

Государственное автономное профессиональное  
образовательное учреждение Иркутской области  
«Братский индустриально-металлургический техникум»  
(ГАПОУ БРИМТ)

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора по ОМР

ГАПОУ БРИМТ  
  
О. Е. Рогова  
«21»   
учебная 2021г.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ СТУДЕНТОВ  
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ И ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ  
по МДК

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

ПМ.01 ОРГАНИЗАЦИЯ И ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ И  
РЕМОНТУ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

по специальности 08.02.09 Монтаж, наладка и эксплуатация  
электрооборудования промышленных и гражданских зданий

Разработал: Тарасова Т. А.

г. Братск, 2021

Организация-разработчик:

Государственное автономное профессиональное образовательное учреждение  
Иркутской области «Братский индустриально-металлургический техникум»  
(ГАПОУ БрИМТ)

Разработчик:

Тарасова Т.А.. – преподаватель ГАПОУ ИО «Братский индустриально-  
металлургический техникум»

Рассмотрена и одобрена на заседании предметной цикловой комиссии  
электротехнических дисциплин

«21 » октябрь 2021г., № 2,

Председатель предметной цикловой комиссии: Сафонова Н.Е.



© ГАПОУ БрИМТ

## СОДЕРЖАНИЕ

стр.

1	Пояснительная записка	4
2	Правила выполнения лабораторных, практических и контрольных работ	5
3	Техника безопасности при работах в лаборатории	7
4	Критерии оценивания	9
5	Перечень практических занятий, лабораторных и контрольных работ	10
6	Инструктивно-методические указания по выполнению практических занятий, лабораторных работ	124
7	Контрольные работы	125
8	Дополнительные практические работы	132
8	Используемая литература и интернет-источники	154

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Методические указания предназначены в качестве методического пособия при проведении практических занятий и лабораторных работ по МДК Электрические машины для специальности СПО 08.02.09 Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования промышленных и гражданских зданий (базовая подготовка).

Выполнение студентами заданий практических занятий, лабораторных и контрольных работ направлено на обобщение, систематизацию, углубление и закрепление знаний и умений, по МДК Электрические машины. В результате выполнения

Иметь практический опыт :

-в организации и выполнении работ по эксплуатации и ремонту электроустановок

уметь:

- оформлять документацию для организации работ и по результатам испытаний действующих электроустановок с учётом требований техники безопасности;
- осуществлять коммутацию в электроустановках по принципиальным схемам;
- читать и выполнять рабочие чертежи электроустановок;
- производить электрические измерения на различных этапах эксплуатации электроустановок;
- контролировать режимы работы электроустановок;
- выявлять и устранять неисправности электроустановок;

знать:

- классификацию кабельных изделий и область их применения;
- устройство, принцип действия и основные технические характеристики электроустановок;
- правила технической эксплуатации осветительных установок, электродвигателей, электрических сетей;
- требования техники безопасности при эксплуатации электроустановок;
- устройство, принцип действия и схемы включения измерительных приборов;
- типичные неисправности электроустановок и способы их устранения;

Выполнение практических работ способствует формированию общих и профессиональных компетенций:

ОК 01 Выбирать способы решения задач профессиональной деятельности, применительно к различным контекстам

ОК 02 Осуществлять поиск, анализ и интерпретацию информации, необходимой для выполнения задач профессиональной деятельности

ОК 03 Планировать и реализовывать собственное профессиональное и личностное развитие.

ОК 04 Работать в коллективе и команде, эффективно взаимодействовать с коллегами, руководством, клиентами.

ОК 05 Осуществлять устную и письменную коммуникацию на государственном языке с учетом особенностей социального и культурного контекста.

ОК 06 Проявлять гражданско-патриотическую позицию, демонстрировать осознанное поведение на основе традиционных общечеловеческих ценностей.

ОК 07 Содействовать сохранению окружающей среды, ресурсосбережению, эффективно действовать в чрезвычайных ситуациях.

ОК 08 Использовать средства физической культуры для сохранения и укрепления здоровья в процессе профессиональной деятельности и поддержания необходимого уровня физической подготовленности.

ОК 09 Использовать информационные технологии в профессиональной деятельности

ОК 10 Пользоваться профессиональной документацией на государственном и иностранных языках.

ПК 1.1 Организовывать и осуществлять эксплуатацию электроустановок промышленных и гражданских зданий

Перечень работ определен рабочей программой ПМ1 Организация и выполнение работ по эксплуатации и ремонту электроустановок,

Указания содержат: пояснительную записку, перечень работ, задания для работ, методические указания по выполнению работ, информационные и справочные материалы.

Задачи проведения практических занятий/лабораторных работ:

- сформировать умения применять полученные знания на практике;
- выработать при решении поставленных задач таких профессионально значимых качеств, как самостоятельность, ответственность, точность, творческая инициатива и др.

На практических занятиях/лабораторных работах обучающиеся овладевают первоначальными профессиональными умениями и навыками, которые в дальнейшем закрепляются и совершенствуются в процессе учебной и производственной практики.

Практические занятия, лабораторные и контрольные работы являются неотъемлемой частью МДК Электрические машины и подлежат обязательному выполнению студентами.

## ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ, ПРАКТИЧЕСКИХ И КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

Практические занятия, лабораторные и контрольные работы выполняются студентами под руководством преподавателя. О проведении практического занятия, лабораторной и контрольной работы обучающимся сообщается заранее: когда предстоит данная работа, какие вопросы нужно повторить, чтобы ее выполнить. Просматриваются задания, оговаривается ее объем и время ее выполнения. Выполнение лабораторной (практической) работы происходит в несколько этапов:

- 1) Предварительная (домашняя) подготовка к выполнению лабораторной работы.

Перед выполнением лабораторных работ студент должен строго выполнить весь объем домашней подготовки; знать, что выполнению каждой работы предшествует проверка

готовности студента.

Подготовка к выполнению лабораторной работы должна включать в себя следующее:

- повторение соответствующего теоретического раздела курса по учебнику и конспекту лекций;
- тщательное изучение содержания работы по руководству и усвоение ее целевого назначения и программы;
- составление заготовки отчета или конспекта каждым студентом отдельно.

Заготовка отчета должна включать в себя: цель и порядок работы, рабочие схемы, таблицы и основные расчетные соотношения.

2) Получение допуска к работе. Знакомство в лаборатории с оборудованием стенда и требованиями техники безопасности.

К выполнению лабораторных работ могут быть допущены студенты, прошедшие инструктаж по ТБ. Инструктаж проводится в учебной группе в начале семестра на первом лабораторном занятии. На этом же занятии студентов знакомят с основными требованиями, предъявляемыми к выполнению лабораторных работ и оформлению отчетов по ним. На последующих занятиях студенты обязаны придерживаться указаний преподавателя в отношении мер предосторожности, а также целесообразной сборки электрических цепей.

Студенты допускаются к лабораторным занятиям, во-первых, только после представления преподавателю отчета по лабораторной работе, выполненной на предыдущем занятии, во-вторых, после того, как представлены каждым студентом заготовки нового отчета. При этом студенты должны показать удовлетворительные знания при ответах на контрольные вопросы на допуск, составленные к данной лабораторной работе, знать порядок выполнения работы.

3) Проведение лабораторной работы и предварительная обработка полученных результатов.

Уяснив последовательность эксперимента, усвоив электрическую схему соединения отдельных элементов цепи, студенты записывают паспортные данные электрических машин, аппаратов, измерительных приборов и элементов исследуемой электрической цепи.

Изучая теоретическое обоснование, студент должен иметь в виду, что основной целью изучения теории является умение применить ее на практике для решения практических задач.

4) Составление отчета и представление его преподавателю.

После выполнения работы студент должен представить отчет о проделанной работе с полученными результатами и выводами и устно ее защитить. Отчеты по лабораторным работам выполняются в отдельной тетради в клетку. Необходимо оставлять поля шириной 25...30 мм для замечаний преподавателя. Содержание отчета должно включать в себя: цель работы, порядок выполнения, электрические схемы, основные расчетные соотношения, таблицы данных наблюдений и расчетов, диаграммы и кривые, выводы по работе, представленные в виде

письменных ответов на вопросы. Все таблицы, графики и диаграммы должны иметь заголовки, поясняющие зависимость, которую они характеризуют. Вычерчивание схем, таблиц, графиков необходимо выполнять чертежным инструментом (линейка, циркуль, лекало и т.д.) карандашом либо чернилами. Элементы схем должны быть вычерчены тщательно с использованием обозначений по ГОСТ. Отчёт по расчётным работам выполняется студентом в сроки, определённые преподавателем.

Дифференцированный зачет выставляется по итогам выполнения и защиты каждой лабораторной работы. При отсутствии студента по неуважительной причине студент выполняет работу самостоятельно, в свое личное время и защищает на консультации по указанию преподавателя.

Неаккуратное выполнение лабораторной работы, несоблюдение принятых правил и плохое оформление чертежей и схем могут послужить причиной возвращения работы для доработки.

## ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТАХ В ЛАБОРАТОРИИ

Лабораторные стенды в лаборатории «Электромеханического оборудования» являются действующими электроустановками, отдельные элементы которых находятся под напряжением. Поэтому при определенных условиях, возникающих из-за нарушения установленных правил, лабораторные стенды могут стать источником поражения человека электрическим током и других видов травматизма. Положение усугубляется еще и особенностю монтажа элементов лабораторного стенда, предусматривающего максимальную доступность учащихся к приборам, машинам и пускорегулирующей аппаратуре, создающего дополнительные опасности при выполнении лабораторных и практических работ.

Тело человека обладает электропроводностью, а поэтому при соприкосновении с двумя неизолированными элементами установки, находящимися под напряжением через тело человека проходит электрический ток. Достигнув опасных значений, этот ток приводит либо к сильным ожогам (электрическая травма), либо к тяжелым поражениям нервной, сердечной и дыхательной систем организма человека (электрический удар). Последствия поражения электрическим током бывают тяжелыми и могут привести к смертельному исходу.

Специфика работы студентов с электрооборудованием состоит в том, что при несоблюдении правил техники безопасности студенты подвергается не только опасности поражения электрическим током, но и опасности механических ударов со стороны вращающихся частей электрических машин и тормозных устройств. Необходимо помнить, что многие элементы схемы лабораторной установки, находящиеся под напряжением, доступны для прикосновения, а вращающиеся части, хотя и имеют обычно защитные устройства, все же не исключают «захвата» частей одежд или механического удара. Поэтому студенты в лаборатории должны соблюдать исключительную осторожность и **Правила техники безопасности:**

- 1) студент, находясь в лаборатории, должен быть предельно дисциплинированным и

внимательным; беспрекословно выполнять все указания преподавателей и лаборантов; находиться непосредственно у исследуемой лабораторной установки;

- 2) запрещается подходить к другим установкам, распределительным щитам и пультам и делать на них какие-либо включения или переключения; включать схему под напряжение, если кто-нибудь касается ее неизолированной токоведущей части; производить какие-либо пересоединения в схеме, находящейся под напряжением; во время работы электрической машины касаться вращающихся частей или наклоняться к ним близко; оставлять без наблюдения лабораторную установку или отдельные приборы под напряжением;
- 3) при перемещениях движков и рукояток пускорегулирующей аппаратуры необходимо следить за тем, чтобы рука была в соприкосновении только с изолированной рукояткой;
- 4) одежда студента не должна иметь свободно свисающих концов шарфов, косынок, галстуков и т. п., а прическа или головной убор должны исключать возможность «свисания» прядей волос;
- 5) если схема содержит конденсаторы, то после ее отключения необходимо разрядить конденсаторы, замкнув накоротко их выводы;
- 6) при работе с лабораторной установкой, находящейся под *напряжением*, студенты должны стоять на изоляционных резиновых ковриках, имеющихся у каждой лабораторной установки;
- 7) о всех замеченных случаях неисправности в работе установок и нарушении правил техники безопасности каждый студент должен немедленно дождаться преподавателя;
- 8) если произошел несчастный случай, лабораторную установку следует немедленно отключить, оказать пострадавшему первую помощь и сообщить об этом преподавателю.

Инструктаж по технике безопасности должен быть зафиксирован в специальном журнале, где каждый студент должен расписаться.

При выполнении лабораторных работ необходимо соблюдать следующие правила техники безопасности:

Категорически запрещается:

- трогать руками оголенные провода и части приборов, находящихся под напряжением, даже если оно не велико;
- прикасаться к вращающимся частям электродвигателей;
- заменять или брать оборудование или приборы с других мест без разрешения преподавателя или лаборанта;

- отходить от приборов и машин, находящихся под напряжением или оставлять схему под напряжением.

Помните, что электрический ток, проходящий через тело человека, величиной в 0,025 А уже является опасным для жизни человека.

## КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ

Критерии оценки сообщаются перед выполнением каждой практической работы оценивается выполнение и защита лабораторных, практических и контрольных работ .

**Оценка «отлично»** Работа выполнена, верно в полном объеме с первого раза на занятии по расписанию, структура отчета полностью соответствует требованиям; изложение материала в отчете логично, последовательно, грамотно; подготовленный отчет демонстрирует свободное владение студентом профессиональной терминологией, умение высказывать и обосновать свои суждения; при защите отчета студент дает четкий, полный, правильный ответ на вопросы преподавателя; подготовленный отчет и ответы студента при его защите демонстрируют умение обучающегося организовать связь теории с практикой, студент достаточно четко формулирует предложения по совершенствованию программы учебной дисциплины.

**Оценка «хорошо»** Работа выполнена в полном объеме, структура отчета в целом соответствует требованиям; подготовленный отчет демонстрирует грамотное изложение материала, умение студента ориентироваться в материале, владение профессиональной терминологией, но содержание и форма ответа имеют отдельные неточности; ответ студента при защите отчета правильный, полный, с незначительными неточностями или недостаточно полный.

**Оценка «удовлетворительно»** Работа выполнена в полном объеме, структура отчета не полностью соответствует требованиям; студент излагает материал в отчете неполно, непоследовательно, допускает неточности в определении понятий, в применении теоретических знаний, не может в полной мере доказательно обосновать свои суждения; обнаруживается недостаточно глубокое понимание изученного материала.

**Оценка «неудовлетворительно»** Работа выполнена с ошибками и недочетами, структура отчета не соответствует требованиям; отсутствуют необходимые теоретические знания; допущены ошибки в определении понятий, искажен их смысл, не четко сформулированы выводы; в ответе студента проявляется незнание основного материала программы дисциплины, допускаются грубые ошибки в изложении.

## ПЕРЕЧЕНЬ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ ИЛИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

№ п\п	Название практических занятий	Количество часов	Формируемые компетенции (в соответствии с ФГОС)
1	<u>Практическое занятие № 1</u> Изучение конструкции электрических машин постоянного тока	2	ПК 1.1, ОК 01,
2	<u>Практическое занятие № 2</u> Расчет параметров обмотки якоря. Выполнение развернутой схемы обмотки якоря машины постоянного тока	4	ПК 1.1, ОК 10
3	<u>Лабораторная работа №1</u> Изучение работы генератора постоянного тока с параллельным, смешанным возбуждением.	2	ОК 04,ОК 02
4	<u>Лабораторная работа № 2</u> Определение координат электропривода с двигателем постоянного тока параллельного возбуждения в генераторном, двигательном и тормозном режимах	2	ОК 04, ОК 09
5	<u>Лабораторная работа № 3</u> Изучение работы двигателя постоянного тока параллельного возбуждения Сборка схемы и включение двигателя. построение характеристик двигателя	2	ОК 04, ОК 01
6	<u>Практическое занятие № 3</u> Изучение конструкции силовых трансформаторов	2	ПК 1.1, ОК 10
7	<u>Лабораторная работа № 4</u> Снятие и определение характеристик холостого хода и короткого замыкания трансформатора замыкания	2	ПК 1.1 ОК 09

8	<u>Практическое занятие № 4</u> Параллельная работа трансформаторов. Изучение условий параллельной работы силовых трансформаторов И распределения нагрузки между ними	2	ПК 1.1 ОК 01
9	<u>Практическое занятие № 5</u> Изучение конструкции асинхронных машин Изучение основных узлов асинхронных машин и их назначение.	2	ПК 1.1, ОК 10
10	<u>Лабораторная работа № 5</u> Определение выводов обмоток статора трехфазного асинхронного двигателя	2	ОК 04 ОК 09
11	<u>Лабораторная работа № 6</u> Изучение работы трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором	2	ОК 04, ОК 02
12	<u>Практическое занятие № 6</u> Расчет параметров асинхронного двигателя. Изучение влияния величины нагрузки на параметры асинхронного двигателя.	2	ПК 1.1 ОК 01
13	<u>Практическое занятие № 7</u> Изучение работы трехфазного синхронного генератора	2	ПК 1.1, ОК 10
14	<u>Лабораторная работа № 7</u> Изучение работы машин постоянного тока специального назначения	2	ОК 04, ОК 09
15	<u>Контрольная работа № 1</u> по теме «Коллекторные машины постоянного тока»	2	ОК 03, ОК 02
16	<u>Контрольная работа № 2</u> по теме «Трансформаторы»	1	ОК 03, ОК 02
17	<u>Контрольная работа № 3</u> по теме «Бесколлекторные машины переменного тока (общие сведения)»	1	ОК 03, ОК 02
Итого		32 ч лабораторных и практических и 4 часа контрольных работ	

# Лабораторные и практические по основной программе ПМ 01

## МДК Электрические машины

### ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 1

#### ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

#### ПОСТОЯННОГО ТОКА

**1. Цель работы:** изучить конструкцию машин постоянного тока, отдельных узлов машин постоянного тока и их взаимодействие, ознакомиться с электротехническими материалами, применяемыми в электрических машинах.

#### **2. Основные понятия.**

Электрические машины постоянного тока используют в качестве генераторов и электродвигателей. По сравнению с электрическими машинами переменного тока у них более высокая стоимость, они сложнее в изготовлении и менее надежны в работе из-за наличия в их конструкции щеточно-коллекторного узла. Поэтому генераторы постоянного тока менее распространены и их заменяют синхронными генераторами, работающими совместно с полупроводниковыми преобразователями переменного тока в постоянный. Однако двигатели постоянного тока находят более широкое применение по сравнению с двигателями переменного тока и имеют следующие преимущества: хорошие пусковые свойства, значительную перегрузочную способность, благоприятные механические характеристики, возможность плавного и глубокого регулирования частоты вращения. Двигатели постоянного тока используют в электрокарах, автомобилях и тракторах с бортовой электрической сетью постоянного тока; во всевозможных автоматизированных приводах, например, в установках приготовления гранулированного зеленого корма типа АВМ. Генераторы применяют в сварочных установках, устройствах заряда аккумуляторов.

##### 2.1. Основные законы.

###### 2.1.1. Закон Ампера.

Принцип действия электрической машины основан на физических явлениях открытых Фарадеем и Ампером. Физическое явление, открытое Ампером, состоит в том, что если проводник, по которому течет ток, находится в магнитном поле, на каждый из носителей тока действует сила. От носителя тока действие этой силы передается проводнику, по которому он перемещается. В результате на проводник с током, находящийся в магнитном поле, действует сила. Соотношение величин было установлено экспериментально Ампером и носит название *закона Ампера*: если проводник длиной  $L$ , по которому проходит

электрический ток  $I$ , поместить в магнитное поле с индукцией  $B$  перпендикулярно магнитным силовым линиям, то на проводник будет действовать выталкивающая сила:

$$F = IB L.$$

Направление действия этой силы определяется по правилу левой руки. *Правило левой руки* — правило определения направления механической силы, действующей на проводник с током, помещенный в магнитное поле: если расположить левую руку таким образом, что силовые линии магнитного поля будут входить в ладонь, а вытянутые пальцы направить по току, то отогнутый большой палец покажет направление действующей силы. Векторы силовых линий, тока и силы расположены под углом  $90^\circ$ .

### 2.1.2. Закон Фарадея.

В 1831 г. Фарадеем сформулирован закон электромагнитной индукции: если проводник пересекает магнитное поле, то в нем индуцируется ЭДС, величина которой пропорциональна интенсивности магнитного поля  $B$ , длине проводника  $L$  и скорости его перемещения  $V$  в магнитном поле:

$$e = B L V.$$

Направление ЭДС определяют по *правилу правой руки*: если правую руку расположить таким образом, что силовые линии магнитного поля будут входить в ладонь, а отогнутый под углом  $90^\circ$  большой палец будет показывать направление перемещения проводника, то четыре вытянутых пальца покажут направление ЭДС. Векторы силовых линий, скорости и ЭДС расположены под углом  $90^\circ$ .

### 2.2. Рабочий процесс генератора постоянного тока.

*Генератор постоянного тока* — вращающаяся электрическая машина постоянного тока, предназначенная для преобразования механической энергии в электрическую постоянного тока.

*Рабочий процесс ГПТ* можно условно разделить на 4 стадии:

1 — «воздуждение». Обмотка возбуждения, расположенная на полюсах, подключается к источнику постоянного напряжения. Под действием приложенного напряжения по обмотке потечет ток возбуждения, который создает основной магнитный поток. Этот магнитный поток замыкается по магнитной цепи генератора, пронизывая обмотку якоря.

2 — «подведение первичной энергии». Якорь приводится во вращение первичным двигателем.

3 — «преобразование энергии». Вращающиеся проводники якоря пересекают основной магнитный поток. Это индуцирует электродвижущие силы ЭДС

в проводниках обмотки якоря. ЭДС проводников через коллектор и щетки выводится на зажимы генератора. Таким образом, в режиме холостого хода напряжение генератора равно ЭДС, а мощность первичного двигателя затрачивается на покрытие потерь холостого хода.

4 — «передача энергии нагрузке». К зажимам генератора подключается электрическая нагрузка. Под действием напряжения по нагрузке и обмотке якоря протекает ток. Ток обмотки создает магнитный поток, называемый магнитным потоком реакции якоря. Взаимодействие потоков возбуждения и реакции якоря создает тормозной электромагнитный момент, преодолевая который первичный двигатель затрачивает механическую энергию, а генератор превращает ее в электрическую.

При вращении с помощью первичного двигателя ротора генератора постоянного тока в магнитном поле, образованном обмоткой возбуждения, в обмотке якоря в соответствии с законом электромагнитной индукции наводится ЭДС. Максимальное значение ЭДС будет иметь место при расположении стороны катушки под магнитным полюсом. При пересечении обмоткой якоря оси геометрической нейтрали ЭДС обращается в нуль, при дальнейшем повороте ротора изменяет знак на противоположный. Для выпрямления, возникающего в обмотке якоря переменного напряжения, используется коллектор, благодаря чему со щеток генератора снимается напряжение постоянного тока с незначительным уровнем пульсаций. Значение напряжения на зажимах обмотки якоря определяется частотой вращения и током возбуждения. Выходные характеристики генератора зависят от способа возбуждения (электромагнитное или от постоянных магнитов) и от схемы включения обмотки возбуждения по отношению к обмотке якоря. На практике используются генераторы постоянного тока с параллельным, последовательным и смешанным электромагнитным возбуждением.

