоток Д/У

стенках бака). При наличии нейтрального провода образуется замкнутый контур для третьих гармоник тока, что в принципе способствует ослаблению нежелательных явлений. Однако, если этот контур создается через сопротивление нагрузки или другие сопротивления, то трети гармоники тока уменьшаются и, следовательно, их влияние будет незначительным.

Отметим, что соединение одной из обмоток трансформатора по схеме **треугольник** положительно влияет также на работу трансформатора при несимметричной нагрузке (см. описание Работы №3).

#### 4. Экспериментальные исследования

Исследуется трехфазный групповой трансформатор (он содержит три однофазных трансформатора), а также трехфазный трехстержневой трансформатор. В опытах используются амперметры с пределом по току  $1\text{ A}$  и настольный вольтметр  $PV$  со свободными концами с пределом по напряжению  $300\text{ B}$ .

Во избежании повреждения входного аттенюатора осциллографа перед подключением его входа к измеряемому напряжению необходимо установить переключатель чувствительности, в положение соответствующее  $2\text{ B/дел}$  (не менее).

**Сердечник трансформатора, обладающий нелинейными свойствами, является как бы генератором высших гармоник.**

Таким образом, при соединении одной из обмоток трехфазного трансформатора в **треугольник** благоприятнее протекают процессы, связанные с намагничиванием трансформатора: магнитные потоки в стержнях и фазные ЭДС обмоток становятся практически синусоидальными и не возникают неблагоприятные явления, свойственные трехфазным трансформаторам с соединением У/У (искажение фазных напряжений и увеличение их максимальных значений, а при трехстержневом трансформаторе еще и вихревые токи в

#### 4.1. Трансформатор со схемой соединения обмоток Y/Y (рис.4.16а)

Принципиальная схема опыта приведена на рис.4.16а. Для каждого из трансформаторов эта схема одна и та же.

С помощью автотрансформатора устанавливают на фазе трансформатора номинальное напряжение  $U_{AX}$ , измеряют ток холостого хода во всех фазах  $I_{xAX}$ ,  $I_{xBY}$ ,  $I_{xCZ}$ , линейные  $U_{AB}$ ,  $U_{ab}$  и фазное  $U_{ax}$  напряжения. Напряжение измеряется вольтметрами  $PV$ ,  $PVI$ , а токи амперметрами  $PA1$ ,  $PA2$ ,  $PA3$ . С экрана осциллографа на кальку копируют кривые напряжений  $U_{AX}$ ,  $U_{AB}$ ,  $U_{ab}$ ,  $U_{ax}$  и тока холостого хода  $I_x$  во всех фазах; кривые токов рекомендуется определять при подключении входа осциллографа на клеммы амперметров.

Опыт проводится дважды: 1) для группового трехфазного трансформатора. (см. *разд.3.1* и *разд.3.2.1*); 2) для трехстержневого трехфазного трансформатора. (см. *разд.3.1* и *разд.3.3.1*). Результаты записываются в табл.4.1.

Таблица 4.1

$U_{AX}^{2)}$	$U_{AB}$	$\frac{U_{AB}^{1)}$	$I_{xAX}^{2)}$	$I_{xBY}$	$I_{xCZ}$	$U_{ax}^{2)}$	$U_{ab}$	$\frac{U_{ab}^{1)}$	$E_{3\phi}$	
<i>B</i>	<i>B</i>	-	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	-	<i>B</i>	%
<b>Групповой трехфазный трансформатор</b>										
Рис.4.6	-	-	-			Рис.4.6	-	-	-	-
Рис.4.7	-	-	-			Рис.4.7	-	-	-	-
120	208									
<b>Трехстержневой трехфазный трансформатор</b>										
Рис.4.6	-	-	Рис.4.12			Рис.4.6	-	-	-	-
Рис.4.7	-	-	Рис.4.12			Рис.4.7	-	-	-	-
127	220									

**П р и м е ч а н и е.**

<sup>1)</sup> Значения указанных отношений будут меньше чем  $\sqrt{3}$ , так как третьи гармоники проявляются в фазных напряжениях  $U_{AX}$ ,  $U_{ax}$ , но отсутствуют в линейных напряжениях  $U_{AB}$ ,  $U_{ab}$ .

<sup>2)</sup> Экспериментальные осциллограммы напряжений и токов необходимо сравнить с кривыми, представленными на соответствующих рисунках.

Действующее значение 3-й гармоники фазной ЭДС рассчитывается приближенно следующим образом:

$$E_{3\phi} \approx \sqrt{E_{\phi}^2 - E_{1\phi}^2}, \text{ В, где } E_{\phi} = U_{AX}, \quad E_{1\phi} = U_{AB}/\sqrt{3}.$$

$$E_{3\phi} = 100E_{3\phi}/U_{AX}, \%$$

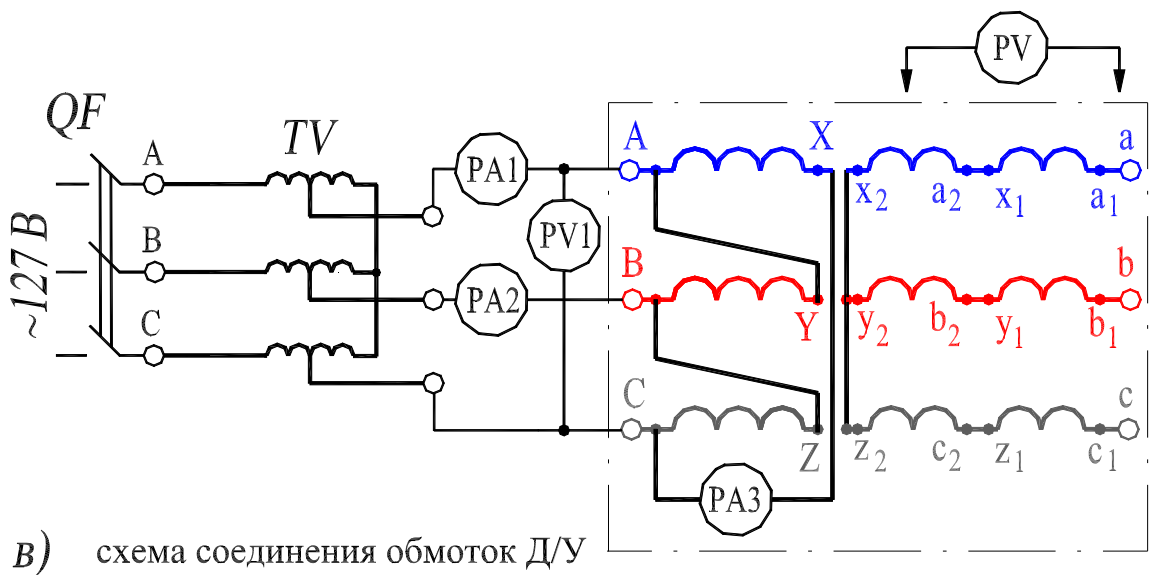
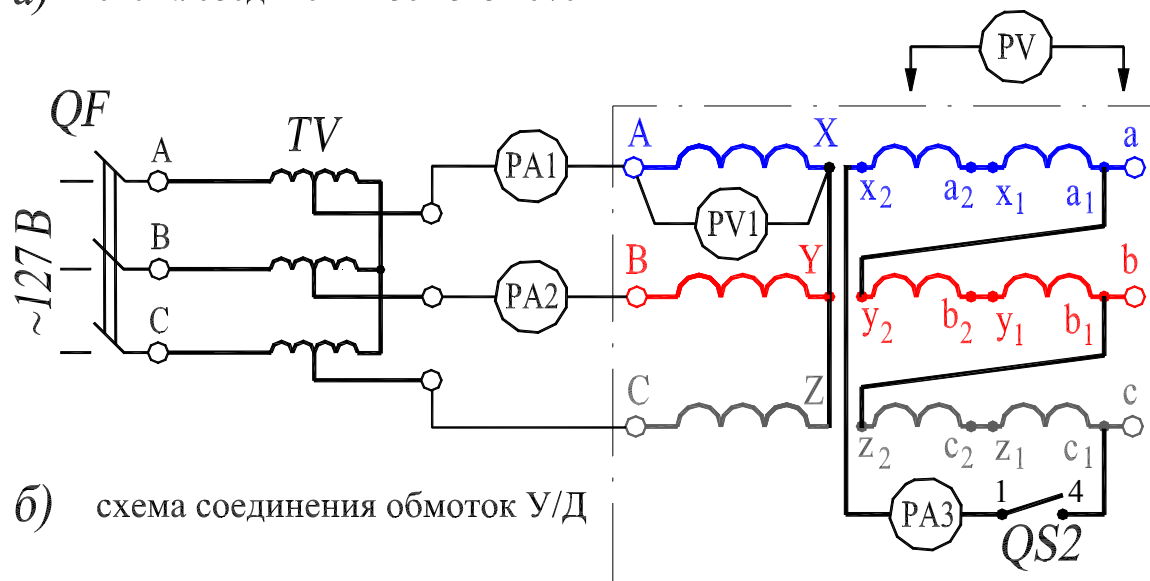
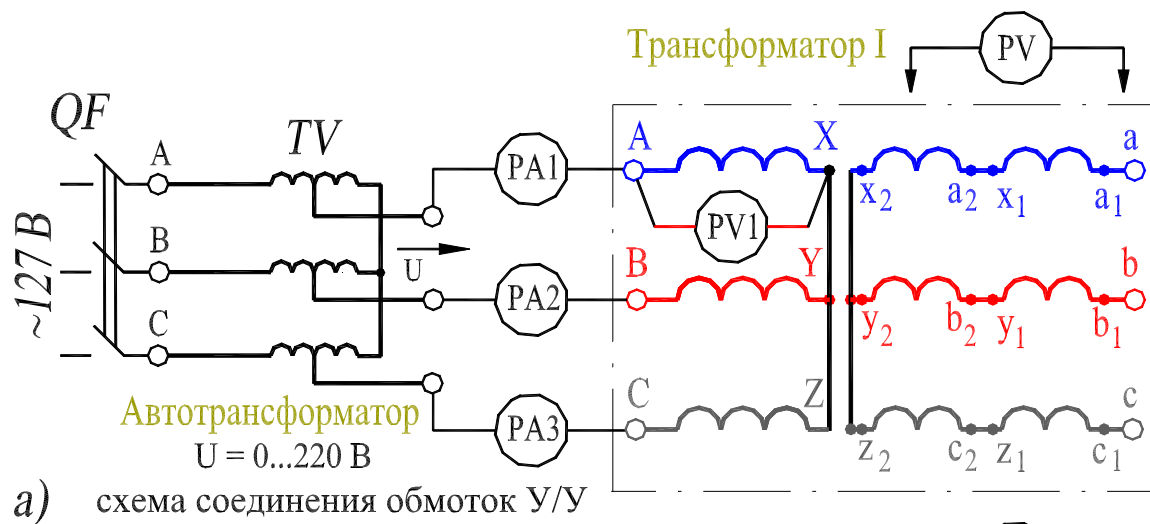


Рис. 4.16. Схема лабораторной установки для исследования явлений, возникающих при намагничивании магнитопровода трансформатора

#### 4.2. Трансформатор со схемой соединения обмоток У/Д (рис.4.16б)

Принципиальная схема опыта приведена на рис.4.16б. Для каждого из трансформаторов эта схема одна и та же.

Опыты проводятся в следующей последовательности: 1) с помощью автотрансформатора устанавливают на фазе трансформатора номинальное напряжение  $U_{AX}$ ; 2) выключателем  $QS2$  замыкают контур треугольника; 3) измеряют ток холостого хода во всех фазах  $I_{xAX}$ ,  $I_{xBY}$ ,  $I_{xCZ}$ , линейное  $U_{AB}$  и фазное  $U_{ax}$  напряжения. Также измеряют ток  $I_3$  в контуре треугольника. Напряжение измеряется вольтметрами  $PV$ ,  $PV1$ , а токи амперметрами  $PA1$ ,  $PA2$ ,  $PA3$ ; 4) с экрана осциллографа на кальку копируют кривые напряжений  $U_{AX}$ ,  $U_{AB}$ ,  $U_{ab}$ ,  $U_{ax}$  и тока холостого хода  $I_x$  во всех фазах, а также тока  $I_3$ ; кривые токов рекомендуется определять при подключении входа осциллографа на клеммы соответствующих амперметров; 5) выключателем  $QS2$  размыкают контур треугольника и на зажимах выключателя 1 - 4 измеряют напряжение равное сумме ЭДС третьих гармоник  $E_3 = \sum E_{3\phi}$ ; 6) с помощью автотрансформатора устанавливают на фазе трансформатора напряжение  $U_{AX} = 60 В$  и повторяют пункты 2)...5).

Опыт проводится дважды: 1) для группового трехфазного трансформатора (см. разд.3.1 и разд.3.2.3); 2) для трехфазного трехстержневого трансформатора (см. разд.3.1 и разд.3.3.2). Результаты записываются в табл.4.2.

Таблица 4.2

$U_{AX}^{2)}$	$U_{AB}$	$\frac{U_{AB}^{1)}$	$I_{xAX}^{2)}$	$I_{xBY}$	$I_{xCZ}$	$U_{ax}^{2)}$	$I_3$		$E_3$	
$B$	$B$	-	$A$	$A$	$A$	$B$	$A$	%	$B$	%
<b>Групповой трехфазный трансформатор</b>										
Рис.4.6 Рис.4.7	-	-	Рис.4.10			Рис.4.6 Рис.4.7	-	-	-	-
120										
60										
<b>Трехстержневой трехфазный трансформатор<sup>3)</sup></b>										
Рис.4.6 Рис.4.7	-	-	Рис.4.14			Рис.4.6 Рис.4.7	Рис.4.13		-	-
127										
60										

П р и м е ч а н и е.

<sup>1)</sup> Значение указанного отношения должно быть равно  $\sqrt{3}$ , так как третьи гармоники практически исключены из фазного напряжения  $U_{AX}$  и отсутствуют в линейном напряжении  $U_{AB}$ .



2) Экспериментальные осциллограммы напряжений и токов необходимо сравнить с кривыми, представленными на соответствующих рисунках.

3) В связи с несимметрией магнитопровода в кривых ЭДС  $E_3$  и тока  $I_3$  содержатся составляющиеся изменяющиеся с частотой 50 Гц.

Процентные значения ЭДС  $E_3$  и тока  $I_3$  рассчитываются по формулам:

$$E_3 = 100E_3/U_{ax}, \%$$

$$I_3 = 100I_3/I_{2фном}, \%$$

где  $I_{2фном} = S_{фном}/U_{2фном}$ ,  $S_{фном}$  – номинальная фазная мощность трансформатора;  $U_{2фном}$  – номинальное вторичное фазное напряжение.

### 4.3. Трансформатор со схемой соединения обмоток Д/У (рис.4.16в)

Принципиальная схема опыта приведена на рис.4.16в. Для каждого из трансформаторов эта схема одна и та же.

С помощью автотрансформатора устанавливают на фазе трансформатора номинальное напряжение  $U_{AX}$ , измеряют линейный  $I_l$  и фазный  $I_\phi$  первичные токи холостого хода, линейное  $U_{ab}$  и фазное  $U_{ax}$  вторичные напряжения. Напряжение измеряется вольтметрами  $PV, PVI$ , а токи амперметрами  $PA1, PA2, PA3$ . С экрана осциллографа на кальку копируют кривые напряжений  $U_{ab}, U_{ax}$  и токов  $I_l, I_\phi$ ; кривые токов рекомендуется определять при подключении входа осциллографа на клеммы соответствующих амперметров.

Измеренный в опыте фазный ток  $I_\phi$  содержит весь спектр нечетных гармоник. Как известно, его действующее значение определяется как корень квадратный из суммы квадратов действующих значений гармонических составляющих:

$$I_\phi = \sqrt{I_{1\phi}^2 + I_{3\phi}^2 + I_{5\phi}^2 \dots}$$

Опыт проводится дважды: 1) для группового трехфазного трансформатора. (см. разд.3.1 и разд.3.2.2); 2) для трехстержневого трехфазного трансформатора. (см. разд.3.1 и разд.3.3.3). Результаты записываются в табл.4.3

Таблица 4.3

$U_{AX}^{2)}$	Токи на первичной стороне				$U_{ax}$	$U_{ab}$
	$I_l$	$I_\phi$	$I_l/I_\phi^{1)}$	$I_3$		
$B$	$A$	$A$	-	$A$   $\%$	$B$	$B$
<b>Групповой трехфазный трансформатор</b>						
Рис.4.6, рис.4.7	Рис.4.9б		-	Рис.4.9а	Рис.4.6, рис.4.7	
120						
<b>Трехстержневого трехфазный трансформатор</b>						
Рис.4.6, рис.4.7	Рис.4.15		-	-	Рис.4.6, рис.4.7	
127						

Примечание. <sup>1)</sup> Значения указанного отношения будет меньше чем  $\sqrt{3}$ , так как третья гармоника проявляется в фазном токе, но отсутствует в линейном.

2) Экспериментальные осциллограммы напряжений и токов необходимо сравнить с кривыми, представленными на соответствующих рисунках.

Действующее значение 3-й гармоники фазного тока рассчитывается приближенно следующим образом:

$$I_{3\phi} \approx \sqrt{I_{\phi}^2 - I_{1\phi}^2}, \text{ A,} \quad \text{где } I_{1\phi} = I_{л} / \sqrt{3}.$$

$$I_{3\phi} = 100 I_{3\phi} / I_{1\phi}, \%$$

### **5. Содержание отчета**

Отчет должен содержать программу лабораторной работы, паспортные данные трансформатора, схемы испытаний, результаты опытных и расчетных данных в соответствующих таблицах и копии осциллограмм.

### **6. Контрольные вопросы**

1. Что такое явление насыщения стали?
2. Почему катушка со стальным сердечником в сети переменного тока является нелинейным сопротивлением?
3. Что такое магнитная характеристика трансформатора (привести графическую зависимость)?
4. Как по магнитной характеристике определить форму намагничивающего тока при синусоидальном магнитном потоке?
5. Какие высшие гармоники содержит намагничивающий ток однофазного трансформатора?
6. Почему третья и кратной ей гармоники отсутствует в линейном намагничивающем токе трехфазного трансформатора при схемах соединения обмоток  $У/У$ ,  $У/Д$  и  $Д/У$ ?
7. Как измерить 3-ю гармонику ЭДС в трансформаторе со схемой соединения обмоток  $У/Д$ ?

**Переходный процесс при включении трансформатора**

*а) Общая характеристика переходных процессов*

Переходные процессы возникают в трансформаторах при всяком изменении режима их работы: присоединение трансформатора к сети, резкое изменение нагрузки, короткое замыкание в первичной или вторичной сети, волновые процессы в линии, питающей трансформатор, и в ряде аналогичных случаев.

При переходных процессах в обмотках трансформатора возникают дополнительные электромагнитные явления, требующие специального рассмотрения, так как их необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации трансформаторов.

При включении трансформатора в сеть возможно сильное насыщение магнитопровода и более чем 100-кратный бросок тока холостого хода. Однако при включении трансформатора в сеть ток холостого хода может сразу же принять установившееся значение: броска тока не происходит, а насыщение магнитопровода соответствует “колену” магнитной характеристики. Далее рассматриваются оба случая.

*б) Включение трансформатора*

Рассмотрим включение однофазного трансформатора вхолостую, когда вторичная обмотка его разомкнута. Схема замещения трансформатора в этом режиме представлена на рис.П.1.

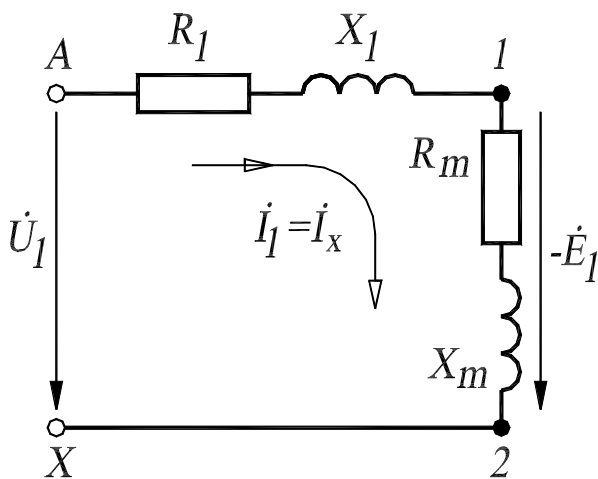


Рис. П.1. Схема замещения трансформатора при холостом ходе

Ток холостого хода  $i_1 = i_x$  трансформатора в установившемся режиме обычно невелик, не превосходит нескольких процентов номинального и только в трансформаторах небольшой мощности он достигает 10 % и более.

Однако при включении трансформатора вхолостую может иметь место кратковременный переходный процесс, при котором намагничивающий ток в первичной обмотке резко возрастает, превышая в некоторых случаях номинальное значение тока этой обмотки.

При исследовании процесса включения и определении тока  $i_1 = f(t)$  будем исходить из уравнения равновесия ЭДС первичной обмотки (рис.П.1):

$$u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \psi) = i_1 R_1 + W_1 d\Phi/dt, \tag{П.1}$$

где  $\psi$  - фазный угол, определяющий мгновенное значение  $u_1$  синусоидального напряжения сети в момент включения трансформатора,  $t = 0, 0 c$ ;  $\Phi$  - мгновен-

ное значение магнитного потока первичной обмотки;  $W_1$  - число витков этой обмотки, ее активное сопротивление -  $R_1$ ;  $i_1 = i_x$  - ток холостого хода (намагничивающий ток), протекающий в первичной обмотке.

Это уравнение является нелинейным, что обусловлено нелинейным характером магнитной характеристики магнитопровода (см. рис.4.2). Решая его приближенно, исключим из уравнения (П.1) ток  $i_1$ , сделав предположение, что между намагничивающим током  $i_1$  и магнитным потоком  $\Phi$  существует линейная зависимость, а именно

$$i_1 = \Psi_1 / L_{11} = W_1 \Phi / L_{11}, \quad (\text{П.2})$$

где  $\Psi_1$  - потокосцепление первичной обмотки трансформатора;  $L_{11} = (X_1 + X_m) / \omega$  - индуктивность этой обмотки;  $X_1 \approx const$  - индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки, обусловленное ее магнитным потоком рассеяния  $\Phi_{1\sigma}$ ;  $X_m = var$  - индуктивное сопротивление взаимной индукции первичной обмотки, обусловленное основным магнитным потоком. Индуктивность  $L_{11}$  не является постоянной, она меняется, постепенно возрастая до значения, которое она принимает при установившемся процессе. В дальнейшем для упрощения решения задачи в первом приближении будем считать эту индуктивность постоянной,  $L_{11} \approx const$ .

Подставляя (П.2) в (П.1) и полагая приложенное напряжение  $u_1$  синусоидальным, получаем:

$$R_1 \Phi / L_{11} + W_1 d\Phi / dt = u_1 / W_1 = (U_{1m} / W_1) \sin(\omega t + \psi). \quad (\text{П.3})$$

Решение уравнения (П.3) может быть представлено в виде двух слагаемых:

$$\begin{aligned} \Phi &= \Phi' + \Phi'' = \\ &= -\Phi_m \cos(\omega t + \psi) + (\Phi_m \cos \psi \pm \Phi_r) e^{-tR_1/L_{11}}, \end{aligned} \quad (\text{П.4})$$

где  $\Phi'$  - мгновенное значение установившегося потока;  $\Phi''$  - мгновенное значение переходного или свободного потока;  $\Phi_m$  - амплитуда магнитного потока;  $\pm \Phi_r$  - остаточный магнитный поток, который в отдельных случаях может составить примерно  $\Phi_m / 2$ .

В момент включения ( $t = 0, 0 \text{ с}$ ) магнитный поток  $\Phi$  равен нулю или остаточному потоку  $\Phi_r$ , который может иметь любой знак в зависимости от направления остаточного поля.

Возможны два крайних случая при включении трансформатора на холостой ход:

1) в момент времени  $t = 0, 0 \text{ с}$  мгновенное значение напряжения равно максимальному  $u_1 = U_{1m}$  ( $\psi = \pi/2$ ) и  $\Phi_r = 0$ . В этом случае с первого же момента времени устанавливается нормальный магнитный поток, то есть

$$\Phi = \Phi' = -\Phi_m \cos(\omega t + \pi/2) = \Phi_m \sin \omega t, \quad (\text{П.5})$$

а  $\Phi'' = 0,0$  и переходного процесса практически не возникает. Насыщение трансформатора соответствует “колену” магнитной характеристики (рис.4.2), ток холостого хода сразу же принимает установившееся значение. Таким образом, включение трансформатора происходит при благоприятных условиях;

2) в момент времени  $t = 0,0$  с мгновенное значение напряжения  $u_1$  равно нулю ( $\psi = 0$ ), а остаточный поток  $\Phi_r$  противоположен по знаку потоку  $\Phi'$ .

В этом случае

$$\Phi = -\Phi_m \cos \omega t + \Phi_m e^{-tR_1/L_{11}} + \Phi_r e^{-tR_1/L_{11}}. \quad (\text{П.6})$$

На рис.П.2 приведены кривые, характеризующие изменения во времени магнитного потока  $\Phi$  и его составляющих при процессе включения однофазного трансформатора, протекающего согласно уравнению (П.6). Как видно из рисунка приблизительно через половину периода ( $t \approx 0,01$  с) после включения трансформатора магнитный поток  $\Phi$  достигает максимальной величины  $\Phi_{max}$ , которая может принять значение примерно  $2,5\Phi_m$

$$\begin{aligned} \Phi &= -\Phi_m \cos 0,01\omega + \Phi_m e^{-0,01R_1/L_{11}} + \Phi_r e^{-0,01R_1/L_{11}} \approx \\ &\approx \Phi_m + \Phi_m + \Phi_r = \Phi_{max} \approx 2,5\Phi_m. \end{aligned} \quad (\text{П.7})$$

Поэтому во втором случае через  $0,01$  с после включения трансформатора на холостой ход магнитопровод будет сильно насыщен, чем и обусловлен значительный бросок тока холостого хода. Это иллюстрирует рис.П.3, на котором графическим путем получена зависимость тока включения  $i_1$  от времени  $t$ .

При включении насыщенного трансформатора, как показывает опыт, бросок тока включения может в  $100$  раз и более превысить нормальное значение намагничивающего тока. На рис.П.4 приведена типичная осциллограмма тока включения насыщенного трансформатора. Как видно из осциллограммы, длительность переходного процесса включения невелика и не превосходит нескольких периодов.

С возрастанием номинальной мощности трансформатора отношение  $R_1/L_{11}$  обычно уменьшается, поэтому у трансформаторов малой мощности переходный процесс при включении протекает быстрее и связан с меньшими бросками тока.

В трехфазном трансформаторе процесс включения в отдельных фазах протекает различно, так как магнитные потоки фаз сдвинуты между собой на  $120^\circ$ ; броски токов в фазах будут не равны. Однако уравнение (П.6) для каждой фазы в отдельности остается справедливым.

В условиях эксплуатации токи включения трансформатора приходится учитывать главным образом при регулировке аппаратуры защиты во избежание неправильных отключений масляных выключателей, вызываемых токами включения. Известную опасность представляют также электромагнитные силы взаимного притяжения, возникающие при токах включения между витками первичной обмотки.