### 2.3. Рабочий процесс двигателя постоянного тока.

*Двигатель постоянного тока (ДПТ) — машина постоянного тока, предназначенная для преобразования электрической энергии постоянного тока в механическую.*

При подключении ДПТ к питающей сети постоянного тока через обмотки якоря и возбуждения протекает постоянный ток, создающий собственные магнитные потоки. В результате взаимодействия потоков образуется вращающий момент.

*Рабочий процесс ДПТ можно условно разделить на 4 стадии:*

1 — «возбуждение». На обмотку возбуждения полюсов подключается по-

стоянное напряжение. По обмотке потечет ток якоря, создающий магнитный поток, замыкающийся по магнитной цепи и воздушному зазору;

2 — «подведение первичной энергии». На обмотку якоря подводится постоянное напряжение. По обмотке якоря потечет ток;

3 — «преобразование энергии». По закону Ампера на проводники с током, помещенные в магнитное поле действует электромагнитная выталкивающая сила. Якорь начинает вращаться с частотой  $n$ . Также в проводниках якоря, вращающихся в магнитном поле, наводится ЭДС. Эта ЭДС направлена против тока и называется противо-ЭДС;

4 — «подключение нагрузки». К валу двигателя подключают механическую нагрузку, которая создает тормозной момент. Вал двигателя замедляет вращение, что уменьшает противо-ЭДС. Нарушается электрическое равновесие  $i=E$ . Для его восстановления из сети потребляется больший ток, который увеличивает частоту вращения и противо-ЭДС.

#### 2.4. Конструкция машины постоянного тока.

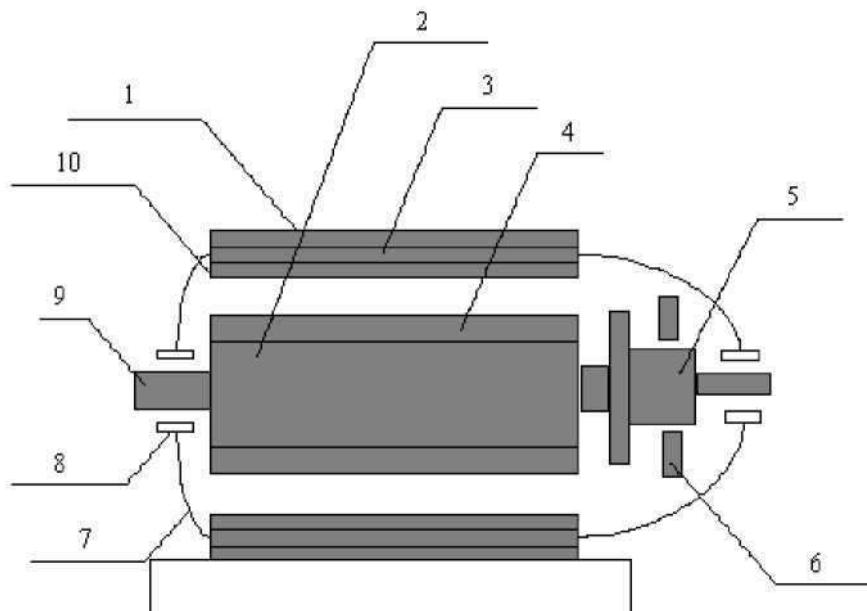


Рис. 1. Конструктивная схема машины постоянного тока:

1 — станина (ярмо); 2 — сердечник якоря; 3 — сердечник главных полюсов;

4 — обмотка якоря; 5 — коллектор; 6 — щеточный аппарат; 7 — подшипниковые щиты; 8 — подшипники; 9 — вал; 10 — обмотка возбуждения.

*Станина 1* служит для крепления полюсов и подшипниковых щитов и является частью магнитопровода, так как через нее замыкается магнитный поток машины. Станину изготавлиают из стали — материала, обладающего достаточной механической прочностью и большой магнитной проницаемостью. В нижней части станины имеются лапы для крепления машины к фундаментальной плите, а по окружности станины расположены отверстия для крепления *сердечников главных полюсов 3*. Обычно станину делают цельной из стальной трубы, либо сварной из листовой стали, за исключением машин с весьма большим наружным диаметром, у которых станину делают разъемной, что облегчает транспортировку и монтаж машины.

**Индуктор** — узел, назначением которого является создание в машине основного магнитного поля (потока). Это неподвижная часть машины. Индуктор состоит из *обмотки возбуждения* и *сердечников полюсов* (магнитное поле может создаваться постоянными магнитами, но при этом возникает сложность регулировки величины магнитного потока).

*Сердечники главных полюсов* предназначены для создания основного магнитного потока машины. Со стороны, обращенной к якорю, сердечник полюса имеет полюсный наконечник, который обеспечивает необходимое распределение магнитной индукции в зазоре машины. Сердечники главных полюсов делают шихтованными из листовой конструкционной стали толщиной 1-2 мм или из тонколистовой электротехнической анизотропной холоднокатаной стали, например марки 3411. Штампованные пластины главных полюсов специально не изолируют, так как тонкая пленка окисла на их поверхности достаточна для значительного ослабления вихревых токов, наведенных в полюсных наконечниках пульсациями магнитного потока, вызванного зубчатостью сердечника якоря. Анизотропная сталь обладает повышенной магнитной проницаемостью вдоль проката, что должно учитываться при штамповке пластин и их сборке в пакет. Пониженная магнитная проницаемость поперек проката способствует ослаблению реакции якоря и уменьшению потока рассеяния главных и добавочных полюсов.

Кроме главных полюсов в машинах мощностью более 0,5 кВт устанавливаются дополнительные полюса, которые служат для улучшения токосъема (коммутации) с коллектора. Главные и дополнительные полюса крепятся к ярму болтами. Число главных полюсов, создающих основной магнитный поток в машине, всегда четное, причем «северные» и «южные» чередующиеся, что достигается особым соединением катушек возбуждения.

Массивное **ярмо** одновременно является станиной, к которой крепятся неподвижные части машины и с помощью которой машина крепится к основанию.

*Обмотки возбуждения* предназначены для подведения к ним постоянного тока, создающего основной магнитный поток. Они выполняются из изолированного провода круглого или прямоугольного сечения марок ПЭЛ, ПЭВ-1, ПЭВ-2, ПЭМ-1, ПЭМ-2, ПЭВЛ и др. В машинах постоянного тока небольшой мощности полюсные катушки делают бескаркасными — намоткой обмоточного провода непосредственно на сердечник полюса, предварительно наложив на него изоляционную прокладку. В большинстве машин (мощностью 1 кВт и более) полюсную катушку делают каркасной: обмоточный провод наматывают на каркас (обычно пластмассовый), а затем надевают на сердечник полюса.

Т. о. основной поток создается обмоткой возбуждения, по которой проникает постоянный ток, а сердечник полюса и ярмо служат в роли магнитопровода, т. к. имеют высокую магнитную проницаемость.

**Якорь** — часть электрической машины, в которой преобразуется электрическая энергия. Якорь машины постоянного тока состоит из вала 9, сердечника 2 с обмоткой 4 и коллектора 5.

*Сердечник якоря* служит для крепления обмотки и является частью магнитопровода машины. Сердечник якоря имеет шихтованную конструкцию и набирается из штампованных пластин тонколистовой электротехнической стали. Листы покрывают изоляционным лаком, собирают в пакет и запекают. Головковый сердечник напрессовывают на вал якоря. Такая конструкция сердечника якоря позволяет значительно ослабить в нем вихревые токи, возникающие в результате его перемагничивания в процессе вращения в магнитном поле. На поверхности сердечника якоря имеются продольные пазы, в которые укладывают обмотку якоря.

*Обмотка якоря* в двигателе служит для получения вращающегося момента, когда к ней подведен ток, и она находится под действием поля возбуждения. В генераторе в обмотке наводится ЭДС, когда она вращается в магнитном поле возбуждения. Обмотку выполняют медным проводом круглого или прямоугольного сечения. Пазы якоря после заполнения их проводами обмотки обычно закрывают клиньями (текстолитовыми или гетинаксовыми). В некоторых машинах пазы не закрывают клиньями, а накладывают на поверхность якоря бандаж. Бандаж делают из проволоки или стеклоленты с предварительным натягом. Лобовые части обмотки якоря крепят к обмоткодержателям бандажом. Концы обмоток выведены на зажимы коробки выводов.

*Коллектор* служит для подведения напряжения к обмотке якоря (двигатель постоянного тока) и отведения напряжения (генератор постоянного тока). Он также является механическим выпрямителем в генераторе, т. е. преобразовывает переменный ток обмотки якоря в постоянный ток внешней цепи. Коллектор состоит из медных пластин 3-15 мм, изолированных друг от друга. Пакет коллектора

скрепляется с помощью напаянных фланцев стяжными болтами и крепится на валу с помощью шпонки. Проводники обмотки якоря соединяются пайкой с коллектором через петушки особым образом.

Вал служит либо для передачи вращающего момента электродвигателя к приводимому механизму, либо для передачи вращающего момента генератору от соединенного с ним первичного двигателя, а также для крепления на нем якоря и коллектора.

*Щеточный аппарат* служит для отвода тока от вращающегося коллектора или подвода к нему тока. Он состоит из траверсы, щеточных пальцев, щеткодержателей (обойма, нажимная пружина, колодки для крепления к пальцу), щеток, токосбирающих шин. Число щеточных пальцев равно числу главных полюсов. Полярность их чередуется, и все они (одной полярности) соединяются между сборными шинами, которые соединяются с выводными зажимами или с другими обмотками машины. Траверса крепится или к станине, или к втулке подшипникового щита.

*Подшипниковые щиты* служат для крепления в них вала и для защиты от попадания внутрь машины посторонних предметов. Концы вала крепятся в подшипниках, запрессованных в подшипниковые щиты. Для охлаждения машины устанавливают крыльчатку (вентилятор). В щитах делаются отверстия для забора и отвода воздуха.

Части машины, несущие механическую нагрузку (ярмо или станина), изготавливаются из конструктивных материалов, применяемых в общем машиностроении. Это сталь, чугун, цветные металлы и их сплавы. Сердечники дополнительных и главных полюсов набираются из листов магнитопроводящего материала, которым является легированная электротехническая сталь, содержащая от 2 до 5 % кремния. Присадка кремния увеличивает удельное электрическое сопротивление стали, в результате чего уменьшаются потери на вихревые токи, сталь становится устойчивой к окислению и старению. Графитные щетки изготавливают из натурального графита без связующих (мягкие сорта) и с применением связующих (твёрдые сорта). Угольно-графитовые щетки изготавливают из графита с введением других углеродистых материалов (кокс, сажа) и связующих веществ. Электрографитированные щетки изготавливают из графита и других углеродистых материалов (кокс, сажа) с введением связующих веществ после первой термической обработки щетки подвергают графитизации — отжигу при 2500-2800 °С. Металлографитовые щетки изготавливают из смеси порошков графита и меди. В некоторые из них вводят порошки свинца, олова или серебра. Эти щетки отличаются малым значением удельного сопротивления, допускают большие плотности тока и имеют малые переходные падения напряжения. Подшипниковые

щиты изготавливаются из того же материала, что и станина или иных сплавов на основе алюминия.

Особенностью электрических машин является тесное сочетание металлов и изоляции, т. е. материалов, имеющих различные тепловые характеристики. В настоящее время в электрических машинах применяются изоляционные материалы классов нагревостойкости Е, В, F (ГОСТ 8865-70). Материалы класса Н используются значительно реже; материалы классов нагревостойкости У и А в современных электрических машинах практически не применяются.

Основной серией машин постоянного тока общего назначения, которую выпускает в настоящее время отечественная промышленность, является серия 2П. Основное исполнение серии 2П охватывает диапазон мощностей от 0,37 до 200 кВт. Машины серии выполняют с высотой от вращения оси 80 до 315 мм. Номинальное напряжение якорной цепи 110, 220, 440, 600 В. Возбуждение независимое, V 110 или 220 В. Шкала номинальных частот вращения — 3000, 1500, 1000, 750, 600, 500 об/мин. Частота вращения двигателей может регулироваться как изменением напряжения якорной цепи, так и уменьшением тока возбуждения. По степени защиты от воздействия окружающей среды двигатели серии 2П имеют два исполнения: IP 22 и IP44 (по ГОСТ 17494-87). Электродвигатели с высотой оси вращения  $h < 100$  мм выполняются двухполюсными, а с  $h > 112$  мм — четырехполюсными. Режим работы машин серии 2П продолжительный. Средний срок службы 12 лет, средний ресурс 30 000 ч.

2П X XXX X X XXXX 1 2

3 4 5 6,

где 1 — наименование серии; 2 — исполнение по степени защиты и вентиляции (Н, Ф, Б, О); 3 — высота оси вращения; 4 — условная длина (М или L); 5 — наличие встроенного тахометра (при его наличии — индекс Г, при отсутствии Г не ставится); 6 — климатическое исполнение и категория размещения по ГОСТ 15150-69.

В настоящее время практически освоена новая серия машин постоянного тока — серия 4П. По сравнению с серией 2П она имеет улучшенные малогабаритные показатели. У всех машин серии 4П имеется распределенная компенсационная обмотка, а магнитопроводы статора и якоря у них выполняются шихтованными. У ряда машин серии 4П статоры выполнены по типу статоров асинхронных двигателей и не имеют явновыраженных полюсов. Компенсационная обмотка, а иногда и обмотка возбуждения равномерно распределенная по пазам. Такое выполнение статора позволяет при его изготовлении применять хорошо отработанную технологию производства статоров асинхронных двигателей, что снижает трудоемкость изготовления в 2,5 раза и уменьшает материалоемкость на 15-20 %.

### **3. Содержание и методика выполнения работы.**

Для выполнения работы необходимо:

- изучить физические явления, на которых основан принцип действия машин постоянного тока;
- записать паспортные данные электрической машины постоянного тока, установленной на стенде;
- разобрать электрическую машину;
- изучить состав, устройство и назначение узлов машины постоянного тока;
- определить материалы, из которых изготовлены узлы электрической машины и способ охлаждения машины;
- изучить принцип взаимодействия узлов машины, составить конструктивную схему;
- изучить обозначения выводов обмоток машины постоянного тока;
- собрать электрическую машину;
- в отчете поместить паспортные данные машины, конструктивную схему, наименование, материал и назначение узлов электрической машины.

### **4. Порядок выполнения работы.**

4.1. Получить допуск к работе. Для этого необходимо:

заготовить бланк отчета;

ознакомиться с электрической машиной, установленной на стенде; записать паспортные данные электрической машины; отчитаться преподавателю по вопросам: какова цель работы, порядок ее выполнения.

4.2. Произвести внешний осмотр машины, определить назначение (двигатель, генератор) и наметить порядок разборки.

4.3. Разобрать машину, при этом запомнить (отметить) расположение узлов, чтобы правильно произвести сборку машины.

4.4. Определить наименование и назначение каждого узла машины.

4.5. Записать в отчет наименование всех имеющихся узлов машины.

4.6. Изучить устройство каждого узла и принцип его работы.

4.7. Изучить принцип взаимодействия узлов машины.

4.8. Определить ориентировочно, из какого материала изготовлен каждый узел.

4.9. Определить способ охлаждения машины.

4.10. Собрать машину, сдать рабочее место лаборанту.

4.11. Выполнить письменно отчет по прилагаемой форме на листах формата А4 и сдать преподавателю.

### **5. Контрольные вопросы.**

5.1. Опишите область применения машин постоянного тока.

- 5.2. Объясните закон Ампера и правило левой руки.
- 5.3. Объясните закон Фарадея и правило правой руки.
- 5.4. Объясните рабочий процесс двигателя постоянного тока.
- 5.5. Объясните рабочий процесс генератора постоянного тока.
- 5.6. Составить конструктивную схему машины постоянного тока.
- 5.7. Объяснить назначение и описать устройство индуктора и его элементов.
- 5.8. Объяснить назначение и описать устройство якоря и его элементов.
- 5.9. Объяснить назначение и описать устройство подшипниковых щитов, вентилятора и щеточного аппарата.
- 5.10. Описать материалы, применяемые в электрических машинах.
- 5.11. Описать марки электрических машин постоянного тока.

**ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 2**  
**РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ И ВЫПОЛНЕНИЕ РАЗВЁРНУТОЙ СХЕМЫ**  
**ОБМОТКИ ЯКОРЯ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

**Цель работы:** научиться определять параметры обмотки якоря расчетным методом и строить ее развернутую схему, используя знания, полученные на теоретических занятиях.

**Задание:** по исходных данным, приведенным в таблице, рассчитать параметры и начертить развернутую схему простой петлевой (ПП) или простой волновой (ПВ) обмотки якоря. На схеме необходимо обозначить полюсы, расставить щетки и, задавшись направлением вращения якоря, определить полярность щеток в генераторном режиме.

Исходные данные для расчета параметров обмотки якоря:

Величины	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Число пазов - $Z$	20	25	33	32	23	24	29	30	27	28
Число полюсов - $2p$	4	6	8	4	4	8	4	6	4	6
Тип обмотки	ПП	ПВ	ПВ	ПП	ПВ	ПП	ПВ	ПП	ПВ	ПП

Определить: число секций  $S$ , число коллекторных пластин в коллекторе  $K$ , первый частичный шаг по якорю  $u_1$ , второй частичный шаг по якорю  $u_2$ , результирующий шаг по якорю  $u$ , шаг по коллектору  $u_k$  и число параллельных ветвей обмотки якоря  $2a$ .

Примечание: направление укладки секций обмотки якоря принять произвольно.

**Этапы построения развернутой схемы простой петлевой обмотки якоря (в качестве примеры рассматривается ПП обмотка с числом секций  $S = 12$ ):**

1. Прежде чем приступить к выполнению схемы обмотки, необходимо отметить и пронумеровать все пазы и секции, нанести на предполагаемую схему контуры магнитных полюсов и указать их полярность (рис. 1).

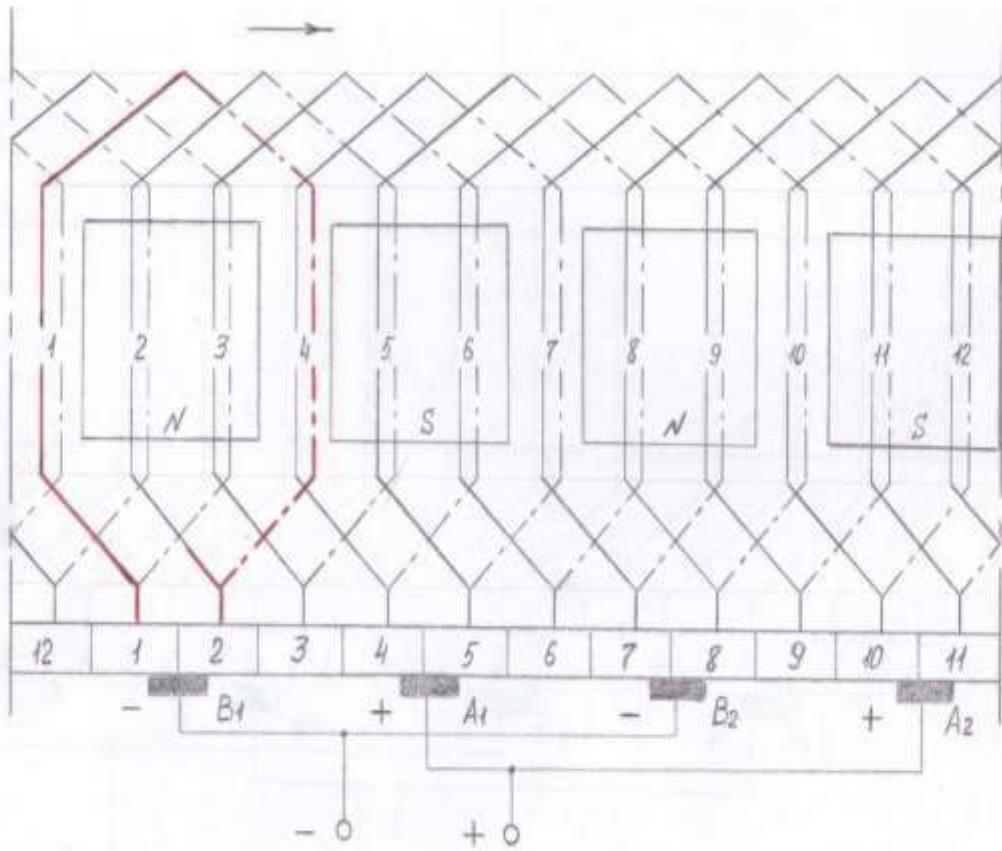


Рис. 1 Развёрнутая схема простой петлевой обмотки (число секций  $S=12$ ,  $2p=4$ )

2. Затем изображают коллекторные пластины и наносят на схему первую секцию, пазовые части которой располагаются в пазах 1 и 4. Коллекторные пластины, к которым присоединены начало и конец этой секции, обозначают 1 и 2. Затем нумеруют все остальные пластины и наносят на схему остальные секции (2, 3, 4 и т.д.) последняя секция 12 должна замкнуть обмотку, что будет свидетельствовать о правильном выполнении схемы.

3. Далее на схеме изображают щетки. Расстояние между щетками  $A$  и  $B$  должно быть равно  $K/(2p) = 12/4 = 3$ , т.е. должно соответствовать полюсному делению. Располагают щетки на коллекторе по оси главных полюсов. При определении полярности щеток предполагают, что машина работает в генераторном режиме и ее якорь вращается в направлении стрелки (рис. 1). Тогда получаем, что щетки  $A_1$  и  $A_2$ , от которых ток отводится во внешнюю цепь, являются положительными, а щетки  $B_1$  и  $B_2$  – отрицательными. Щетки одинаковой полярности присоединяют параллельно к выводам соответствующей полярности.

**Этапы построения развернутой схемы простой волновой обмотки якоря (в качестве примера рассматривается ПВ обмотка с числом секций  $S = 13$ ):**

1. Прежде чем приступить к выполнению схемы обмотки, необходимо отметить и пронумеровать все пазы и секции нанести на предполагаемую схему контуры магнитных полюсов и указать их полярность (рис 2).

2. Затем изображают коллекторные пластины и начинают наносить схему секций. Необходимо помнить, что ПВ обмотку получают при последовательном соединении секций, находящихся под разными парами полюсов. Концы секций ПВ обмотки присоединяют к коллекторным пластинам, удаленным друг от друга на расстояние шага обмотки по коллекторному  $y_k = y$ . За один обход по якорю укладывают столько секций, сколько пар полюсов имеет машина, при этом конец последней по обходу секций присоединяют к пластине, расположенной рядом с исходной.

Т.о., при первом обходе укладываем секции 1 и 7 (рис. 2). При втором обходе укладываем секции 13 и 6 и т.д. пока не будут уложены все 13 секций и обмотка не окажется замкнутой.

3. Щетки на схеме ПВ обмотки изображают также как на схеме ПП обмотки.

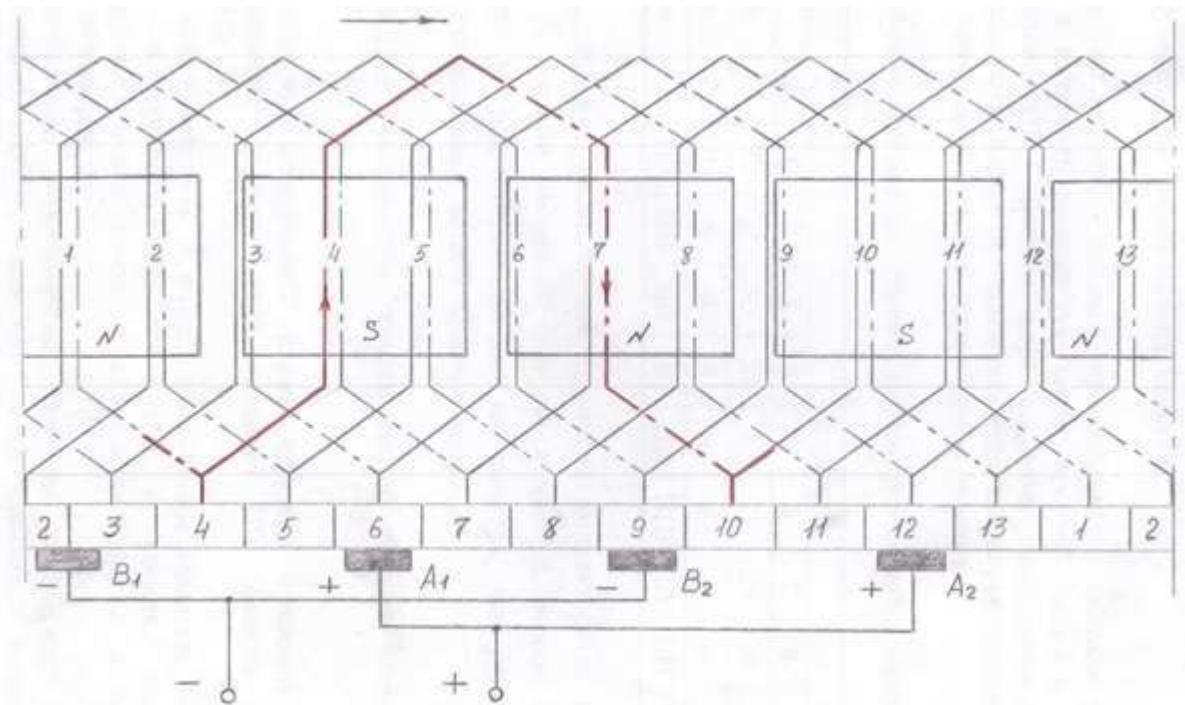


Рис. 2 Развёрнутая схема простой волновой обмотки (число секций  $S=13$ ,  $2p=4$ )

Пример №1. Рассчитать шаги и выполнить развернутую схему простой петлевой обмотки якоря для четырехполюсной ( $2p=4$ ) машины постоянного тока. Обмотка правоходовая, содержит 12 секций.

Решение: Первый частичный шаг по якорю по  $y_1 = (Z_a/2p) \pm \epsilon = 12/4 = 3$  паза.

Второй частичный шаг по якорю по  $y_2 = y_1 - y = 3 - 1 = 2$  паза.

Пример №2. Шестиполюсная машина постоянного тока имеет на якоре простую петлевую обмотку из 36 секций. Определить ЭДС и величину тока машины, если в каждой секции наводится ЭДС 10 В, а сечение провода секции рассчитано на ток не более 15 А.

Решение. Число параллельных ветвей в обмотке  $2a=2p=6$ , при этом в каждой ветви  $S_{n.e.} = S/(2a) = 36/6 = 6$  секций. Следовательно, ЭДС машины  $E_a = 6*10 = 60$  В, а допустимый ток машины  $I_a = 6*15 = 90$  А.

Если машина при прочих неизменных условиях имела бы восемь полюсов, то ее ЭДС уменьшилась бы до 40 В, а ток увеличился бы до 120 А.

Пример №3. Четырехполюсная машина постоянного тока имеет сложную петлевую обмотку якоря из 16 секций. Выполнить развернутую схему этой обмотки, приняв  $m=2$ .

Решение. Шаги обмотки  $y_1 = (Z_a/2p) \pm \varepsilon = 16/4 = 4$  паза;  $y = y_k = m = 2$  паза;  $y_2 = y_1 - y = 4 - 2 = 2$  паза.

Пример №4. Четырехполюсная машина постоянного тока имеет простую волновую обмотку якоря из 13 секций. Построить развернутую схему и схему параллельных ветвей этой обмотки.

Решение. Шаги обмотки:  $y_k = y = (K \pm 1)/p = (13 - 1)/2 = 6$  пазов;  $y_1 = (Z_a/2p) \pm \varepsilon = (13/4) - 0.25 = 3$  паза;  $y_2 = y - y_1 = 6 - 3 = 3$  паза.

Контрольные вопросы:

1. Что такое обмотка якоря?
2. Что является элементом обмотки якоря?
3. Какие основные требования предъявляются к обмотке якоря?
4. Сколько параллельных ветвей имеет обмотка якоря шестиполюсной машины в случаях ПП и ПВ обмотки?

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ, СМЕШАННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ.

## Задача № 1 (варианты 1 – 20)

Генератор постоянного тока с параллельным возбуждением отдает полезную мощность  $P_2$  при напряжении  $U_{\text{ном}}$ . Ток в нагрузке  $I_h$ ; ток в цепи якоря  $I_a$ , ток в обмотке возбуждения  $I_b$ . Сопротивления цепи якоря  $R_a$ , обмотки возбуждения  $R_b$ ; ЭДС генератора  $E$ . Генератор приводится во вращение двигателем мощностью  $P_d$ . Электромагнитная мощность, развиваемая генератором, равна  $P_{\text{эм}}$ . Потери мощности в цепи  $P_a$ , в обмотке возбуждения  $P_b$ . Суммарные потери мощности составляют  $\Sigma P$ ; КПД генератора  $\eta_g$ . Определить величины указанные в таблице № 10 прочерками.

Таблица № 1

№ вар	$P_d$ , кВт	$P_2$ , кВт	$P_{\text{эм}}$ , кВт	$P_a$ , кВт	$P_b$ , Вт	$\Sigma P$ , Вт	$I_h$ , А	$I_a$ , А	$I_b$ , А	$U_{\text{ном}}$ , В	$E$ , В	$R_a$ , Ом	$R_b$ , Ом	$\eta_g$
01	23,4	-	22	-	-	-	-	-	-	430	440	-	215	-
02	-	20,6	-	-	-	2,8	48	-	-	-	440	0,2	-	-
03	-	20,6	-	0,5	-	-	48	-	2	-	-	-	-	0,88
04	-	20,6	-	-	-	-	48	-	-	430	440	0,2	-	0,88
05	-	-	-	-	-	-	48	50	-	-	-	0,2	215	0,88
06	23,4	-	-	-	-	-	-	-	2	430	440	-	-	-
07	-	20,6	-	0,5	0,86	-	-	-	-	-	-	0,2	215	0,88
08	-	-	-	-	-	2,8	-	50	2	430	-	0,2	-	-
09	23,4	-	22	0,5	-	-	48	-	2	-	440	-	-	0,88
10	-	-	23,5	-	0,86	-	-	-	-	-	440	-	-	0,88

Продолжение таблица № 1

№ вар	$P_d$ , кВт	$P_2$ , кВт	$P_{\text{эм}}$ , кВт	$P_a$ , кВт	$P_b$ , Вт	$\Sigma P$ , Вт	$I_h$ , А	$I_a$ , А	$I_b$ , А	$U_{\text{ном}}$ , В	$E$ , В	$R_a$ , Ом	$R_b$ , Ом	$\eta_g$
11	-	-	-	1,5	-	3,8	98	100	-	-	-	0,15	-	-
12	25,4	-	-	1,5	-	3,8	-	-	2	220	-	-	-	-
13	-	-	23,5	-	0,44	-	-	100	-	220	-	-	-	0,85
14	25,4	-	-	-	-	3,8	-	-	-	-	235	-	110	-
15	25,4	21,6	23,5	-	-	-	98	100	-	-	-	0,15	-	-
16	-	21,6	-	-	-	-	98	100	-	-	-	-	-	0,85
17	-	21,6	-	-	0,44	-	-	-	-	220	-	0,15	-	0,85
18	-	-	-	-	0,44	-	-	100	-	-	235	0,15	-	0,85
19	25,4	-	-	-	-	-	-	-	100	-	220	235	-	110
20	-	-	-	-	-	-	98	-	-	220	-	0,15	110	0,85

## Задача № 2 (варианты 21 – 30)

Генератор постоянного тока смешанного возбуждения отдает полезную мощность  $P_g$  при напряжении  $U_{\text{ном}}$ . Ток в нагрузке  $I_h$ ; ток в цепи якоря  $I_a$ , ток в параллельной обмотке возбуждения  $I_b$ . Сопротивления  $R_h$ , обмотке якоря  $R_a$ , последовательной обмотки возбуждения  $R_b$ , параллельной обмотки возбуждения  $R_b$ ; ЭДС генератора  $E$ . Генератор приводится во вращение двигателем мощностью  $P_d$ . Электромагнитная мощность, развиваемая генератором, равна  $P_{\text{эм}}$ . Суммарные потери мощности составляют  $\Sigma P$ ; КПД генератора  $\eta_g$ . Определить величины указанные в таблице № 2 прочерками.

Таблица № 2

№ вар	Р <sub>Г</sub> , кВт	Р <sub>д</sub> , кВт	Р <sub>ЭМ</sub> , кВт	ΣР, кВт	I <sub>h</sub> , А	I <sub>a</sub> , А	I <sub>b</sub> , А	U <sub>ном</sub> , В	E, В	R <sub>a</sub> , Ом	R <sub>b</sub> , Ом	R <sub>nc</sub> , Ом	R <sub>h</sub> , Ом	η <sub>Г</sub>
21	-	10	-	-	-	-	2	220	230	-	-	0,15	-	0,87
22	42,3	-	-	-	-	-	4	-	460	-	-	0,08	4,58	0,9
23	-	2,59	-	-	-	22	-	-	115	-	55	0,03	5,5	0,85
24	4	5	-	-	-	-	5	220	-	0,25	-	0,2	-	-
25	-	2,5	-	-	18	-	2	110	-	0,3	100	0,2	-	-
26	16,4	20	-	-	-	-	2,2	-	238	0,09	-	-	2,95	-
27	-	-	-	-	39,5	41,5	-	-	230	0,09	110	-	5,57	0,87
28	-	-	-	-	20	-	-	110	115	0,2	55	-	-	0,85
29	8,1	-	-	-	-	77	-	110	-	0,12	-	0,08	-	0,85
30	-	47	-	-	96	-	-	-	-	0,12	110	0,08	-	0,9

**Задача № 3**

Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения развивает полезную мощность на валу  $P_2$ , потребляя из сети ток  $I$  при напряжении  $U_{ном}$ . Ток в обмотке якоря  $I_a$ , возбуждения  $I_b$ , частота вращения якоря  $n_2$ . Двигатель потребляет из сети мощность  $P_1$ . Полезный врачающий момент двигателя  $M$ . В якоре двигателя наводится противо – ЭДС  $E$ . Суммарные потери в двигателе составляют  $ΣP$ , а его КПД  $η_d$ . Определить величины указанные в таблице № 3 прочеркками. Начертить механическую характеристику двигателя.

Таблица 3

№ вар	P <sub>1</sub> , кВт	P <sub>2</sub> , кВт	ΣP, кВт	U <sub>ном</sub> , В	E, В	I <sub>h</sub> , А	I <sub>a</sub> , А	I <sub>b</sub> , А	R <sub>a</sub> , Ом	R <sub>b</sub> , Ом	M, Нм	n <sub>2</sub> , об/мин	η <sub>д</sub>
01	-	-	-	100	-	-	1	0,282	110	-	1600	0,8	
02	10	-	-	430	410	-	-	-	-	215	-	850	0,85
03	-	17	-	220	-	-	-	2,2	0,125	-	162	-	0,85
04	-	8,5	-	-	410	-	21,3	-	0,94	-	95,5	-	0,85
05	-	-	-	-	36,4	-	-	0,282	110	19,1	1600	0,8	
06	-	-	-	220	-	81,8	79,6	-	0,125	-	162	1000	-
07	20	-	-	220	210	-	-	-	-	100	-	1000	0,85
08	4	3,2	-	-	-	-	35,4	1	0,282	-	-	1600	-
09	-	-	-	-	410	23,3	21,3	-	-	215	95,5	850	-
10	-	3,2	-	110	100	36,4	35,4	-	-	-	19,1	-	-
11	-	1.5	0,3	220	-	-	6,8	-	0,8	-	-	1600	-
12	22	-	4	-	420	50	-	-	0,5	-	-	850	-
13	10	-	-	220	-	-	-	0,1	110	162	-	0,86	
14	-	-	-	110	100	20	-	2	-	-	15,5	-	0,9
15	3,5	-	0,5	-	208	15,9	-	2	-	-	-	1600	-
16	-	100	-	-	420	-	240	12	-	-	-	1000	0,9
17	3,8	3,2	-	110	-	-	-	1	0,2	-	-	1000	-
18	-	10	2,5	-	-	-	-	1,8	0,08	122	-	1600	-
19	10	-	-	220	206	-	-	2	-	-	95,5	850	0,88
20	4,84	-	-	-	210	22	20	-	-	-	19,1	-	0,8
21	-	-	2,4	-	420	54,4	-	-	-	100	-	1600	0,9
22	-	13	-	110	-	-	-	5,2	0,025	-	-	850	0,91
23	-	6	1	220	-	-	-	1,8	0,44	-	162	-	-
24	100	-	-	440	-	-	-	17	0,08	-	95,5	-	0,92

25	8	-	-	-	-	72,8	-	-	0,1	39,3	41,8	1600	0,88
26	3,5	-	-	-	-	-	-	1	0,6	220	162	1000	0,85
27	10	-	2	220	208	-	40	-	-	-	-	1000	-
28	-	18	-	-	-	-	43	2,9	0,27	-	-	1600	0,89
29	-	40	-	440	-	100	-	-	0,1	100	-	850	-
30	-	-	-	220	-	15	-	-	0,93	110	19,1	-	0,88

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ В ГЕНЕРАТОРНОМ, ДВИГАТЕЛЬНОМ И ТОРМОЗНОМ РЕЖИМАХ

Цель: Опытным путем исследовать режимы работы ДПТ

### Студент должен знать:

- принцип действия и устройство двигателя постоянного тока,
  - Характеристики и назначение генераторного, двигательного и тормозного режимов

уметь:

- рассчитывать и строить рабочие и регулировочные характеристики двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.

## Содержание

- Теоретическое обоснование
  - Схемы электрические соединений
  - Перечень аппаратуры
  - Указания по проведению экспериментов

## Теоретическое обоснование Режимы работы ДПТ.

Любая машина постоянного тока обладает свойством обратимости, т.е. она может работать как в генераторном, так и в двигательном режиме при изменении знака момента нагрузки на ее валу или при изменении напряжения на якоре.

Генераторный режим работы машины – такой режим, при котором ток якоря и ЭДС  $E_a$  совпадают по направлению, а электромагнитный момент, развиваемый машиной противоположен по направлению вращению ротора. Такой режим имеет место, если ротор ДПТ разогнать от внешнего момента  $M$  до скорости  $n$  и замкнуть цепь якоря на сопротивление нагрузки  $R_h$  (рис. 1а).

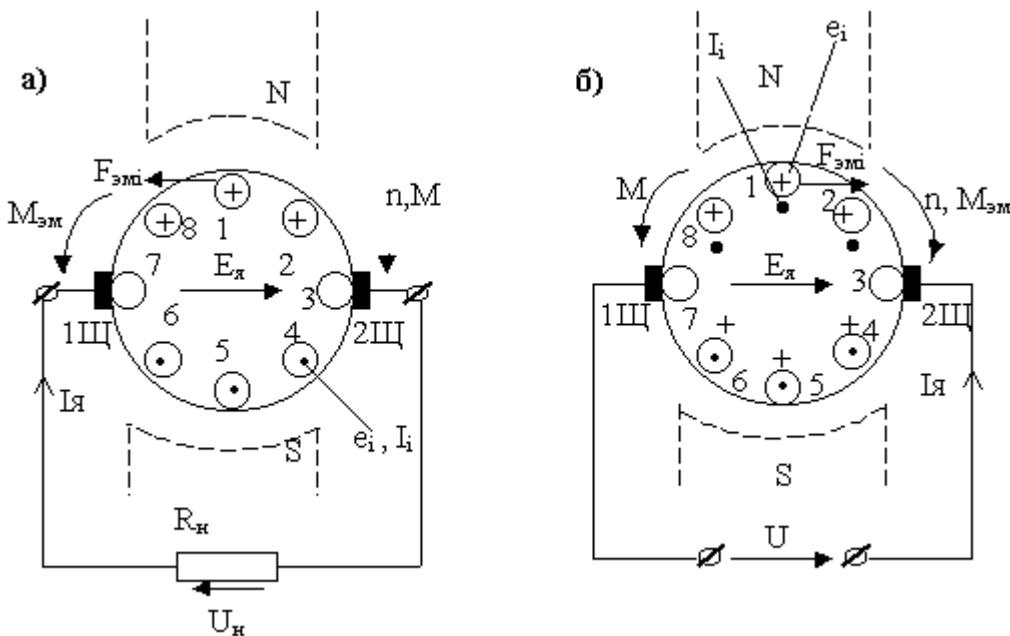


Рис. 1, а, б

В этом случае под действием ЭДС **Ея** в цепи нагрузки потечёт ток **Iя**. Ток в каждом из проводников обмотки якоря будет совпадать по направлению с ЭДС в проводнике. Определяя по правилу левой руки направление силы, действующей на проводник, найдём, что электромагнитный момент машины направлен встречно вращению и, следовательно, встречно внешнему моменту нагрузки **M**.

При работе машины в генераторном режиме ЭДС якоря уравновешивается падением напряжения на нагрузке и падением напряжения от тока якоря на сопротивлении якоря, т. е.

$$E_a = I_a \cdot R_a + U_a,$$

где **Rя** – сопротивление якоря, которое складывается из эквивалентного сопротивления параллельных ветвей обмотки ротора и сопротивления перехода "щётка - коллектор".

Уравнение баланса мощностей при работе машины в генераторном режиме имеет

вид

$$P_{\text{мех}} = P_m + P_x + P_n + P_e,$$

где **P<sub>мех</sub>** – механическая мощность, потребляемая машиной от источника механической мощности, **P<sub>m</sub>** – потери мощности в обмотке якоря, **P<sub>x</sub>** – потери холостого хода, состоящие из потерь на трение в подшипниках и потерь на перемагничивание материала ротора, **P<sub>n</sub>** – электрическая мощность в нагрузке, **P<sub>e</sub>** – потери в меди обмотки возбуждения.

**Двигательный** режим работы – такой режим, при котором электромагнитный момент машины **M<sub>эм</sub>** совпадает по направлению со скоростью, а ЭДС якоря **Ея** направлена встречно току якоря.

Пусть к щёткам двигателя, ротор которого нагружен моментом **M** подведено от внешнего источника напряжение **U** (рис.6.5,б). В этом случае по проводникам обмотки ротора потечёт ток **Ii**. Взаимодействие тока якоря с потоком возбуждения приведёт при неподвижном роторе к появлению электромагнитного момента, называемого пусковым

$$M_{\text{зпл}} = C_m \cdot \Phi \cdot I_{\text{пл}}, \quad I_{\text{пл}} = \frac{U}{R_a},$$

с направлением, определяемым по правилу левой руки. Если **M<sub>эм</sub>**  $> M$ , то якорь двигателя придет во вращение в направлении действия момента **M<sub>эм</sub>**. Но при этом в проводниках обмотки якоря появятся ЭДС, направление которых определяется правилом правой руки. Эти ЭДС направлены встречно токам в проводниках обмотки, и следовательно, ЭДС между щётками машины **Ея** будет направлена встречно току в якоре, поэтому она часто называется противо ЭДС. Появление противо ЭДС приведет к уменьшению тока якоря и, следовательно, вращающего момента **M<sub>эм</sub>** и ускорения. Процесс этот будет продолжаться до тех пор, пока напряжение на якоре **U** не будет уравновешено противо ЭДС **Ея** и падением напряжения от тока якоря на сопротивление якоря **Rя**, т.е.

$$U = I_a \cdot R_a + E_a.$$

При этом  $M_{\text{зпл}} = M$  и якорь будет вращаться с постоянной скоростью.

Уравнение баланса мощности для двигательного режима работы имеет вид

$$P_{\text{зпл}} = P_{\text{мех}} + P_x + P_e,$$

где  $P_{эл}$  - электрическая мощность потребляемая от сети,  $P_{мех}$  - полезная механическая мощность на валу двигателя.

### Регулировочная характеристика.

Регулировочная характеристика  $n=f(I_b)$  двигателя параллельного возбуждения изображена на рис. 1.29.

Ее характер определяется зависимостью (1.5), из которой следует, что частота вращения обратно пропорциональна магнитному потоку и, следовательно, току возбуждения  $I_b$ . При токе возбуждения  $I_b = 0$ , что может быть при обрыве цепи возбуждения, магнитный поток равен остаточному  $\Phi_{ост}$  и частота вращения становится настолько большой, что двигатель может механически разрушиться, – подобное явление называется разносом двигателя.