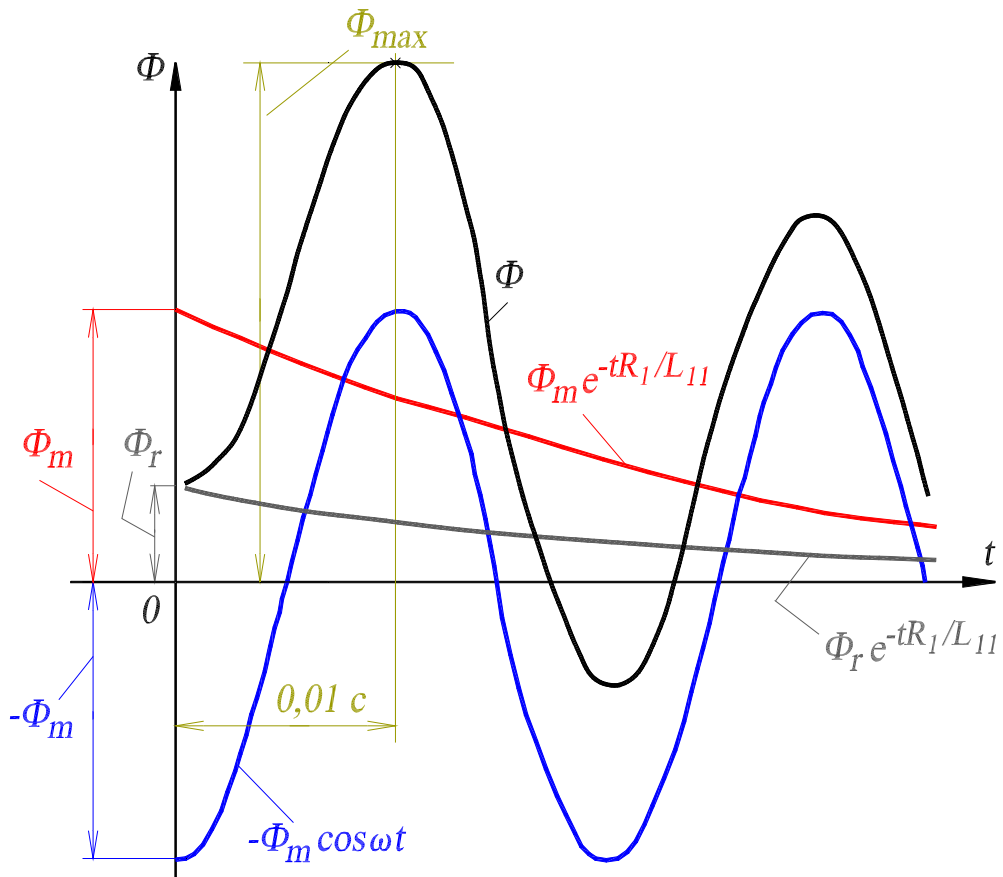


Рис. П.2. Переходный процесс при включении трансформатора в холостую

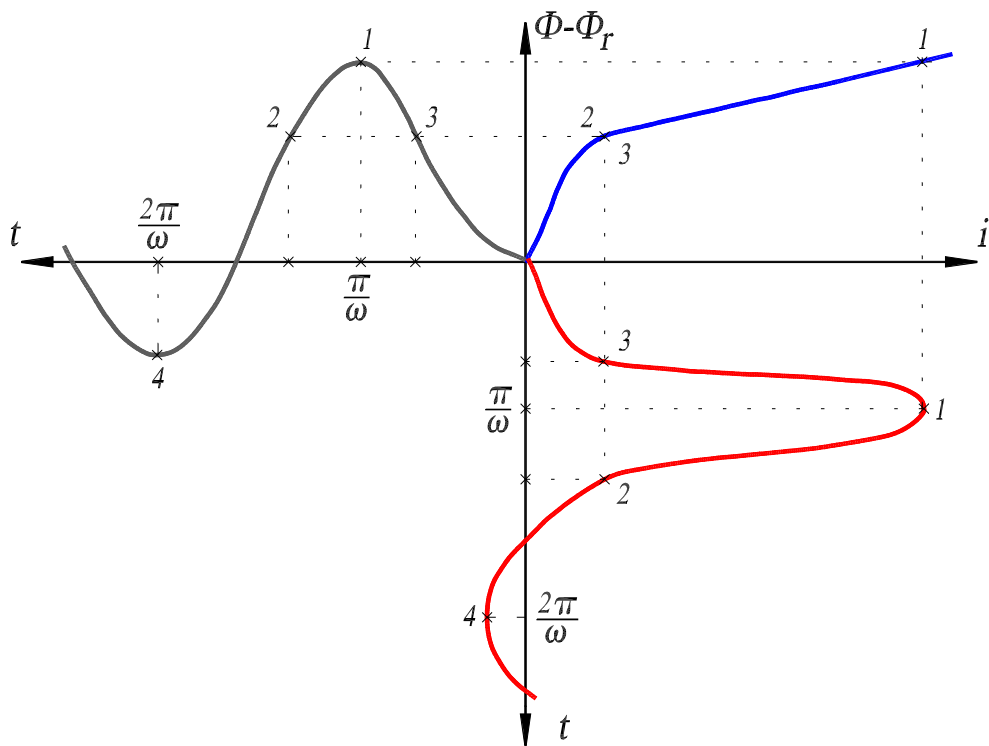


Рис. П.3. Графическое построение тока включения

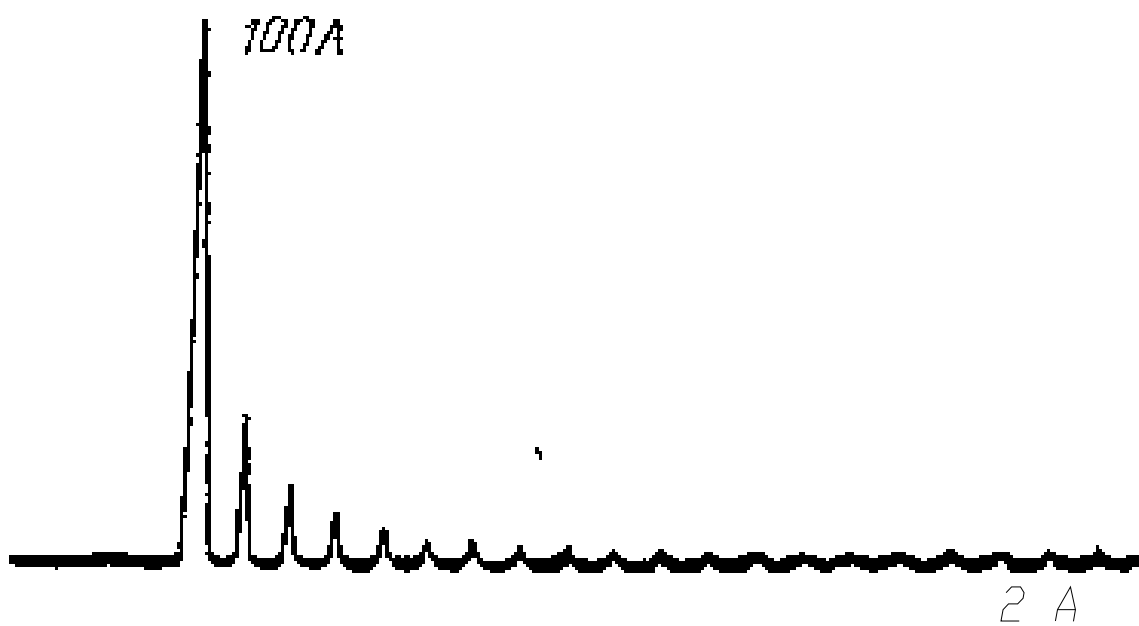


Рис.П.4. Осциллограмма тока включения насыщенного трансформатора

## ***Список литературы***

1. Копылов И.П. Электрические машины: Учебник. – 3-е изд., перераб. – М.: Высшая школа, 2002.
2. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины и микромашины. – М.: Высшая школа, 1990.
3. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1978.
4. Петров Г.Н. Электрические машины. В 3-х частях. Ч. 1. Введение. Трансформаторы. Учебник для вузов. – Москва: Энергия, 1974.
5. Андрианов В.Н. Электрические машины и аппараты. – М.: Колос, 1971.
6. Андрианов В.Н., Воропаев Н.И., Дружинина Н.А., Никонов Л.В. Практикум по электрическим машинам и аппаратам. – М.: Колос, 1969.
7. Забудский Е.И. Конструкция и технология сборки электрических машин. В 5-ти частях. Ч.1. Трансформаторы. Ч.2. Асинхронные машины. Ч.3. Синхронные машины. Ч.4. Машины постоянного тока. Ч.5. Электростанции: Видеофильм. – М.: МГАУ, 2004 ([разработано в Power Point](#)).
8. ГОСТ 16110–82. Трансформаторы силовые. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1986.
9. ГОСТ 11677–85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1999.
10. ГОСТ 3484.1–88. Трансформаторы силовые. Методы электромагнитных испытаний. М.: Изд-во стандартов, 1989.
11. Забудский Е.И. Конструкция и технология сборки электрических машин. В 5-ти частях. Ч.1. Трансформаторы. Ч.2. Асинхронные машины. Ч.3. Синхронные машины. Ч.4. Машины постоянного тока. Ч.5. Электростанции: Видеофильм. – М.: МГАУ, 2004 ([разработано в Power Point](#)).
12. Указатель. Каталоги и справочники по электротехнике. Серия 01 Электрические машины. Серия 03 Трансформаторы. – М.: ФГУП ИПР “Информэлектро”, 2007. <http://www.informelectro.ru/>
13. Забудский Е.И. Совмещенные регулируемые электромагнитные реакторы: Монография. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 436 с. <http://zei.narod.ru/regreak.html>
14. Забудский Е.И. Электрические машины. Ч. 1. Трансформаторы. Учебное пособие для вузов. – М.: МГАУ, 2002. – 166 с. <http://zei.narod.ru/soderghanie.html>
15. Забудский Е.И. Электрические машины. Ч. 3. Синхронные машины. Учебное пособие для вузов. – М.: МГАУ, 2008. – 195 с. [http://zei.narod.ru/Sm\\_Up.html](http://zei.narod.ru/Sm_Up.html)
16. Забудский Е.И. Математическое моделирование управляемых электроэнергетических устройств: Учебное пособие для вузов. – Ульяновск: УЛГТУ, 1998. – 120 с. <http://zei.narod.ru/Up1.html>
17. Забудский Е.И. Анализ управляемых электроэнергетических устройств методом конечных элементов: Учебное пособие для вузов. – Москва: МГАУ, 1999. – 141 с. <http://zei.narod.ru/Up2.html>



***URL-адреса предприятий, производящих электрические машины и трансформаторы***

<b>URL-адрес</b>	<b>Предприятие</b>
<a href="http://www.elektrozavod.ru">http://www.elektrozavod.ru</a>	ОАО ХК Электрозавод, г. Москва
<a href="http://www.aek-dinamo.ru">http://www.aek-dinamo.ru</a>	Акционерная электротехническая компания “Динамо”, г. Москва
<a href="http://www.energomash.ru">http://www.energomash.ru</a>	Энергомаш, г. Санкт-Петербург
<a href="http://www.vemp.ru">http://www.vemp.ru</a>	ОАО “Владимирский электромоторный завод”, г. Владимир
<a href="http://www.ztr.zp.ua">http://www.ztr.zp.ua</a>	ОАО Запорожтрансформатор, г. Запорожье
...	...

<http://www.rao-ees.ru> – РАО “ЕЭС Россия”;

<http://www.informelectro.ru/> – ФГУП Институт промышленного развития (Информэлектро) – Информационный центр России;

<http://www.center.enereal.ru/products.html> – продукция заводов России, производящих электрические машины и трансформаторы

**Паскаль-программа**

**“Расчет характеристик холостого хода трансформатора”**

{Эта Паскаль-программа обеспечивает расчет характеристик холостого хода трансформатора

Исходные данные (см. табл. 1.1, графа “Измерение”, с.31)  
считываются из файла **data.XX** .

**Файл data.XX формируется (редактируется) пользователем.**

Результаты расчета (табл. 1.1, графа “Расчет”)  
помещаются в файл **result.XX** .

**Файл result.XX создается турбосредой.**

Обозначения физических величин (переменных), которые приняты в учебной литературе по дисциплине Электрические машины и в Паскаль-программе, совпадают}

```
uses crt;
var i, n      : integer;
    fi, fo    : text;
    U1x, U2x, IAx, IBx, ICx, PAx, PCx,
    Ix, Px, CosFix, K, Zm, Rm, Xm : array[1..30] of real;
begin
clrscr;
assign(fi,'d:\tp_7\pas\data.XX'); reset(fi);
assign(fo,'d:\tp_7\pas/result.XX'); rewrite(fo);
writeln(fo,' Паскаль-программа обеспечивает расчет');
writeln(fo,'характеристик холостого хода трансформатора');
writeln(fo,'=====');
write('1. ВВЕДИТЕ число точек на экспериментальной зависимости n = ');
read (n);
{Считывание исходных данных из файла data.XX}
for i := 1 to n do
read(fi,U1x[i], U2x[i], IAx[i], IBx[i], ICx[i], PAx[i], PCx[i]);
{Расчет характеристик холостого хода
и сопротивлений намагничивающего контура}
for i := 1 to n do begin
Ix[i] := (IAx[i] + IBx[i] + ICx[i])/3;
Px[i] := PAx[i] + PCx[i];
CosFix[i] := Px[i]/(3.*U1x[i]*Ix[i]);
K[i] := U2x[i]/U1x[i];
Zm[i] := U1x[i]/Ix[i];
Rm[i] := Px[i]/(3.*sqr(Ix[i]));
Xm[i] := sqrt(sqr(Zm[i]) - sqr(Rm[i]))
end;
```

```

{Вывод результатов в файл result.XX}
writeln(fo,'    ФАЙЛ С РЕЗУЛЬТАТАМИ РАСЧЕТА');
writeln(fo);
writeln(fo, '    Таблица 1.1, графа "ИЗМЕРЕНИЕ");
writeln(fo, '    (исходные данные)');
writeln(fo, '-----');
writeln(fo, 'U1x U2x  IAx  IBx  ICx  PAx  PCx ');
writeln(fo, '-----');
writeln(fo, ' В   В   А   А   А   Вт   Вт');
writeln(fo, '-----');
for i := 1 to n do
writeln(fo, U1x[i]:3:0,' ',U2x[i]:3:0,' ',IAx[i]:3:2,' ',
IBx[i]:3:2,' ',ICx[i]:3:2,' ',PAx[i]:4:1,' ',PCx[i]:5:1);
writeln(fo, '-----');
writeln(fo);
writeln(fo, ' Продолжение табл. 1.1, графа "РАСЧЕТ");
writeln(fo, '    (результаты расчета)');
writeln(fo, '-----');
writeln(fo, 'Ix  Px  CosFix  K   Zm  Rm  Xm');
writeln(fo, '-----');
writeln(fo, ' А   Вт   -     -   Ом  Ом  Ом');
writeln(fo, '-----');
for i := 1 to n do
writeln(fo, Ix[i]:3:2,' ',Px[i]:4:1,' ',CosFix[i]:4:3,' ',
K[i]:4:2,' ',Zm[i]:5:1,' ',Rm[i]:5:1,' ',Xm[i]:5:1);
writeln(fo, '-----');
writeln(fo);
writeln(fo,'Copyright, кафедра ЭЭМ МГАУ, Москва. ');
writeln(fo,'Паскаль-программу составил профессор Е.И.Забудский ');
writeln(fo,'10 сентября 2000 года. ');
close(fi); close(fo)
end.

```

### **Примечания:**

1. Паскаль-программа расчета характеристик холостого хода трансформатора (файлы **XX.pas** и **XX.exe**) реализована на компьютерах вычислительной лаборатории кафедры "Электроснабжение и электрические машины".
2. Перед запуском программы на выполнение необходимо отредактировать текст файла **data.XX** в соответствии с выполненным экспериментом (таблица 1.1, графа "Измерение", с.31).
3. Результаты расчета помещаются турбосредой в файл **result.XX** (см. далее).
4. Для расчета других характеристик студентам рекомендуется составить компьютерные программы (аналогично вышеприведенной) самостоятельно.

## ФАЙЛ С РЕЗУЛЬТАТАМИ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ХОЛОСТОГО ХОДА ТРАНСФОРМАТОРА

Таблица 1.1, графа “ИЗМЕРЕНИЕ”  
(исходные данные)

U1x	U2x	IAx	IBx	ICx	PAx	PCx
В	В	А	А	А	Вт	Вт
86	90	0.23	0.20	0.22	35.0	-10.0
104	108	0.39	0.28	0.38	60.0	-25.0
115	121	0.50	0.37	0.50	80.0	-52.5
127	133	0.68	0.50	0.68	115.0	-75.0
133	138	0.76	0.57	0.80	132.5	-85.0

Продолжение табл. 1.1, графа “РАСЧЕТ”  
(результаты расчета)

Ix	Px	CosFix	K	Zm	Rm	Xm
А	Вт	–	–	Ом	Ом	Ом
0.22	25.0	0.447	1.05	396.9	177.5	355.0
0.35	35.0	0.321	1.04	297.1	95.2	281.5
0.46	27.5	0.175	1.05	251.8	44.0	248.0
0.62	40.0	0.169	1.05	204.8	34.7	201.9
0.71	47.5	0.168	1.04	187.3	31.4	184.7

© Copyright, кафедра “Электроснабжение и электрические машины”, МГАУ, Москва.  
Паскаль-программу составил профессор Е.И. Забудский  
10 сентября 2000 года.

**Трансформаторы специального назначения**

**Оглавление**

Введение .....	101
<b>П.1. Умножители частоты .....</b>	<b>103</b>
П.1.1. Применение ферромагнитных умножителей частоты и их достоинства. Краткое сопоставление с умножителями других типов .....	103
П.1.2. Принцип действия и устройство ферромагнитных умножителей частоты .....	105
П.1.3. Утроитель частоты с трехфазным входом и с однофазным выходом .....	108
П.1.4. Утроитель частоты с трехфазным входом и с трехфазным выходом .....	108
<b>П.2. Насыщающиеся и управляемые реакторы .....</b>	<b>112</b>
П.2.1. Классификация реакторов, основные определения .....	112
П.2.2. Области применения .....	114
П.2.2.1. Воздушные линии электропередачи высокого напряжения .....	114
П.2.2.2. Распределительные электросети .....	123
П.2.2.3. Системы электроснабжения промышленных предприятий .....	125
П.2.3. Основы теории и устройства реакторов трансформаторного типа .....	126
П.2.3.1. Явление генерации гармоник насыщения .....	127
П.2.3.2. Насыщающийся реактор .....	129
П.2.3.3. Управляемый реактор .....	130
Список литературы .....	137

## ***Введение***

Наряду с силовыми трансформаторами электроэнергетического назначения используются трансформаторы для особых условий работы, которые называются трансформаторами специального назначения. К ним относятся: трансформаторы для преобразования числа фаз переменного тока; трансформаторы для преобразования частоты; трансформаторы для питания дуговых электропечей; трансформаторы с плавным регулированием напряжения; трансформаторы для дуговой электросварки; трансформаторы высокого напряжения для лабораторных установок; насыщающиеся и управляемые реакторы и др. Трансформаторы специального назначения обладают рядом особенностей по сравнению с трансформаторами общепромышленного применения.

Далее будут рассмотрены *трансформаторы для преобразования частоты* (умножители частоты), а также *насыщающиеся и управляемые реакторы*. Функциональное назначение этих устройств различно. Умножители частоты преобразуют частоту, например  $50 \text{ Гц}$ , в повышенную частоту ( $100, 150, 200, 250, 300, \dots \text{ Гц}$ ) и предназначены для питания различных электропотребителей напряжением повышенной частоты. Реакторы представляют собой силовые регулируемые индуктивные сопротивления, которые предназначены для использования в ЛЭП, в распределительных электросетях и в системах электроснабжения промышленных предприятий с целью улучшения режимов их работы [1, 2, 3]\*. Общим для умножителей частоты [7, 8, 12] и реакторов [9, 10, 11, 13] является глубокое насыщение магнитной системы. В частности, в утроителях частоты и насыщающихся реакторах амплитуда магнитной индукции в магнитопроводе составляет **2...2,2 Тл**. Схемотехнические решения этих устройств также имеют много общего. Например, утроитель частоты и насыщающийся реактор могут отличаться соответственно лишь наличием и отсутствием вторичной обмотки повышенной частоты.

Исследованию режимов, характеристик и процессов как умножителей частоты и реакторов, так и других электромагнитных и электромеханических устройств должна предшествовать реализация триады “модель – алгоритм – программа”. В результате осуществляется замена исходного устройства его моделью, которая затем анализируется на ПК при помощи вычислительно-логических алгоритмов.

Математическая модель глубже вскрывает внутренние связи устройства, дает его точные количественные характеристики. Вычислительный эксперимент частично или полностью заменяет натурное экспериментирование, позволяя уменьшить сроки и стоимость разработок. Универсальность математических моделей, алгоритмов и программ дает возможность оперативно и без дополнительных затрат переходить от решения одной проблемы к другой.

Триада “модель – алгоритм – программа” предполагает три этапа: поста-

---

\* В прил. 2 даны библиографические ссылки на издания, перечисленные в списке литературы (с. 137, 138).

новка задачи, разработка математической модели, составление программы решения задачи на ПК.

Постановка задачи включает конкретизацию схмотехнических и конструктивных особенностей устройства, исходные допущения, формулирование конечной цели и др.

В понятие математической модели входит формирование на основе законов электротехники в соответствии с принятыми допущениями системы уравнений, необходимой и достаточной для достижения поставленной цели, а также аналитическое преобразование этой системы, обеспечивающее оптимальность решения задачи на ПК.

На третьем этапе осуществляется программная реализация математической модели.

*Наиболее эффективно решается задача, когда все три этапа осуществляет специалист в данной предметной области, владеющий также математическим аппаратом численных методов анализа и компьютерными технологиями.*

Разработаны: обобщенная математическая модель электромагнитных режимов электроэнергетических устройств с произвольной конструкцией магнитопровода и наложенными на нем обмотками, алгоритм программной реализации модели и соответствующие компьютерные программы. Математическая модель – это система нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений электрического равновесия и магнитного состояния устройств, которые записаны на основе теории цепей с нелинейными сосредоточенными параметрами.

На основе анализа математической модели исследовано поведение (“физиология”) реакторов в электроэнергетических системах в нормальных установившихся режимах работы, в переходных, несимметричных и др. [4, 20].

В связи с бурным развитием средств вычислительной техники и созданием систем автоматизированного проектирования (САПР) *для инженеров актуально владение современными численными методами решения краевых задач математической физики.* Поэтому электротехникам необходимо своевременное ознакомление с теорией и практикой решения таких задач [23].

Введение САПР в электротехнике сопровождается краткосрочным и долгосрочным эффектами: первый – это рост производительности труда при выполнении научно-исследовательских работ благодаря сокращению сроков разработки новой продукции; второй – отказ от традиционных методов расчета, замена дорогостоящих натуральных испытаний вычислительным экспериментом, получение изделий более высокого качества. *Перечисленные цели в большинстве случаев достигаются применением метода конечных элементов – эффективного средства решения краевых задач математической физики* [5, 25].

Начиная с 1970 года этот метод становится все более популярным среди инженеров различных специальностей. Достоинство метода конечных элементов – это универсальные формы описания различных полевых задач, что помо-

гает взаимопониманию между специалистами, работающими в различных предметных областях. Электромагнетизм, термодинамика и механика – три обширные теоретические дисциплины, на базе которых с помощью САПР моделируются электротехнические устройства.

В настоящее время *работа инженеров изменилась благодаря развитию информатики и численных методов анализа*. Численные методы сделали возможным решение самых сложных задач для самых сложных физических моделей. Широкое распространение получили интерактивные программы графического представления информации, позволяющие более компактно описывать геометрические и физические свойства объектов по сравнению с классическими методами. Численные методы и интерактивная графическая техника составляют единое целое в компьютерных программах систем автоматизированного проектирования [21, 23, 25].

**Внимание!** Программы САПР ни в коей мере не могут заменить интуицию и умение обобщать накопленный опыт, которые присущи опытным проектировщикам. Программы САПР лишь материализуют детерминированный алгоритм, которому нужно следовать, чтобы получить решение. Он воспроизводит принятое проектировщиком приемлемое решение.

Разработанные на основе макроскопической теории электромагнитного поля и метода конечных элементов математические модели умножителей частоты и реакторов учитывают совокупность физических явлений, определяющих их функционирование. По результатам расчета поля выполнен анализ и проведена оптимизация “анатомии” (внутреннего строения) устройств [5, 16, 18, 19, 21].

## ***П.1. Умножители частоты***

Электромагнитные, точнее ферромагнитные умножители, представляющие собой своеобразные *трансформаторные устройства с конденсаторами*, находят все более широкое и разнообразное применение. Мощность отдельных умножителей частоты, питаемых от промышленных сетей, достигает до 3000 кВ·А. Лучшие технико-экономические показатели имеют умножители с кратностью умножения от 2 до 9. Такие умножители наиболее распространены. Они надежны, удельный расход активных материалов всего в 1,5...5 раз больше, чем для обычных трансформаторов той же мощности и входной частоты, они имеют высокий КПД, достигающий для некоторых умножителей до 95 %, хорошую форму кривой выходного напряжения, жесткую внешнюю характеристику.

### ***П.1.1. Применение ферромагнитных умножителей частоты и их достоинства. Краткое сопоставление с умножителями других типов***

Ферромагнитные умножители частоты широко применяют в самых различных областях техники. *Не имея подвижных частей, они очень надежны в эксплуатации. Стоимость их не высока, КПД довольно велик*. Важными областями применения ферромагнитных умножителей является металлургия и электротехнология металлов. Умножители используют для питания разнообразных



плавильных индукционных печей, питания устройств, предназначенных для нагрева заготовок из черных и цветных металлов, а также для предварительного нагрева металла перед сваркой или под закалку. Умножители применяют и для питания аппаратов электроэрозионной обработки, для нагрева графита и обработки карбида.

В мощных установках для индукционного нагрева обычно используют утроители и упятерители частоты. Сварочные аппараты питают от удвоителей, утроителей или ушестерителей частоты. Для питания электроэрозионных станков пользуются удвоителями частоты, преобразующими частоту 3 или 10 кГц в частоту 6 или 20 кГц.

*Ферромагнитные умножители применяют для питания быстроходных двигателей, в частности двигателей различных электроинструментов. Двигатели чаще всего питают от ферромагнитных удвоителей, утроителей и учетверителей частоты.* Трехфазный утроитель частоты (50/150 Гц), разработанный в Институте сильноточной техники (Германия) на выходную мощность 25 кВ·А и предназначенный для питания асинхронных электродвигателей, имеет КПД 86 %. Утроитель частоты, разработанный в этом же Институте на мощность 150...400 кВ·А и предназначенный для индукционного нагрева и плавки металлов, имеет КПД 85...90 %. Известны и другие применения ферромагнитных умножителей частоты.

Достоинством большинства типов ферромагнитных умножителей частоты является то, что одновременно с увеличением частоты питающей сети в них легко осуществляется и трансформация ее напряжения. Их можно рассчитать практически на любые значения входного и выходного напряжений, что исключает потребность в согласующих трансформаторах, необходимых при полупроводниковых умножителях, и других их видах. Ценным является и то, что ферромагнитные умножители, предназначенные для питания однофазной нагрузки, например мощной электрической печи, могут равномерно нагрузить первичную трехфазную сеть, так как почти всегда они имеют трехфазный вход.

В ферромагнитных умножителях легко осуществить плавное или ступенчатое регулирование выходного напряжения, что достигается путем изменения величины подмагничивания или чисел витков обмоток. Возможность плавного бесконтактного регулирования напряжения облегчает автоматизацию процессов в устройствах, питаемых умножителями частоты.

Ферромагнитные умножители обладают достаточным быстродействием. Продолжительность переходного процесса при внезапных изменениях напряжения питающей сети или сопротивления нагрузки составляет всего лишь один-два периода входного напряжения. Умножители довольно устойчиво работают при обычных колебаниях напряжения питающей сети по амплитуде и частоте.

Достоинством ферромагнитных умножителей частоты является и то, что их изготовление при использовании обычной технологии простое и доступное.

Ниже дано краткое сравнение ферромагнитных умножителей частоты с другими типами умножителей, а именно: электромашинными и полупроводниковыми преобразователями.

Ферромагнитные умножители частоты значительно надежнее, чем электромашинные или все другие умножители. Утроители  $50/150 \text{ Гц}$  мощностью в  $15...20 \text{ кВ}\cdot\text{А}$  на  $10...20 \%$  дешевле, чем электромашинные. Удельная стоимость ферромагнитного утроителя для индукционного нагрева ( $2000/6000 \text{ Гц}$ ) приблизительно в 3 раза меньше, чем электромашинных. Вес активных материалов современных ферромагнитных удвоителей, утроителей и учетверителей частоты обычно меньше, чем электромашинных умножителей частоты. Итак, можно заключить, что ферромагнитные умножители частоты превосходят электромашинные не только потому, что они гораздо надежнее и не требуют специального обслуживания, но также и по той причине, что в ряде случаев они легче и дешевле.

Недостатком ферромагнитных умножителей частоты по сравнению с полупроводниковыми является то, что в них невозможно плавно изменять выходную частоту. Они неприменимы, следовательно, для плавного регулирования скорости электродвигателей.

Но в тех случаях, когда требуется неизменная выходная частота, ферромагнитные умножители обычно превосходят современные полупроводниковые умножители, будучи проще, надежнее и дешевле. Как источник питания мощных нагрузок, в частности индукционных печей, ферромагнитные умножители превосходят все другие типы умножителей, и в этой области их будут применять еще долгие годы.

### ***П.1.2. Принцип действия и устройство ферромагнитных умножителей частоты***

Преобразование частоты в рассматриваемых умножителях происходит благодаря явлениям, возникающим при насыщении их ферромагнитных сердечников. Кривая намагничивания сердечников – зависимость величины магнитной индукции в них от напряженности поля,  $B = f(H)$ , как известно, нелинейна. Умножение частоты возможно, если величина магнитной индукции достигает значений, лежащих на нелинейном участке кривой намагничивания, который соответствует области насыщения. Практически в номинальном режиме сердечники умножителей всегда сильно насыщены: при электротехнической стали марки 3413 амплитуда индукции достигает значений  $2,0...2,2 \text{ Тл}$ .

На рис. 4.6 приведено построение, показывающее, какую форму имеет кривая магнитного потока в насыщенном сердечнике при синусоидальном изменении реактивной составляющей тока холостого хода (допущение – эффект гистерезиса не учтен – не приводит при трансформаторной стали к существенным погрешностям). Как видно, кривая магнитного потока имеет характерную трапецеидальную форму и ее можно разложить в ряд с нечетными гармониками (формула (9) на с.74).

На рис. 4.3а приведено аналогичное построение, но выполненное для того случая, когда магнитный поток изменяется по синусоидальному закону. Кривая реактивной составляющей тока холостого хода имеет при этом характерный пикообразный вид и может быть также разложена в ряд с нечетными гармониками (формула (8) на с. 71 и рис. 4.4).

Умножители частоты в четное число раз нуждаются в поляризации их сердечников постоянным магнитным полем. Эта поляризация осуществляется специальными обмотками подмагничивания постоянным током. Необходимость поляризации сердечников умножителей в четное число раз объясняется тем, что искажение синусоидального входного колебания в двух следующих друг за другом полупериодах должно быть неодинаковым. В противном случае четные гармонические составляющие не появляются.

Умножители частоты в нечетное число раз в специальной поляризации сердечников постоянным магнитным полем не нуждаются.

**Вывод!** Ферромагнитные насыщенные элементы умножителей частоты служат для возбуждения колебаний повышенной частоты.

Внутреннее индуктивное сопротивление умножителя оказывает отрицательное влияние на его работу, делая внешнюю характеристику умножителя мягкой и ограничивая его предельную выходную мощность. Для уменьшения вредного влияния внутреннего сопротивления умножителя на его выходе устанавливают конденсаторы продольной или поперечной емкостной компенсации. Конденсаторы продольной компенсации включаются последовательно с нагрузкой умножителя, а конденсаторы поперечной компенсации – параллельно нагрузке и выходным зажимам умножителя.

На рис. П.1 показаны типичные внешние характеристики умножителя при активно-индуктивной нагрузке без емкостной компенсации (кривая 1), с продольной (кривая 2) и с поперечной (кривая 3) емкостной компенсацией. При отсутствии конденсаторов во вторичной цепи выходное напряжение быстро уменьшается с ростом тока нагрузки ввиду падения напряжения на внутреннем индуктивном сопротивлении. В случае продольной компенсации падение напряжения на внутреннем индуктивном сопротивлении в значительной мере компенсируется падением напряжения на конденсаторе, и внешняя характеристика становится жесткой. При включении конденсатора параллельно нагрузке выходное напряжение холостого хода умножителя при неизменных числах витков выходной обмотки значительно возрастает, а ток короткого замыкания не изменяется. *Поперечная компенсация особенно целесообразна в умножителях с выходом низкого напряжения.*

*Максимальная выходная мощность, которую может иметь умножитель без учета нагрева, значительно больше при наличии продольной или поперечной компенсации.* Ферромагнитные элементы умножителей с емкостной компенсацией получаются значительно легче и компактнее, чем при отсутствии ее.

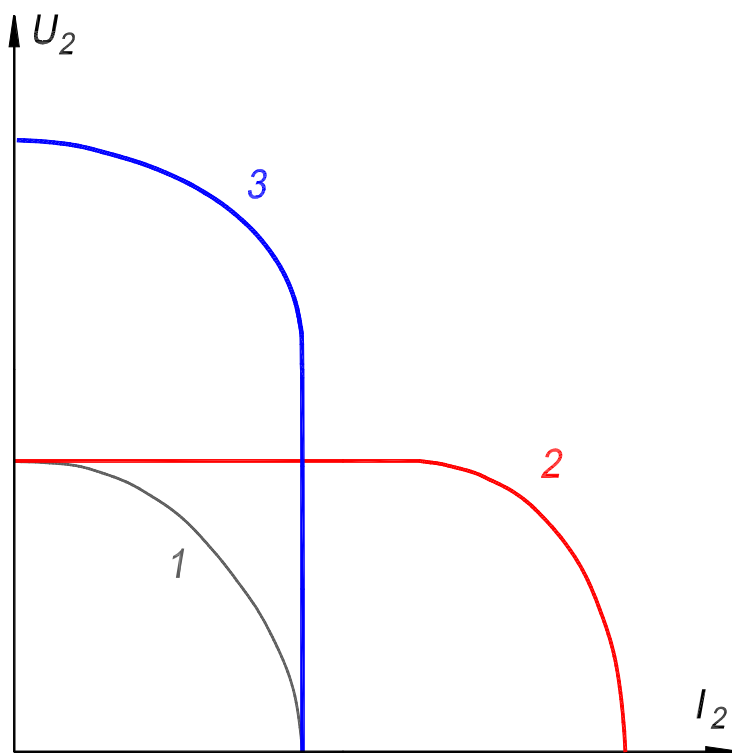


Рис. П.1. Типичные внешние характеристики ферромагнитных умножителей частоты: 1 — без емкостной компенсации на выходе; 2 — при продольной компенсации; 3 — при поперечной компенсации

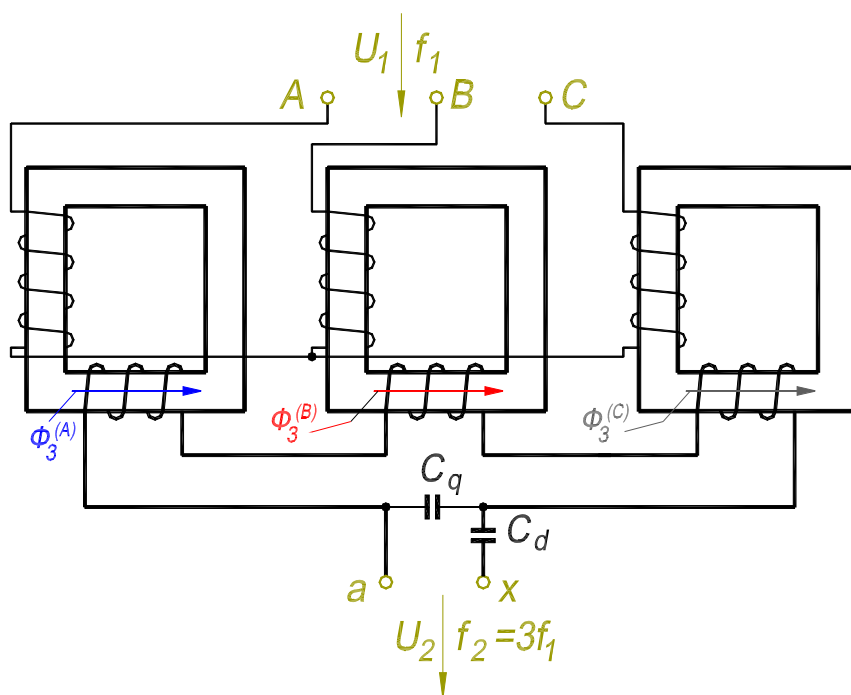


Рис. П.2. Электромагнитная схема утроителя частоты с однофазным выходом

В некоторых умножителях применяют продольно-поперечную компенсацию, одновременно включая конденсаторы параллельно выходу умножителя и последовательно с его нагрузкой.

**Внимание!** Конденсаторы для емкостной компенсации – неременная составная часть умножителей.

В большинстве умножителей выделение колебания умноженной частоты основано на том, что в  $m$ -фазной системе несинусоидальных напряжений или токов колебания с частотами, кратными  $m$ , образуют нулевую последовательность, совпадая по фазе. При суммировании всех несинусоидальных напряжений или токов  $m$ -фазной системы их гармонические составляющие, не кратные  $m$ , взаимно уничтожаются, а кратные  $m$  арифметически складываются. Суммирование напряжений в ферромагнитных умножителях осуществляется путем последовательного соединения их вторичных обмоток – соединением в открытый многоугольник. Нагрузка присоединяется к свободным зажимам многоугольника.

### ***П.1.3. Утроитель частоты с трехфазным входом и с однофазным выходом***

Утроение частоты при помощи трансформаторов можно осуществить по схеме, представленной на рис. П.2. Утроитель состоит из трех насыщенных двухобмоточных однофазных трансформаторов, первичные обмотки которых соединены звездой, а вторичные – открытым треугольником.

При соединении в звезду первичных обмоток трех однофазных трансформаторов в магнитном потоке каждой фазы (помимо основной гармонической) возникает значительная третья гармоническая  $\Phi_3^{(A)}$ ,  $\Phi_3^{(B)}$ ,  $\Phi_3^{(C)}$  (с. 74...77). Эта составляющая магнитного потока наводит в обмотках каждой фазы ЭДС тройной частоты. Если поэтому обмотки всех трансформаторов соединить последовательно по схеме открытого треугольника, то на зажимах  $a-x$  будет действовать напряжение в основном только частоты  $f_2 = 3f_1$ ; первая гармоническая в напряжении  $u_2$  будет отсутствовать, так как в трех катушках вторичной обмотки (в сумме) первая гармоническая равна нулю.

На выходе утроителя включены конденсаторы продольной и поперечной емкостной компенсации  $C_d$  и  $C_q$ . На входе утроителей иногда включают косинусные конденсаторы.

Конденсаторы служат одновременно и для компенсации реактивных токов на входе утроителя и для поперечной компенсации на его выходе. Их применение позволяет уменьшить отрицательное влияние индуктивности рассеяния первичных обмоток. Они служат также и для улучшения входного  $\cos \varphi_1$ .

При переходе утроителя от режима холостого хода к режиму нагрузки в его сердечниках благодаря продольной емкостной компенсации появляется дополнительный магнитный поток утроенной частоты. Результирующий поток утроенной частоты, образованный основным и дополнительным потоком, возрастает по амплитуде.

При наличии продольной емкостной компенсации возрастание амплитуды третьей гармоники потока с включением нагрузки приводит к увеличению напряжения на зажимах вторичных обмоток  $U_2$ . Это добавление компенсирует падение напряжения на конденсаторе  $C_d$ , вследствие чего выходное напряжение утроителя  $U_2$  с включением нагрузки изменяется незначительно: его внешняя характеристика делается жесткой. При поперечной компенсации выходное напряжение утроителя существенно зависит от нагрузки (рис. П.1).

#### **П.1.4. Утроитель частоты с трехфазным входом и с трехфазным выходом**

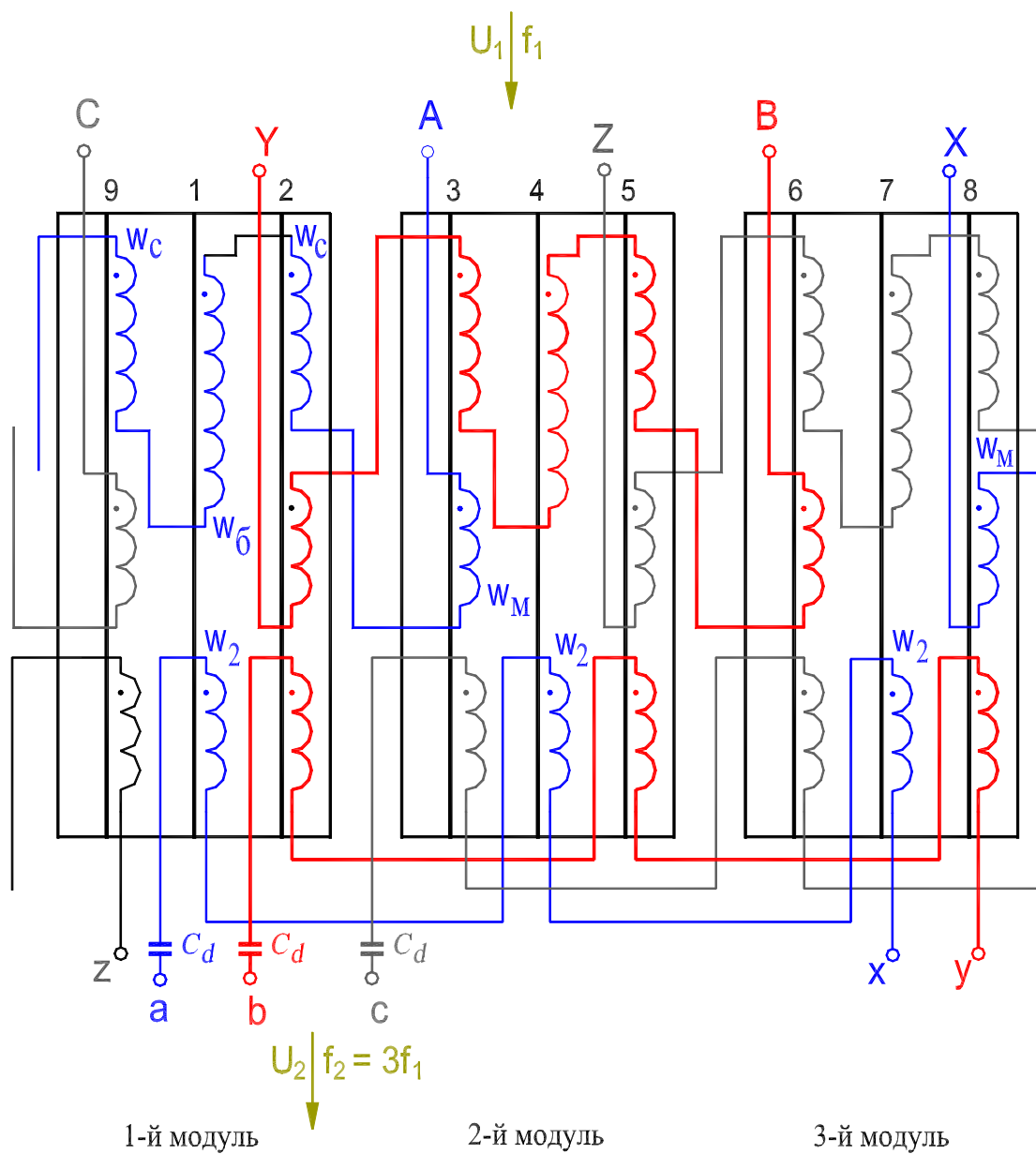
Утроитель частоты можно использовать в качестве источника питания напряжением утроенной частоты нерегулируемых асинхронных электроприводов сельскохозяйственных механизмов.

Разработан трехфазный утроитель частоты, активная часть которого состоит из магнитопровода, трехфазной первичной обмотки основной частоты и трехфазной вторичной обмотки утроенной частоты (рис. П.3). Активная часть выполнена в виде трех одинаковых модулей, соединенных между собой. Модуль содержит трехстержневой, бронестержневой сердечник и восемь катушек разных фаз и обмоток. Каждая фаза обмотки основной частоты состоит из пяти последовательно-встречно соединенных катушек, соотношение чисел витков которых  $W_m : W_c : W_b : W_c : W_m = 0,395 : 0,743 : 1 : 743 : 0,395$ . Катушки с числами витков  $W_b$  и  $W_m$  являются основными, а две катушки с числом витков  $W_c$  – фазосдвигающими. Таким образом, совмещенная первичная рабочая обмотка выполняет функции двух обмоток: основной и фазосдвигающей. Принятые соотношение чисел витков катушек фаз, схема соединения катушек и расположение их на стержнях обеспечивают исключение из тока обмотки гармоник с номерами 3, 5, 7, 9, 11,...

На рис. П.4а, б, в показаны векторы первой гармоники МДС катушек соответственно фаз А, В, и С обмотки в предположении, что ток протекает только по одной из фаз, а по двум другим не протекает. На рис. П.4г показана трехфазно-расщепленная звезда векторов первой гармоники МДС стержней магнитопровода, созданных первичной обмоткой.

Каждая фаза вторичной обмотки утроенной частоты состоит из трёх последовательно-согласно соединенных катушек с одинаковым числом витков  $W_2$ . В фазах вторичной обмотки 1, 5, 7, 11, 13-я гармоники магнитного потока не индуцируют результирующей ЭДС. Третья гармоника потока индуцирует в катушках каждой фазы вторичной обмотки ЭДС утроенной частоты, которые арифметически складываются. На выходе утроителя включаются конденсаторы продольной и поперечной емкостной компенсации. На входе утроителя могут быть включены косинусные конденсаторы [7, 12].

Результаты экспериментальных исследований подтверждают приемлемые технико-экономические показатели разработанного утроителя частоты.



1, 2, 3, ..., 9 — номера стержней магнитопровода

$$W_M : W_C : W_{\bar{C}} : W_C : W_M = 0,395 : 0,743 : 1 : 0,743 : 0,395$$

Рис. П.3. Электромагнитная схема трехфазного устроителя частоты





## ***П.2. Насыщающиеся и управляемые реакторы***

### ***П.2.1. Классификация реакторов, основные определения***

Насыщающиеся и управляемые реакторы по конструктивным и схемотехническим решениям подобны силовым трансформаторам или неявнополусным электрическим машинам переменного тока, но с неподвижным ротором.

Реактор – это статическое силовое нелинейное устройство, работа которого основана на явлении электромагнитной индукции. Являясь средством автоматического регулирования реактивной мощности, реакторы управляют режимами электроэнергетических систем: компенсируют избыточную зарядную мощность ЛЭП и повышают их пропускную способность, ограничивают коммутационные перенапряжения и токи короткого замыкания, уменьшают колебания напряжения, рационально распределяют напряжение и ток и др. Реактивная мощность, потребляемая реактором, плавно регулируется за счет изменения насыщения (магнитного сопротивления) его магнитопровода.

Активная часть реактора содержит одну или несколько обмоток и магнитопровод, выполненный из электротехнической стали. В реакторе могут быть следующие обмотки: 1) *рабочая обмотка* для включения реактора в электрическую цепь, в которой используется индуктивность реактора; 2) *обмотка управления*, предназначенная для создания управляющего магнитного поля. В большинстве случаев это постоянное магнитное поле или поле, имеющее значительную постоянную составляющую; 3) *компенсационная (вспомогательная) обмотка*, необходимая для компенсации части магнитного потока устройства, например для компенсации высшей гармоники в индукции магнитного поля; 4) *фазосдвигающая (вспомогательная) обмотка*, обеспечивающая сдвиг по фазе векторов МДС стержней магнитопровода.

Технико-экономические показатели реакторов должны удовлетворять следующим требованиям: практическая синусоидальность регулируемого тока, отсутствие индуктивных связей между обмотками и достаточное быстродействие, пониженная материалоемкость, технологичность и др.

*Реакторы классифицируются по различным признакам.*

**1.** Классификация по способу регулирования индуктивного сопротивления рабочей обмотки реактора, т.е. по способу регулирования его реактивной мощности:

*а)* управляемый реактор (**УР**). Это устройство, у которого индуктивное сопротивление рабочей обмотки регулируется за счет изменения насыщения сердечника посредством изменения постоянной составляющей магнитного потока. Реактор содержит обмотку управления;

*б)* насыщающийся реактор (**НР**). Это устройство, магнитопровод которого самонасыщается переменным магнитным полем при номинальном напряжении рабочей обмотки, и предназначено для работы в этом режиме. В реакторе отсутствуют обмотка управления и постоянное магнитное поле подмагничивания;

в) магнитно-вентильный реактор. Это устройство, у которого индуктивное сопротивление рабочей обмотки меняется за счет выпрямления с помощью тиристорov тока, протекающего по части ее витков.

## 2. Классификация по типу конструкции магнитопровода:

а) реактор трансформаторного типа. Его магнитная система является стержневой и подобна магнитопроводу силового трансформатора. Переменное магнитное поле реактора – пульсирующее, т.е. изменяется по периодическому закону только по временной координате;

б) реактор электромашинного типа. Его магнитная система – кольцевая, т.е. выполняется по типу магнитопровода неявнополюсной электрической машины переменного тока. Разница состоит в том, что внутренний сердечник, называемый по аналогии ротором, неподвижен и вставляется в расточку статора с минимальным технологическим зазором. Переменное магнитное поле реактора – вращающееся, т.е. изменяется по периодическому закону не только по временной координате, но и вдоль пространственной координаты.

## 3. Классификация по режимам намагничивания, характеризующимся различным проявлением гармоник насыщения переменного магнитного поля [4].

*Гармоники насыщения обусловлены нелинейностью кривой намагничивания материала магнитопровода, их амплитуды зависят от степени насыщения электротехнической стали.* При отсутствии подмагничивания магнитопровода постоянным полем в переменном магнитном поле проявляются только высшие гармоники насыщения нечетного спектра, а при подмагничивании магнитопровода в магнитном поле возникают еще и высшие гармоники насыщения четного спектра (с. 68...78). При соблюдении определенных условий четные гармоники могут отсутствовать и при подмагничивании магнитопровода постоянным полем.

### Реакторы работают в следующих режимах намагничивания:

а) режим вынужденного намагничивания (ВН). В этом режиме высшие гармоники насыщения проявляются в индукции переменного магнитного поля, а в напряженности – практически отсутствуют;

б) режим свободного намагничивания по той или иной  $n$ -ой гармонике насыщения (СН $n$ ), например по 2-й гармонике (СН2). В этом режиме эта гармоника проявляется в напряженности переменного магнитного поля, а в индукции – практически отсутствует;

в) режим симметричного намагничивания (СН) по четным гармоникам насыщения магнитного поля. В этом режиме при подмагничивании магнитопровода постоянным полем все четные гармоники насыщения исключены как из индукции, так и из напряженности переменного магнитного поля;

г) режим самоподмагничивания по 2-й гармонике насыщения магнитного поля. В этом режиме мощность 2-й гармоники преобразуется посредством выпрямителя в мощность, используемую для питания одной из обмоток управления.

#### 4. Классификация по виду совмещаемых функций:

а) **совмещенный реактор**. Это устройство с совмещением функций двух или нескольких отдельных обмоток в одной совмещенной обмотке;

б) **совмещенный управляемый реактор-трансформатор** (трансреактор). Он выполняет функции отдельного управляемого реактора и силового трансформатора. Это устройство имеет общую магнитную систему и может иметь две совмещенные обмотки;

в) **совмещенный реактор-конденсатор** (реаконд). Он выполняет функции отдельного реактора и батареи конденсаторов параллельного или последовательного включения;

г) **магнитно-вентильный реактор**. Совмещенное устройство выполняет функции отдельного управляемого реактора и источника постоянного тока (за счет включения тиристорov в одну из обмоток реактора).

В одном устройстве может быть совмещено большинство из перечисленных функций или часть их.

Возможны и другие классификации реакторов, в частности классификация по взаимной ориентации переменного магнитного поля и постоянного магнитного поля подмагничивания (этот признак положен в основу классификации, принятой в ГОСТ 18624–73. Реакторы электрические. Термины и определения).

#### **II.2.2. Области применения**

Насыщающиеся и управляемые реакторы предназначены для использования в воздушных линиях электропередачи традиционного конструктивного исполнения и повышенной натуральной мощности, в распределительных электросетях и в системах электроснабжения промышленных предприятий.

##### **II.2.2.1. Воздушные линии электропередачи высокого напряжения**

Воздушные линии (ВЛ) электропередачи являются протяженным токопроводом, создающим электрическое и магнитное поля. Условия работы линий с точки зрения физических процессов в их электромагнитном поле, рассмотрены в [1]. Эти процессы определяют требования к устройствам компенсации избыточной реактивной мощности линий.

Мощность электрического поля трехфазной линии длиной  $l$

$$Q_{эл} = 3\omega CU_{\phi}^2 l, \quad (\text{П.1})$$

где  $U_{\phi}$  – напряжение фазы линии относительно земли;  $C$  – погонная емкость линии,  $\omega = 2\pi f$ .

Мощность магнитного поля трехфазной линии длиной  $l$

$$Q_{мг} = 3\omega LI^2 l, \quad (\text{П.2})$$

где  $I$  – ток, протекающий по фазе линии;  $L$  – погонная индуктивность линии.