Физически явление разноса объясняется тем, что врачающий момент (1.2) при уменьшении магнитного потока, казалось бы, должен уменьшиться, однако ток якоря  $I_a = (U - E)/R_a$  увеличивается значительно, так как уменьшается  $E$  (1.1) и разность  $U - E$  увеличивается в большей степени (обычно  $E \gg 0,9 U$ ).

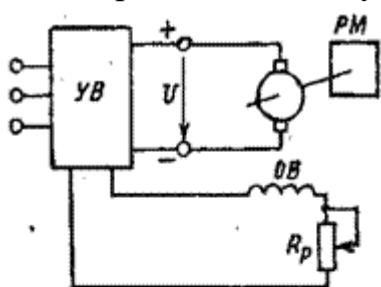


Рис. 1.28

### Тормозные режимы.

Тормозные режимы двигателя имеют место тогда, когда электромагнитный момент, развиваемый двигателем, действует против направления вращения якоря. Они могут возникать в процессе работы двигателя при изменении условий работы или создаваться искусственно с целью быстрого уменьшения скорости, остановки или реверсирования двигателя.

У двигателя параллельного возбуждения возможны три тормозных режима: генераторное торможение с возвратом энергии в сеть, торможение противовключением и динамическое торможение.

**Генераторное торможение** возникает в тех случаях, когда частота вращения якоря  $n$  становится больше частоты вращения при идеальном (т.е. при  $M_{пр} = 0$ ) холостом ходе  $n_x$  ( $n > n_x$ ). Переход в этот режим из режима двигателя возможен, например, при спуске груза, когда момент, создаваемый грузом, приложен к якорю в том же направлении, что и электромагнитный момент двигателя, т.е. тогда, когда момент нагрузки действует согласно с

электромагнитным моментом двигателя и он набирает скорость, большую чем  $n_x$ . Если  $n > n_x$ , то  $E > U_c$  (где  $U_c$  – напряжение сети) и ток двигателя изменяет свой знак (1.4) – электромагнитный момент из вращающего становится тормозным, а машина из режима двигателя переходит в режим генератора и отдает энергию в сеть (рекуперация энергии). Переход машины из двигательного режима в генераторный иллюстрируется механической характеристикой (рис. 1.30). Пусть в двигательном режиме  $a_1$  – рабочая точка; ей соответствует момент  $M$ . Если частота вращения увеличивается, то рабочая точка по характеристике 1 из квадранта I переходит в квадрант II, например, в рабочую точку  $a_2$ , которой соответствует частота вращения  $n'$  и тормозной момент  $-M'$ .

**Торможение противовключением** возникает в работающем двигателе, когда направление тока в якоре или тока возбуждения переключается на

противоположное. Электромагнитный момент при этом изменяет знак и становится тормозным.

Работе двигателя с противоположным направлением вращения соответствуют механические характеристики, располагающиеся в квадрантах II и III (например, естественная характеристика 2 на рис. 1.30).

Внезапный переход на эту характеристику практически недопустим, так как сопровождается чрезмерно большим броском тока и тормозного момента. По этой причине одновременно с переключением одной из обмоток в цепь якоря включается добавочное сопротивление  $R_{\text{доб}}$ , ограничивающее ток якоря.

Механическая характеристика режима с  $R_{\text{доб}}$  имеет большой наклон (прямая 3). При переходе в режим противовключения частота вращения  $n$  в первый момент измениться не может (из-за инерционности якоря) и рабочая точка из положения  $a_1$  перейдет в положение  $a_3$  на новой характеристике. Из-за появления  $M_{\text{топ}}$  частота вращения  $n$  будет быстро падать до тех пор, пока рабочая точка  $a_3$  не перейдет в положение  $a_4$ , соответствующее остановке двигателя. Если в этот момент двигатель не отключить от источника питания, то якорь изменит направление вращения.

Машина начнет работать в двигательном режиме с новым направлением вращения, а ее рабочая точка  $a_5$  будет находиться на механической характеристике 3 в квадранте III.

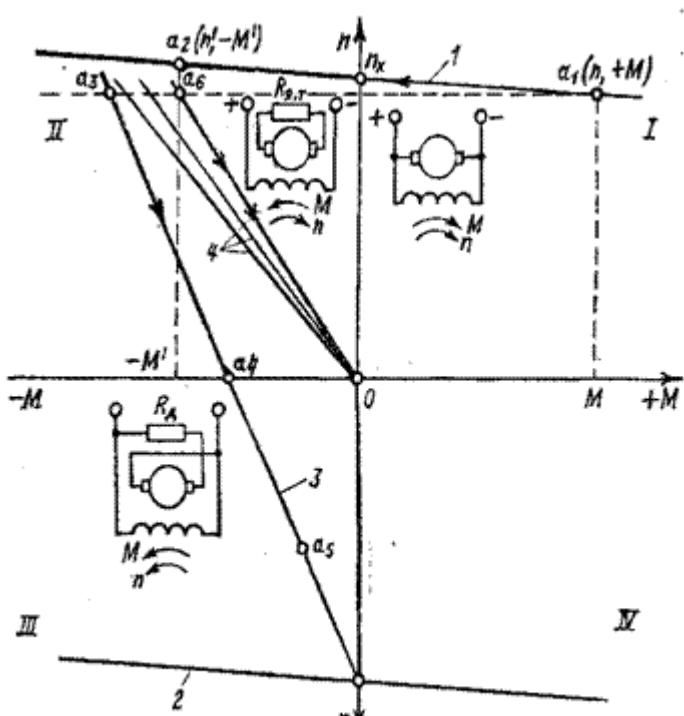


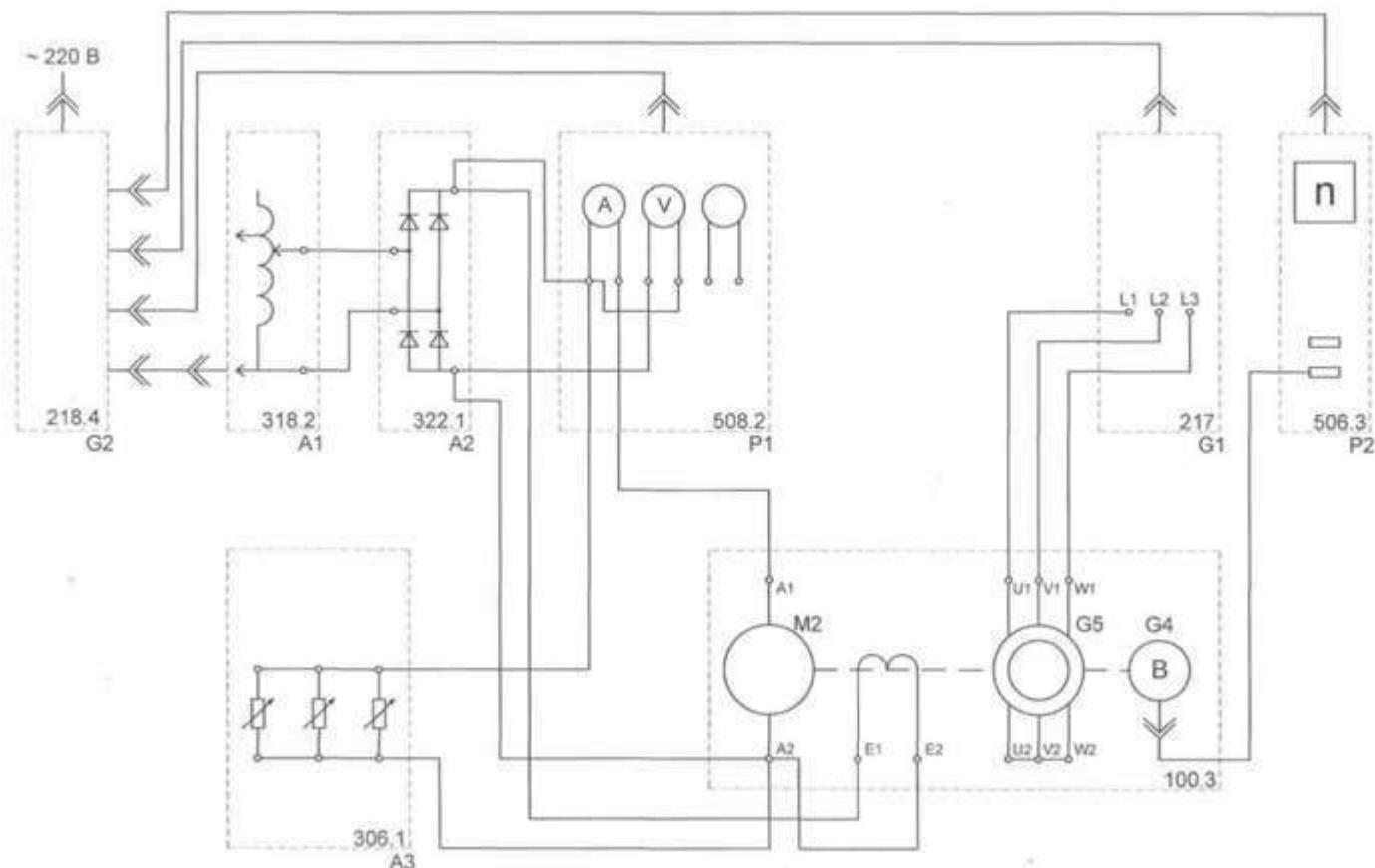
Рис. 1.30

**Динамическое торможение** возникает в тех случаях, когда якорь двигателя отключается от сети и замыкается на сопротивление динамического торможения  $R_{\text{д.т.}}$ . Уравнение характеристики (1.6) принимает вид:

$$n = -\frac{R_a + R_{\text{д.т.}}}{C_E C_M \Phi} M,$$

что соответствует семейству прямых 4 (при разных  $R_{\text{д.т.}}$ ), проходящих через начало координат. При переключении в этот режим рабочая точка  $a_1$  переходит на одну из характеристик 4, например, в точку  $a_6$ , а затем перемещается по прямой 4 до нуля. Якорь двигателя тормозится до полной остановки. Изменением сопротивления  $R_{\text{д.т.}}$  можно регулировать ток якоря и скорость торможения.

**Схема для определения координат электропривода с двигателем постоянного тока параллельного тока параллельного возбуждения в генераторном, двигательном и тормозном режимах.**



## Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
01	Преобразователь частоты	217	0...100 Гц 3x220 В; 3
02	Однофазный источник питания	218.4	~220 В /6 А
M2	Машина постоянного тока	101.1	90 Вт; 220 В 2,4 А (якорь) 220 В (возбуждение)
04	Преобразователь угловых перемещений	104	6 выходных сигналов
05	Асинхронный двигатель	106	120 Вт; 220/380 В; 1350 мин <sup>-1</sup>
A1	Регулируемый автотрансформатор	318.2	-0...240В /2А
A2	Выпрямитель	322.1	~400 В /2 А
A3	Активная нагрузка	306.1	220/380 В; 50Гц; 3x0...50
A4	Реостат возбуждения машины постоянного тока	308.2	0...2000 Ом/ 0,25 А
P1	Блок мультиметров	508.2	3 мультиметра 0...1000В~; 0...10А-; 0...20МОм
P2	Указатель частоты вращения	506.3	2000...0...2000 мин <sup>-1</sup>

## **Указания по проведению экспериментов**

- Убедитесь, что устройства, используемые в экспериментах, отключены от сети электропитания.
- Соедините гнезда защитного заземления "ЗУ" устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» автотрансформатора А1.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рис. 2.5.
- Регулировочную рукоятку автотрансформаторов А1 поверните против часовой стрелки до упора.
- Регулировочные рукоятки активной нагрузки А3 установите, например, в положение «20%».
- Включите устройство защитного отключения и автоматические выключатели однофазного источника питания 02.
- Включите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров Р1 и указателя частоты вращения Р2.
- Активизируйте мультиметры блока Р1, задействованные в эксперименте.
- Включите выключатель «СЕТЬ» автотрансформатора А1.
- Вращая регулировочную рукоятку автотрансформатора А1, установите напряжение на якоре двигателя М2 равным, например, 35В. Двигатель при этом должен вращаться со скоростью около 800 об/мин.
- Включите выключатель «СЕТЬ» преобразователя частоты 01. Кнопками «ВЫБОР СТРОКИ / СТРАНИЦЫ НА ДИСПЛЕЕ» выберите режим работы «Эксперимент №1: Исследование режимов работы асинхронного двигателя».
- Кнопкой «ВЫБОР ИНФОРМАЦИИ НА ДИСПЛЕЕ» выберите «МАССИВ ИЗМЕНЯЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ», далее кнопками «ВЫБОР СТРОКИ / СТРАНИЦЫ НА ДИСПЛЕЕ» и «ИЗМЕНЕНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРА» выберите, например, следующие значения параметров: *V* номинальное - 220 В, тип характеристики - линейная, выход 1 -скорость, выход 2 - скорость, управление - ручное.
- Кнопкой «ВЫБОР ИНФОРМАЦИИ НА ДИСПЛЕЕ» выберите «МАССИВ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ».
- Вращая регулировочную рукоятку преобразователя частоты 01, установите задание скорости вращения магнитного поля двигателя М1, например, 84 рад/с (соответствует 800 об/мин) и нажмите кнопку «ВПЕРЕД».
- Для перевода электропривода с двигателем М2 постоянного тока в двигательный режим вращением регулировочной рукоятки преобразователя частоты 01, устанавливайте задание скорости вращения магнитного поля двигателя М1 менее 84 рад/с, а для перевода в генераторный режим - более 84 рад/с.
- Для перевода электропривода с двигателем М2 постоянного тока в тормозной режим вращением регулировочной рукоятки преобразователя частоты 01 добейтесь снижения скорости вращения двигателя М2 до нуля, нажмите кнопку «НАЗАД» и добейтесь его вращения с отрицательной скоростью.
- С помощью блока мультиметров Р1 измеряйте координаты электропривода:

напряжение II и ток I якоря двигателя M2 постоянного тока, с помощью указателя P2 частоту вращения п двигателя M2 постоянного тока.

- По завершении эксперимента нажмите кнопку «СТОП» и отключите выключатель «СЕТЬ» преобразователя частоты 01, у автотрансформатора A1 поверните регулировочную рукоятку против часовой стрелки до упора и отключите выключатель "СЕТЬ". Отключите выключатель "СЕТЬ" блока мультиметров P1 и указателя частоты вращения P2. Отключите автоматические выключатели однофазного источника питания 02.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3**  
**ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО  
 ВОЗБУЖДЕНИЯ**  
**СБОРКА СХЕМЫ И ВКЛЮЧЕНИЕ ДВИГАТЕЛЯ. СНЯТИЕ И ПОСТРОЕНИЕ  
 ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ.**

**Цель:** исследовать двигатель постоянного тока параллельного возбуждения, произвести регулирование частоты вращения, снять показания, построить регулировочные характеристики, сделать вывод.

**Содержание:**

- Перечень аппаратуры
- Схемы электрические соединений
- Указания по проведению экспериментов

**Перечень аппаратуры**

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Преобразователь частоты	217	0...100 Гц 3x220 В; 3 А
G2	Однофазный источник питания	218.4	~220 В /6 А
M2	Машина постоянного тока	101.1	90 Вт; 220 В 2,4 А (якорь) 220 В (возбуждение)
G4	Преобразователь угловых перемещений	104	6 выходных сигналов
G5	Асинхронный двигатель	106	120 Вт; 220/380 В; 1350 мин <sup>-1</sup>
A1	Регулируемый автотрансформатор	318.2	-0...240 В /2 А
A2	Выпрямитель	322.1	~400 В /2 А
A3	Активная нагрузка	306.1	220/380 В; 50 Гц; 3x0...50 Вт
A4	Реостат возбуждения машины постоянного тока	308.2	0...2000 Ом/ 0,25 А
P1	Блок мультиметров	508.2	3 мультиметра 0...1000 В~; 0...10 А~;
P2	Указатель частоты вращения	506.3	2000...0...2000 мин <sup>-1</sup>

## Схемы электрических соединений

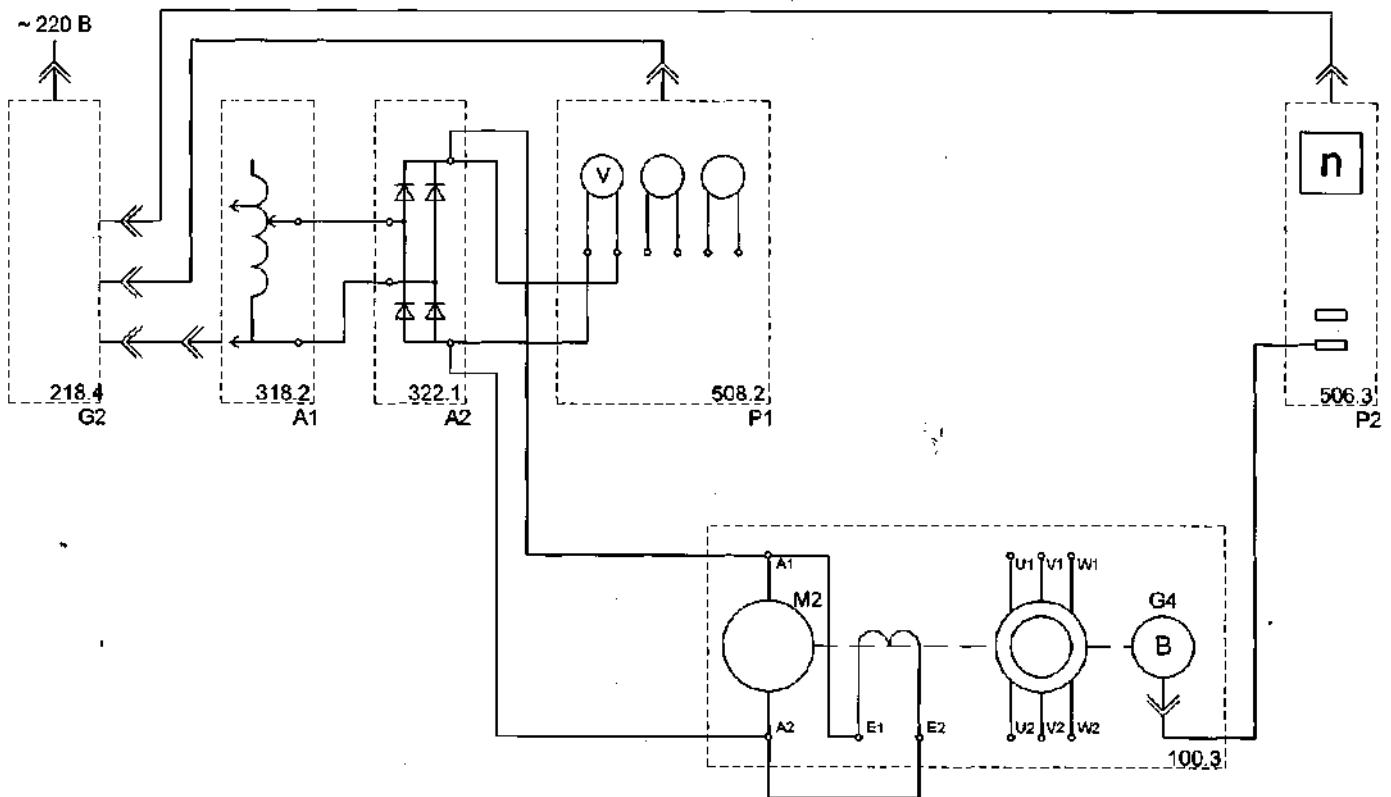


Схема для регулирования скорости вращения двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением изменением напряжения якоря.

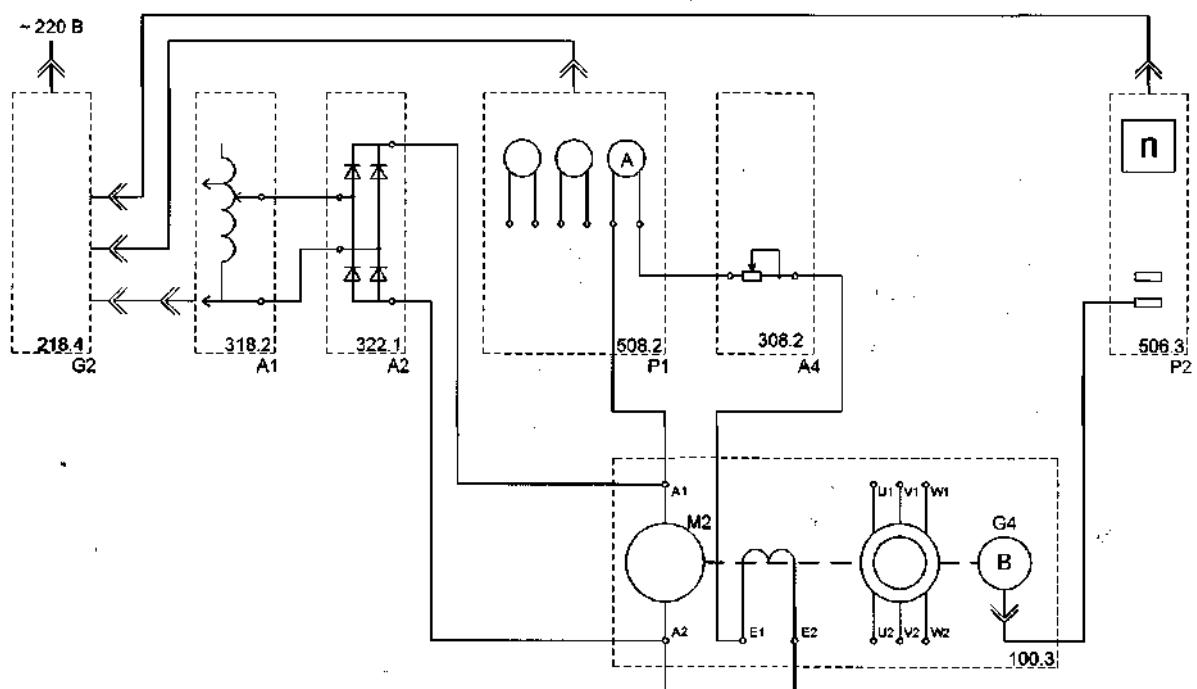


Схема для регулирования скорости вращения двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением изменением тока возбуждения.