Мощность электрического поля линии изменяется незначительно из-за ограниченных пределов изменения напряжения. Мощность магнитного поля

изменяется в широких пределах в соответствии с изменением тока. Это обстоятельство определяет режимные особенности работы электропередач переменного тока и связанные с ними мероприятия по управлению работой электропередач.

Разность мощностей электрического и магнитного полей определяет реактивную мощность линии

$$Q = Q_{эл} - Q_{мг} = 3\omega l C U_{\phi}^2 \left(1 - LI^2 / CU_{\phi}^2\right), \quad (\text{П.3})$$

которая равна нулю в частном случае соблюдения равенства  $Q_{эл} = Q_{мг}$ , что имеет место при

$$1 - LI^2 / CU_{\phi}^2 = 0 \quad \text{или} \\ I = U_{\phi} \sqrt{C/L} = U_{\phi} / Z_{\epsilon} = I_n, \quad (\text{П.4})$$

где  $Z_{\epsilon} = \sqrt{C/L}$  – волновое сопротивление линии;  $I_n$  – ток, протекающий по линии, называемый при  $Q_{эл} = Q_{мг}$  натуральным (естественным) током линии.

*Соответствующий режим работы линии называется натуральным, он является сбалансированным по реактивной мощности: линия не генерирует и не потребляет реактивную мощность.*

Если ток в линии не совпадает с натуральным, т.е.  $I = kI_n$ , ( $k$  – произвольное число), то формула (П.3) для реактивной мощности линии записывается в виде

$$Q = \left(3\omega l U_{\phi}^2 / v_{\epsilon} Z_{\epsilon}\right) \cdot \left(1 - Z_{\epsilon}^2 k^2 I_n^2 / U_{\phi}^2\right) = P_n \lambda \left(1 - k^2\right) = P_n \lambda \left[1 - (P/P_n)^2\right], \quad (\text{П.5})$$

где  $v_{\epsilon} = 1/\sqrt{L \cdot C}$  – скорость распространения электромагнитной волны,  $\lambda = \omega l / v_{\epsilon}$  – волновая длина линии;  $P_n = 3U_{\phi}^2 / Z_{\epsilon}$  – натуральная мощность линии;  $k = I/I_n = P/P_n$  – отношение передаваемой по линии мощности  $P$  к натуральной мощности линии  $P_n$ .

Если передаваемая по линии мощность  $P$  меньше натуральной ( $P < P_n$ ), то, исходя из физических условий работы линии, такой режим ее работы считается естественным. Если же передаваемая по линии мощность  $P$  больше натуральной ( $P > P_n$ ), то режим ее работы считается искусственным.

На рис. П.5 (лист 1) представлена зависимость реактивной мощности  $Q$  линии, отнесенной к произведению  $P_n \lambda$ , от отношения  $P/P_n$ . Она рассчитана по формуле (П.5), но с обратным знаком. Из графика следует:

1) при  $P = 0$  (режим холостого хода) ВЛ электропередачи генерирует реактивную мощность;

2) при  $0 < P < P_n$  (естественный режим) ВЛ электропередачи также генерирует реактивную мощность, т.е. преобладающей является мощность электрического поля линии. В этом смысле линия эквивалентна батарее конденсаторов;

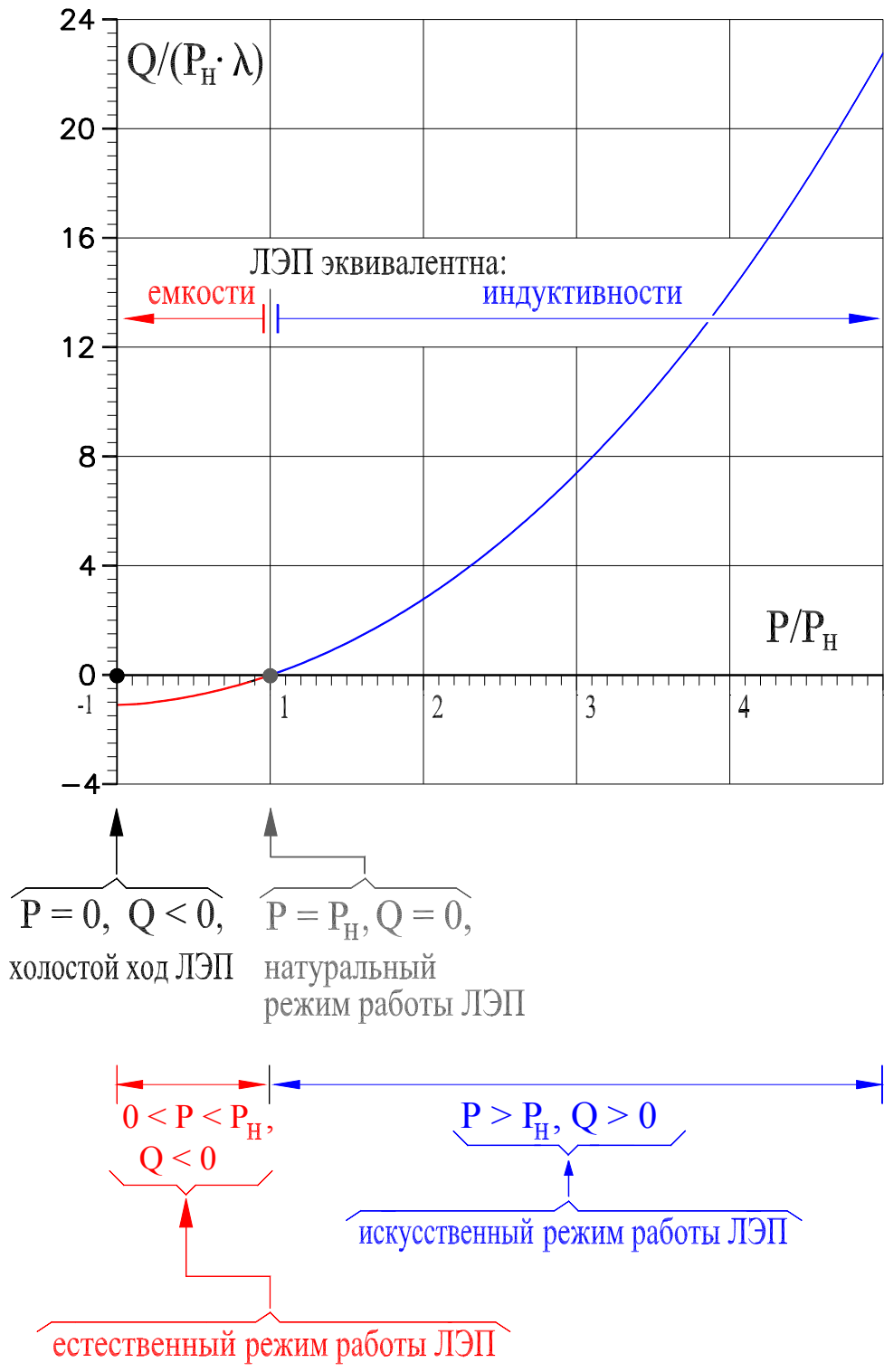


Рис. П5, лист 1. Зависимость реактивной мощности  $Q$  линии, отнесенной к произведению  $P_H \cdot \lambda$ , от отношения  $P/P_H$

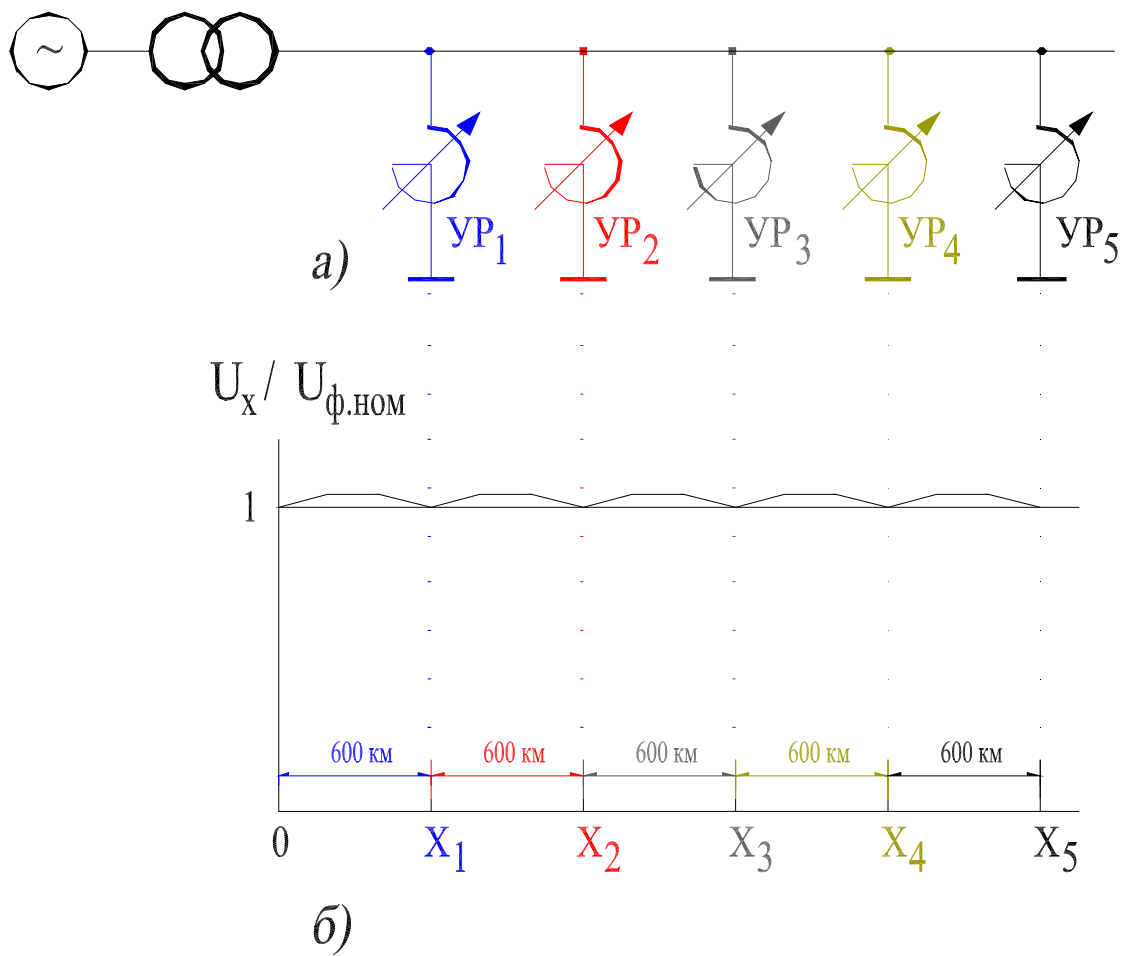


Рис. П.5, лист 2. Схема электропередачи с промежуточными управляемыми реакторами (а); распределение напряжения вдоль длинной линии с одинаковыми реактивными участками длиной 600 км (б)

3) при  $P = P_n$  (натуральный режим) ВЛ не генерирует и не потребляет реактивную мощность, так как мощности ее электрического и магнитного полей равны;

4) при  $P > P_n$  (искусственный режим) ВЛ электропередачи потребляет реактивную мощность, т.е. преобладающей является мощность магнитного поля линии. В этом смысле линия эквивалентна индуктивности.

Таким образом, как следует из рис. П.5 (лист 1) и формулы (П.5) при  $0 \leq k < 1$  ( $0 \leq P < P_n$ ) на линии есть избыток реактивной мощности, максимальное значение которой имеет место при холостом ходе линии ( $k = 0$ ,  $P = 0$ ).

Так как в любой энергосистеме должна быть обеспечена возможность работы линии при загрузке от максимальной расчетной до нулевой (режим холостого хода), то в линии должны быть установлены потребители ее избыточной реактивной мощности при малых нагрузках, в качестве которых используют шунтирующие реакторы. Некоторая часть избыточной реактивной мощности может быть потреблена примыкающими энергосистемами, поскольку, как правило, они дефицитны по реактивной мощности из-за преобладания индуктивного характера нагрузки.

Физические условия работы ВЛ переменного тока определяют необходимость учета двух важных обстоятельств: 1) во всех режимах работы линии необходимо обеспечить баланс реактивной мощности на электропередаче в целом; 2) размещение вдоль линии устройств, компенсирующих ее реактивную мощность, должно обеспечить выполнение нормативных документов на допустимые пределы изменения параметров режима передачи [3, 24].

Очевидно, что целесообразно повышать пропускную способность линии электропередачи, т.е. повышать максимальную мощность, которая может быть передана без ограничения длительности режима передачи. Повышение пропускной способности в линиях традиционного конструктивного исполнения и в линиях повышенной натуральной мощности обеспечивается по-разному.

В существующих воздушных линиях (ВЛ) традиционного конструктивного исполнения повышение пропускной способности линий достигается за счет увеличения передаваемой мощности  $P$  сверх натуральной ( $P > P_n$ ). Таким образом, режим работы этих ВЛ соответствует искусственному (рис. П.5, лист 1). Традиционное конструктивное исполнение существующих высоковольтных ВЛ характеризуется, во-первых, фиксированным расстоянием (30...40 см) между расщепленными, по условиям ограничения коронного разряда, проводами фаз и, во-вторых, увеличенными междуфазными расстояниями по сравнению с минимально необходимыми по условию обеспечения надежной работы линий.

Работы, выполненные в течение последних 10...15 лет в Санкт-Петербургском гостехуниверситете и СЗО института “Энергосетьпроект” [1], доказали, что *при отказе от ограничений расстояний между проводами технически возможно и экономически целесообразно создание электропередач произвольно*

*увеличенной натуральной мощности, индуктивное (и волновое) сопротивление которых обратно пропорционально числу проводов в фазе.* Соответственно натуральная мощность таких линий пропорциональна числу составляющих в фазе. При таком изменении принципов конструирования необходимо увеличить число составляющих в фазе сверх минимального (обусловленного ограничением коронного разряда) на линиях с расщепленными проводами, а также необходимо осуществить расщепление проводов на линиях напряжением 35...220 кВ, благодаря чему многократно уменьшается их индуктивное сопротивление. Связанное с этим многократное повышение натуральной мощности воздушных линий позволяет существенно расширить области применения электропередач каждого из освоенных классов напряжения по передаваемой мощности, по новому решить проблему обеспечения баланса реактивной мощности в электроэнергетической системе. На ВЛ повышенной натуральной мощности, в отличие от линий традиционного конструктивного исполнения, увеличение пропускной способности соответственно росту их натуральной мощности  $P_n$  осуществляется при  $P < P_n$ . Таким образом, *режим работы ВЛ повышенной натуральной мощности соответствует естественному* (рис. П.5, лист 1).

Если происходит отклонение режима работы линии от натурального ( $k = I/I_n = P/P_n \neq 1$ ), баланс реактивной мощности в электроэнергетической системе, т.е. баланс электромагнитного поля линии нарушается. При этом линия не может передавать электроэнергию без дополнительных управляемых источников реактивной мощности (синхронные компенсаторы, статические компенсаторы реактивной мощности), если  $k > 1$ , либо без управляемых потребителей избыточной реактивной мощности, если  $k < 1$ . Причем, если устройства, компенсирующие реактивную мощность, располагать по концам линии, то необходимо обеспечить протекание по всей линии потоков реактивной мощности, соизмеримых с передаваемой мощностью и даже превышающей ее. Более целесообразно располагать устройства для поглощения избыточной реактивной мощности непосредственно на линии с расстоянием между местами их установки не более 300...600 км (рис. П.5, лист 2) [1]. В этом случае *напряжение вдоль линии не будет превышать нормируемого предела*. Поскольку передаваемая по линии мощность может изменяться в широких пределах в соответствии с графиком нагрузки ( $0 < P < P_n$ ), необходимо обеспечить плавное и быстрое регулирование мощности таких устройств. В их качестве используются управляемые и насыщающиеся реакторы. При наличии реакторов на линии отсутствуют ограничения дальности электропередачи переменного тока и пропускной способности, связанные в основном с протеканием огромных потоков реактивной мощности по ВЛ повышенной натуральной мощности при отсутствии реакторов.

На рис. П.6 показано условное графическое обозначение и ВАХ насыщающегося реактора (а) и управляемого реактора (б).

*Управляемые и насыщающиеся реакторы – важнейшие устройства высокого напряжения, без которых невозможно обеспечить передачу больших*



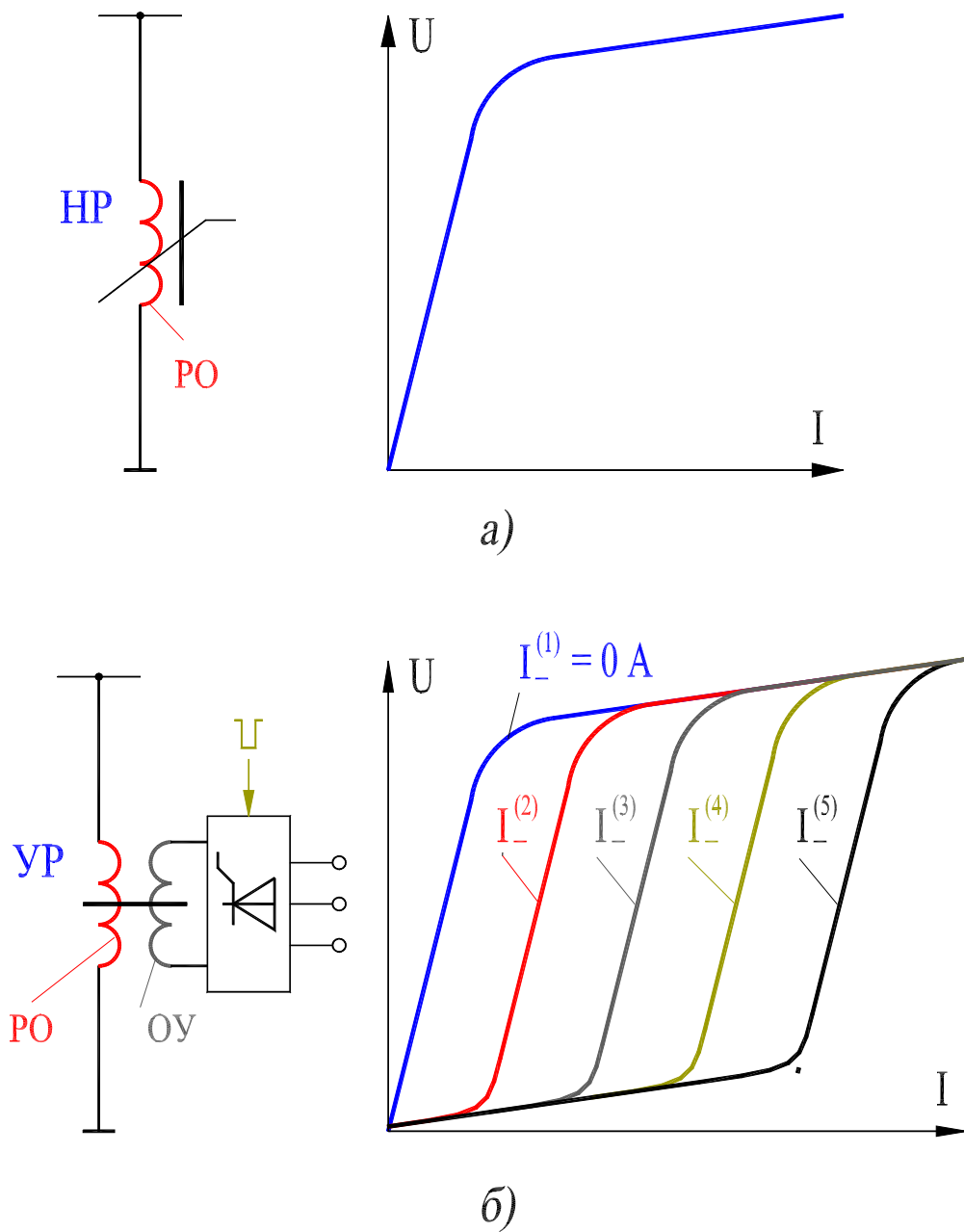


Рис. П.6. Условное графическое обозначение и вольт-амперные характеристики:  
 а) — насыщающегося реактора (НР); б) — управляемого реактора (УР);  
 РО — рабочая обмотка; ОУ — обмотка управления

*мощностей на далекие расстояния по линиям переменного тока. К тому же они являются самыми экономичными устройствами потребления избыточной реактивной мощности.*

Плавное изменение мощности управляемых и насыщающихся реакторов придает электропередаче повышенной натуральной мощности следующие положительные свойства: возможность рационального распределения напряжения и тока в линии, повышение пропускной способности ЛЭП по статической устойчивости, ограничение коммутационных перенапряжений, снижение потерь энергии в линии.

Важным применением УР и НР является их использование в схеме статического компенсатора реактивной мощности (СКРМ). Он состоит из параллельно включаемых конденсаторной батареи и управляемого (рис. П.7а) или насыщающегося реактора (рис. П.7б) в качестве регулирующего элемента. Такие СКРМ используются в линиях традиционного конструктивного исполнения. Компенсатор способен потреблять или генерировать реактивную мощность в зависимости от режима энергосистемы. Мощность потребляется реактором, а генерируется батареей конденсаторов. Если СКРМ реализован на основе УР, то необходимо обеспечить автоматическое управление током подмагничивания [22]. Вольт-амперные характеристики УР и НР показаны на рис. П.6а, б. Типичная вольт-амперная характеристика самого СКРМ, реализованного на основе НР, показана на рис. П.7г. В пределах своей рабочей характеристики СКРМ способен регулировать напряжение в точке подключения, он близок по действию к синхронному компенсатору, но у него нет вращающихся частей и ему не свойственна механическая инерция, а быстродействие значительно выше.

Статические компенсаторы реактивной мощности, выполненные на основе НР, применяются для управления режимами энергосистем с целью решения таких задач, как регулирование напряжения, повышение пропускной способности действующих и вновь построенных электропередач, ограничение перенапряжений и колебаний напряжения и др.

Вольт-амперная характеристика СКРМ, приведенная на рис. П.7г, имеет некоторый статизм. Под ним понимается отношение изменения напряжения к изменению тока в регулировочном диапазоне компенсатора (участок ВАХ между точками 1 и 2). Обычно статизм выражается в процентах по отношению к номинальному напряжению:

$$\text{статизм} = 100 \cdot (U_2 - U_1) / U_{\text{ном}} \cdot (I_2 - I_1) = 100 \cdot \Delta U_{1-2} / \Delta I_{1-2}, \%. \quad (\text{П.6})$$

Значение статизма определяется условиями точности поддержания напряжения и располагаемой мощностью СКРМ. Введение статизма в ВАХ позволяет осуществлять распределение нагрузок между параллельно работающими компенсаторами. Как правило, настроечный диапазон статизма составляет от 0 до 10 % в регулировочном диапазоне СКРМ. Значение статизма компенсатора обычно устанавливается равным 2...5 %. Величина статизма регулируется посредством конденсатора  $C_s$  (рис. П.7б).

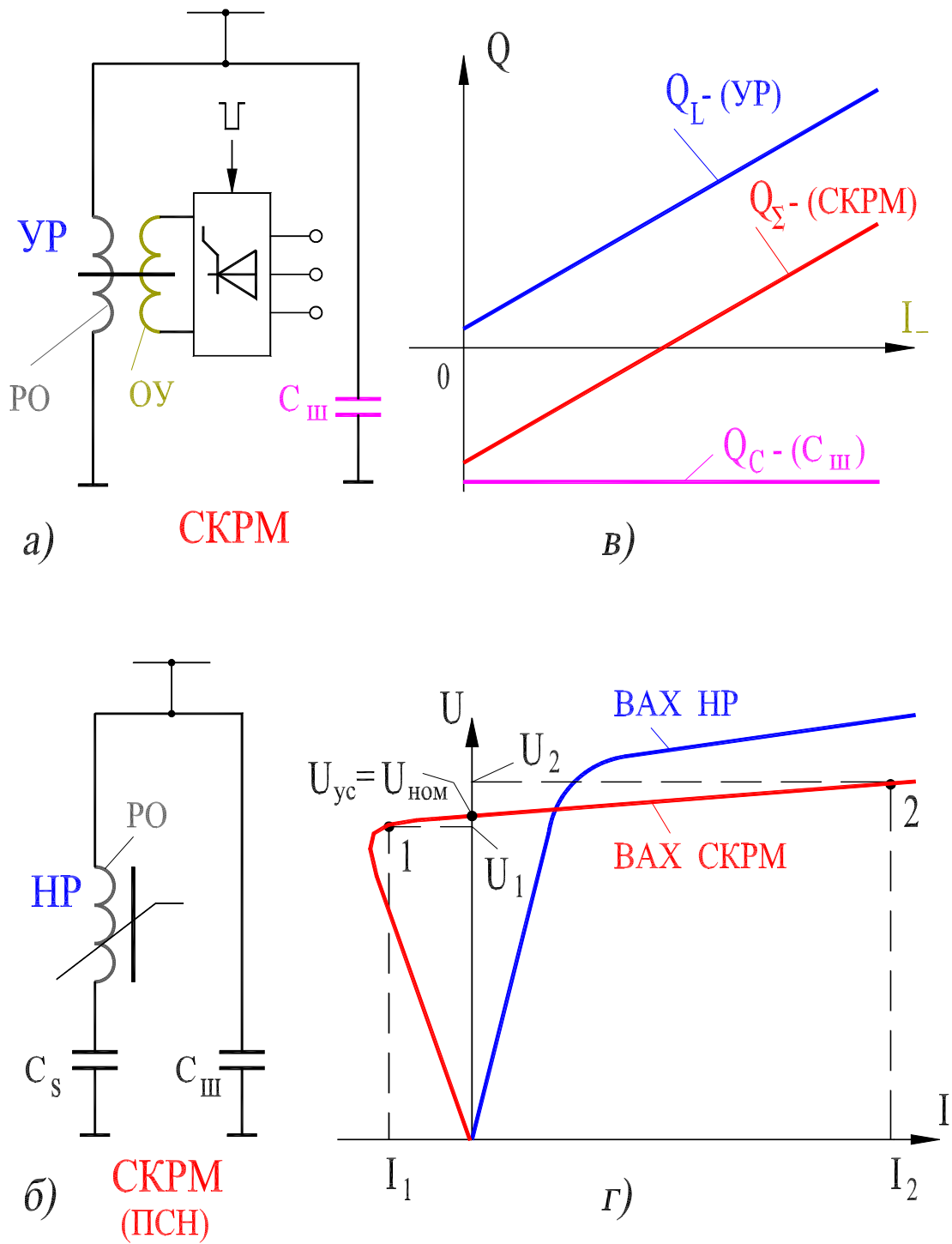


Рис. П.7. Принципиальные схемы СКРМ:

а) — СКРМ на базе УР; б) — СКРМ на базе НР;

в) — характеристика  $Q = f(I_-)$  СКРМ на базе УР; г) — ВАХ СКРМ на базе НР

Напряжение, при котором СКРМ не потребляет и не выдает реактивную мощность, соответствует напряжению уставки  $U_{yc} = U_{ном}$  (рис. П.72). Обычно напряжение уставки может регулироваться в диапазоне  $\pm 10\%$ . Режим работы СКРМ зависит от значения напряжения энергосистемы в точке его подключения, по сравнению с напряжением уставки. Если напряжение системы меньше или равно нижнему пределу  $U_l$  регулировочного диапазона компенсатора, то вся реактивная мощность, генерируемая шунтовыми конденсаторами  $C_{ш}$ , поступает в сеть. При этом мощность, потребляемая реакторами, равна нулю. С увеличением напряжения часть мощности, генерируемой конденсаторами, потребляется реактором. Когда напряжение сети равно напряжению уставки  $U_{yc}$  компенсатора, то мощность, генерируемая конденсаторами, равна мощности, потребляемой реактором. При увеличении напряжения выше номинального реактор продолжает поглощать реактивную мощность, пока не будет достигнута номинальная его нагрузка, которая определяет верхний предел мощности компенсатора. Потребление реактивной мощности за верхним пределом зависит от перегрузочной способности компенсатора. Насыщающийся реактор обладает перегрузочной способностью до  $3..4$  о.е. и более, что позволяет использовать его для ограничения коммутационных перенапряжений.