## **1. Регулирование частоты вращения двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением изменением напряжения якоря**

- Убедитесь, что устройства, используемые в экспериментах, отключены от сети электропитания.
- Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» автотрансформатора А1.
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений, приведенную на рисунком.
- Регулировочную рукоятку автотрансформатора А1 поверните против часовой стрелки до упора.
- Включите устройство защитного отключения и автоматические выключатели однофазного источника питания G2.
- Включите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров Р1 и указателя частоты вращения Р2.
- Активизируйте мультиметры блока Р1, задействованные в эксперименте.
- Включите выключатель «СЕТЬ» автотрансформатора А1.
- Вращая регулировочную рукоятку автотрансформатора А1, разгоните двигатель М2 до частоты вращения, например, 1500 об/мин.
- Вращая регулировочную рукоятку автотрансформатора А1, уменьшайте напряжение якоря  $U$  двигателя М2 и заносите показания вольтметра блока Р1 (напряжение  $U$ ) и указателя Р2 (частота вращения  $n$ ) в таблицу.

<b><math>U, В</math></b>									
<b><math>n, \text{мин}^{-1}</math></b>									

- По завершении эксперимента у автотрансформатора А1, поверните регулировочную рукоятку против часовой стрелки до упора и отключите выключатель "СЕТЬ". Отключите выключатель "СЕТЬ" блока мультиметров Р1 и указателя частоты вращения Р2. Отключите автоматические выключатели однофазного источника питания G2.
- Используя данные таблицы, постройте в виде графика зависимость  $n=f(U)$ .

## **2. Регулирование частоты вращения двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением изменением возбуждения**

- Убедитесь, что устройства, используемые в экспериментах, отключены от сети электропитания.
- Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» автотрансформатора А1.

- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений, приведенную на рисунке.
- Регулировочную рукоятку автотрансформатора А1 поверните против часовой стрелки до упора.
- Регулировочную рукоятку реостата возбуждения А4 поверните против часовой стрелки до упора.
- Включите устройство защитного отключения и автоматические выключатели однофазного источника питания G2.
- Включите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров Р1 и указателя частоты вращения Р2.
- Активизируйте мультиметры блока Р1, задействованные в эксперименте.
- Включите выключатель «СЕТЬ» автотрансформатора А1.
- Вращая регулировочную рукоятку автотрансформатора А1, разгоните двигатель М2 до частоты вращения, например,  $1000 \text{ мин}^{-1}$ .
- Вращая регулировочную рукоятку реостата возбуждения А4 по часовой стрелке, уменьшайте ток возбуждения  $I_b$  двигателя М2 и заносите показания амперметра блока Р1 (ток возбуждения  $I_b$ ) и указателя Р2 (частота вращения  $n$ ) в таблицу.

Таблица

$I_b, \text{ А}$								
$n, \text{ об/мин}$								

- По завершении эксперимента у автотрансформатора А1, поверните регулировочную рукоятку против часовой стрелки до упора и отключите выключатель "СЕТЬ". Отключите выключатель "СЕТЬ" блока мультиметров Р1 и указателя частоты вращения Р2. Отключите автоматические выключатели однофазного источника питания G2.
- Используя данные таблицы, постройте в виде графика зависимость  $n=f(I_b)$ .

Сделайте вывод о проделанной работе

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 3

### ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

**Цель :** Ознакомиться с устройством трансформатора; усвоить практические приемы лабораторного исследования трансформатора

Студент должен

знать:

Устройство и назначение основных элементов силового трансформатора;

уметь:

Расшифровать буквенные обозначения силовых трансформаторов

#### Теоретический материал

Силовые трансформаторы предназначены для преобразования (трансформирования) переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения — более низкого или более высокого. Трансформаторы, понижающие напряжение, называют понижающими, а повышающие напряжение — повышающими.

Трансформаторы изготавливают двухобмоточные и трехобмоточные. Последние кроме обмотки НН и ВН имеют обмотку СН (среднего напряжения).

Трехобмоточный силовой трансформатор позволяет снабжать потребителей электроэнергией разных напряжений. Обмотка, включенная в сеть источника электроэнергии, называется первичной, а обмотка, к которой присоединены электроприемники, — вторичной.

В рассматриваемых распределительных устройствах и подстанциях промышленных предприятий применяют трехфазные двухобмоточные понижающие трансформаторы, преобразующие напряжение 6 и 10 кВ в 0,23 и 0,4 кВ.

В зависимости от изолирующей и охлаждающей среды различают трансформаторы масляные ТМ и сухие ТС. В масляных основной изолирующей и охлаждающей средой являются трансформаторные масла, в сухих — воздух или твердый диэлектрик. В специальных случаях применяют трансформаторы с заполнением баков негорючей жидкостью — совтолом.

Основой конструкции трансформатора служит активная часть, состоящая из магнитопровода 4 (рис. 1) с расположенными на нем обмотками низшего напряжения 3 и высшего напряжения 2 отводов и переключающего устройства.

Магнитопровод, набранный из отдельных тонких листов специальной трансформаторной стали, изолированных друг от друга покрытием, состоит из стержней, верхнего и нижнего ярма. Такая конструкция способствует уменьшению потерь на нагрев от перемагничивания (гистерезис) и вихревых токов.

Соединительные провода, идущие от концов обмоток и их ответвлений, предназначенные для регулирования напряжения, называют отводами, которые изготавливают из неизолированных медных проводов или проводов, изолированных кабельной бумагой либо гетинаксовой трубкой.

Переключающие устройства обмоток трансформатора служат для ступенчатого изменения напряжения в определенных пределах, поддерживания номинального напряжения на зажимах вторичной обмотки при изменении напряжения на первичной или вторичной обмотке. С этой целью обмотки ВН трансформаторов снабжают регулировочными ответвлениями, которые подсоединяют к переключателям.

Необходимость регулирования вызвана тем, что в электросистемах возможны различные отклонения от нормального режима электроснабжения, приводящие к неэкономичной работе приемников, преждевременному износу и сокращению сроков их службы. Особенно чувствительны к повышению напряжения электролампы, радиолампы и лампы телевизоров: срок их службы резко сокращается при систематическом увеличении напряжения.

В трансформаторах могут быть два вида переключений ответвлений: под нагрузкой — РПН (регулирование под нагрузкой) и без нагрузки после отключения трансформатора — ПБВ (переключение без возбуждения). С помощью ПБВ и РПН можно поддерживать напряжение, близким к номинальному во вторичных обмотках трансформаторов.

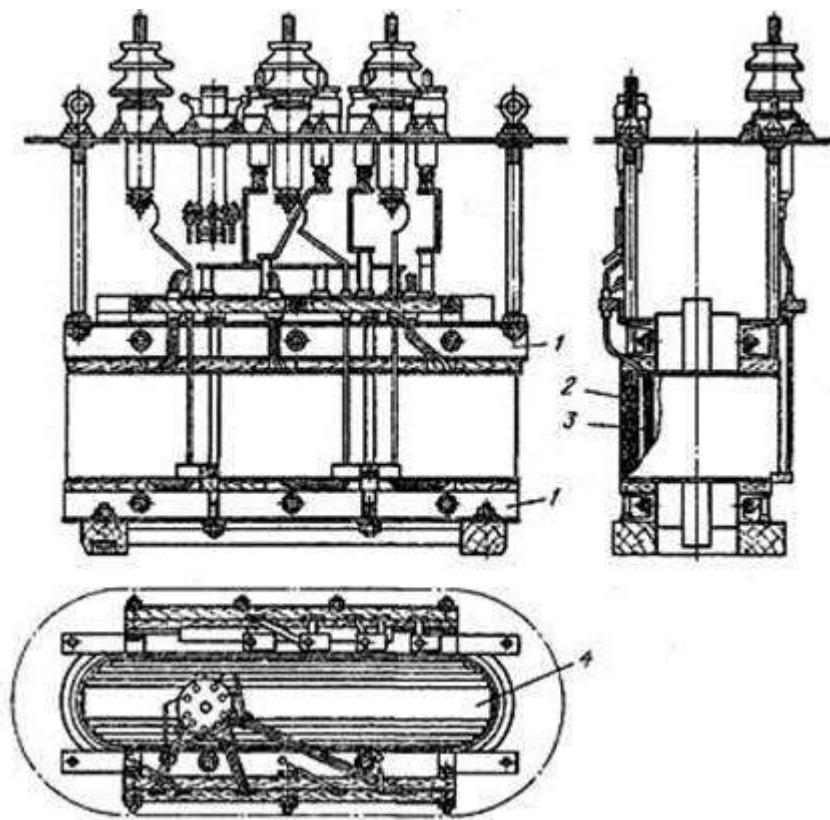
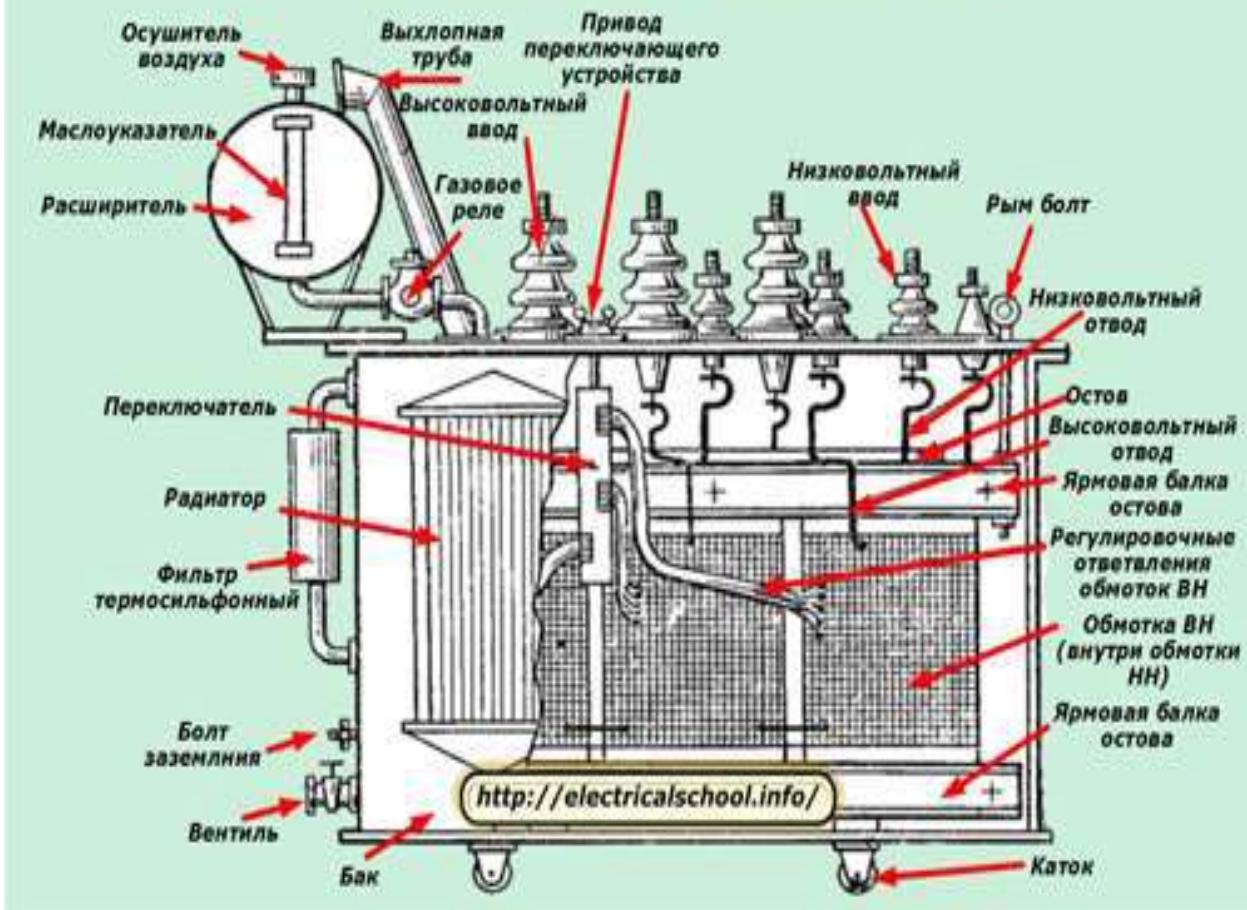


Рис. 1. Активная часть трансформатора серии ТМ: 1 — ярмо, 2 и 3 — обмотки ВН и НН, 4 — магнитопровод

Отдельные ярко выраженные элементы его конструкции снабжены подписями. Более подробно устройство основных частей и их взаимное расположение демонстрирует чертеж.

## Конструкция силового трансформатора



Переключение осуществляют изменением числа витков с помощью регулировочных ответвлений обмоток, т. е. изменением коэффициента трансформации, который показывает, во сколько раз напряжение обмотки ВН больше напряжения обмотки НН или во сколько раз число витков обмотки ВН больше числа витков обмотки НН. Пределы регулирования вторичных напряжений для разных трансформаторов различны: на  $\pm 10\%$  12 ступенями по 1,67% или 16 ступенями по 1,25% с помощью РПН; на  $\pm 5\%$  четырьмя ступенями по 2,5% с помощью ПБВ.

**Бак** трансформатора, в который погружена активная часть, представляет собой стальной резервуар овальной формы, заполненный трансформаторным маслом. Масло, являясь охлаждающей средой, отводит теплоту, выделяющуюся в обмотках и магнитопроводе, и отдает ее в окружающую среду через стенки и крышку бака. Кроме охлаждения активной части трансформатора масло повышает степень изоляции между токоведущими частями и заземленным баком.

Для увеличения поверхности охлаждения трансформатора баки изготавливают ребристыми, вваривают в них трубы или снабжают съемными радиаторами

(только у трансформаторов мощностью до 25 кВ-А стенки бака гладкие). Радиаторы присоединяют к стенкам бака патрубками со специальными радиаторными кранами. У верхнего торца бака к его стенкам приваривают раму из угловой или полосовой стали, к которой крепят крышку на прокладках из маслouпорной резины.

В нижней части бака всех типов трансформаторов имеется кран для взятия пробы и слива масла, а в его днище (в трансформаторах мощностью выше 100 кВ-А) — пробка для спуска осадков после слива масла через кран. Второй кран устанавливают на крышке бака, через который заливают в него масло. Оба крана служат одновременно для присоединения к ним маслоочистительных аппаратов.

К дну баков трансформаторов массой выше 800 кг приваривают тележку с поворотными катками, конструкция крепления которых позволяет изменять направление передвижения трансформаторов с поперечного на продольное. Для подъема трансформатора на баке имеется четыре кольца-рыма. Активная часть поднимается за скобы в верхних консолях магнитопровода.

На крышке бака размещены вводы, расширитель и защитные устройства (выхлопная предохранительная труба, реле давления, газовое реле, пробивной предохранитель). К стенкам бака приваривают подъемные крюки, прикрепляют манометрический сигнализатор (у трансформаторов мощностью выше 1000 кВ-А) и устанавливают фильтры. Трансформатор серии ТМ-1000-10 показан на рис. 2.

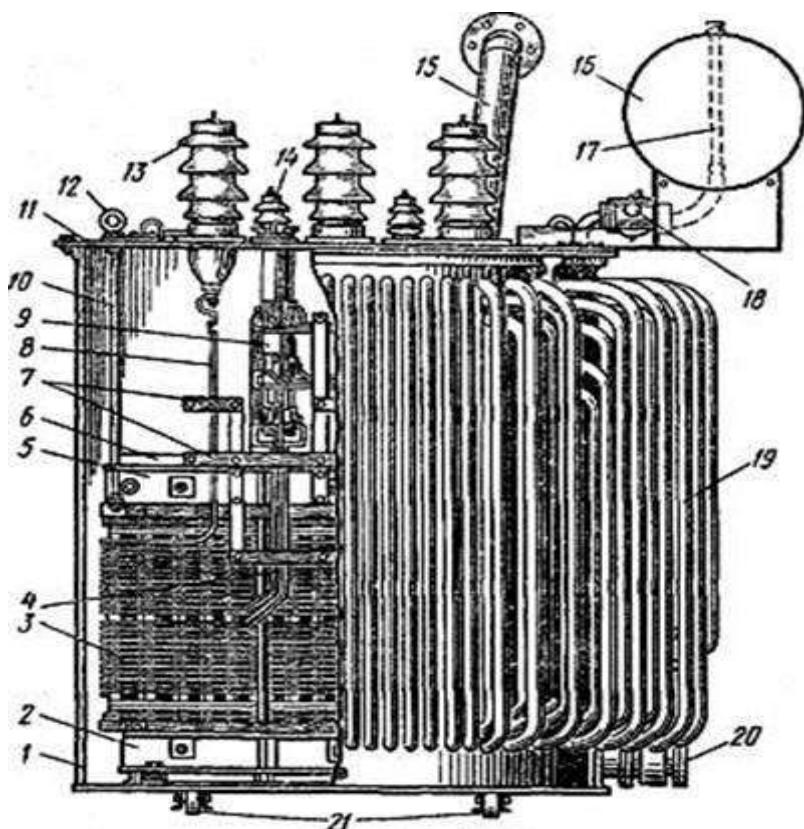


Рис. 2. Трехфазный силовой трансформатор мощностью 1000 кВ А с масляным охлаждением:

1 — бак, 2 и 5 — нижняя и верхняя ярмовые балки магнитопровода, 3 — обмотка ВН, 4 — регулировочные отводы к переключателю, 6 — магнитопровод, 7 — деревянные планки, 8 — отвод от обмотки ВН, 9 — переключатель, 10 — подъемная шпилька, 11 — крышка бака, 12 — подъемное кольцо (рым), 13 и 14 — вводы ВН и НН, 15 — предохранительная труба, 16 — расширитель (консерватор), 17 — маслоуказатель, 18 — газовое реле, 19 — циркуляционные трубы, 20 — маслоспускной кран, 21 — катки

**Вводы** 14 и 15 представляют собой фарфоровые проходные изоляторы, через которые выводы обмоток трансформатора присоединяются к электрическим сетям.

Большинство трансформаторов оборудовано **расширителями** (рис. 3), обеспечивающими постоянное заполнение бака маслом и уменьшающими поверхность соприкосновения масла с воздухом, следовательно, защищающими масло от увлажнения и окисления. У расширителя есть отверстие для всасывания и вытеснения воздуха при изменении уровня содержащегося в нем масла (дыхательная пробка).

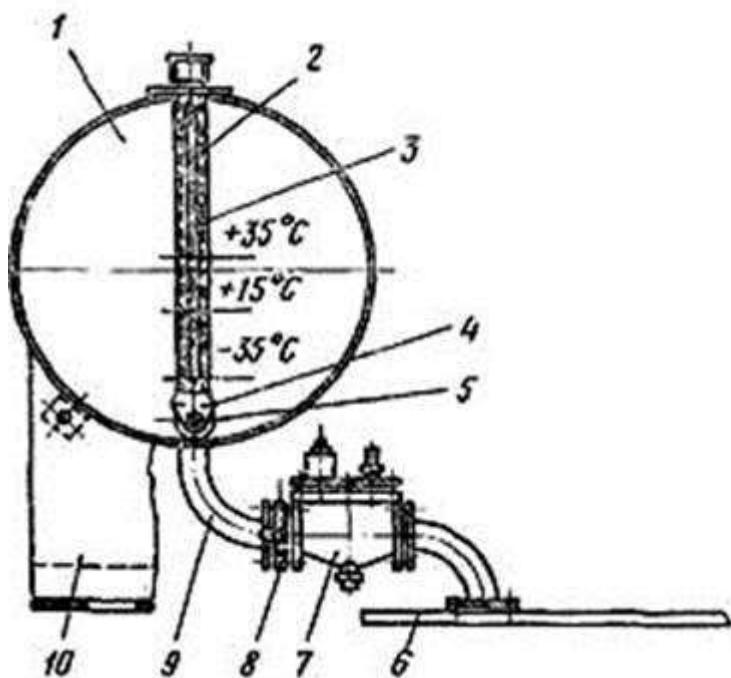


Рис. 3. Расширитель:

— бак расширителя, 2 — маслоуказатель, 3 — маслоуказательное стекло, 4 — угольник, 5 — запирающий болт, 6 — крышка трансформатора, 7 — газовое реле, 8 — плоский кран, 9 — трубопровод, 10 — опорная пластина

Расширитель имеет цилиндрическую форму, закрепляется на кронштейне, установленном на крышке б трансформатора, и сообщается с баком трансформатора трубопроводом, не выступающим ниже внутренней поверхности крышки трансформатора и заканчивающимся внутри расширителя выше его дна во избежание попадания осадков масла в бак 1. Внутренняя поверхность расширителя имеет защитное покрытие, предохраняющее масло от соприкосновения с металлической поверхностью и расширитель от коррозии. В нижней части расширителя имеется пробка для слива масла из него.

Объем расширителя определяют так, чтобы уровень масла оставался в его пределах как летом при 35 °С и полной нагрузке трансформатора, так и зимой при минимальной температуре масла и отключенном трансформаторе. Обычно объем расширителя составляет 11 — 12% объема масла в баке трансформатора. Для наблюдения за уровнем масла на боковой стенке расширителя устанавливают маслоуказатель 2, выполненный в виде стеклянной трубы в металлической оправе.

Емкость расширителя должна обеспечивать постоянное наличие в нем масла при всех режимах работы трансформатора от отключенного состояния до номинальной нагрузки и при колебаниях температуры окружающего воздуха, причем при допустимых перегрузках масло не должно выливаться.

В герметичных масляных трансформаторах и трансформаторах с жидким негорючим диэлектриком поверхность масла защищают сухим азотом, а в заполненных совтолом -10 — сухим воздухом. Негерметичные масляные трансформаторы мощностью 160 кВ· А и более, в которых масло в расширителе соприкасается с окружающим воздухом, имеют термосифонный или адсорбционный фильтр, а трансформаторы мощностью 1 мВ · А и более с естественным масляным охлаждением и азотной подушкой — термосифонный фильтр (кроме трансформаторов с жидким негорючим диэлектриком).

Масляные трансформаторы мощностью 1 мВ \* А и более с расширителем снабжают защитным устройством, предупреждающим повреждение бака при внезапном повышении внутреннего давления более 50 к Па. К защитным устройствам относят выхлопную трубу со стеклянной диафрагмой и реле давления. Масляные трансформаторы и трансформаторы с жидким диэлектриком с азотной подушкой без расширителя имеют реле давления, срабатывающее при повышении внутреннего давления более 75 кПа.

Нижний конец выхлопной трубы соединяют с крышкой бака, а на верхний ее конец устанавливают тонкую стеклянную мембрану (от 2,5 до 4 мм) диаметром 150, 200 и 250 мм, которая разрушается при определенном давлении и дает выход газу и маслу наружу раньше, чем произойдет деформация бака. Реле давления размещают на внутренней стороне крышки трансформатора.