Для реализации описанных выше функций в воздушных линиях электропередачи высокого напряжения используются реакторы трансформаторного типа со стержневым магнитопроводом.

### ***П.2.2.2. Распределительные электросети***

Под распределительной электрической сетью понимается сеть, к которой непосредственно присоединяются электроприемники. Как правило, распределительная сеть имеет две ступени напряжения в диапазоне номинальных напряжений  $6..10$  кВ и выше для высокой и  $220..660$  В для низкой стороны.

Режим работы электроприемников сопровождается потреблением активной и реактивной мощности. Активная мощность передается к электроприемникам от синхронных генераторов электростанций, являющихся единственными ее источниками. В качестве источников реактивной мощности, кроме синхронных генераторов, используются синхронные компенсаторы и двигатели, батареи конденсаторов поперечного включения и тиристорные устройства. Источником реактивной мощности является также емкость воздушных и кабельных линий.

Для любого режима работы электрической системы всегда имеет место баланс реактивной мощности, т.е. суммарная генерируемая реактивная мощность всегда равна суммарной потребляемой мощности. Условие баланса соблюдается для каждого узла электрической сети и для всей электрической системы.

Генерируемая синхронными генераторами и компенсаторами реактивная мощность передается в промышленные, городские и сельские распределительные сети. По техническим и экономическим причинам такая передача реактивной мощности в распределительные сети нецелесообразна. Хотя потери элек-

троэнергии в крупных синхронных генераторах и компенсаторах на генерацию реактивной мощности невелики, потери на передачу мощности по сети могут быть значительны. Поэтому более экономичным оказывается компенсация реактивной мощности на месте ее потребления. Для этих целей используются синхронные двигатели, батареи конденсаторов и тиристорные устройства.

Синхронные двигатели выпускают отечественные заводы с номинальным опережающим коэффициентом мощности, равным 0,9. Техническая возможность использования двигателя в качестве источника реактивной мощности ограничивается наибольшей величиной реактивной мощности, которую он может генерировать без нарушения условий допустимого нагрева обмоток и магнитопровода. Для эффективного выполнения указанной функции двигатель должен быть снабжен системой автоматического регулирования возбуждения.

В качестве нерегулируемых источников реактивной мощности используются батареи конденсаторов. Относительно небольшие эксплуатационные расходы, простая технология производства привели к увеличению их количества в электрических сетях, что при неполной нагрузке вызывает необходимость компенсации избыточной реактивной мощности, генерируемой батареями конденсаторов. Наиболее просто и экономично эта проблема может быть решена с помощью управляемых реакторов.

Суммарная мощность установки, состоящей из параллельно включенной емкости и регулируемого индуктивного сопротивления (рис. П.7а, в), при пренебрежении активными потерями, определяется разностью мощностей отдельных составляющих:

$$Q_{\Sigma} = \pm(Q_L - Q_C). \quad (\text{П.7})$$

Учитывая, что в электрических системах напряжение сети изменяется на относительно небольшую величину 10...15 %, можно считать мощность батареи конденсаторов  $Q_C$  приблизительно неизменной. Мощность  $Q_L$ , потребляемая УР, будет меняться в зависимости от величины его индуктивности, т. е.

$$Q_C = U^2/X_C \approx \text{const}; \quad Q_L = U^2/X_L = \text{var}. \quad (\text{П.8})$$

Диапазон изменения мощности устройства, содержащего параллельно включенные индуктивность и емкость, определяется соотношением мощностей батареи конденсаторов и УР. Если предположить, что мощность, потребляемая реактором, может изменяться от нуля до номинальной, то при равенстве установленных мощностей батареи конденсаторов и УР, суммарная мощность СКРМ будет изменяться так:

$$0 \leq Q_{\Sigma} \leq Q_L. \quad (\text{П.9})$$

При этом СКРМ генерирует реактивную мощность в сеть. В случае, если номинальная мощность УР будет больше мощности батареи конденсаторов, СКРМ может работать как в режиме генерации, так и в режиме потребления реактивной мощности. При этом переход из одного режима в другой осуществляется плавно (рис. П.7в).

Другая положительная особенность СКРМ (рис. П.7а): напряжение на реакторе и на батарее конденсаторов равно напряжению сети и не зависит от ре-

жима работы СКРМ и от способа регулирования мощности УР. Благодаря этому оказывается возможным включать реактор и батарею конденсаторов непосредственно в сеть без промежуточного трансформатора.

Если передача реактивной мощности осуществляется от электростанции к месту ее потребления, то в сети появляются дополнительные потери напряжения и электроэнергии. Эти потери уменьшаются, если СКРМ располагать в электрической близости от места потребления реактивной мощности. Так как при компенсации реактивной мощности потери напряжения в сети уменьшаются, то при определенных условиях СКРМ используется не только для обеспечения баланса реактивной мощности, но и в качестве средства регулирования напряжения в сети в месте его установки [22]. Экономический эффект компенсации реактивной мощности заключается в снижении потерь электроэнергии в сети и уменьшении стоимости ее сооружения за счет повышения пропускной способности.

Большая часть электрических сетей напряжением  $6...10$  кВ и выше эксплуатируется с компенсацией емкостных токов, возникающих при однофазном замыкании на землю. Компенсация осуществляется с помощью дугогасящего (управляемого) реактора, включаемого между нейтралью трансформатора и землей. Дугогасящий реактор предотвращает развитие электрической дуги в месте однофазного замыкания, если его индуктивное сопротивление равно емкостному сопротивлению сети на землю.

В качестве дугогасящего реактора может быть использован магнитно-вентильный УР. Этот реактор имеет практически линейную вольт-амперную характеристику в заданном ограниченном диапазоне изменений тока. Требование практической линейности диктуется необходимостью устранить высшие гармоники в токе реактора, поскольку компенсация имеет место только для основной частоты, а токи иных частот протекают через дугу в месте замыкания.

При соединении фазы с землей возникает переходный процесс, сопровождающийся насыщением магнитопровода реактора вследствие появления однонаправленной медленно затухающей составляющей магнитного потока. Индуктивное сопротивление реактора при этом уменьшается и приближается к требуемому значению емкостного сопротивления сети на землю. Дугогасящие управляемые реакторы снабжаются автоматическими регуляторами тока подмагничивания, которые обеспечивают и поддерживают равенство индуктивного сопротивления реактора и емкостного сопротивления сети на землю.

В распределительных электросетях возможно использование и реакторов электромашинного типа, и реакторов трансформаторного типа, так как и те и другие могут быть выполнены на номинальное напряжение этих электросетей и включены без промежуточного трансформатора.

### ***П.2.2.3. Системы электроснабжения промышленных предприятий***

Особенность металлургических и многих машиностроительных предприятий является резкопеременная нагрузка, которая обуславливает колебания напряжения, уровень которых превышает ограничения ГОСТ 13109–87 [3]. На

металлургических предприятиях такой нагрузкой являются прокатные станы с вентильными электроприводами, электродуговые сталеплавильные печи, на машиностроительных – мощные сварочные агрегаты. Государственный стандарт ограничивает допустимые пределы колебания напряжения 1,5 % от номинального напряжения, однако на указанных предприятиях эти колебания могут достигнуть 4...12 % и более. При этом другие показатели качества электроэнергии – отклонение напряжения, несинусоидальность тока и несимметрия напряжения также не соответствуют требованиям стандарта [3].

Колебания напряжения отрицательно воздействуют на работу многих потребителей электроэнергии, а именно: ЭВМ, систем автоматики и телемеханики, автоматизированных систем управления, логической аппаратуры и др. Они также влияют отрицательно на производительность труда и зрение работников.

Колебания напряжения уменьшаются в 8...10 раз с помощью статических компенсаторов реактивной мощности, состоящих из насыщающегося реактора и батареи конденсаторов, включенной параллельно. Статический компенсатор реактивной мощности с насыщающимся реактором (рис. П.7б) называется параметрическим компенсатором, так как потребляемая или генерируемая им реактивная мощность является функцией приложенного к СКРМ напряжения сети. В СКРМ с НР отсутствует какая-либо внешняя система управления, являющаяся существенно инерционным звеном при решении задачи уменьшения колебания напряжения. Параметрический СКРМ имеет рабочую область на результирующей вольт-амперной характеристике за “коленом” кривой, где зависимость реактивного тока от напряжения сети в первом приближении может быть принята линейной (рис. П.7г, участок на ВАХ СКРМ, заключенный между точками 1 и 2). При снижении напряжения сети почти пропорционально снижаются ток и реактивная мощность, потребляемая НР; поскольку реактивная мощность батареи конденсаторов изменяется относительно незначительно, то резко увеличивается генерация в сеть реактивной мощности шунтовой батареей конденсаторов. В случае повышения напряжения аналогичным образом увеличивается потребляемая реактором реактивная мощность. *За счет указанного быстрого параметрического изменения реактивной мощности СКРМ по величине и по знаку и осуществляется уменьшение колебаний напряжения.*

Для ограничения колебаний напряжения используются НР как трансформаторного типа, со стержневым магнитопроводом, так и электромашинного типа, с кольцевым магнитопроводом. Параметрические СКРМ, используемые для уменьшения колебаний напряжения, имеют ряд преимуществ перед синхронными компенсаторами, а именно: более высокое быстродействие, меньшие удельные активные потери, простота обслуживания и др.

### ***П.2.3. Основы теории и устройства реакторов трансформаторного типа***

В [4] по результатам программной реализации математической модели, разработанной на основе теории электрических и магнитных нелинейных цепей, анализируются электромагнитные режимы работы (“физиология”) реакторов. В [5] по результатам программной реализации математической модели,

разработанной на основе теории поля Дж. К. Максвелла и метода конечных элементов, исследуется и оптимизируется устройство (“анатомия”) реакторов.

### **П.2.3.1. Явление генерации гармоник насыщения**

Магнитопровод реакторов является генератором высших гармоник насыщения. Одно из условий использования реакторов в энергосистеме – практическое устранение высших гармоник из переменного тока, протекающего в трехфазной рабочей обмотке. Природа этих гармоник такая же, как и нечетных гармоник в силовых трехфазных трансформаторах, выпускаемых серийно (см. описание лабораторной работы № 4, с. 68...84). В рассмотренных (с. 103...111) ферромагнитных умножителях частоты гармоник насыщения являются полезными.

Высшие гармоники неблагоприятно влияют на процессы генерации, передачи и использования электроэнергии, на электрооборудование, системы автоматики, релейной защиты, телемеханики и связи; появляются дополнительные потери в электрических машинах, трансформаторах и сетях; затрудняется компенсация реактивной мощности; сокращается срок службы изоляции электрических машин и аппаратов; возрастает аварийность в кабельных сетях; ухудшается качество работы систем релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи.

В силовом трансформаторостроении принимаются меры для подавления гармонических составляющих кратных трем. Они сводятся, главным образом, к соединению фаз одной из обмоток в треугольник и к изготовлению магнитопровода трехстержневым, магнитосвязанным. Остальные высшие нечетные гармоники практически не устраняются. Применительно к серийным трансформаторам это в какой-то степени оправдано, так как они работают на “коллене” кривой намагничивания, т. е. не в зоне глубокого насыщения, как реакторы.

Повышение удельных электромагнитных нагрузок в силовых трансформаторах обуславливает увеличение насыщения их магнитопроводов и, следовательно, рост процентного содержания гармоник в токе холостого хода. Мероприятия, реализуемые для уменьшения содержания высших гармоник в токе реакторов трансформаторного типа, могут использоваться и для улучшения формы кривой тока в силовых серийных трансформаторах.

В реакторах трансформаторного типа основной магнитный поток замыкается по магнитопроводу и не встречает на своем пути явно выраженных немагнитных зазоров. Последнее обуславливает существенную нелинейность характеристик управляемого реактора с пульсирующим магнитным полем. Гармонический состав пульсирующего поля определяется следующим образом: если напряжение, приложенное к рабочей обмотке, синусоидально, а сопротивлением ее можно пренебречь, то магнитная индукция в сердечнике также будет изменяться во времени синусоидально:

$$b_1 = B_{1m} \sin \omega_1 t,$$

где  $\omega_1$  – угловая частота напряжения, питающего рабочую обмотку.



При подмагничивании магнитопровода постоянным полем с индукцией  $B_0$  результирующая индукция определяется так:

$$b = B_0 + B_{1m} \sin \omega_1 t.$$

В силу существенной нелинейности кривой намагничивания напряженность магнитного поля будет содержать бесконечный спектр гармоник, который можно выразить аналитически, если аппроксимировать кривую намагничивания в виде гиперболического синуса (формула Оллендорфа):

$$h = \alpha Sh\beta b,$$

где  $h$  и  $b$  – напряженность и индукция магнитного поля;  $\alpha$ ,  $A/m$  и  $\beta$ ,  $1/Tл$  – коэффициенты аппроксимации, зависящие от сорта стали и других факторов.

В качестве расчетной далее принята средняя кривая намагничивания предельного гистерезисного цикла. При пренебрежении потерями в стали аппроксимация кривой гиперболическим синусом дает возможность получить простые выражения, удобные для качественного анализа магнитного поля.

Результирующая напряженность  $h$ , при подстановке в формулу Оллендорфа выражения для  $b$ , записанного с учетом подмагничивания, после некоторых преобразований, представляется в виде

$$\begin{aligned} h &= \alpha \cdot Sh\beta(B_0 + b_1) = \alpha \cdot Sh\beta(B_0 + B_{1m} \sin \omega_1 t) = \\ &= \alpha \cdot Sh\beta B_0 \left[ J_0(j\beta B_{1m}) + 2 \sum_{k=1}^{k=\infty} J_{2k}(j\beta B_{1m}) \cos 2k\omega_1 t \right] + \\ &+ \alpha \cdot Ch\beta B_0 \left[ -2j \sum_{k=0}^{k=\infty} J_{2k+1}(j\beta B_{1m}) \sin(2k+1)\omega_1 t \right], \end{aligned} \quad (\text{П.10})$$

где  $J_0(j\beta B_{1m})$ ,  $J_{2k}(j\beta B_{1m})$ ,  $J_{2k+1}(j\beta B_{1m})$  – функции Бесселя соответственно нулевого,  $2k$ -го и  $(2k+1)$ -го порядков от чисто мнимого аргумента.

Как следует из (П.10), напряженность магнитного поля содержит постоянную составляющую, спектр высших нечетных гармоник и спектр четных гармоник насыщения. Их амплитуды обусловлены взаимным действием постоянного и пульсирующего магнитных полей. Если  $B_0 = 0$ , то напряженность магнитного поля содержит только спектр нечетных гармоник насыщения.

Таким образом, в подмагниченном реакторе с пульсирующим полем, магнитная напряженность содержит спектр высших четных и нечетных временных  $n$ -х гармоник, изменяющихся с угловыми частотами:

$$\omega_n = (2k + 1)\omega_1; \quad (\text{П.11})$$

$$\omega'_n = 2k\omega_1. \quad (\text{П.12})$$

Периодическое изменение магнитного поля *только по временной координате*  $t$  – характерная особенность реактора трансформаторного типа, существенно влияющая на его свойства. Необходимым условием появления высших гармоник напряженности, определяемых рядами (П.11) и (П.12), является нели-

нейность кривой намагничивания, а процентное содержание гармоник зависит от вида кривой намагничивания и степени насыщения магнитопровода.

В реакторах трансформаторного типа электроэнергетического назначения практическая синусоидальность рабочего тока достигается следующими мерами: применение специальных схем обмоток, расщепление стержней магнитопровода, использование компенсационных и фазосдвигающих вспомогательных обмоток и др.

Достоинство реакторов этого типа состоит в том, что они могут быть изготовлены на стандартные трансформаторные напряжения и подключены к ЛЭП без промежуточного трансформатора, а технология изготовления их, при реализации модульного принципа, подобна таковой у серийных силовых трансформаторов и, следовательно, производство таких реакторов осуществимо на трансформаторных заводах без больших дополнительных затрат.

### ***П.2.3.2. Насыщающийся реактор***

Реактор предназначен для работы в схеме параметрического стабилизатора напряжения (ПСН) с целью ограничения колебаний напряжения, которые обусловлены нагрузкой (см. разд. П.2.2.3). Он также может быть использован для компенсации избыточной реактивной мощности энергосистемы в схеме статического компенсатора реактивной мощности (СКРМ) (см. разд. П.2.2.1). Схемы ПСН и СКРМ практически одинаковы, разные названия их отражают различные целевые функции использования устройства.

Параметрический стабилизатор напряжения состоит из трех основных элементов: регулирующее устройство – его функции выполняет трехфазный насыщающийся реактор (НР); две нерегулируемые батареи конденсаторов – шунтовая  $C_{ш}$  и серийная  $C_s$ . На рис. П.7б, з показаны, соответственно, принципиальная схема параметрического стабилизатора напряжения и его вольт-амперная характеристика. Устройство должно выдавать или поглощать реактивную мощность в точке его подключения так, чтобы обеспечить практическое постоянство напряжения. Эта мощность является функцией напряжения, приложенного к зажимам НР, и зависит от наклона (статизма, формула П.6) к оси абсцисс рабочего участка 1–2 вольт-амперной характеристики ПСН. Статизм характеристики является отношением изменения напряжения к изменению тока в регулировочном диапазоне ПСН (участок 1–2 ВАХ) и поэтому может рассматриваться как динамическое реактивное сопротивление  $X_d$ . Для уменьшения значения динамического индуктивного сопротивления в области насыщения последовательно с НР включается серийная батарея конденсаторов  $C_s$ , в связи с чем и обеспечивается требуемый статизм, который влияет на функции регулирования.

Параметрическая зависимость  $\Delta I_{1-2} = f(\Delta U_{1-2})$ , отсутствие параллельных ветвей в обмотке обуславливают практически безынерционный принцип действия реактора, что и делает особенно эффективным его использование для стабилизации напряжения в сети с резкопеременной нагрузкой.

Разработан трехфазный НР, его активная часть состоит из магнитопровода и совмещенной трехфазной рабочей обмотки (рис. П.8). Активная часть выполнена в виде трех одинаковых модулей, соединенных электрически [10, 13].

Модуль содержит трехстержневой, бронестержневой сердечник и четыре катушки разных фаз обмотки. Каждая фаза состоит из четырех последовательно соединенных катушек, соотношение чисел их витков составляет  $W_{\delta} : W_M : W_C : W_C = 1 : 0,347 : 0,532 : 0,532$ . Катушки с числами витков  $W_{\delta}$  и  $W_M$  являются основными, а две катушки с числом витков  $W_C$  – фазосдвигающими. Таким образом, совмещенная рабочая обмотка выполняет функции двух обмоток: основной и фазосдвигающей. Принятые соотношение чисел витков катушек, схема соединения катушек и расположение их на стержнях обеспечивают исключение из тока обмотки гармоник с номерами 3, 5, 7, 9, 11, 13, ... Нечетные гармоники, оставшиеся некомпенсированными, имеют номера 17, 19; 35, 37; ...

Вследствие пониженного содержания гармоник подобный НР является наиболее часто используемым типом реакторов.

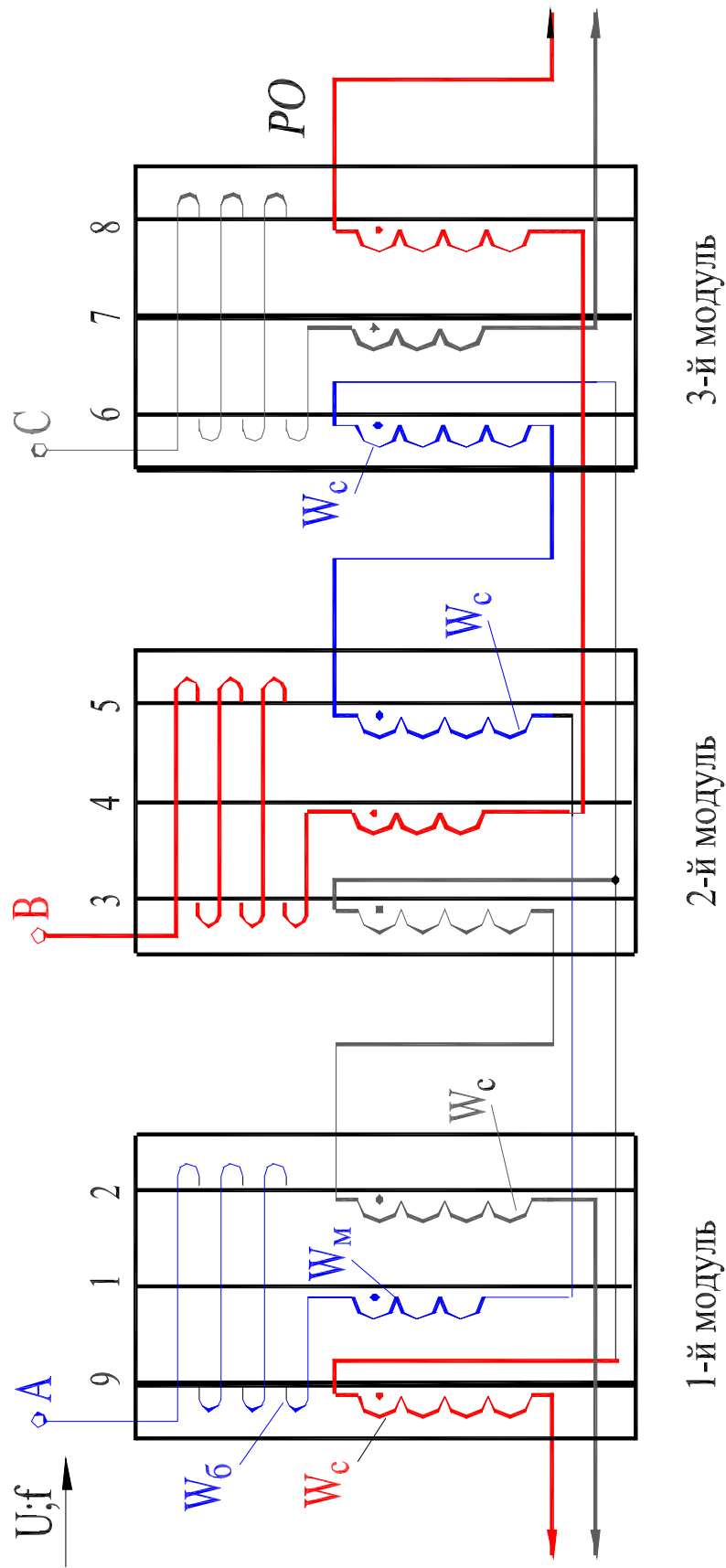
Отметим, что если на стержни поместить дополнительные катушки и соединить последовательно-согласно каждые три катушки, расположенные на стержнях 1, 4, 7; 2, 5, 8 и 3, 6, 9, то с полученных фаз, соединенных в звезду клеммами  $X_2, B_2, C_2$ , можно снять трехфазную ЭДС утроенной частоты. Если же фазы этой дополнительной обмотки соединить в открытый треугольник, то с такой обмотки можно снять однофазную ЭДС *9-кратной* частоты.

Фаза обмотки рассмотренного НР, представленного на рис. П.8, состоит из четырех катушек, причем катушка с большим числом витков  $W_{\delta}$  охватывает сечения трех стержней. Возможно выполнить обмотку с катушками, каждая из которых охватывает сечение только одного, своего стержня, как и в серийных силовых трансформаторах. Фаза этой обмотки содержит катушки с соотношением чисел витков  $W_M : W_C : W_{\delta} : W_C : W_M = 0,395 : 0,743 : 1 : 0,743 : 0,395$ . Реактор с такой обмоткой показан на рис. П.9а [10]. Все выводы относительно качества формы кривой тока НР, справедливы и для реактора, показанного на рис. П.9а. В этом можно убедиться, если проанализировать звезду векторов МДС стержней (рис. П.4).

Катушки фаз обмотки реактора, приведенного на рис. П.9а, можно также соединить в три параллельные ветви в каждой фазе (рис. П.9б), при этом форма кривой фазного (линейного) тока практически не ухудшится (см. в [4] рис. 5.3).

### **П.2.3.3. Управляемый реактор**

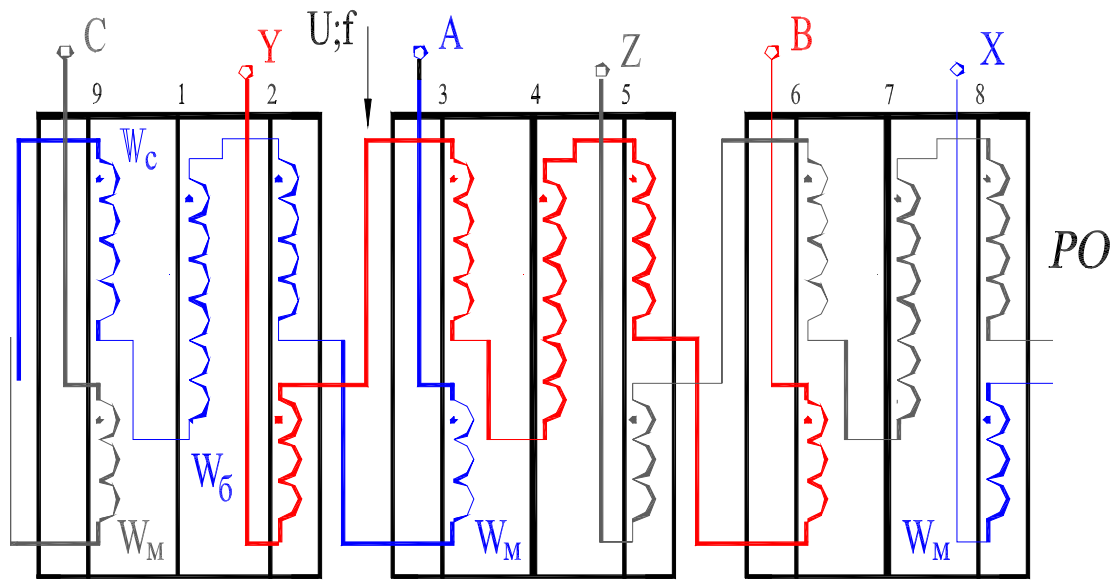
Реактор предназначен для улучшения режимов работы распределительных электросетей 6...10 кВ и выше и устанавливается в этих сетях параллельно с нерегулируемыми источниками реактивной мощности (батарея конденсаторов). В совокупности УР и батарея конденсаторов представляют собой статический компенсатор реактивной мощности (рис. П.7а), который плавно регулирует реактивную мощность как по величине, так и по знаку (рис. П.7в), т.е. выполняет функцию синхронного компенсатора. Статический компенсатор реактивной



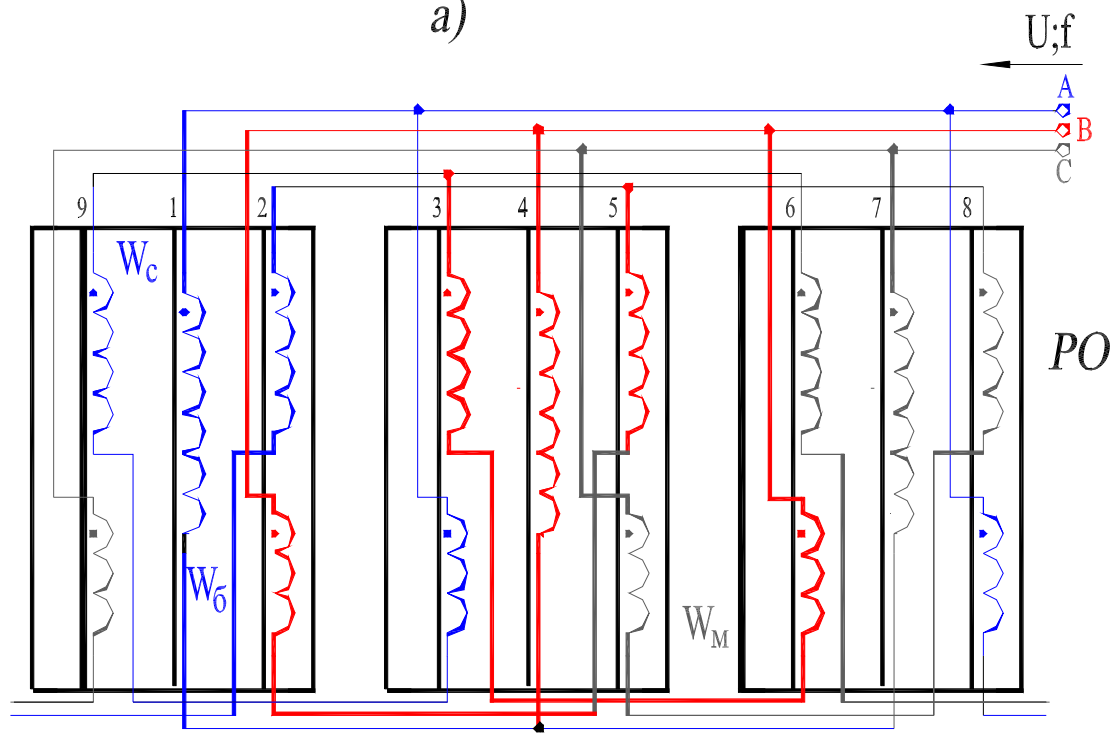
1, 2, ..., 9 — номера стержней

$$W_6 : W_M : W_C = 1 : 0,347 : 0,532 : 0,532.$$

Рис. П.8. Электромагнитная схема трехфазного HP с четырьмя кагушками в фазе



a)



1-й модуль

2-й модуль

3-й модуль

$$W_M : W_C : W_6 : W_C : W_M = 0,395 : 0,743 : 1 : 0,743 : 0,395$$

б)

Рис. П.9. Электромагнитная схема трехфазного НР с пятью катушками в фазе:  
 а) — последовательное соединение катушек в фазе; б) — три параллельных ветви в фазе

мощности конкурирует с синхронным компенсатором в экономическом отношении и превосходит его по таким важным показателям, как быстродействие, надежность, перегрузочная способность, поведение в аварийных режимах и др.

Разработан трехфазный управляемый реактор, активная часть которого состоит из трех одинаковых модулей (рис. П.10а) [11]. Модуль выполняется на базе четырехстержневого планарного магнитопровода. На стержнях расположены катушки двух совмещенных обмоток: рабочая трехфазная обмотка (РО) реактора, которая выполняет также функцию фазосдвигающей обмотки, и обмотка управления (ОУ) постоянного тока, которая совмещена с трехфазными обмотками короткозамкнутыми по 2, 10 и 4, 8-й гармоникам поля.

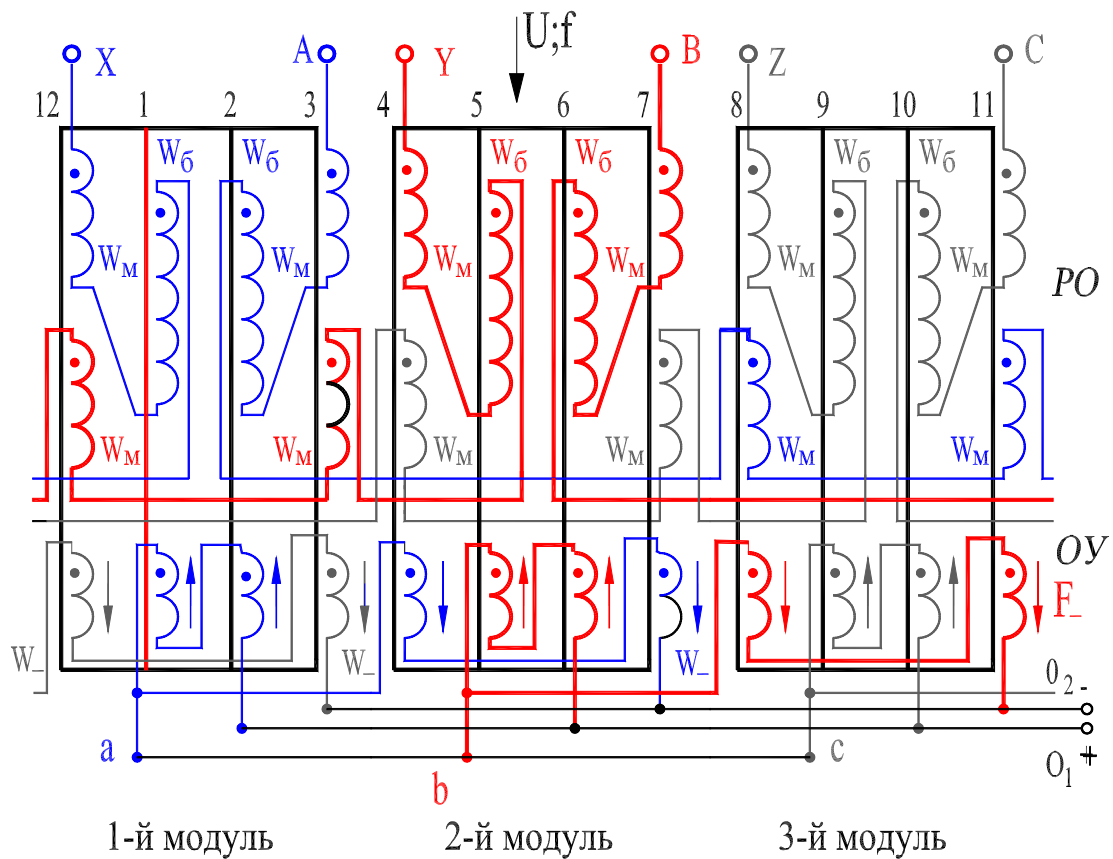
Каждая фаза рабочей обмотки состоит из двух встречно-последовательно соединенных групп катушек. Каждая группа состоит из трех встречно-последовательно соединенных катушек. Соотношение чисел витков катушек составляет  $W_m : W_c : W_m = 0,577 : 1 : 0,577$ . Катушки с меньшим числом витков  $W_m$  являются фазосдвигающими, эти катушки расположены на крайних стержнях (левом и правом) каждого модуля, причем принадлежат они разным фазам рабочей обмотки.

Катушки ОУ, структурная схема которой показана на рис. П.10б, соединены в шесть параллельных ветвей, причем в пределах 1 и 4, 2 и 5, 3 и 6-й ветвей замыкаются 4 и 8-я гармоники тока, а по отношению к зажимам **a**, **b**, **c** являются короткозамкнутыми 2 и 10-я гармоники тока. Это согласуется с данными эксперимента (рис. П.11а, б), с результатами анализа индуктивных связей гармоник насыщения магнитного поля с обмоткой управления, а также с результатами анализа математической модели электромагнитных режимов, выполненного на ПК (см. в [4] рис. 5.10) для рассматриваемого управляемого реактора.

Гармонический состав тока обмоток и их индуктивные связи анализируются так же, как и для НР (разд. П.2.3.2), на основе: звезды векторов 1-й гармоники МДС стержней магнитопровода, звезд векторов гармоник магнитного потока и векторных диаграмм ЭДС, обусловленных этими гармониками потока в обмотках УР.

Из анализа диаграмм ЭДС следует, что в линейном токе рабочей обмотки из высших гармоник будут присутствовать, по существу, лишь 11 и 13-я гармоники тока, четных же гармоник и других высших нечетных гармоник в кривой тока проявляться практически не будет.

Как следует из сопоставления звезд векторов 2, 4, 8, 10-й гармоник магнитных потоков и схемы обмотки управления (рис. П.10б), в ее контурах будут короткозамкнутыми 2, 4, 8, 10-я гармоники тока, что положительно сказывается на диапазоне регулирования реактивной мощности реактора, на форме кривой тока рабочей обмотки, на способности ограничивать токи короткого замыкания в месте установки УР и на уменьшении потерь в стали магнитопровода. На зажимах  $O_1$  и  $O_2$  обмотки управления будет индуцироваться ЭДС лишь 12-й гармоникой магнитного потока, амплитуда которой относительно невелика.



$W_M : W_6 : W_M = 0,577 : 1 : 0,577$ ;    1, 2, 3, ..., 12 – номера стержней

а)

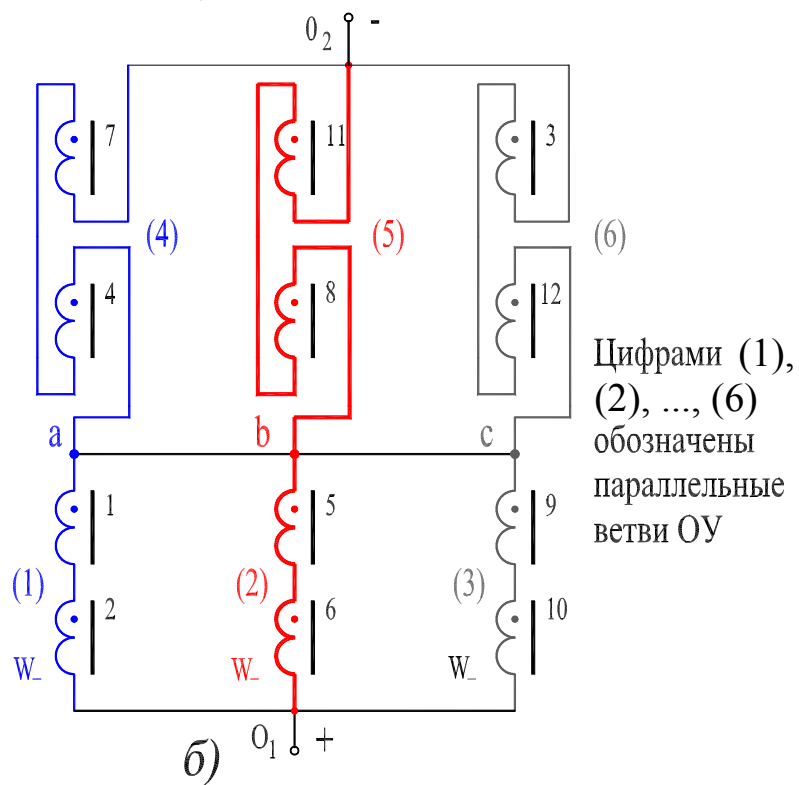


Рис. П.10. Электромагнитная схема совмещенного УР (а); структурная схема ОУ (б)

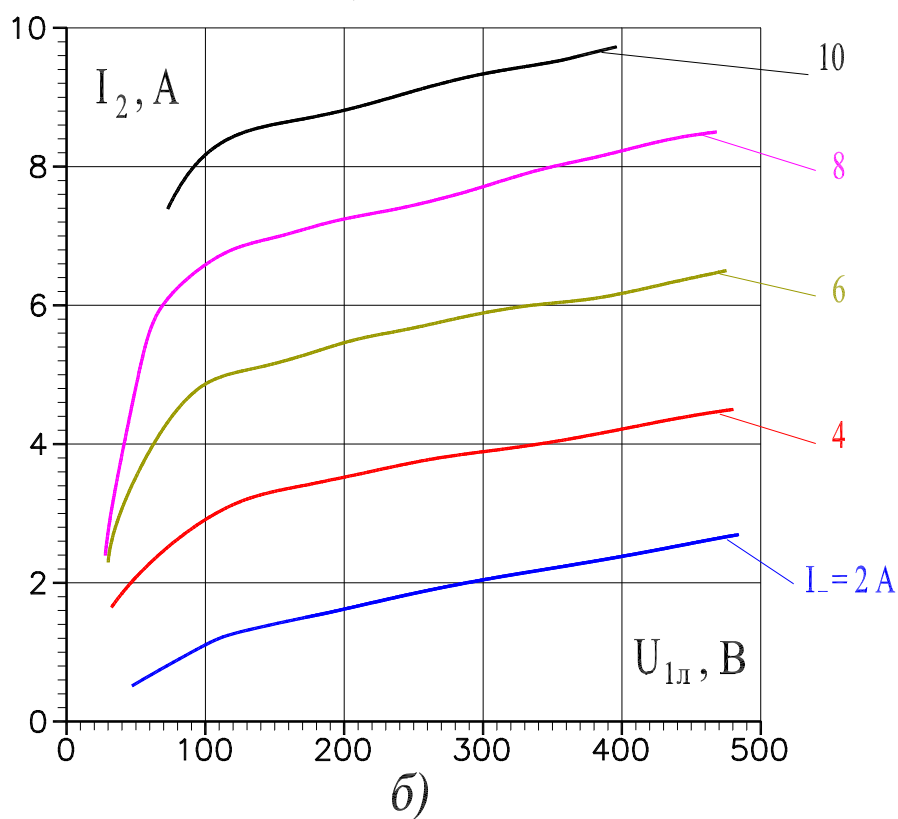
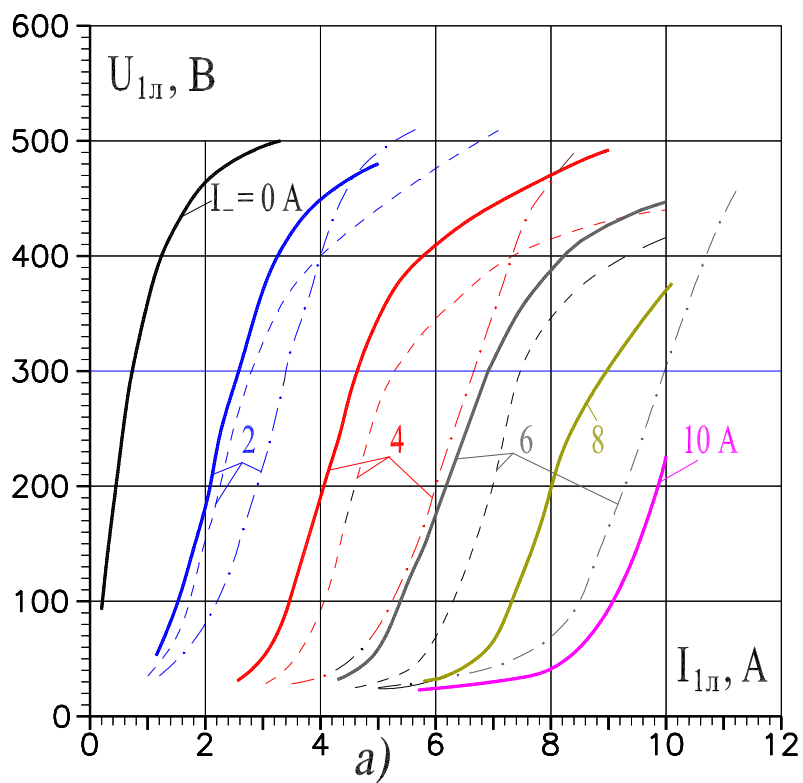


Рис. П.11. Вольт-амперные характеристики реактора для режимов:  
 а) — ВН (сплошные линии), СН4\_8 (пунктирные), СН2\_4\_8\_10 (штрих-пунктирные);  
 б) — зависимость тока удвоенной частоты, протекающего в перемычке, соединяющей зажимы а, б, с обмотки управления, от напряжения, подведенного к рабочей обмотке



Нечетные гармоники потока результирующей ЭДС в обмотке управления не создают. Как отмечено выше, эти выводы подтверждаются данными экспериментальных исследований (рис. П.11а, б), а также результатами расчетов [4].

Изготовлены на основе магнитопроводов силовых серийных трансформаторов два совмещенных управляемых реактора-трансформатора на мощность  $250 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ , напряжение  $10/0,4 \text{ кВ}$ . На стороне высокого напряжения включены батареи конденсаторов  $3 \times 100 \text{ квар}$ ;  $6,3 \text{ кВ}$  (рис. П.7а). Устройства установлены на подстанциях в распределительных электросетях с целью выполнения следующих функций: трансформация напряжения, компенсация реактивной мощности, улучшение качества электроэнергии.

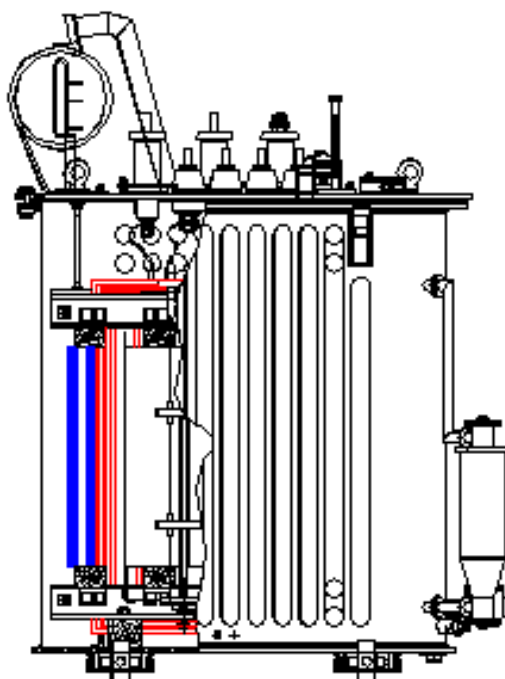
*Фотографии и описание разработанных устройств, а также системы автоматического управления стабилизацией напряжения распределительной электросети, реализованной на основе однокристалльной микроЭВМ и управляемого реактора, приведены на Web-странице <http://zei.narod.ru> .*

## ***Список литературы***

1. Александров Г.Н. Передача электрической энергии переменным током. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 176 с.
2. Глебов И.А. Всесоюзный симпозиум “Эффективность применения управляемых реакторов в энергосистемах” // Электротехника. – 1990. – №5. – С.76–77.
3. ГОСТ 13109–87. Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 20 с.
4. Забудский Е.И. Математическое моделирование управляемых электроэнергетических устройств: Учебное пособие для вузов. – Ульяновск: УЛГТУ, 1998. – 120 с. <http://zei.narod.ru/Up1.html>
5. Забудский Е.И. Анализ управляемых электроэнергетических устройств методом конечных элементов: Учебное пособие для вузов. – Москва: МГАУ, 1999. – 141 с. <http://zei.narod.ru/Up2.html>
6. Забудский Е.И. Управляемые реакторы для электроэнергетики // Электрификация, автоматизация и компьютеризация сельского хозяйства: Сборник научных трудов. – Москва: МГАУ, 2000. – С. 41–52.
7. А.с. 1345294 СССР. Трехфазный статический ферромагнитный утроитель частоты / Е.И. Забудский, Ю.В. Ермураки. Опубл. 15.10.87. Бюл. № 38.
8. А.с. 1347131 СССР. Трехфазный статический ферромагнитный удвоитель частоты / Е.И. Забудский, Ю.В. Ермураки. Опубл. 23.10.87. Бюл. № 39.
9. А.с. 1541681 СССР. Трехфазный управляемый реактор / Е.И. Забудский, Ю.В. Ермураки. Опубл. 07.02.90. Бюл. № 5.
10. А.с. 1651326 СССР. Трехфазный насыщающийся реактор / Е.И. Забудский, Ю.В. Ермураки, С.Ф. Козырин. Опубл. 23.05.91. Бюл. № 19.
11. А.с. 1658224 СССР. Трехфазный управляемый реактор / Е.И. Забудский, Ю.В. Ермураки, С.Ф. Козырин. Опубл. 23.06.91. Бюл. № 23.
12. А.с. 1663721 СССР. Трехфазный статический ферромагнитный утроитель частоты / Е.И. Забудский, Ю.В. Ермураки, С.Ф. Козырин, В.Г. Ольховский, О.В. Воловецкий. Опубл. 15.07.91. Бюл. № 26.
13. А.с. 1781711 СССР. Трехфазный насыщающийся реактор / Е.И. Забудский, Ю.В. Ермураки, Г.А. Евдокунин, С.Ф. Козырин. Опубл. 15.12.92. Бюл. № 46.
14. Забудский Е.И., Ермураки Ю.В., Козырин С.Ф. Новые конструкции ферромагнитных устройств для электроэнергетики // Электротехника. – 1991. – № 2. – С. 44–48.
15. Забудский Е.И., Three-phase matched reactors-transformers for electric power engineering // 9th International Power System Conference, Vol.2: Доклады конференции. – Санкт-Петербург: СПбГТУ, 1994. – 12 с.

16. Забудский Е.И., Павлов М.В. Расчет магнитного поля в устройствах электромеханики и интерпретация результатов средствами компьютерной графики // Электротехника. – 1995. – № 4. – С. 44–46.
17. Забудский Е.И. Совмещенные электромагнитные устройства для систем управления в электроэнергетике // Всероссийский Электротехнический конгресс “На рубеже веков: итоги и перспективы” – Москва: МЭИ. – 1999. – С. 43–45.
18. Забудский Е.И. Расчет стационарного магнитного поля в ферромагнитных устройствах электроэнергетического назначения: Пакет компьютерных программ / Зарегистрирован в Отраслевом фонде алгоритмов и программ НИИВО Минобразования РФ. Регистр. № 94700, 16.02.94.
19. Забудский Е.И. Расчет переменного магнитного поля в ферромагнитных устройствах электроэнергетического назначения: Пакет компьютерных программ / (там же). Регистр. № 94698, 16.02.94.
20. Забудский Е.И. Расчет электромагнитных режимов работы ферромагнитных устройств электроэнергетического назначения: Пакет компьютерных программ / (там же). Регистр. № 94699, 16.02.94.
21. Забудский Е.И. Компьютерный фильм Геометрическая интерпретация результатов расчета магнитного поля в устройствах электромеханики: Пакет компьютерных программ / (там же). Регистр. № 94696, 16.02.94. (Фильм демонстрируется и копируется на Web–странице автора <http://zei.narod.ru> ).
22. Забудский Е.И. Стабилизация напряжения электросети на основе однокристалльной микроЭВМ // Повышение эффективности функционирования систем электроснабжения электроэнергетики сельского хозяйства: Сборник научных трудов. – Москва: МГАУ, 2001. – С.50–69.
23. Кулон Ж.-Л., Сабонадьер Ж.-К. САПР в электротехнике. Пер. с франц. – М.: Мир, 1988. – 203 с.
24. Правила устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 645 с.
25. Сабонадьер Ж.-К., Кулон Ж.-Л. Метод конечных элементов и САПР. Пер. с франц. – М.: Мир, 1989. – 190 с.
26. . Забудский Е.И. Совмещенные регулируемые электромагнитные реакторы: Монография. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 436 с. <http://zei.narod.ru/regreak.html>

Московский государственный агроинженерный университет  
Кафедра Электроснабжение и Электрические машины



# Электрические машины

## Часть 1. ТРАНСФОРМАТОРЫ

*Отчет по лабораторной работе №1*

Выполнил студент гр. \_\_\_\_\_  
/ \_\_\_\_\_ /

Принял  
профессор Е.И.Забудский

Москва 2010

Отчет по лабораторной работе № 1  
**ТРЕХФАЗНЫЙ ДВУХОБМОТОЧНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР**

**Содержание**

1. Цель работы .....	2
2. Программа работы .....	2
3. Номинальные величины исследуемого трансформатора .....	3
4. Т-образная схема замещения трансформатора .....	3
5. Опыт холостого хода .....	4
6. Опыт короткого замыкания .....	5
7. Опыт под нагрузкой. Внешняя характеристика трансформатора .....	6
8. Расчет и построение внешних характеристик .....	6
9. Расчет и построение зависимости КПД от коэффициента нагрузки ....	7
10. Рисунки .....	8
11. Оценка результатов эксперимента и расчета .....	11

**1. Цель работы**

Ознакомиться с устройством, принципом действия и назначением трансформатора; освоить практические методы проведения опытов холостого хода (ХХ), короткого замыкания (КЗ) и под нагрузкой, а также использования опытных данных для получения параметров трансформатора и основных характеристик.

**2. Программа работы**

**2.1.** Ознакомиться с устройством испытуемого трансформатора и записать его паспортные данные.

**2.2.** Определить коэффициент трансформации.

**2.3.** Провести опыт ХХ и построить характеристики

$$I_x, P_x, \cos \varphi_x = f(U_{Ix}) \text{ при } I_2 = 0.$$

**2.4.** Провести опыт КЗ и построить характеристики

$$I_k, P_k, \cos \varphi_k = f(U_{Ik}) \text{ при } U_2 = 0.$$

**2.5.** Провести опыт под нагрузкой и построить внешнюю характеристику

$$U_2 = f(I_2) \text{ при } \cos \varphi_2 = 1,0.$$

**2.6.** На основании данных опытов ХХ и КЗ определить параметры Т-образной схемы замещения трансформатора. Вычертить ее для режима нагрузки.

**2.7.** Определить напряжение короткого замыкания и его активную и реактивную составляющие.

**2.8.** Рассчитать и построить внешние характеристики трансформатора при активной нагрузке ( $\cos \varphi_2 = 1,0$ ), активно-индуктивной ( $\cos \varphi_2 = 0,8$ ;  $\sin \varphi_2 = +0,6$ ) и активно-емкостной ( $\cos \varphi_2 = 0,8$ ;  $\sin \varphi_2 = -0,6$ ). Сравнить расчетную характеристику при  $\cos \varphi_2 = 1,0$  с опытной.

**2.9.** Рассчитать и построить зависимость КПД трансформатора от коэффициента нагрузки  $\eta = f(\beta)$  для  $\cos \varphi_2 = 1,0$  и  $\cos \varphi_2 = 0,8$ . Определить нагрузку, соответствующую максимальному значению КПД.

\*

**Для защиты отчета необходимо знать:**

- 1) назначение и содержание выполненных опытов,
- 2) физическую природу параметров Т-образной схемы замещения трансформатора,
- 3) физическую природу экспериментальных и расчетных зависимостей.