Основными его элементами являются ударный механизм и стеклянная диафрагма. При достижении определенного давления в баке механизм срабатывает, разбивает диафрагму и обеспечивает свободный выход газам.

Трансформаторы мощностью 1 кВ \* А и более, имеющие расширитель, снабжают газовым реле, которое реагирует на повреждения внутри бака трансформатора (электрический пробой изоляции, витковое замыкание, местный нагрев магнитопровода), сопровождающиеся выделением газа или резким увеличением скорости перетекания масла из бака в расширитель.

Выделение газообразных продуктов происходит в результате разложения масла и других изоляционных материалов под действием высокой температуры, возникающей в месте повреждения. На этом явлении основана работа газовой защиты трансформатора от внутренних повреждений, сопровождающихся выделением газов при их утечке, утечке масла и попадании воздуха в бак.

Основной элемент этой защиты — газовое реле, устанавливаемое обычно на трубопроводе, который соединяет расширитель с баком, имеющим наклон к горизонтали от 2 до 4°. В газовом реле имеются две пары контактов для работы на сигнал или отключение.

Пробивные предохранители служат для защиты от пробоя обмоток ВН на обмотки НН. Устанавливают их на крышке бака и подсоединяют к нулевому вводу НН, а при напряжении 690 В — к линейному вводу.

При пробое изоляции между обмотками ВН и НН промежуток между контактами, в котором проложены тонкие слюдяные пластины с отверстиями, пробивается и вторичная обмотка оказывается соединенной с землей.

Для заземления трансформаторов служит специальный заземляющий контакт с резьбой не менее М12, расположенный в доступном месте нижней части бака со стороны НН и обозначенный четкой несмыывающейся надписью «Земля» или знаком заземления. Поверхность заземляющего контакта должна быть гладкой и защищенной; заземление осуществляют подсоединением стальной шины сечением не менее 40x4 мм.

Для измерения температуры масла на трансформаторах монтируют ртутные термометры со шкалой от 0 до 150° С или термометрические сигнализаторы ТС со шкалой от 0 до 100° С. Последние снабжены двумя передвижными контактами, которые можно установить на любую температуру в пределах шкалы. Первый контакт, будучи включенным в сигнальную цепь, при определенной температуре масла дает сигнал; в случае дальнейшего повышения температуры масла второй контакт, соединенный с реле, отключает трансформатор. На трансформаторах мощностью 6300 кВ \* А и выше установлены термометры сопротивления.

Для сушки и очистки увлажненного и загрязненного воздуха, поступающего в расширитель при температурных колебаниях масла, все трансформаторы снабжены воздухоочистительным фильтром — воздухоосушителем (рис. 4),

который представляет собой цилиндр, заполненный силикагелем и размещенный на дыхательной трубке 1 расширителя.

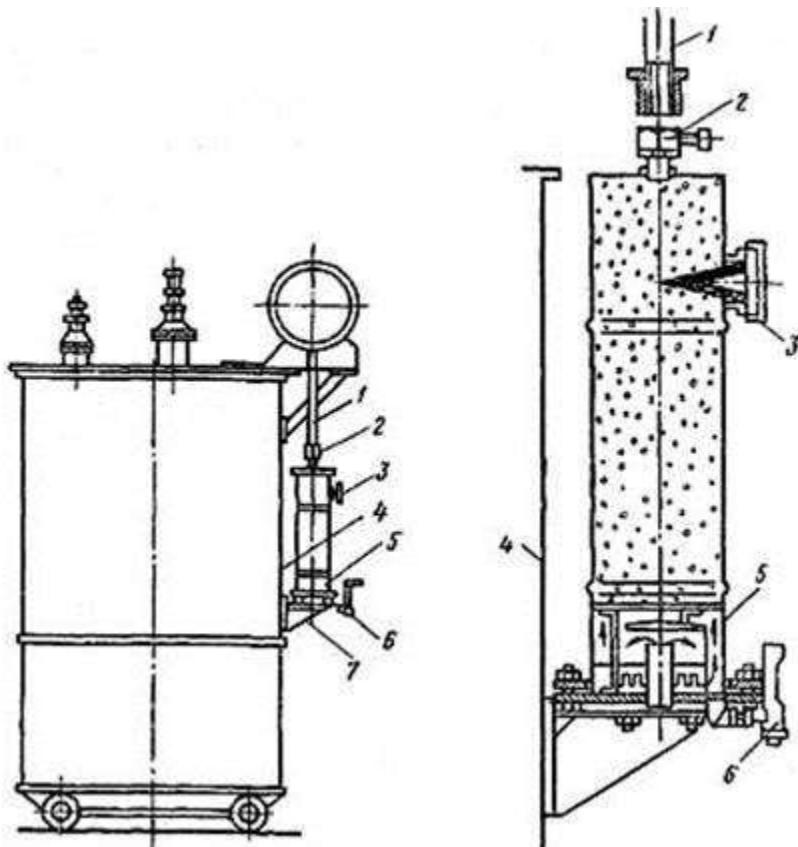


Рис. 4. Воздухоочистительный фильтр (воздухоосушитель):

1 — дыхательная трубка, 2 — соединительная муфта, 3 — смотровое окно, 4 — бак трансформатора, 5 — масляный затвор, 6 — указатель уровня масла в затворе, 7 — кронштейн

В нижней части цилиндра расположен масляный затвор 5 для очистки засасываемого воздуха, в верхней части — патрон с индикаторным силикагелем, который при увлажнении меняет свою окраску с голубой на розовую.

Для поддержания изоляционных свойств масла, а следовательно, продления срока его службы предназначен термосифонный фильтр (рис. 5), представляющий собой цилиндрический аппарат, заполненный активным материалом — сорбентом (поглотителем продуктов старения масла).

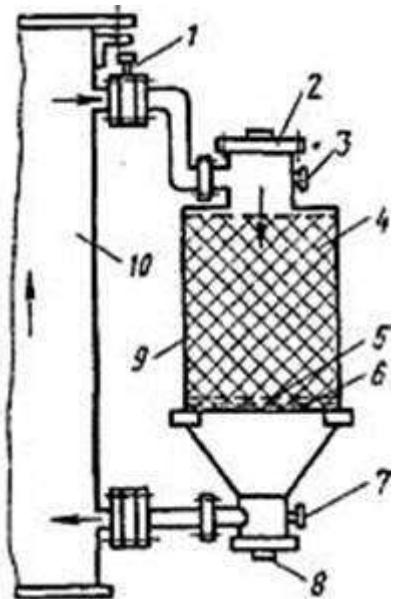


Рис. 5. Термосифонный фильтр:

1 — радиаторные краны, 2 — загрузочный люк, 3 — пробка с отверстием для выпуска воздуха, 4 — силикагель, 5 — сетка, 6 — дно с отверстиями, 7,8 — пробки для отбора пробы масла и его слива, 9 — корпус фильтра, 10 — стенка бака трансформатора

Фильтр присоединяют к баку трансформатора двумя патрубками и промежуточными плоскими кранами. Работа фильтра основана на термосифонном принципе: более нагретое масло верхних слоев, проходя через охлаждающее устройство, опускается вниз. Параллельно радиаторам подсоединен термосифонный фильтр. Следовательно, через фильтр масло проходит сверху вниз и непрерывно очищается. Фильтры устанавливают на трансформаторах мощностью 160 кВ \* А и выше.

Номенклатура трансформаторов (расшифровка буквенных и цифровых обозначений наименования) не регламентируется какими-либо нормативными документами, а всецело определяется производителем оборудования. Поэтому, если название Вашего трансформатора не поддаётся расшифровке, то обратитесь к его производителю или посмотрите паспорт изделия. Приведенные ниже расшифровки букв и цифр названия трансформаторов актуальны для отечественных изделий.

Наименование трансформатора состоит из букв и цифр, каждая из которых имеет своё значение. При расшифровке наименования следует учитывать то что некоторые из них могут отсутствовать в нём вообще (например буква "А" в наименовании обычного трансформатора), а другие являются взаимоисключающими (например, буквы "О" и "Т").

## РАСШИФРОВКА НАИМЕНОВАНИЙ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Для силовых трансформаторов приняты следующие буквенные обозначения [1, с.238]:

**Таблица 1 - Расшифровка буквенных и цифровых обозначений наименования силового трансформатора**

<b>1. Автотрансформатор</b>	<b>А</b>
<b>2. Число фаз</b>	
Однофазный	<b>О</b>
Трёхфазный	<b>Т</b>
<b>3. С расщепленной обмоткой</b>	<b>Р</b>
<b>4. Охлаждение</b>	
<i><b>Сухие трансформаторы:</b></i>	
естественное воздушное при открытом исполнении	<b>С</b>
естественное воздушное при защищенном исполнении	<b>СЗ</b>
естественное воздушное при герметичном исполнении	<b>СГ</b>
воздушное с принудительной циркуляцией воздуха	<b>СД</b>
<i><b>Масляные трансформаторы:</b></i>	
естественная циркуляция воздуха и масла	<b>М</b>
принудительная циркуляция воздуха и естественная циркуляция масла	<b>Д</b>
естественная циркуляция воздуха и принудительная циркуляция масла с ненаправленным потоком масла	<b>МЦ</b>
естественная циркуляция воздуха и принудительная циркуляция масла с направленным потоком масла	<b>НМЦ</b>
принудительная циркуляция воздуха и масла с ненаправленным потоком масла	<b>ДЦ</b>
принудительная циркуляция воздуха и масла с направленным потоком масла	<b>НДЦ</b>
принудительная циркуляция воды и масла с ненаправленным потоком масла	<b>Ц</b>
принудительная циркуляция воды и масла с направленным потоком масла	<b>НЦ</b>
<b>5. Трёхобмоточный</b>	<b>Т</b>
<b>6. Переключение ответвлений</b>	
регулирование под нагрузкой (РПН)	<b>Н</b>
автоматическое регулирование под нагрузкой (АРПН)	<b>АН</b>
<b>7. С литой изоляцией</b>	<b>Л</b>
<b>8. Исполнение расширителя</b>	
с расширителем	<b>Ф</b>

без расширителя, с защитой при помощи азотной подушки	З
без расширителя в гофробаке (герметичная упаковка)	Г
<b>9. С симметрирующим устройством</b>	У
<b>10. Подвесного исполнения (на опоре ВЛ)</b>	П
<b>11. Назначение</b>	
для собственных нужд электростанций	С
для линий постоянного тока	П
для металлургического производства	М
для питания погружных электронасосов	ПН
для прогрева бетона или грунта (бетоногрейный), для буровых станков	Б
для питания электрооборудования экскаваторов	Э
для термической обработки бетона и грунта, питания ручного инструмента, временного освещения	ТО
шахтные трансформаторы	Ш
<b>Номинальная мощность, кВА</b>	[число]
<b>Класс напряжения обмотки ВН, кВ</b>	[число]
<b>Класс напряжения обмотки СН (для авто- и трёхобмоточных тр-ов), кВ</b>	[число]

*Примечание: принудительная циркуляция воздуха называется дутьем, то есть "с принудительной циркуляцией воздуха" и "с дутьем" равнозначные выражения.*

#### ПОРЯДОК РАБОТЫ:

1. Повторить теоретический материал;
2. Выписать элементы конструкции и описать их назначение;
3. Расшифровать буквенные обозначения силовых трансформаторов:  
ТМ - 100/35; ТДНС - 10000/35; ТРДНФ - 25000/110; АОДЦТН - 333000/750/330;

#### ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 3/1(

#### ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

**1. Цель работы:** изучить конструкцию трансформаторов, отдельных узлов трансформаторов и их взаимодействие, ознакомиться с электротехническими материалами, применяемыми в трансформаторах.

**2. Основные понятия.**

Трансформаторы широко применяются в системах передачи и распределения электроэнергии. *Трансформатором* называют статическое электромагнитное устройство, имеющее две (или более) индуктивно связанные обмотки пред-

назначенное для преобразования посредством явления электромагнитной индукции одной (первичной) системы переменного тока в другую (вторичную) систему переменного тока.

Наибольшее применение в электротехнических установках, а также в энергетических системах передачи распределения электроэнергии имеют *силовые трансформаторы*, посредством которых изменяют значения переменного напряжения и тока. При этом число фаз, форма кривой напряжения (тока) и частота остаются неизменными.

## 2.1. Классификация трансформаторов.

Трансформаторы классифицируют в первую очередь по выполняемым ими функциям. В энергетических установках различают следующие типы трансформаторов.

- 1) Силовые трансформаторы, служащие для передачи и распределения электрической энергии.
- 2) Силовые трансформаторы специального назначения, предназначенные для питания электрических печей (электропечные трансформаторы), трансформаторы для выпрямительных установок, сварочные трансформаторы и т. д.
- 3) Индукционные регуляторы (вариаторы), служащие для регулирования напряжения.
- 4) Автотрансформаторы, используемые для преобразования напряжения в небольших пределах, для пуска в ход двигателей переменного тока и т. д.
- 5) Измерительные трансформаторы, включаемые в схемы измерительных приборов и устройств релейной защиты.
- 6) Испытательные трансформаторы, используемые при испытании изоляции и высоковольтной аппаратуры высоким напряжением.

По числу фаз различают однофазные и трехфазные трансформаторы, по числу обмоток — двух-, трех- и многообмоточные.

Силовыми считают трехфазные и однофазные трансформаторы, начиная от мощностей соответственно 6,3 и 5 кВ<sup>А</sup>. Трансформаторы мощностью менее 5 кВ<sup>А</sup> называют трансформаторами малой мощности.

## 2.2. Принцип действия трансформаторов

В основе работы трансформатора лежит явление электромагнитной индукции, в соответствии с которыми значение электродвижущей силы (ЭДС), наведенной в контуре пропорционально скорости изменения потока  $\Phi$ , пронизывающего этот контур. При этом направление ЭДС определяется законом Ленца, по которому ток, вызванный этой ЭДС, стремится воспрепятствовать изменению потока  $\Phi$ , пронизывающего контур:

$$\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{e}{dt}$$

Работа трансформатора основывается на принципе электромагнитного взаимодействия двух или в общем случае любого числа контуров неподвижных относительно друг друга. Если к зажимам  $A-X$  одной из обмоток (Рис. 1) подвести напряжение  $U_1$ , от сети переменного тока, то под действием связывающего обе обмотки магнитного потока  $\Phi$  во вторичной обмотке возникает переменная

ЭДС и по вторичному контуру будет протекать ток  $I_2$ , питающий подключенные к зажимам приемники электроэнергии  $Z$ .

Таким путем осуществляется передача энергии переменного тока из первичного контура — (первичной сети) во вторичный контур (вторичную сеть).

**Рабочий процесс трансформатора** можно условно разделить на 4 стадии:

1 — возбуждение — создание потока. Первичная обмотка трансформатора подключается к сети с синусоидальным напряжением  $U_1$ , которое вызывает ток  $I_1$ . Этот ток создает синусоидально изменяющийся магнитный поток  $\Phi$ , замыкающийся по сердечнику.

2 — создание ЭДС. Под действием потока  $\Phi$ , индуцируются ЭДС: в первичной обмотке будет наводиться ЭДС самоиндукции  $E_1$ , во вторичной — ЭДС взаимной индукции  $E_2$ ; значения  $E_1$  и  $E_2$  определяются числами витков соответствующих обмоток.

Таким образом, согласно второму закону Кирхгофа, для первичной обмотки:  $U_1 = -E_1 + I_1 Z_1$ , т. е. ЭДС  $E_1$ , наведенная в первичной обмотке, совместно с падением напряжения на ее сопротивлении  $I_1 Z_1$  уравновешивает подводимое к этой обмотке напряжение сети  $U_1$ .

Аналогично для вторичной обмотки:  $U_2 = E_2$ .

3 — подключение нагрузки. Ко вторичной обмотке подключается электрическая нагрузка; под действием напряжения на ней и по вторичной обмотке пойдет ток  $I_2$ .

4 — электропреобразование. Намагничающая сила вторичной обмотки, обусловленная током  $I_2$ , направлена встречно намагничающей силе первичной обмотки и, следовательно, стремится уменьшить созданный этой намагничающей силой поток  $\Phi$ . Однако в действительности заметного изменения магнитного потока не происходит, так как для поддержания электрического равновесия между  $U_1$  и  $E_1$  одновременно с появлением тока во вторичной обмотке в первичной обмотке возникает дополнительный ток, который компенсирует размагничающее действие тока  $I_2$  и поддерживает магнитный поток постоянным, чем обеспечивается равновесие между ЭДС  $E_1$ , наведенной в первичной обмотке, и напряжением сети  $U_1$ .

Потребность в трансформации электрической энергии встречается в самых разнообразных областях промышленности и техники. В соответствии с этим существует большое разнообразие трансформаторов как по назначению, так и по мощности и напряжению. Однако все они имеют общую конструктивную схему, которая включает в себя (рис. 2) замкнутую магнитную систему — магнитопровод. Из листовой электротехнической стали; электрическую систему — две или несколько обмоток, охватывающих стержни магнитопровода и изолированных относительно их; охлаждающую систему — воздушную, масляную, водяную или комбинированную; механическую.

Систему, обеспечивающую механическую прочность всей конструкции трансформатора; вспомогательное оборудование.

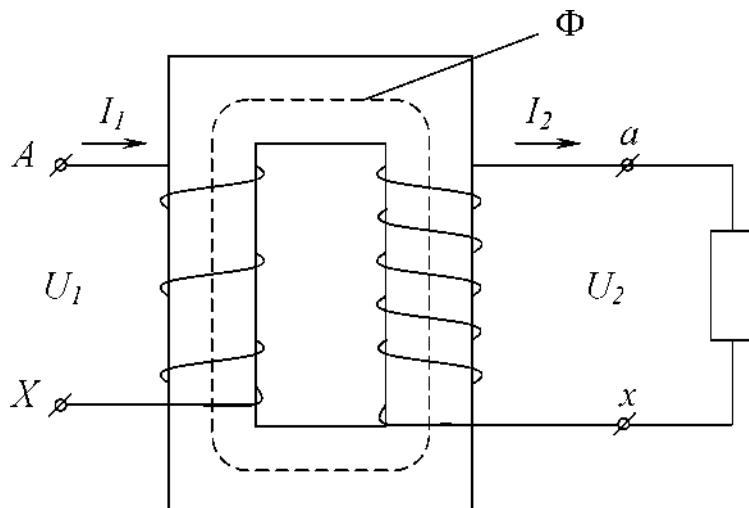


Рис. 19. Электромагнитная схема однофазного трансформатора

Работа трансформатора характеризуется многими параметрами. Для силовых трансформаторов очень важен высокий к.п.д., так как энергия, генерируемая на электростанции, многократно трансформируется, прежде чем достигает приемника. По этой же причине форма кривой напряжения не должна иска-жаться при трансформировании.

Падения напряжения в обмотках трансформаторов не должны быть слишком большими, чтобы изменение напряжения при сбросе нагрузки не сказывалось на работе приемников электрической энергии. Вместе с тем они не должны быть слишком малыми, чтобы ограничить токи коротких замыканий.

**Регулируемым** трансформатором называют трансформатор, в который встроено специальное устройство для регулирования напряжения.

Трансформаторы, подключаемые к воздушным линиям передачи, должны быть грозоупорными: напряжения на витках обмоток должны распределяться более или менее равномерно при переходных процессах. С этой целью в трансформаторы встраивают заземленный экран, увеличивающий емкость средней части обмотки относительно корпуса и магнитной системы. Такая емкостная защита применяется во всех отечественных трансформаторах напряжением 110 кВ и выше.

На заводском щитке указывают тип трансформатора и его номинальные величины, например частоту, мощность, напряжение, ток, обеспечивающие работу в условиях, определенных нормативными документами. Номинальной мощностью является полная мощность, гарантированная исполнителем при номинальной частоте и номинальном напряжении. У двухобмоточного трансформатора это мощность каждой из его обмоток. Номинальное напряжение обмотки есть напряжение при холостом ходе между зажимами трансформатора, связанными с обмоткой. Номинальный ток обмотки определяется по ее номинальной мощности, номинальному напряжению и множителю, учитывающему число фаз.

Многочисленные требования к свойствам трансформаторов обусловливают разнообразные конструктивные типы и исполнения трансформаторов. Однако

основные процессы, определяющие работу трансформаторов и приемы их изучения, по существу, одинаковы для всех типов трансформаторов.

## 2.3. Конструкция трансформатора.

Современный трансформатор состоит из различных конструктивных элементов: магнитопровода, обмоток, бака и др. Магнитопровод с насыщенным на его стержни обмотками составляет *активную часть* трансформатора. Остальные элементы трансформатора называют *неактивными* (вспомогательными) частями. Конструктивная схема однофазного трансформатора с масляным охлаждением приведена на рис. 20.

Магнитопровод трансформатора является конструктивной, механической основой и служит для локализации в ней основного магнитного потока трансформатора. Для приготовления магнитопроводов применяются специальные тонколистовые электротехнические стали.

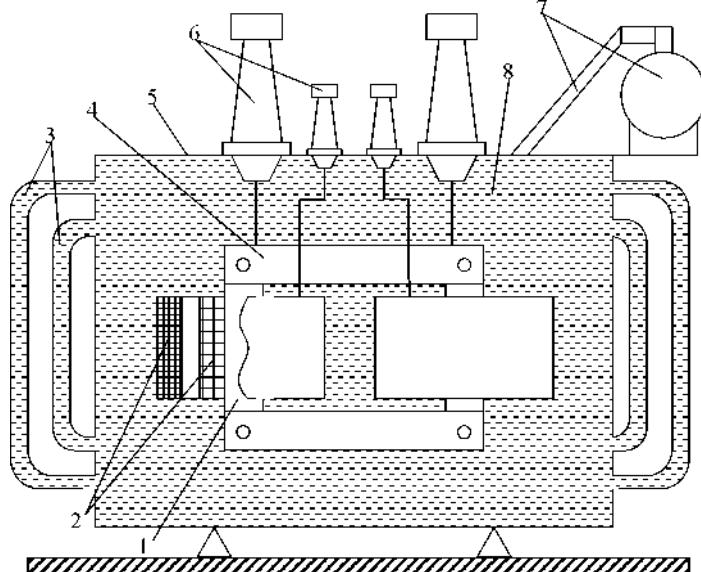


Рис. 20. Конструктивная схема однофазного трансформатора с масляным охлаждением: 1 — магнитопровод; 2 — обмотки высшего и низшего напряжения; 3 — трубы для циркуляции масла и его охлаждения; 4 — ярмовая балка; 5 — масляный бак; 6 — выводы низшего и высшего напряжения; 7 — вспомогательное оборудование системы охлаждения; 8 — масло.

Обмотки трансформатора служат для создания магнитного поля, посредством которого осуществляется передача электрической энергии, а также обеспечивают наведение ЭДС, требуемых по условиям эксплуатации трансформатора.

## 2.4. Вспомогательное оборудование.

Баки силовых трансформаторов бывают: гладкие, ребристые, трубчатые, радиаторные. Для герметизации трансформатора бак закрывается крышкой.

Баки трансформаторов, устанавливаемых во взрывоопасных помещениях, заливают негорючей синтетической жидкостью совтолом. При нагреве совтоля выделяется газообразный хлористый водород. В жилых и общественных помещениях устанавливают сухие трансформаторы.

Для механической защиты изоляции и тонких проводов обмоток маломощные трансформаторы заливают озокеритом или битумом. Трансформаторы,

предназначенные для работы при температурах от  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $+70^{\circ}\text{C}$  или в помещениях с агрессивной средой, заливают эпоксидными смолами.

Вспомогательное оборудование служит для контроля за состоянием масла, защиты от воздействия окружающего воздуха и защиты от разрушения бака при внутренних повреждениях трансформатора и включает в себя ряд устройств.

Расширитель устанавливается на крышке бака и служит для компенсации колебаний уровня масла в баке трансформатора при всех возможных колебаниях температуры и предохраняет масло в баке от непосредственного соприкосновения с окружающим воздухом. На торцевой части расширителя или на стенке бака устанавливается маслоуказатель, который служит для контроля за уровнем масла.

Газовое реле устанавливаемое между расширителем и баком служит для защиты трансформатора от внутренних повреждений (витковом замыкании, пробое изоляции и т. п.) сопровождающихся выделением газа.

Для предохранения от разрушения бака трансформатора при повреждениях, сопровождающихся выделением большого количества газа и резким повышением давления внутри бака, устанавливается выхлопная (предохранительная) труба.

Трансформаторы мощностью 1000 кВА и более снабжают газовым реле 7 (рис. 21), представляющим собой небольшой котел, в котором находятся два поплавка с расположенными около них контактами. Котел устанавливают на трубе, идущей от бака к расширителю. Во время работы трансформатора часть изоляции от нагрева разлагается. Газообразные продукты поднимаются вверх и заполняют верхнюю часть закрытого котла. Верхний поплавок при этом опускается и замыкает контакты, сигнализирующие о загрязнении масла. В верхней части газового реле находится кран для отбора проб газа. При аварийных режимах, когда газовыделение и расширение масла протекают наиболее интенсивно, масло движется в расширитель с большой скоростью и отклоняет нижний поплавок, который замыкает контакты в цепи защиты трансформатора.

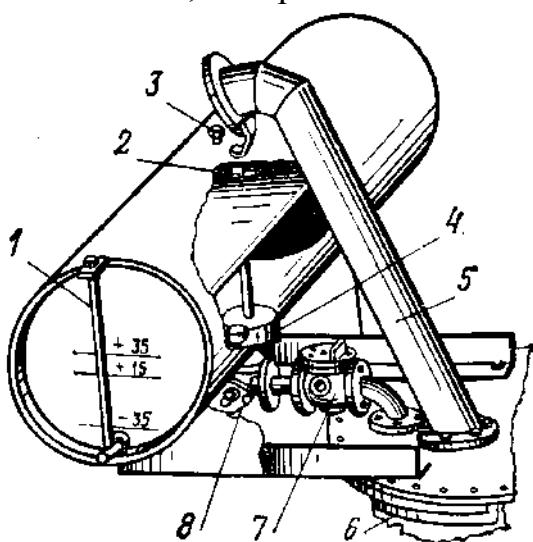


Рис. 21. Вспомогательное оборудование: 1 — указатель уровня масла; 2 — труба для свободного обмена воздуха; 3 — пробка для заливки масла; 4 —

грязеотстойник; 5 — выхлопная труба; 6 — бак трансформатора; 7 — газовое реле 8 — кран для отъединения расширителя.

Трансформаторы мощностью 1000 кВА и более снабжают выхлопными трубами 5, закрытыми тонкими стеклянными мембранными или предохранительными клапанами. При аварии, когда давление в баке трансформатора превысит  $0,5 \cdot 10^6$  Па, мембрана продавливается, и масло выливается через выхлопную трубу, не повреждая бак.

Трансформаторы мощностью более 1000 кВ А комплектуются воздухоосушителем для очистки от влаги и загрязнения воздуха, поступающего в трансформатор, и термосифонным фильтром для непрерывной автоматической регенерации масла.

Арматура бака (вентили, задвижки, краны, пробки) служит для отбора, пробы и спуска масла.

Для контроля температуры трансформаторы снабжают термометрами 1, устанавливаемыми на крышке бака (рис. 21), а при мощности 1000 кВА и более — также и в средней части бака. Для заливки и слива масла баки снабжают пробками 4, 6, 11 и кранами.

Для перемещения трансформаторы устанавливают на катки. Остов трансформатора для заземления электрически соединен с баком. Контур заземления не должен образовывать короткозамкнутых витков вокруг любой части магнитопровода.

В зависимости от типа системы охлаждения существуют: сухие трансформаторы; масляные трансформаторы и трансформаторы с негорючим жидким диэлектриком.

В сухих трансформаторах охлаждение осуществляется за счет естественной или принудительной циркуляции воздуха.

В масляных трансформаторах осуществляется принудительная или естественная циркуляция масла в баке, где размещается активная часть трансформатора.

## 2.5. Системы охлаждения трансформаторов.

При работе трансформатора происходит нагрев обмоток и магнитопровода за счет потерь энергии в них. Предельный нагрев частей трансформатора ограничивается изоляцией, срок службы которой зависит от температуры нагрева. Чем больше мощность трансформатора, тем интенсивней должна быть система охлаждения. Ниже приводится описание систем охлаждения трансформаторов.

**Естественное воздушное охлаждение** трансформаторов осуществляется путем естественной конвекции воздуха и частично лучеиспускания в воздухе. Такие трансформаторы получили название сухих. Условно принято обозначать естественное воздушное охлаждение при открытом исполнении — С; при защищенным исполнении — СЗ, при герметизированном исполнении — СГ.

Допустимое превышение температуры обмотки сухого трансформатора над температурой охлаждающей среды зависит от класса нагревостойкости изоляции и согласно ГОСТ 11677-85 должно быть не больше 60 °C (класс А); 75 °C (класс Е); 80 °C (класс В); 100 °C (класс С); 125 °C (класс Н).

Данная система охлаждения малоэффективна, поэтому применяется для трансформаторов мощностью до 1600 кВ-А при напряжении до 15 кВ.

**Естественное масляное охлаждение (М)** выполняется для трансформаторов мощностью до 16000 кВА включительно. В таких трансформаторах тепло, выделенное в обмотках и магнитопроводе, передается окружающему маслу, которое, циркулируя по баку и радиаторным трубам, передает его окружающему воздуху. При номинальной нагрузке трансформатора температура масла в верхних, наиболее нагретых слоях не должна превышать +95 °С.

**Масляное охлаждение с дутьем и естественной циркуляцией масла (Д)** применяется для более мощных трансформаторов. В навесных охладителях из радиаторных труб помещаются вентиляторы. Термосифонный фильтр, заполненный силикагелем, служит для поглощения продуктов окисления масла. При циркуляции масла через фильтр происходит непрерывная регенерация его. Вентилятор засасывает воздух снизу и обдувает нагретую верхнюю часть труб. Пуск и остановка вентиляторов могут осуществляться автоматически в зависимости от нагрузки и температуры нагрева масла. Трансформаторы с таким охлаждением могут работать при полностью отключенном дутье, если нагрузка не превышает 100 % номинальной, а температура верхних слоев масла не более +55 °С, а также при минусовых температурах окружающего воздуха при температуре масла не выше +45 °С, независимо от нагрузки. Максимально допустимая температура масла в верхних слоях при работе с нормальной нагрузкой +95 °С.

Форсированный обдув радиаторных труб улучшает условия охлаждения масла, а, следовательно, обмоток и магнитопровода трансформатора, что позволяет изготавливать такие трансформаторы до 100000 кВ-А.

**Масляное охлаждение с дутьем и принудительной циркуляцией масла (ДЦ)** применяется для трансформаторов мощностью 63000 кВ-А и более.

Охладители 3 состоят из системы тонких ребристых трубок, обдуваемых снаружи вентиляторами 4. Электронасосы 2, встроенные в маслопроводы, создают непрерывную принудительную циркуляцию масла через охладители (рис. 8.) Адсорбный фильтр 5 служит для регенерации масла. Благодаря большой скорости циркуляции масла, развитой поверхности охлаждения и интенсивному дутью охладители обладают большой теплоотдачей и компактностью. Переход к такой системе охлаждения значительно уменьшает габариты трансформаторов. Охладители могут устанавливаться вместе с трансформатором на одном фундаменте или на отдельных фундаментах рядом с баком трансформатора. В трансформаторах с системой охлаждения ДЦ максимально допустимая температура масла +75 °С.

**Масляно-водяное охлаждение с принудительной циркуляцией масла**

(Ц) принципиально устроено так же, как и система ДЦ, но в отличие от последнего охладители состоят из трубок, по которым циркулирует вода, а между трубками движется масло. Температура масла на входе в маслоохладитель не должна превышать +70 °С.

Чтобы предотвратить попадание воды в масляную систему трансформатора, давление масла в маслоохладителях должно превышать давление циркули-

рующей в них воды не менее чем на 0,02 МПа. Эта система охлаждения эффективна, но имеет сложное конструктивное выполнение и применяется на мощных трансформаторах (630 МВ\*А и более).

На трансформаторах с системами охлаждения ДЦ и Ц устройства принудительной циркуляции масла должны автоматически включаться одновременно с включением трансформатора и работать непрерывно независимо от его нагрузки. Число включаемых в работу охладителей определяется нагрузкой трансформатора. Трансформаторы должны иметь сигнализацию о прекращении циркуляции масла, охлаждающей воды или об остановке вентилятора.

В настоящее время ведутся разработки новых конструкций трансформаторов с обмотками, охлаждаемыми до очень низких температур. Металл при низких температурах обладает сверхпроводимостью, что позволяет резко уменьшить сечение обмоток. Трансформаторы с использованием принципа, сверхпроводимости будут иметь малую транспортную массу при мощности 1000 МВ-А и выше.

### **3. Содержание и методика выполнения работы.**

- 3.1. Для выполнения работы необходимо изучить физические явления, на которых основан принцип действия трансформаторов
- 3.2. Провести внешний осмотр, определить назначение трансформатора.
- 3.3. Записать паспортные данные трансформатора;
- 3.4. Изучить состав, устройство и назначение узлов трансформатора;
- 3.5. Определить материалы, из которых изготовлены узлы, и определить тип системы охлаждения трансформатора;
- 3.6. Изучить принцип взаимодействия узлов машины, составить конструктивную схему трансформатора;
- 3.7. Выполнить письменно отчет по прилагаемой форме на листах формата А4.

### **4. Порядок выполнения работы.**

- 4.1. Получить допуск к работе. Для этого необходимо: заготовить бланк отчета; ознакомиться с трансформатором, установленном на стенде; записать паспортные данные; отчитаться преподавателю о цели и порядке выполнения работы.
- 4.2. Изучить общую конструкцию трансформатора и назначение его основных систем и узлов. Выполнить эскиз трансформатора в сборе, на котором выделить основные системы и узлы.
- 4.3. Изучить основные типы изоляторов высокого и низкого напряжения и способы их крепления на крышке бака.
- 4.4. Изучить назначение механической системы трансформаторов, способы крепления выемной части внутри бака и к крышке трансформаторов.
- 4.5. Изучить назначение систем охлаждения, классификацию и области применения различных систем охлаждения трансформаторов.

### **5. Контрольные вопросы**

- 5.1. Опишите физические явления и законы, на которых основан принцип действия трансформатора.
- 5.2. Опишите состав узлов трансформатора и объясните их назначение.

- 5.3. Составьте конструктивную схему трансформатора.
- 5.4. Объясните рабочий процесс трансформатора на холостом ходу.
- 5.5. Объясните рабочий процесс трансформатора под нагрузкой.
- 5.6. Опишите конструкционные, активные и изоляционные материалы, применяемые в трансформаторах.
- 5.7. Опишите системы охлаждения трансформаторов.
- 5.8. Объясните назначение и опишите вспомогательное оборудование трансформаторов.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 3/2

### ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ МАГНИТОПРОВОДА И ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА

**1. Цель работы:** ознакомиться с конструкцией, электротехническими материалами магнитопроводов и обмоток трансформаторов.

**2. Основные понятия.**

Трансформатор состоит из 5 основных систем: магнитная система, электрическая система, механическая система, система охлаждения и система регулирования напряжения.

Магнитная система предназначена для проведения основного потока трансформатора, она состоит из магнитопровода.

Электрическая система предназначена для подведения первичного тока и напряжения к первичным обмоткам и снятия напряжения и тока со вторичных обмоток трансформатора. Она состоит из вводов и обмоток высокого и низкого напряжения продольной и главной изоляции (межслоевой и межобмоточной, изоляции, а также изоляции между магнитопроводом и обмотками).

Механическая система предназначена для крепления всех остальных систем и узлов трансформатора, она состоит из снятых балок, швекаров, крепежных шпилек и болтов и прочих механических элементов.

Система охлаждения предназначена для отведения тепла от магнитопровода и обмоток трансформатора, которое образуется при протекании по нему рабочего тока. Она состоит из бака, заполненного охлаждающей жидкостью и приспособлений для охлаждения этой жидкости.

Система регулирования напряжения предназначена для поддерживания напряжения на заданном уровне (стабилизации) напряжения у потребителей при измерении нагрузки питающих и охлаждающих линий.

На рисунке 2 показано общее устройство трехфазного масляного трансформатора.

На стержнях 8 магнитопровода расположены обмотки низшего (9) и высшего (10) напряжения. Выводные изоляторы 2 и 3 (рис. 10) служат для проведения

выводов обмоток сквозь крышку бака. Магнитная система с обмотками помещена в бак 12. Бак трансформатора и часть укрепленного на нем расширителя 7 заливают очищенным и высушенным трансформаторным маслом или специальной негорючей жидкостью. Воздух, имеющийся в верхней части расширителя, сообщается с окружающей средой через дренажную трубу. Через эту трубу в расширитель попадает окружающий воздух без капель влаги, если температура трансформатора уменьшается, и уровень масла понижается. При повышении температуры объем масла увеличивается, и часть воздуха из расширителя выходит в атмосферу.

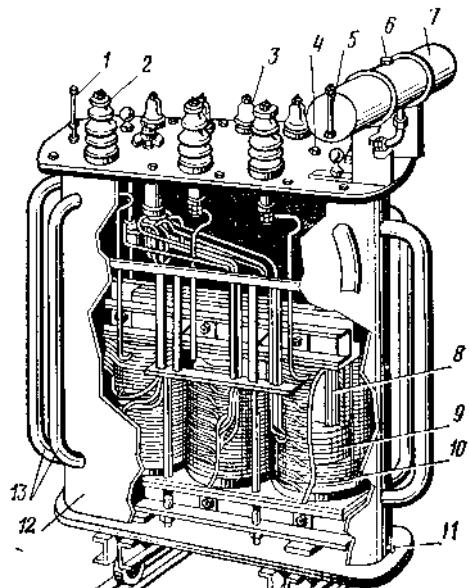


Рис. 10. Устройство трехфазного трансформатора средней мощности:

1 — термометр; 2 — выводы обмотки ВН; 3 — выводы обмотки НН; 4 и 6 — пробки для заливки масла; 5 — указатель уровня масла; 7 — расширитель; 8 — магнитопровод; 9 — обмотка НН; 10 — обмотка ВН; 11 — пробка для спуска масла; 12 — бак; 13 — трубы для охлаждения масла. Для контроля уровня масла расширитель снабжен масломерным стеклом, против которого на днище расширителя нанесены деления, обозначающие нормальный уровень масла при различных его температурах и номинальной нагрузке трансформатора. Рядом с дренажной трубой имеется отстойник 4 для грязи и влаги.

## 2.1. Конструкция магнитопроводов трансформатора.

Магнитопровод в трансформаторе выполняет две функции: во-первых, он составляет магнитную цепь, по которой замыкается основной магнитный поток трансформатора, а во-вторых, он предназначен для установки крепления обмоток. Магнитопровод собирают из тонких (0,5 мм) стальных пластин, покрытых с двух сторон изолирующей пленкой. Такая конструкция магнитопровода обусловлена стремлением ослабить вихревые токи, наводимые в нем переменным магнитным потоком, а, следовательно, уменьшить величину потерь энергии в трансформаторе.

Существуют два основных типа конструкций магнитопроводов: стержневые и броневые (Рис. 11 и 12).

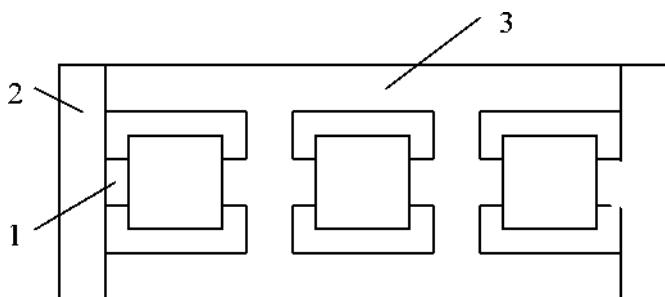


Рис. 11. Броневой магнитопровод трехфазного трансформатора: 1 — стержень; 2 — торцевое ярмо; 3 — боковое ярмо.

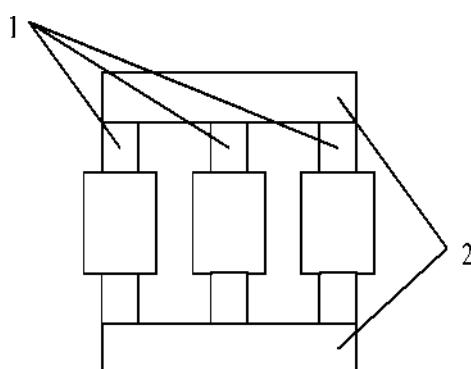


Рис. 12. Стержневой магнитопровод трехфазного трансформатора стержень: 1-2-торцевое (верхнее и нижнее) ярмо.

По способу соединения стержней с ярмами магнитопроводы подразделяют на стыковые, шихтованные и навитые (ленточные). В стыковых магнитопроводах стержни ярма собирают из пластин электротехнической стали отдельно, а затем соединяют (стыкуют) по плоскости разъема после насадки обмоток на стержни (рис. 13).

В шихтованных магнитопроводах пластины стержней и ярм собирают в

переплет — шихтуют, благодаря этому они не имеют сплошного стыка, что приводит к уменьшению магнитных стыков и тока холостого хода (рис. 14).

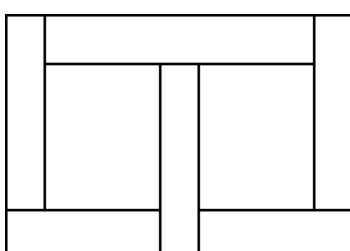
В витых магнитопроводах отдельные части навиваются из лент рулонной стали, а затем скрепляются в единую конструкцию. Стержни и ярма шихтованного магнитопровода стягиваются (прессуются) ярмовыми балками, которые

б

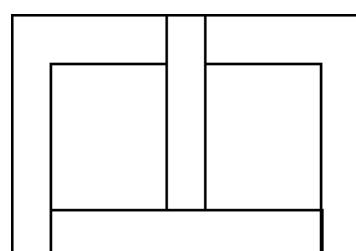
стягиваются шпильками.

а

Рис. 13. Стыковые магнитопроводы: а) собранный из плоских пластин; б) навитый из ленты, разрезной.



1, 3, 5...слои



2, 4, 6...слои

#### Рис. 14. Схема шихтовки магнитопровода

Магнитопровод со всеми узлами и деталями, служащими для соединения его отдельных частей в единую конструкцию, называют остовом трансформатора.

Магнитный поток трансформатора проходит по магнитной системе или магнитопроводу, набранному из листовой электротехнической стали. Горячекатаные стали марок 1511, 1512, 1513 называют трансформаторными. За последние годы расширилось применение холоднокатаной текстуированной стали марок 3411, 3412, 3413. При частоте 50-100 Гц используют листы толщиной 0,35-0,5 мм, изолированные один другого лаком, изоляционной бумагой или тонкой оксидной пленкой. При частотах 400-3000 Гц применяют более тонкие листы холоднокатаной стали толщиной от 0,2 до 0,06 мм.

Части магнитопровода, на которых расположены обмотки, называют стержнями, а части, не несущие обмоток — ярмами. По расположению стержней различают трансформаторы стержневые, у которых обмотки расположены на всех стержнях (рис. 15 а), и броневые, у которых обмотки расположены только на среднем стержне (рис. 15 б, в). У броневого однофазного трансформатора магнитный поток проходит по стержню и разветвляется в два ярма, площадь поперечного сечения которых берется вдвое меньше, чем у стержня.

Для удобства сборки магнитопроводы трехфазных трансформаторов располагаются в одной плоскости (трехстержневой Ш-образный плоский магнитопровод на рисунках 15 д, е, ж) с примерно одинаковым сечением стержней и ярм, размещенная на каждом из стержней первичную и вторичную обмотки одной из фаз. Один слой листов магнитопровода из горячекатаной стали показан на рисунке 15 д. Трансформаторы большой мощности для уменьшения общей высоты делают бронестержневыми (рис. 15 з), располагая рядом с крайними стержнями боковые ярма, в результате чего упрощается их транспортировка по железным дорогам. Высота ярм при этом уменьшается в  $^3$  раз.

Ярмо, соединяющее стержни, выполняют обычно прямоугольного сечения, которое делают на 10-15 % больше, чем сечение стержней. Это уменьшает нагрев стали и потери мощности в ней. В силовых трансформаторах сердечники собирают из прямоугольных листов. Сочленение стержней и ярма обычно производят с взаимным перекрытием их листов «внахлестку». Для этого листы в двух смежных слоях сердечника располагают, как показано на рис. 15 з, в и г, т. е. листы каждого последующего слоя перекрывают стык в листах предыдущего слоя, существенно уменьшая магнитное сопротивление в месте сочленения. После сборки магнитопровода листы верхнего ярма вынимают, на стержни устанавливают катушки и ярмо снова ставят на место (рис. 16 д).