### 3. Номинальные величины исследуемого трехфазного трансформатора

Тип трансформатора – ТС-2,5/0,25

Наименование	Обозначение	Численное значение	Единица измерения
Мощность	$S_{ном}$		$кВ \cdot А$
Первичное напряжение	$U_{1л}$		$В$
Вторичное напряжение	$U_{2л}$		$В$
Линейный ток первичной обмотки	$I_{1л}$		$А$
Линейный ток вторичной обмотки	$I_{2л}$		$А$
Частота	$f$		$Гц$
Число фаз	$m$		–
Схема соединения обмоток	$У/У$		–
Способ охлаждения			
Характер нагрузки			
Ток холостого хода	$i_x$		$\%$
Потери холостого хода	$P_x$		$Вт$
Напряжение короткого замыкания	$u_k$		$\%$
Потери короткого замыкания	$P_k$		$Вт$

Примечания:

1. Значения номинальных токов  $I_{1л}$  и  $I_{2л}$  рассчитаны по формулам (с.12, п. 9.2.9):

$$I_{1л} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{1л}}, \quad I_{2л} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{2л}}$$

2. Значения тока и потерь холостого хода определены по данным опыта ХХ, которые соответствуют номинальному первичному напряжению  $U_{1л} = 2500 В$  (разд. 5).

3. Значения напряжения и потерь короткого замыкания определены по данным опыта КЗ, которые соответствуют номинальному первичному току  $I_{1л} = 10 А$  (разд. 6).

#### 4. Т-образная схема замещения трансформатора

Трансформатор, у которого обмотки имеют только магнитную связь, может быть заменен эквивалентной схемой, называемой Т-образной схемой замещения (рис. 1.1). В ней сопротивления  $R_1$  и  $X_1$  определяют первичную обмотку, а  $R'_2$  и  $X'_2$  – вторичную. Индуктивные сопротивления  $X_1$  и  $X'_2$  обусловлены магнитными потоками рассеяния обмоток. Схемы замещения обмоток объединены в точках 1 и 2 намагничивающим контуром с сопротивлениями  $R_m$  и  $X_m$ . Индуктивное сопротивление  $X_m$  обусловлено основным магнитным потоком, а сопротивление  $R_m$  является *фиктивным* и его величина определяется потерями мощности в стали магнитопровода. Сопротивления вторичной обмотки  $R'_2 = k^2 R_2$ ;  $X'_2 = k^2 X_2$  и нагрузки  $Z'_{нг} = k^2 Z_{нг}$  приведены к числу витков первичной обмотки. Также приведены значения ЭДС и тока вторичной обмотки:  $E'_2 = kE_2 = E_1$ ,  $I'_2 = I_2/k$ , где  $k = W_1/W_2$  – коэффициент трансформации. Это обеспечивает эквивалентную замену магнитно-связанных цепей электрически связанными цепями.

Параметры схемы замещения определяются из опытов ХХ и КЗ трансформатора.

### 5. Опыт холостого хода

Схема включения трансформатора приведена на рис. 1.2. При проведении опыта к первичной обмотке подводилось напряжение  $U_{1x}$ , которое изменялось в пределах  $(0,5...1,25)U_{1ф.ном}$ . Опытные и расчетные данные занесены в табл.1.1.

Таблица 1.1

Измерение							Расчет*				Расчет при $U_{1x} = U_{1ф.ном}$		
$U_{1x}$	$U_{2x}$	$I_{Ax}$	$I_{Bx}$	$I_{Cx}$	$P_{Ax}$	$P_{Cx}$	$I_x$	$P_x$	$\cos \varphi_x$	$k$	$Z_m$	$R_m$	$X_m$
$B$	$B$	$A$	$A$	$A$	$\frac{\text{дел}}{Bm}$	$\frac{\text{дел}}{Bm}$	$A$	$Bm$	–	–	$Om$	$Om$	$Om$
											–	–	–
											–	–	–
											–	–	–
											–	–	–
											–	–	–
											–	–	–
133													
											–	–	–

В табл.1.1  $U_{1x}$ ,  $U_{2x}$  – фазные напряжения, соответствующие одноименным зажимам первичной и вторичной обмоток, например,  $A-X$  и  $a-x$ ;  $I_x = (I_{Ax} + I_{Bx} + I_{Cx})/3$  – среднее арифметическое значение токов фаз;  $P_x = C_w(P_{Ax} - P_{Cx})$  – мощность, потребляемая трансформатором из сети при холостом ходе,  $C_w$  – цена деления ваттметра;  $\cos \varphi_x = P_x/3U_{1x}I_x$  – коэффициент мощности;  $k = U_{2x}/U_{1x}$  – коэффициент трансформации.

По данным опыта XX определены параметры  $R_m$ ,  $X_m$ , и  $Z_m$  намагничивающего контура Т-образной схемы замещения трансформатора (рис. 1.1):

$$Z_x = Z_1 + Z_m = U_{1фном}/I_x \approx Z_m;$$

$$R_x = R_1 + R_m = P_x/3I_x^2 \approx R_m;$$

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}.$$

Характеристики XX  $I_x, P_x, \cos \varphi_x = f(U_{1x})$  представлены на рис. 1.3.

\* Величины рассчитываются на компьютере в соответствии с Паскаль-программой, приведенной в Прил. 1 (с. 97...99).

### 6. Опыт короткого замыкания

Схема включения трансформатора приведена на рис. 1.4. При проведении опыта к первичной обмотке подводилось пониженное напряжение  $U_{1К} = (5...10)\%$  от номинального напряжения  $U_{1ф.ном}$ . Опытные и расчетные данные занесены в табл.1.2.

Таблица 1.2

Измерение				Расчет	
$U_{1К}$	$I_{1К}$	$P_{Ак}$	$P_{Ск}$	$P_K$	$\cos\varphi_K$
<i>В</i>	<i>А</i>	<i>дел</i> <i>Вт</i>	<i>дел</i> <i>Вт</i>	<i>Вт</i>	—
	6,3				

→ Продолжение табл. 1.2

Расчет при $I_{1К} = I_{1ном}$								
$Z_K$	$R_K$	$X_K$	$Z_{к75}$	$R_{к75}$	$U_K$	$U_{к75}$	$U_{a75}$	$U_p$
<i>Ом</i>	<i>Ом</i>	<i>Ом</i>	<i>Ом</i>	<i>Ом</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—

В табл.1.2  $U_{1К}$ ,  $I_{1К}$  – фазные напряжение и ток;  $P_K = C_w k_t (P_{Ак} + P_{Ск})$  – мощность, потребляемая трансформатором из сети при коротком замыкании;  $C_w$  – цена деления ваттметра;  $\cos\varphi_K = P_K / 3U_{1К}I_{1К}$  – коэффициент мощности.

По данным опыта КЗ определены параметры схемы замещения (рис. 1.1):



$$Z_K = Z_1 + Z'_2 = U_{1K} / I_{1ном};$$

$$R_K = R_1 + R'_2 = P_K / 3I_{1ном}^2;$$

$$X_K = X_1 + X'_2 = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2},$$

а также напряжение короткого замыкания трансформатора:

$$u_{к\%} = 100U_{1к} / U_{1ф.ном} = 100I_{1ном}Z_K / U_{1ф.ном}.$$

Для Т-образной схемы замещения исследуемого трансформатора можно принять  $R_1 \approx R'_2 = R_K / 2$ ,  $X_1 \approx X'_2 = X_K / 2$ .

Активное сопротивление  $R_K$  приведено к расчетной рабочей температуре трансформатора, равной  $75^\circ\text{C}$ . Приблизительно  $R_{к75} \approx 1,2R_K$ . Полное сопротивление двух обмоток  $Z_{к75} = \sqrt{R_{к75}^2 + X_K^2}$ , а напряжение короткого замыкания  $u_{к75\%} = 100I_{1ном}Z_{к75} / U_{1ф.ном}$ . Активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания соответственно равны:  $u_{а75\%} = 100I_{1ном}R_{к75} / U_{1ф.ном}$  и  $u_{р\%} = 100I_{1ном}X_K / U_{1ф.ном}$ .

Характеристики КЗ  $I_K$ ,  $P_K$ ,  $\cos \varphi_K = f(U_{1K})$  представлены на рис. 1.5.

### 7. Опыт под нагрузкой. Внешняя характеристика трансформатора

Схема включения трансформатора приведена на рис. 1.6. При отсутствии нагрузки к первичной обмотке трансформатора подводилось напряжение  $U_{1x}$ , при котором  $U_{2x} = U_{2ф.ном}$ . Затем трансформатор загружался равномерно, по всем трем фазам. При этом вторичный ток  $I_2$  изменялся в пределах  $(0 \dots 1,2)I_{2ном}$ . Напряжение  $U_{1x}$  поддерживалось неизменным. В качестве нагрузки использовался нагрузочный реостат (активное сопротивление). Опытные и расчетные данные занесены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

$U_{1ф} = const$	$U_{2ф}$	$I_{1ф}$	$I_{2ф}$	$\beta$
<i>B</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	–
				<i>I</i>

В табл. 1.3  $\beta = I_2 / I_{2ном}$  – коэффициент нагрузки трансформатора.

Внешняя характеристика трансформатора  $U_{2ф} = f(\beta)$ , снятая при  $U_1 = const$  и  $\cos \varphi_2 = 1,0$ , представлена на рис. 1.7 сплошной линией.

### 8. Расчет и построение внешних характеристик

Внешние характеристики можно получить расчетным путем. При любой нагрузке вторичное напряжение определяется так:

$$U_{2ф} = U_{2ф.ном} (1,0 - 0,01 \Delta U \%),$$

где  $U_{2ф.ном}$  – номинальное фазное напряжение вторичной обмотки трансформатора;

$\Delta U_{\%}$  – изменение вторичного напряжения при нагрузке, равно

$$\Delta U_{\%} = 100(U_{2\phi.\text{ном}} - U_{2\phi})/U_{2\phi.\text{ном}}.$$

При номинальной нагрузке величина  $\Delta U_{\%}$  для силовых трансформаторов составляет 2...5%. С достаточной точностью изменение напряжения можно определить по выражению

$$\Delta U_{\%} = \beta(U_{a75\%} \cos \varphi_2 + U_{p\%} \sin \varphi_2).$$

Задаем значения коэффициента нагрузки:  $\beta = 0; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25$ . При заданных значениях  $\cos \varphi_2$  и  $\sin \varphi_2$  (разд. 2) рассчитываем  $\Delta U_{\%}$  и  $U_{2\phi}$ , (табл.1.4).

Таблица 1.4

$\beta$	Характер нагрузки					
	Активная, $\cos \varphi_2 = 1,0$		Активно-индуктивная, $\cos \varphi_2 = 0,8; \sin \varphi_2 = +0,6$		Активно-емкостная, $\cos \varphi_2 = 0,8; \sin \varphi_2 = -0,6$	
	$\Delta U_{\%}$	$U_{2\phi}$	$\Delta U_{\%}$	$U_{2\phi}$	$\Delta U_{\%}$	$U_{2\phi}$
–	%	В	%	В	%	В
0						
0,5						
0,75						
1,0						
1,25						

Расчетные внешние характеристики  $U_{2\phi} = f(\beta)$  в одних координатных осях с опытной внешней характеристикой представлены на рис. 1.7 пунктирной (активная нагрузка), штрих-пунктирной (активно-индуктивная нагрузка) и штрих-штрих-пунктирной (активно-емкостная нагрузка) линиями.

### 9. Расчет и построение зависимости КПД от коэффициента нагрузки

ГОСТ 3484.1–88 рекомендует определять КПД косвенным методом, используя значения потерь мощности в трансформаторе, получаемые из опытов ХХ и КЗ. Расчетное выражение для определения КПД:

$$\eta = 1,0 - \frac{(P_{x.\text{ном}} + \beta^2 P_{k.\text{ном}75})}{(\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_{x.\text{ном}} + \beta^2 P_{k.\text{ном}75})},$$

где  $P_{x.\text{ном}}$  – магнитные потери мощности в магнитопроводе, равные мощности ХХ при  $U_{1x} = U_{1\phi.\text{ном}}$ ;  $P_{k.\text{ном}75}$  – электрические потери в обмотках, равные мощности потерь КЗ при  $I_{1k} = I_{1\text{ном}}$  и температуре  $75^\circ\text{C}$ , т.е.  $P_{k.\text{ном}75} = 3I_{1\text{ном}}^2 R_{k75}$ ;  $S_{\text{ном}}$  – номинальная мощность трансформатора.

Используя данные опытов ХХ и КЗ и ряд значений коэффициента нагрузки  $\beta$ , рассчитываем КПД при заданном значении коэффициента мощности (табл. 1.5).

Таблица 1.5

	$\beta$	0	0,05	0,1	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25
$\eta$	$\cos \varphi_2 = 1,0$								
	$\cos \varphi_2 = 0,8$								

Зависимости  $\eta = f(\beta)$  представлены на рис. 1.8 сплошной ( $\cos \varphi_2 = 1,0$ ) и пунк-

тирной ( $\cos \varphi_2 = 0,8$ ) линиями.

Кривая  $\eta = f(\beta)$  имеет максимум при таком значении  $\beta$ , когда электрические потери в обмотках равны магнитным потерям в стали. Наиболее вероятная нагрузка, при которой  $\eta = \eta_{max}$  имеет место, при значении  $\beta = 0,5 \dots 0,7$ .

Значение коэффициента нагрузки  $\beta$ , которое соответствует максимальному значению КПД  $\eta_{max}$ , определим по формуле

$$\beta_{opt} = \sqrt{P_{x.ном} / P_{к.ном75}} \cdot$$

Максимальное значение КПД

$$\eta_{max} = 1,0 - (P_{x.ном}) / (0,5 \beta_{opt} S_{ном} \cos \varphi_2 + P_{x.ном}).$$

Результаты расчетов занесены в табл.1.6.

Таблица 1.6

$P_{x.ном}$	$P_{к.ном75}$	$\beta_{opt}$	$\eta_{max}$	
			$\cos \varphi_2 = 1,0$	$\cos \varphi_2 = 0,8$

## 10. Рисунки

(рисунки и графики выполняются студентами самостоятельно)

Рис.1.1. Т-образная схема замещения трансформатора

Рис.1.2. Схема лабораторной установки для исследования трансформатора в опыте холостого хода

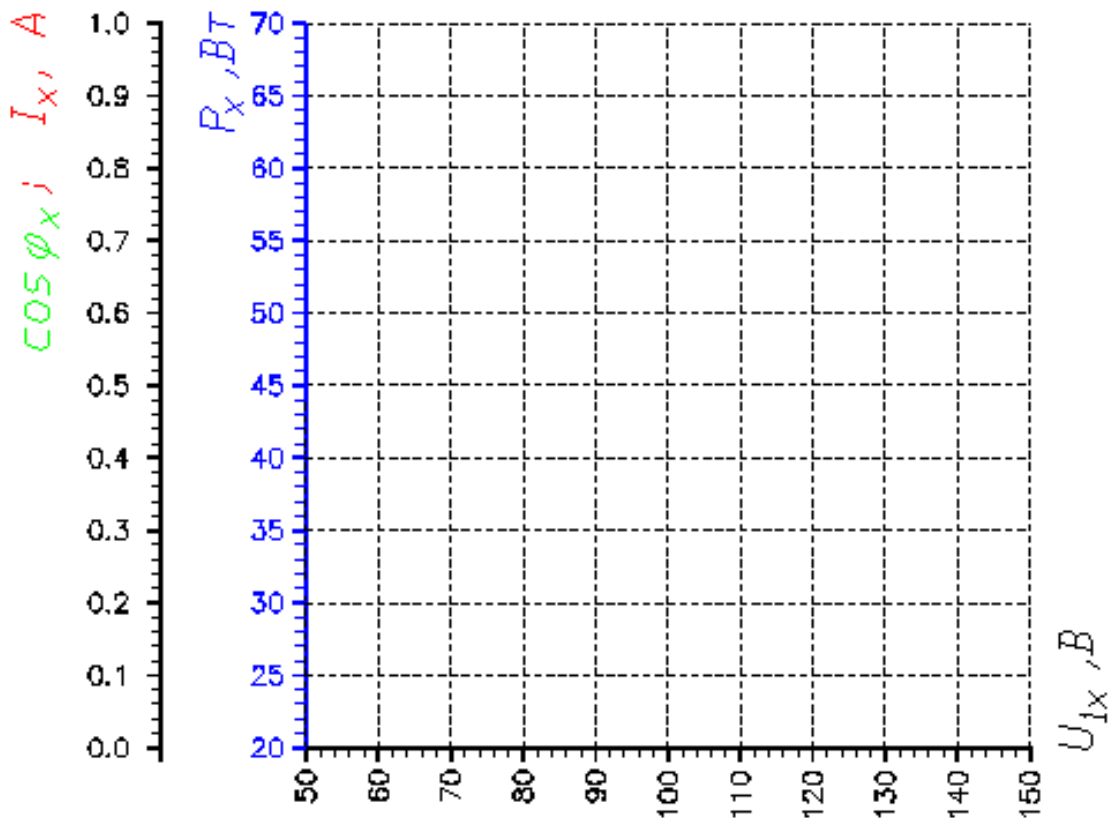


Рис.1.3. Характеристики холостого хода трансформатора

Рис.14. Схема лабораторной установки для исследования трансформатора в опыте короткого замыкания

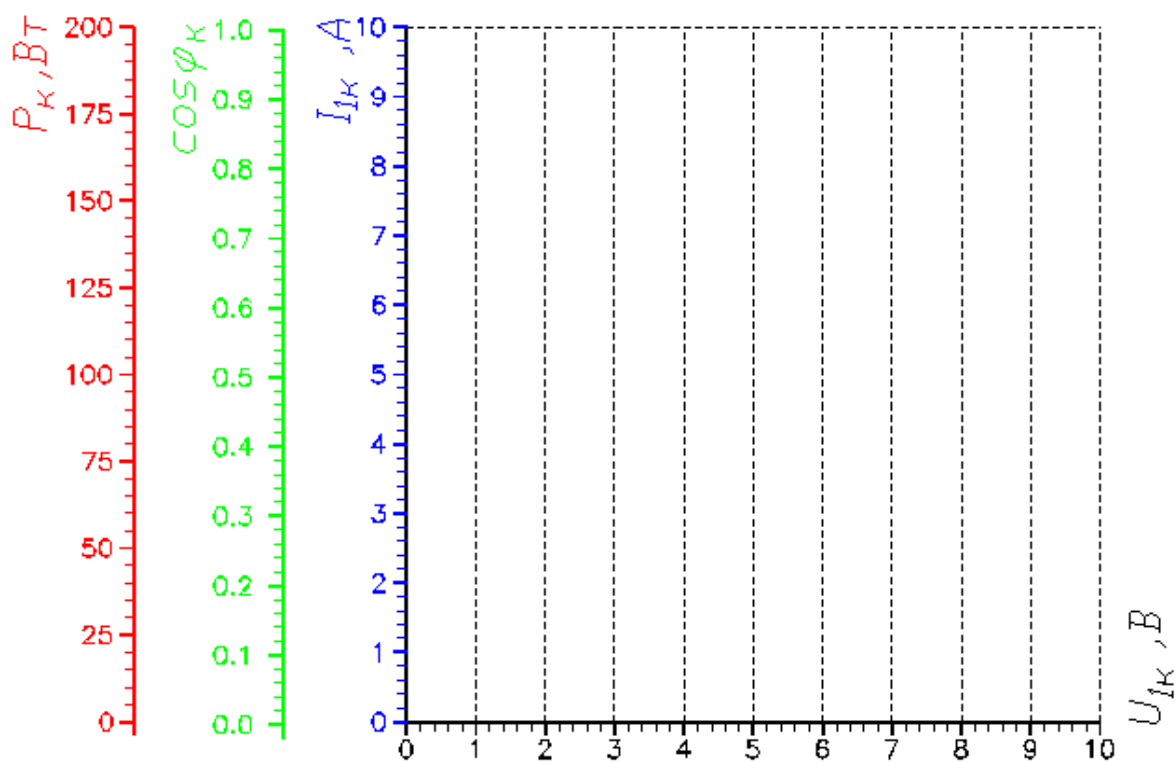


Рис.15. Характеристики короткого замыкания трансформатора

Рис.16. Схема лабораторной установки для исследования трансформатора в режиме нагрузки

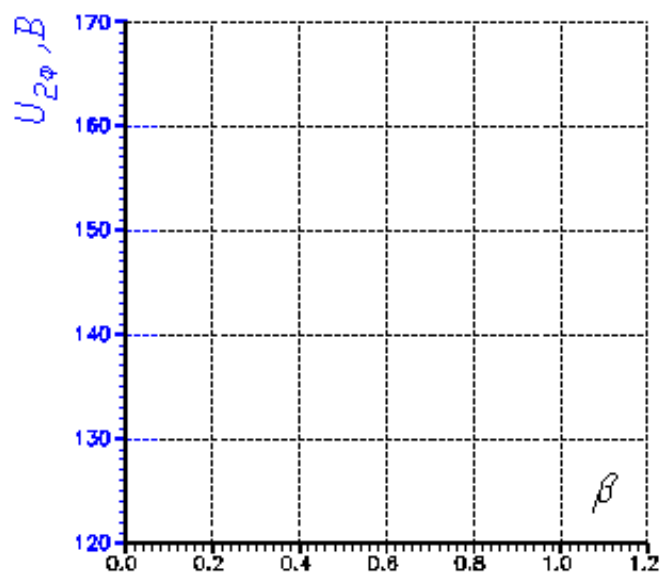


Рис.17. Внешняя характеристика трансформатора

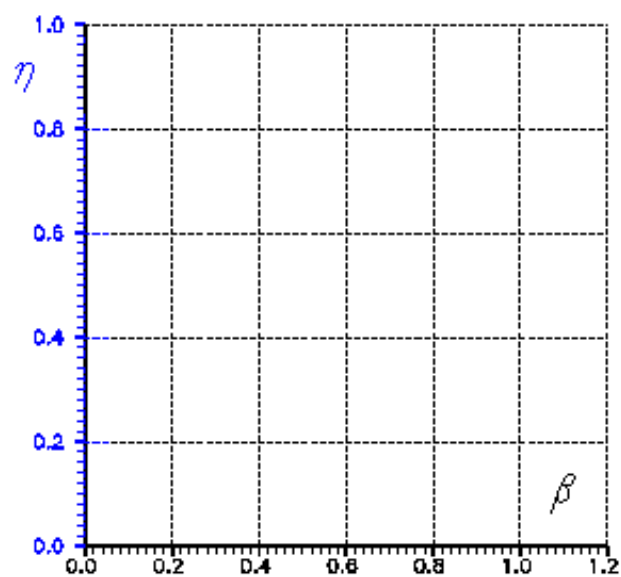


Рис.18. Зависимость КПД трансформатора от коэффициента нагрузки

## *11. Оценка результатов эксперимента и расчета*

**1.** Сопоставление значений сопротивлений обмоток трансформатора и сопротивлений намагничивающего контура. Объяснение физической природы параметров и их различий (рис. 1.1).


**2.** Объяснение физической сущности и формы характеристик холостого хода трансформатора (рис. 1.3)


**3.** Объяснение физической сущности и формы характеристик короткого замыкания трансформатора (рис. 1.5).


**4.** Сопоставление *одноименных* характеристик холостого хода и короткого замыкания. Объяснение различий (рис. 1.3 и рис. 1.5).

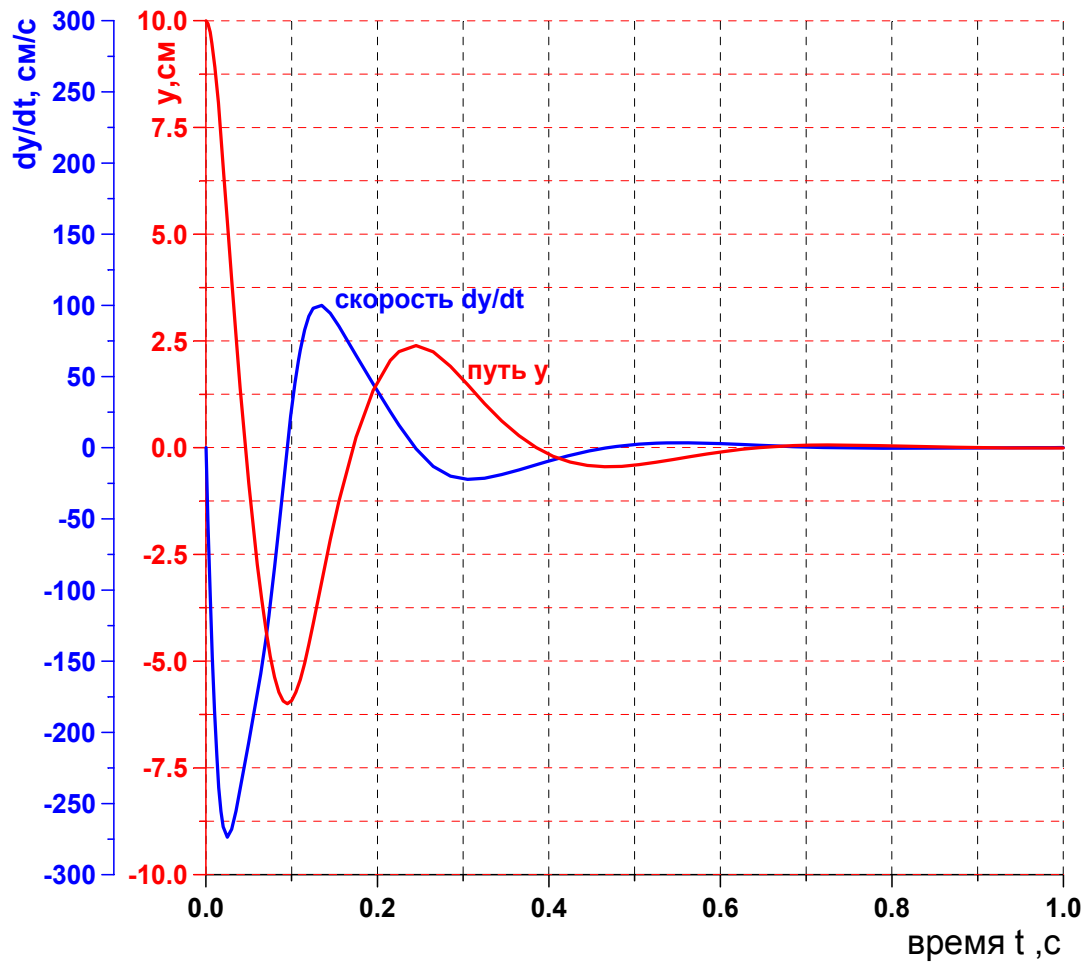
**5.** Объяснение формы внешней характеристики трансформатора. Объяснение различий при R-, R-L- и R-C нагрузке (рис. 1.7).

**6.** Условие максимума коэффициента полезного действия трансформатора (рис. 1.8).

**7.** Меры по снижению магнитных потерь мощности.



## Пример построения графика



*Приложение 4*

УТВЕРЖДАЮ  
Руководитель Департамента образовательных  
программ и стандартов профессионального  
образования  
\_\_\_\_\_ Л.С. Гребнев  
“ “ \_\_\_\_\_ 2001 г.

Примерная программа дисциплины

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ**

Рекомендуется Минобразованием России для  
направления подготовки дипломированного  
специалиста 660300 - "Агроинженерия"  
(специальность 311400 - Электрификация и  
автоматизация сельского хозяйства)

*Программу составил*  
д-р техн. наук, проф. Забудский Е.И.

Москва 2001

## 1. Цель и задачи дисциплины

*Цель* - формирование системы знаний по электрическим машинам, применяемым для электрификации технологических процессов в сельском хозяйстве.

*Задачи* - изучение основ теории, устройства, рабочих свойств электрических машин и области их применения.

## 2. Требования к уровню освоения содержания дисциплины

В результате изучения дисциплины студент *должен знать*:

- значение электрических машин для электрификации и автоматизации сельского хозяйства;
- общие вопросы теории электромеханического преобразования энергии;
- конструктивные исполнения, параметры и режимы работы электрических машин, основные характеристики электрических двигателей, генераторов и преобразователей, эксплуатационные требования к ним;
- тенденции развития электрических машин.

Студент *должен уметь*:

- подключать и испытывать электрические машины и трансформаторы;
- рассчитывать, измерять и анализировать параметры и основные характеристики электрических машин и трансформаторов применительно к потребностям агропромышленного комплекса.

Студент *должен обладать навыками* расчета и выбора электрических машин и трансформаторов для реализации технологий с.-х. производства.

## 3. Объем дисциплины и виды учебной работы

Вид учебной работы	Всего часов	Семестр	
		5	6
Общая трудоемкость дисциплины	200		
<i>Аудиторные занятия</i>	136	*	*
Лекции		*	*
Лабораторные работы (ЛР)		*	*
<i>Самостоятельная работа</i>	64	*	*
Вид итогового контроля			<b>экзамен</b>

## 4. Содержание дисциплины

### 4.1. Разделы дисциплины и виды занятий

№ п/п	Раздел дисциплины	Лекции	Лабораторные работы
	Введение в электромеханику	*	
1	Трансформаторы	*	*
2	Общие вопросы теории электромеханического преобразования энергии	*	
3	Асинхронные машины	*	*
4	Синхронные машины	*	*
5	Машины постоянного тока	*	*

### 4.2. Содержание разделов дисциплины

#### *Введение в электромеханику*

Значение электрических машин и трансформаторов для электрификации и автоматизации сельского хозяйства и для электроэнергетики в целом.

Краткая история развития электрических машин и трансформаторов и задачи электромашиностроения на современном этапе.

Материалы, применяемые в электромашиностроении.

Основные типы электрических машин и общие принципы их устройства. Электромеханическое преобразование энергии в электрической машине. Преобразование электрической энергии в трансформаторе. Основные законы электротехники, в соответствии с которыми осуществляется электромеханическое преобразование энергии.

#### *1. Трансформаторы*

##### *1.1. Области применения и конструкции трансформаторов*

Назначение, области применения, принцип действия и номинальные данные трансформаторов. Устройство магнитных систем, обмоток, баков и других элементов конструкции трансформаторов. Особенности устройства трансформаторов малой и большой мощности.

##### *1.2. Процессы в трансформаторе при холостом ходе*

Основное магнитное поле и поле рассеяния. Формулы для ЭДС. Характеристика намагничивания. Магнитные потери. Сопротивление взаимоиндукции.

##### *1.3. Процессы в трансформаторе при нагрузке*

Магнитное поле при нагрузке. Индуктивности рассеяния обмоток. Намагничивающий ток и уравнение равновесия МДС. Уравнения равновесия напряжений обмоток. Приведение вторичных величин к первичной обмотке. Электрическая схема замещения трансформатора и векторная диаграмма. Определенные параметров и потерь из опытов холостого хода и короткого замыкания.

#### *1.4. Эксплуатационные характеристики трансформаторов при нагрузке*

Зависимость напряжения и КПД от нагрузки. Регулирование напряжения трансформаторов с отключением от сети и при нагрузке.

#### *1.5. Схемы и группы соединения трансформаторов. Явления, возникающие при намагничивании магнитопроводов трансформаторов.*

Схемы и группы соединения обмоток трансформаторов. Формы кривых намагничивающего тока, потока, ЭДС и напряжений. Процессы в трехфазном трансформаторе при симметричной нагрузке;

#### *1.6. Параллельная работа трансформаторов*

Условия включения трансформаторов на параллельную работу. Оценка возможных уравнивающих токов, распределение нагрузки между трансформаторами.

#### *1.7. Автотрансформаторы*

Конструктивные особенности и схемы автотрансформаторов. Преимущества и недостатки автотрансформаторов по сравнению с обычными трансформаторами. Области применения.

#### *1.8. Многообмоточные трансформаторы*

Уравнения равновесия напряжений и МДС. Схема замещения и векторная диаграмма. Изменение вторичных напряжений. Соотношение между мощностями обмоток. Области применения трансформаторов.

#### *1.9. Несимметричные режимы трансформаторов*

Токи и потоки нулевой последовательности в трансформаторах с различной конструкцией магнитопровода. Схема замещения и сопротивление трансформатора для токов нулевой последовательности. Работа трансформатора с различными схемами соединения обмоток при несимметричной нагрузке.

#### *1.10. Переходные процессы в трансформаторах*

Особенности работы трансформатора при переходном процессе. Включение в сеть трансформатора с разомкнутой вторичной обмоткой. Внезапное короткое замыкание на зажимах вторичной обмотки трансформатора, ударный ток короткого замыкания. Электродинамические силы, возникающие при внезапном коротком замыкании. Витковое короткое замыкание в трансформаторе. Нагревание и охлаждение трансформаторов.

#### *1.11. Трансформаторы специального назначения*

Трансформаторы для преобразования частоты и числа фаз. Трансформаторы с плавным регулированием напряжения. Трансформаторы для дуговой электросварки. Трансформаторы для выпрямительных установок. Реакторы (*при изучении данной темы демонстрируется компьютерный фильм [6.2.3]*).

#### *1.12. Технические данные тенденции развития силовых трансформаторов*

Стандартизация в трансформаторостроении. Технические данные и тенденции развития трансформаторов.

## ***2. Общие вопросы теории электромеханического преобразования энергии***

### ***2.1. Вращающееся магнитное поле***

Создание вращающегося поля трехфазной пространственно распределенной обмоткой. Синхронная частота вращения поля. Результирующее магнитное поле электрической машины. Основное магнитное поле и поле рассеяния.

### ***2.2. Обмотки электрических машин и ЭДС обмоток***

Основные принципы устройства сосредоточенных и пространственно распределенных обмоток. Однослойные и двухслойные трехфазные обмотки. Наведение ЭДС в пространственно распределенной обмотке. Обмоточный коэффициент.

### ***2.3. Магнитодвижущие силы обмоток***

МДС катушки, одной фазы и трех фаз пространственно распределенной обмотки. Изменение МДС обмотки во времени и в пространстве.

### ***2.4. Электромагнитный момент***

## ***3. Асинхронные машины***

### ***3.1. Режимы работы, области применения и конструкции асинхронных машин***

Назначение, области применения и принцип действия асинхронных машин. Устройство активной части и конструктивных элементов. Исполнение асинхронных машин по степени защиты. Особенности устройства двигателей единых серий. Асинхронная машина - обобщенный трансформатор. Преобразование вида энергии, величины напряжения, частоты напряжения, фазы напряжения и числа фаз.

### ***3.2. Векторная диаграмма и схемы замещения асинхронной машины.***

#### ***Параметры асинхронной машины.***

Уравнения равновесия напряжений и МДС. Векторная диаграмма. Т-образная и Г-образная электрические схемы замещения, параметры схем.

### ***3.3. Опыты холостого хода и короткого замыкания асинхронной машины***

Характеристики холостого хода и короткого замыкания. Опытное определение параметров схемы замещения. Разделение потерь холостого хода.

### ***3.4. Круговая диаграмма и рабочие характеристики асинхронной машины. Энергетическая диаграмма***

Построение круговой диаграммы по данным опытов холостого хода и короткого замыкания. Определение рабочих характеристик по круговой диаграмме. Распределение активной мощности.

### ***3.5. Электромагнитный момент асинхронной машины. Устойчивость работы асинхронного двигателя***

Механическая характеристика асинхронной машины. Зависимость момента от скольжения. Перегрузочная способность двигателя.

### *3.6. Пуск и регулирование частоты вращения асинхронного двигателя*

Пуск двигателей с фазным ротором и с короткозамкнутым типа "беличья клетка". Регулирующие свойства двигателя и способы регулирования частоты вращения.

### *3.7. Генераторный, тормозной и трансформаторный режимы работы асинхронной машины*

Работа асинхронного генератора в автономной системе. Условия самовозбуждения. Режим противовключения. Индукционный регулятор, фазорегулятор.

### *3.8. Однофазные двигатели*

Способы создания пускового момента. Однофазный конденсаторный двигатель. Трехфазный двигатель в схеме однофазного включения с конденсатором.

### *3.9. Асинхронные машины автоматических устройств*

Исполнительные двигатели. Тахогенератор. Сельсины. Поворотные трансформаторы.

### *3.10. Серии асинхронных двигателей и эксплуатационные требования*

Характеристика единых серий: А и АО, А2 и АО2, 4А, АИ, РА, 5А и др. Обозначение типов двигателей.

## *4. Синхронные машины*

### *4.1. Режимы работы, области применения и конструкции синхронных машин*

Назначение, области применения и принцип действия синхронных машин. Устройство активной части и конструктивных элементов. Системы возбуждения. Особенности устройства явнополюсных и неявнополюсных синхронных машин.

### *4.2. Магнитное поле синхронной машины при холостом ходе и нагрузке. Реакция якоря*

Магнитное поле обмотки возбуждения. Результирующее магнитное поле при различном характере нагрузки.

### *4.3 Параметры синхронных машин в установившемся режиме и характеристики синхронного генератора, работающего на автономную нагрузку*

Индуктивные сопротивления явнополюсной и неявнополюсной синхронной машины. Характеристика холостого хода, индукционная нагрузочная, внешняя, регулировочная и характеристика короткого замыкания.

### *4.4. Векторные диаграммы синхронных генераторов*

Векторные диаграммы явнополюсных и неявнополюсных синхронных генераторов.

#### *4.5. Параллельная работа синхронных машин*

Включение на параллельную работу синхронных генераторов с сетью бесконечно большой мощности. Особенности работы генератора с сетью. Параллельная работа синхронных генераторов соизмеримой мощности.

#### *4.6. Характеристики синхронного генератора, работающего параллельно с сетью бесконечно большой мощности*

Угловая характеристика.  $U$ -образные характеристики. Регулирование активной и реактивной мощности.

#### *4.7. Синхронные двигатели и синхронный компенсатор*

Угловая характеристика и  $U$ -образные характеристики двигателя. Рабочие характеристики двигателя. Сопоставление асинхронного и синхронного двигателей. Назначение и  $U$ -образная характеристика компенсатора.

#### *4.8. Переходные процессы в синхронных машинах. Несимметричные короткие замыкания*

Переходный процесс при симметричном трехфазном коротком замыкании. Параметры синхронной машины по продольной и поперечной осям. Ударное значение тока короткого замыкания. Влияние реакции якоря при несимметричных коротких замыканиях. Сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей синхронной машины.

#### *4.9. Специальные синхронные машины*

Синхронные генераторы для дизель-генераторных установок. Автомобильные и тракторные генераторы. Индукторный генератор. Шаговый, реактивный и гистерезисный двигатели.

#### *4.10. Серии синхронных машин и эксплуатационные требования*

Технические данные турбогенераторов, гидрогенераторов, генераторов общего назначения, синхронных компенсаторов и синхронных двигателей.

### **5. Машины постоянного тока**

#### *5.1. Режимы работы, области применения и конструкции машин постоянного тока.*

Назначение, области применения и принцип действия машин постоянного тока. Устройство активной части и конструктивных элементов. Коллектор - механический преобразователь частоты.

#### *5.2. Обмотки якорей машин постоянного тока*

Радиальная, развернутая и электрическая схемы обмоток. ЭДС обмотки якоря. Электромагнитный момент.

#### *5.3. Магнитное поле машины постоянного тока при холостом ходе и нагрузке. Реакция якоря*

Магнитное поле обмотки возбуждения. Магнитное поле обмотки якоря. Результирующее поле. Действие реакции якоря при различном положении щеток на коллекторе.



#### *5.4. Коммутация и способы ее улучшения*

Прямолинейная и криволинейная коммутация. Реактивная ЭДС и ЭДС вращения. Способы уменьшения добавочного тока в коммутируемой секции обмотки якоря.

#### *5.5. Характеристики генераторов постоянного тока.*

##### *Энергетическая диаграмма*

Схемы возбуждения генераторов. Энергетическая диаграмма. Характеристика холостого хода, нагрузочная, внешняя, регулировочная и характеристика короткого замыкания. Параллельная работа генераторов.

#### *5.6. Характеристики двигателей постоянного тока.*

##### *Энергетическая диаграмма.*

Механическая характеристика и устойчивость работы. Энергетическая диаграмма. Рабочие характеристики. Механическая характеристика при различных способах возбуждения и устойчивость работы.

#### *5.7. Пуск и регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока*

Прямой пуск, пуск с помощью пускового реостата и при пониженном напряжении. Регулирование частоты вращения изменением напряжения, введением сопротивления в цепь обмотки якоря и изменением потока возбуждения. Сопоставление двигателей постоянного тока и асинхронных двигателей.

#### *5.8. Специальные машины постоянного тока*

Универсальный коллекторный двигатель. Исполнительные двигатели постоянного тока. Магнетогидродинамический генератор. Тахогенератор. Электромашинный усилитель. Униполярный генератор. Вентильные двигатели.

#### *5.9. Серии машин постоянного тока и эксплуатационные требования*

Характеристика серий двигателей постоянного тока общего назначения 2П и 4П и др. Обозначение типов двигателей.

#### *5.10. Особенности развития электромашиностроения на современном этапе. Возобновляемые источники энергии*

### **5. Лабораторный практикум**

№ п/п	№ раздела дисциплины	Наименование лабораторных работ
1	2	3
1*	1	Экспериментальное исследование трехфазного двухобмоточного трансформатора
2	1	Исследование явлений, возникающих при намагничивании магнитопровода трансформатора
3	1	Параллельная работа трехфазных трансформаторов
4	1	Несимметричная нагрузка трехфазных трансформаторов

## Продолжение таблицы

1	2	3
5	3	Экспериментальное исследование трехфазной асинхронной машины в режиме индукционного регулятора, регулируемого индуктивного сопротивления и фазорегулятора
6*	3	Экспериментальное исследование трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором
7	3	Экспериментальное исследование трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором
8	3	Экспериментальное исследование многоскоростного асинхронного двигателя
9	3	Экспериментальное исследование асинхронного генератора
10	3	Экспериментальное исследование однофазного асинхронного двигателя
11	3	Экспериментальное исследование асинхронного исполнительного двигателя
12	3	Экспериментальное исследование однофазных сельсинов
13	3	Экспериментальное исследование поворотного трансформатора.
14	4	Экспериментальное исследование синхронных микродвигателей
15*	4	Экспериментальное исследование трехфазного синхронного генератора
16	4	Определение параметров синхронного генератора.
17	4	Параллельная работа синхронного генератора с сетью бесконечно большой мощности
18	4	Экспериментальное исследование трехфазного синхронного двигателя
19	3,4,5	Экспериментальное исследование тахогенераторов
20	5	Экспериментальное исследование генератора постоянного тока
21*	5	Экспериментальное исследование двигателя постоянного тока параллельного возбуждения
22	5	Экспериментальное исследование двигателя постоянного тока последовательного возбуждения
23	5	Экспериментальное исследование исполнительного двигателя постоянного тока
24	5	Экспериментальное исследование универсального коллекторного двигателя

\* *Примечание. Результаты экспериментальных исследований, выполненных в работах № 1, 6, 15 и 21, обрабатываются на компьютере по Pascal-программам [6.2.4, 6.2.5, 6.2.6, 6.2.7].*

## 6. Учебно-методическое обеспечение дисциплины

### 6.1. Рекомендуемая литература

#### *а) Основная литература:*

1. Копылов И.П. Электрические машины: Учебник. - 2-е изд., перераб. - М.: Высшая школа; Логос; 2000.
2. Проектирование электрических машин: Учебник / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин. Б.Ф. и др. / Под ред. И.П. Копылова. - 3-е изд., перераб и доп. - М.: Высшая школа, 2001.

#### *б) Дополнительная литература:*

1. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины и микромашины. - М.: Высшая школа, 1990.
2. Забудский Е.И. Математическое моделирование управляемых электроэнергетических устройств: Учебное пособие для вузов. – Ульяновск: УлГТУ, 1998. – 120 с. <http://zei.narod.ru/Up1.html> .
3. Забудский Е.И. Анализ управляемых электроэнергетических устройств методом конечных элементов: Учебное пособие для вузов. – Москва: МГАУ, 1999. – 141 с. <http://zei.narod.ru/Up2.html> .
4. ГОСТ 27471 - 87. Машины электрические вращающиеся. Термины и определения. - М.: Изд-во стандартов, 1988.
5. ГОСТ 16110 - 82. Трансформаторы силовые. Термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 1986.
6. ГОСТ 183 - 74. Машины электрические вращающиеся. Общие технические условия. - М.: Изд-во стандартов, 1993.
7. ГОСТ 28330 - 89. Машины электрические асинхронные мощностью от 1 до 400 кВт включительно. Двигатели. Общие технические требования. - М.: Изд-во стандартов, 1990.
8. ГОСТ 11677 - 85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. - М.: Изд-во стандартов, 1999.
9. ГОСТ 26772 - 85. Машины электрические вращающиеся. Обозначения выводов и направление вращения. - М.: Изд-во стандартов, 1986.
10. ГОСТ 7217 - 87. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний. - М.: Изд-во стандартов, 1987.
11. ГОСТ 10169 - 77. Машины электрические трехфазные синхронные. Методы испытаний. - М.: Изд-во стандартов, 1984.
12. ГОСТ 10159 - 79. Машины электрические вращающиеся коллекторные. Методы испытаний. М.: Изд-во стандартов, 1999.
13. ГОСТ 3484.1 88. Трансформаторы силовые. Методы электромагнитных испытаний. - М.: Изд-во стандартов, 1989.
14. Справочник инженера-электрика сельскохозяйственного производства: Учебное пособие. - М.: Информагротех, 1999.
15. Журнал "Электротехника", 1999, № 9 (Этот тематический номер журнала посвящен асинхронным двигателям).

## 6.2 Средства обеспечения освоения дисциплины

6.2.1. Забудский Е.И., Козак А.Н. Расчет основных размеров трехфазных трансформаторов: Пакет компьютерных программ / Зарегистрирован в Отраслевом фонде алгоритмов и программ НИИВО Минобразования РФ. Регистр. № 94701, 16.02.94.

6.2.2. Забудский Е.И. Паскаль-программа "Расчет рабочих характеристик асинхронного двигателя". - М.: МГАУ им. В.П. Горячкина, 2000.

6.2.3. Забудский Е.И. Компьютерный фильм "Геометрическая интерпретация результатов расчета магнитного поля в устройствах электромеханики": Пакет компьютерных программ / Зарегистрирован в Отраслевом фонде алгоритмов и программ НИИВО Минобразования РФ. Регистр. № 94696, 16.02.94. Сертификат № 3/93 от 10.09.93 г. ( см. Web страницу <http://zei.narod.ru> ).

6.2.4. Забудский Е.И. Паскаль-программа "Расчет характеристик холостого хода трансформатора". - М.: МГАУ им. В.П. Горячкина, 2000.

6.2.5. Забудский Е.И. Паскаль-программа "Расчет характеристик холостого хода асинхронного двигателя и разделение потерь". - М.: МГАУ им. В.П. Горячкина, 2000.

6.2.6. Забудский Е.И. Паскаль-программа "Расчет в системе относительных единиц экспериментальной функциональной зависимости вида  $Y = f(X)$ ". - М.: МГАУ им. В.П. Горячкина, 2000.

6.2.7. Забудский Е.И. Паскаль-программа "Расчет рабочих характеристик двигателя постоянного тока параллельного возбуждения". - М.: МГАУ им. В.П. Горячкина, 2001.

## 7. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Стенды для испытания трансформаторов;  
Стенды для испытания асинхронных машин;  
Стенды для испытания синхронных машин;  
Стенды для испытания машин постоянного тока;  
Стенды для испытания микромашин.

## 8. Методические рекомендации по организации изучения дисциплины

Примерная тематика расчетно-графических работ:

1. Расчет трансформаторов по каталожным данным. Построение внешней характеристики трансформатора. Расчет КПД. Расчет распределения нагрузки при параллельной работе трансформаторов;
2. Расчет трансформатора малой мощности;
3. Расчет токов и напряжений при несимметричной нагрузке трансформатора;
4. Расчет и построение схем обмоток машин переменного тока;
5. Расчет механической характеристики, пусковых режимов и энергетической диаграммы асинхронного двигателя;

6. Построение круговой диаграммы. Определение по круговой диаграмме рабочих характеристик асинхронного двигателя;

7. Расчет переходных процессов в трансформаторах и электрических машинах;

8. Построение векторных диаграмм неявнополюсного и явнополюсного синхронных генераторов.

Для приобретения навыков разработки и принятия инженерных решений для конкретных условий использования электрических машин по решению Совета вуза (факультета) возможно выполнение курсовой работы по дисциплине вместо расчетно-графических работ.

Примерная тематика и содержание курсовой работы:

### *1. Расчет трансформатора*

1.1. Определение основных электрических величин;

1.2. Расчет основных размеров трансформатора. *Расчет выполняется на компьютере по Pascal-программе [6.2.1];*

1.3. Расчет обмоток;

1.4. Определение параметров короткого замыкания;

1.5. Окончательный расчет магнитной системы. Определение параметров холостого хода.

### *2. Расчет асинхронного двигателя*

2.1. Выбор главных размеров;

2.2. Определение числа зубцов сердечника статора, числа витков и сечения провода обмотки статора;

2.3. Расчет размеров зубцовой зоны статора и воздушного зазора;

2.4. Расчет намагничивающего тока;

2.5. Параметры рабочего режима;

2.6. Расчет рабочих характеристик. *Расчет выполняется на компьютере по Pascal-программе [6.2.2];*

2.7. Расчет пусковых характеристик.

Программа составлена в соответствии с Государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования по направлению подготовки дипломированного специалиста 660300 - "Агроинженерия" (специальность 311400 - Электрификация и автоматизация сельского хозяйства).

*Программу составил:* проф. Забудский Е.И. (Московский ГАУ).

*Рецензенты:* проф. Оськин С.В. (Азово-Черноморский ГАА), проф. Попков А.А. (Челябинский ГАУ), проф. Ерошенко Г.П., ст. преп. Лошкарев И.Ю. (Саратовский ГАУ).

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии по специальности 311400 - Электрификация и автоматизация сельского хозяйства (протокол № 1 от " 12 " сентября 2001 г.).

Председатель Совета УМО  
по агроинженерному образованию

М.Н. Ерохин

СОГЛАСОВАНО  
Заместитель руководителя Департамента  
кадровой политики и образования  
Минсельхоза России

Н.И. Юрченко

Фотографии стенда «Трансформатор»

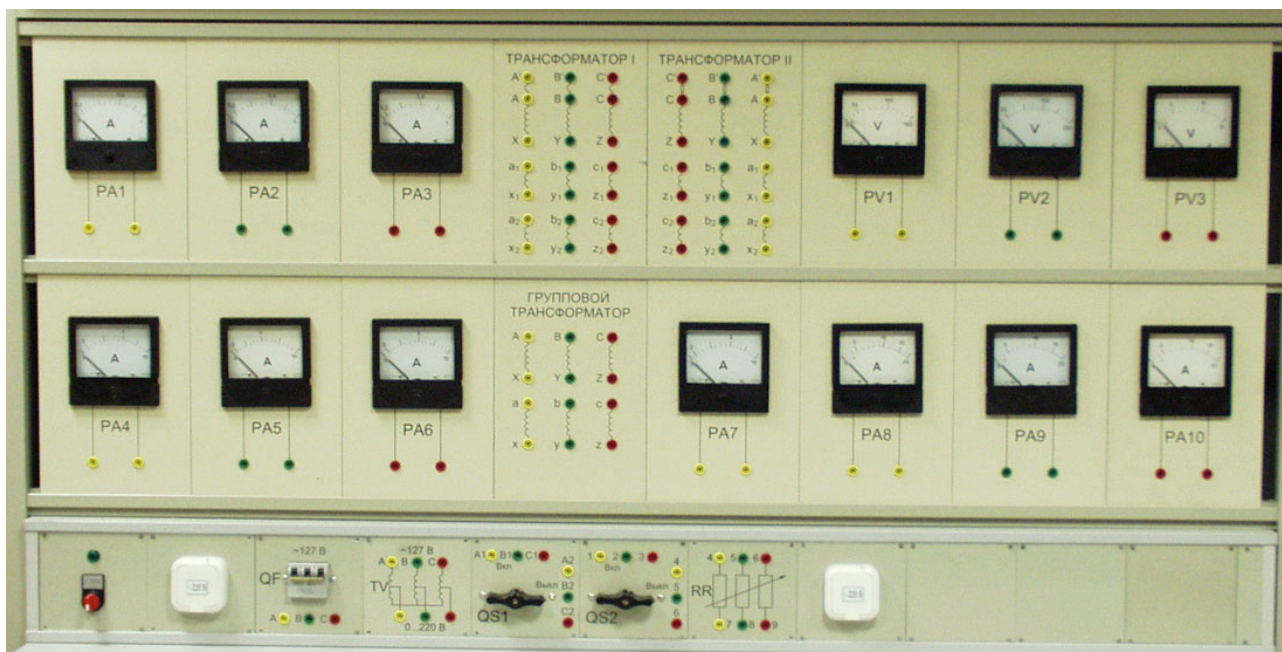


Рис. П5.1. Передняя панель стенда



Рис. П5.2. Общий вид стенда



Рис. П5.3. Общий вид лаборатории Трансформаторов



*Учебное пособие*

**Забудский**

**Евгений Иванович**

E-mail: [zei@inbox.ru](mailto:zei@inbox.ru)

Web-сайт: <http://zei.narod.ru>

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ.  
Часть1. ТРАНСФОРМАТОРЫ**

*Оригинал-макет издания подготовлен автором*

Ответственный редактор  
*Т.В. Сергованцева*

План 2002 г., п. 06  
Подписано к печати 12.09.02  
Формат 60x84/16. Бумага офсетная  
Печать офсетная.  
Уч.-изд. л. 10,0  
Тираж 250 экз.  
Заказ № \_\_\_\_\_  
Цена договорная.  
Московский государственный  
агроинженерный университет  
им. В.П.Горячкина

Отпечатано в лаборатории  
оперативной полиграфии  
Московского государственного  
агроинженерного университета  
им. В.П.Горячкина  
127550, Москва, Тимирязевская, 58