Пакеты стягивают стальными шпильками, изолированными относительно стержней трубками из изоляционного материала. Ярмо стягивают деревянными или стальными опорными балками. Сердечник вместе с опорными балками и другими вспомогательными деталями образует остов трансформатора.

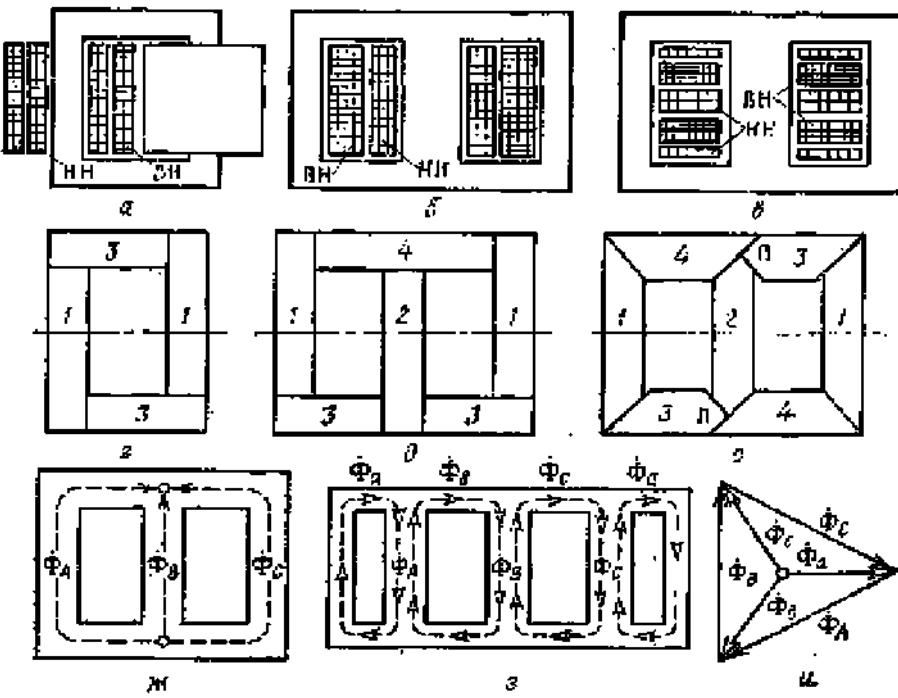


Рис. 15. Типы магнитопроводов трансформатора.

При работе силовых трансформаторов магнитопровод и другие стальные части находятся в сильном электрическом поле, вследствие чего они могут приобрести электрический заряд. Чтобы этого избежать, магнитопровод и балки, стягивающие ярмо, заземляют с помощью медных лент.

Магнитопроводы собирают встык или переплет. В стыковых магнитопроводах стержни и ярма собирают раздельно, а затем устанавливают встык и соединяют при помощи стяжных балок и шпилек. Масса балок и шпилек при этом получается большая. В местах стыка во избежание замыкания пластин сердечника с пластинами ярма прокладывают изоляцию, которая попутно создает воздушные промежутки и увеличивает магнитное сопротивление магнитопровода.

При сборке магнитопровода впереплет (внахлестку) стержни и ярма собирают так, чтобы пластины каждого последующего слоя перекрывали стыки между пластинами предыдущего слоя. На рисунках 15 г, д, е изображены нечетные слои пластин однофазного и трехфазных трансформаторов с плоскими магнитопроводами. Четные слои укладываются из таких же элементов, повернутых на  $180^\circ$  относительно штриховой пунктирной осевой линии.

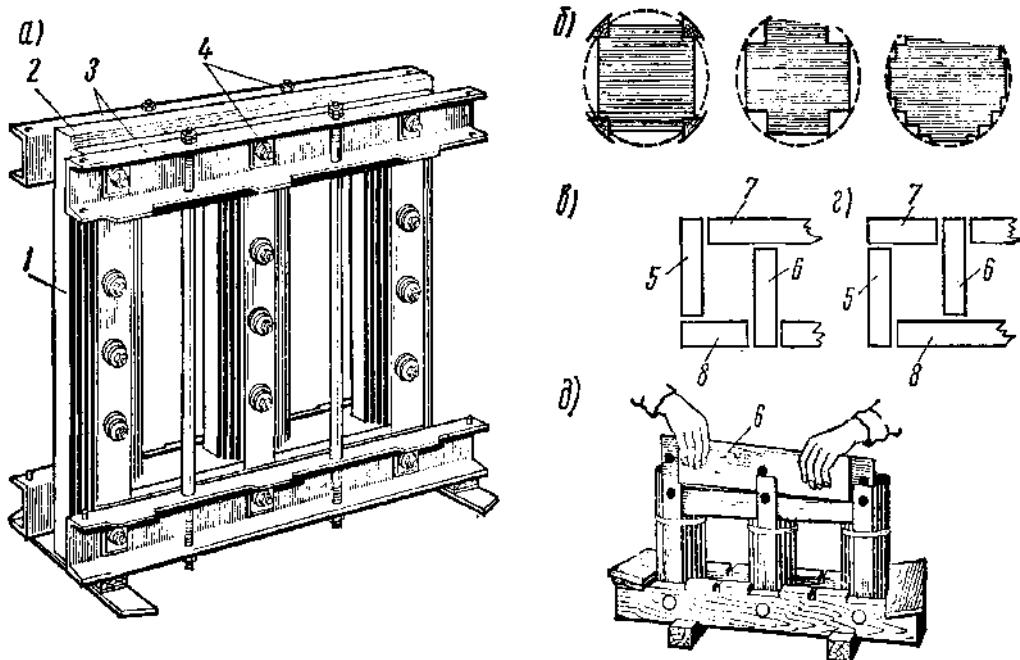


Рис. 16. Магнитопровод силового трехфазного трансформатора:

а — общий вид; б — формы поперечного сечения стержней; в и г — расположение листов в двух смежных слоях сердечника; д — сборка сердечника; 1 — стержень; 2 — ярмо; 3 — опорная балка; 4 — стяжные шпильки; 5 и 6 — листы крайнего и среднего стержней; 7 и 8 — листы верхнего и нижнего ярем

При выполнении магнитопровода из листов текстуированной холоднокатаной стали, имеющей лучшие магнитные свойства в направлении прокатки, листы вырубают вдоль этого направления. В местах поворота магнитного потока листы обрубают под углами, близкими к  $45^\circ$  (рис. 15 е). Число листов можно уменьшить, объединив листы: 3 и 4 и ликвидировав показанную на этом рисунке просечку п.

Ярма делают прямоугольного или ступенчатого сечения, а при круглых стержнях — эллипсоидного.

Собранный магнитопровод спрессовывают и стягивают рамами и шпильками. После сборки шпильки, скреплявшие верхнее ярмо, вынимают и ярмо разбирают. На стержни надевают обмотки с изоляцией, вновь вкладывают на свои места пластины верхнего ярма и магнитопровод стягивают. Совокупность

магнитной системы и всех крепящих ее деталей называют остовом трансформатора.

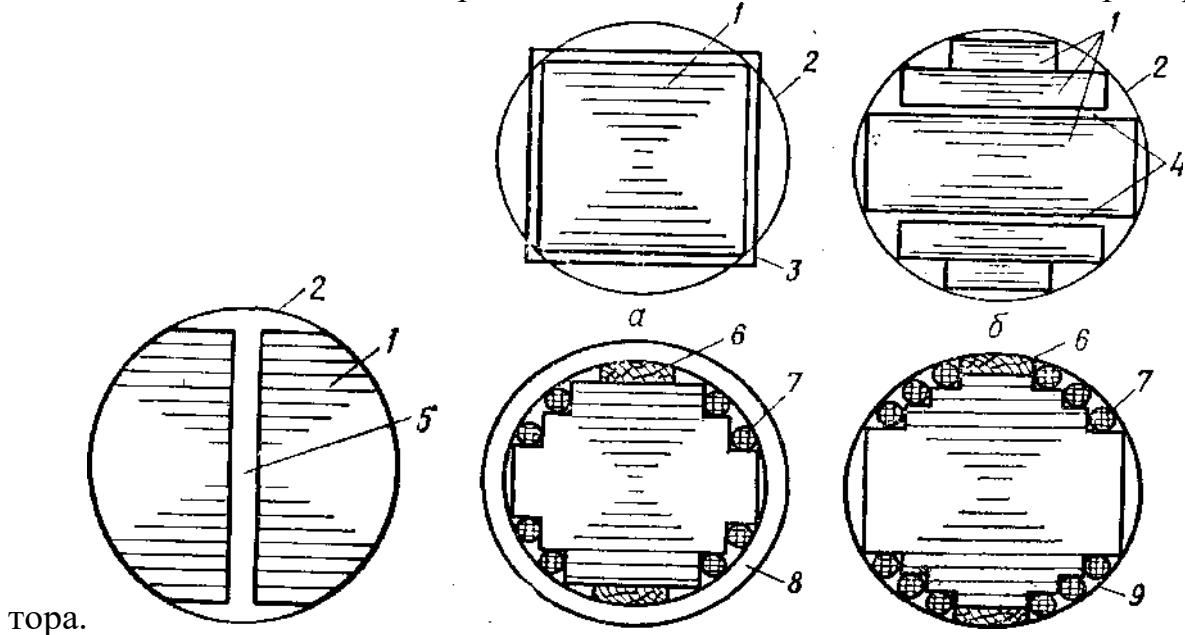


Рис. 17. Форма сечения стержней трансформаторов (а — прямоугольная; б — ступенчатая; в — круглая) и способы опрессовки (г — в изоляционном цилиндре; д — бандажами из стеклоленты): 1 — пакеты листов; 2 — описанная окружность; 3 — изоляционный каркас; 4 — продольные каналы; 5 — поперечный канал; 6 — деревянный клин; 7 — деревянный стержень; 8 — изоляционный цилиндр; 9 — бандаж из стеклоленты.

## 2.2. Конструкция обмоток трансформатора.

Обмотки трансформатора служат для создания магнитного поля, посредством которого осуществляется передача электрической энергии, а также обеспечивают наведение ЭДС, требуемых по условиям эксплуатации трансформатора.

Обмотки выполняются из медных или алюминиевых изолированных проводов круглого или прямоугольного сечения. Для изготовления проводов используется красная электротехническая медь марок ПММ и ПМТ. Марки проводов обмоток: ПБ, ПБУ, АПБ, АПБУ, ПБД и др.

По расположению на стержне обмотки подразделяются на концентрические и чередующиеся (Рис. 18 а и 18 б).

Обмотки выполняют в виде концентрических или чередующихся дисковых катушек. Ближе к стержню располагают обмотки низшего напряжения НН, дальше от него — обмотки высшего напряжения ВН. +

вольтных маломощных трансформаторов или ставят изоляционные цилиндры и втулки у высоковольтных. От магнитной системы обмотки отделяют изоляционными каркасами у низковольтных трансформаторов или изоляционными цилиндрами, прокладками и втулками у высоковольтных.

а

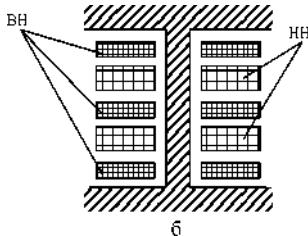


Рис. 18. Конструкция обмоток: а) концентрические; б) чередующиеся.

При концентрическом расположении катушек получается повышенное индуктивное сопротивление рассеяния. Для его уменьшения применяют чередующиеся обмотки, катушки которых выполняют в форме дисков (шайб) небольшой высоты и собирают группами в следующем порядке: одна шайба низшего напряжения, затем две шайбы высшего напряжения и вновь шайба низшего напряжения. Группы катушек соединяют последовательно или параллельно.

Начала обмоток обозначают первыми буквами латинского алфавита А, В, С для высшего напряжения и а, б, с для низшего напряжения а концы — последними буквами (Х, Y, Z — для высшего напряжения и х, у, з — для низшего напряжения). Нулевой (нейтральный) вывод обозначают цифрой 0.

Винтовые обмотки применяют в качестве обмоток НН при токе более 300 А. Винтовые обмотки подразделяются на одно- и многоходовые.

Основным элементом каждой обмотки является виток, который состоит из одного или нескольких параллельных проводников. Совокупность витков соединенных последовательно, образует катушку. Обмотка может состоять из одной или нескольких катушек. Витки, вплотную намотанные на цилиндрической поверхности, образуют слой.

По конструктивно-технологическим признакам цилиндрические обмотки подразделяют на одно- и многослойные обмотки.

Кроме этих существуют непрерывные катушечные обмотки, состоящие из последовательно соединенных дисковых катушек. В последние годы в трансформаторах используются обмотки, изготовленные из алюминиевой фольги.

Цилиндрические обмотки применяются в трансформаторах классов напряжения 10-35 кВ в качестве обмоток ВН, иногда НН.

### 3. Содержание и методика выполнения работы.

- 3.1. Ознакомиться с назначением, конструкцией и классификацией магнитопроводов.
- 3.2. Ознакомиться с назначением, конструкцией и классификацией обмоток трансформатора.
- 3.3. Определить материалы, из которых изготовлены узлы.
- 3.4. Сделать контрольный отчет на формате А4.

### 4. Порядок выполнения.

- 4.1. Получить допуск к работе.
- 4.2. Провести внешний осмотр трансформатора.
- 4.3. Изучить основные типы магнитопроводов, их конструкцию, порядок шихтовки крепления и изоляции магнитопровода и применяемые материалы. Выполнить эскиз магнитопровода изучаемого трансформатора с указанием размеров и особенностей крепления и конструкции.

- 4.4. Изучить основные типы обмоток ВН и НН. Выполнить их эскизы и указать области применения. Показать на эскизе способы крепления обмоток на стержнях магнитопровода и способы усиления главной изоляции обмоток ВН.
- 4.5. Определить тип магнитопровода и обмоток трансформатора.
- 4.6. Записать в отчет классификации магнитопровода и обмоток трансформатора.
- 4.7. Изучить устройство магнитопровода и принцип его работы.
- 4.8. Изучить устройство обмоток трансформатора и принцип их работы.
- 4.9. Определить ориентировочно, из какого материала изготовлены узлы.
- 4.10. Выполнить письменно отчет на листах формата А4.

## **5. Контрольные вопросы.**

- 5.1. Опишите системы, из которых состоит трансформатор.
- 5.2. Опишите основные узлы трансформатора.
- 5.3. Опишите конструкции магнитных систем трансформаторов (типы магнитопроводов способы их крепления, применяемые материалы, изоляция магнитопроводов)
- 5.4. Опишите классификацию обмоток трансформатора.
- 5.5. Опишите конструкцию обмоток трансформатора.
- 5.6. Опишите электрическую систему трансформатора (конструкции обмоток, вводов изоляторов, назначение трансформаторного масла).
- 5.7. Опишите материалы, используемые для изготовления обмоток и магнитопроводов трансформатора.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4  
СНЯТИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ХОЛОСТОГО ХОДА И КОРОТКОГО  
ЗАМЫКАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Цель работы: собрать схему, произвести измерения и построить  
характеристики холостого хода и короткого замыкания  
однофазного трансформатора

I. СНЯТИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ХОЛОСТОГО ХОДА

$I_0 = F(U)$ ,  $P_0 = F(U)$ ,  $\cos \Phi_0 = F(U)$  ТРАНСФОРМАТОРА

Электрическая схема соединений

- Перечень аппаратуры
- Указания по проведению эксперимента

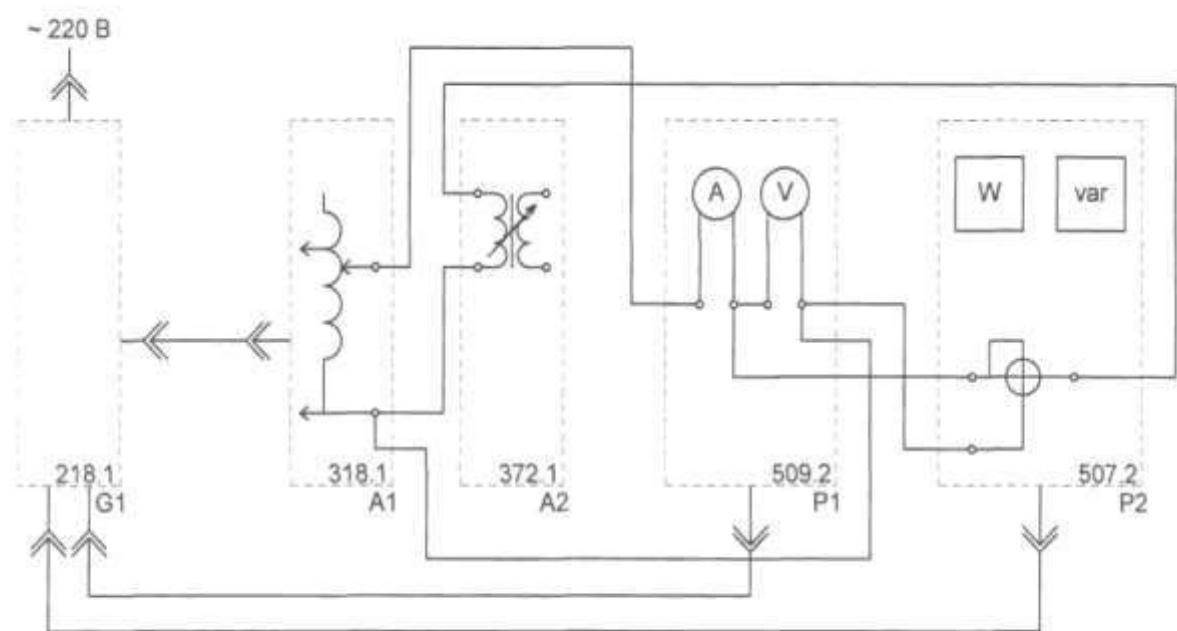


Рисунок 1. Электрическая схема соединений

Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Однофазный источник питания	218.1	~ 220 В / 1,6 А
A1	Регулируемый автотрансформатор	318.1	~ 0...240 В / 2 А
A2	Однофазный трансформатор	372.1	80 ВА 220 / 198...242 В
P1	Блок мультиметров	509.2	2 мультиметра ≤ 0...1000 В / ≤ 0...10 А / 0...20 МОм

### Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" автотрансформатора A1.
- Соедините электрическим шнуром приборную вилку электропитания «220 В» источника G1 с розеткой однофазной трехпроводной электрической сети питания лаборатории напряжением 220 В.
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
- Поверните регулировочную рукоятку автотрансформатора A1 в крайнее против часовой стрелки положение.
- Включите устройство защитного отключения и автоматические выключатели источника G1.
- Включите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.
- Активизируйте мультиметры блока P1.
- Вращая регулировочную рукоятку автотрансформатора A1, изменяйте напряжение  $U$  на выводах первичной обмотки испытуемого трансформатора A2 в диапазоне 0...240 В и заносите показания вольтметра (напряжение  $U$ ) и амперметра (ток  $I_0$  первичной обмотки трансформатора) блока P1, а также ваттметра и варметра измерителя P2 (активная  $P_0$  и реактивная  $Q_0$  мощности, потребляемые трансформатором) в таблицу 1.

Таблица 1

U, В									
$I_0$ , мА									
$P_0$ , Вт									
$Q_0$ , ВАр									

- Отключите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.
- Отключите автоматические выключатели источника G1.

- Используя данные таблицы 1, вычислите соответствующие напряжению  $U$  значения коэффициента мощности по формуле

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{P_0^2 + Q_0^2}};$$

Занесите полученные результаты в таблицу 2.

*Таблица 2*

$U, В$								
$\cos \varphi_0$								

- Используя данные таблиц 1 и 2 постройте искомые характеристики холостого хода однофазного трансформатора.

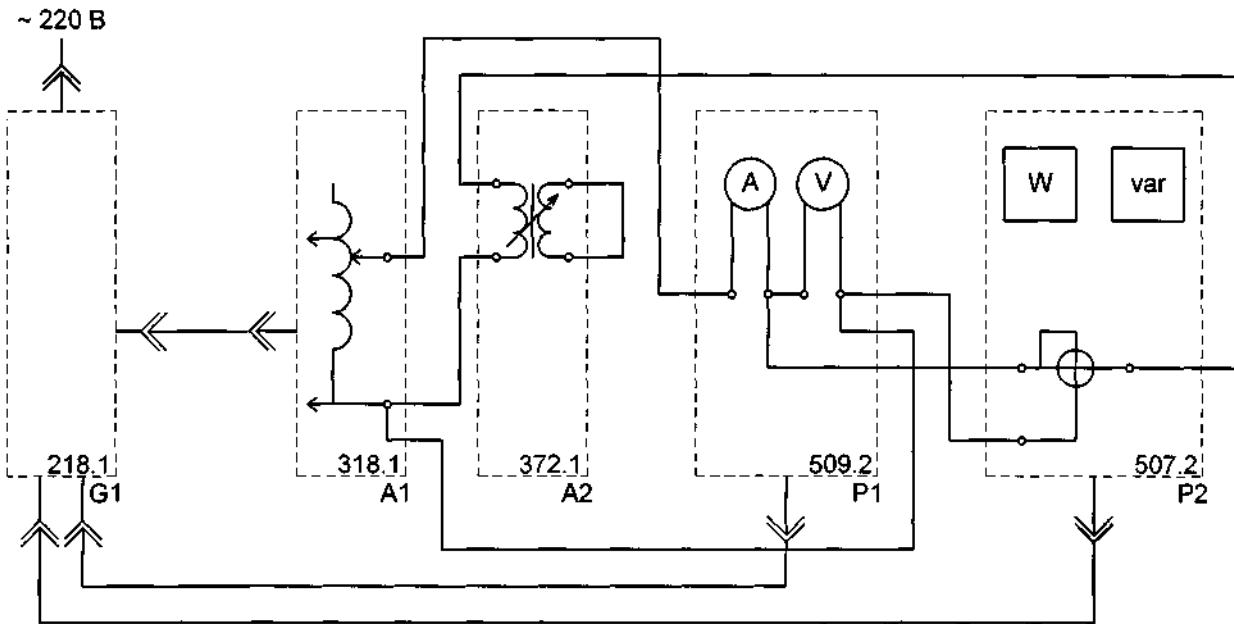
## II. СНЯТИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ $I_k=f(U)$ , $P_k=f(U)$ , $\cos \varphi_k=f(U)$ ТРАНСФОРМАТОРА

Цель работы: собрать схему, произвести измерения и построить характеристики короткого замыкания однофазного трансформатора

- Электрическая схема соединений
- Перечень аппаратуры
- Указания по проведению эксперимента

Электрическая схема соединений

## Перечень аппаратуры



Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
<b>01</b>	Однофазный источник питания	218.1	-220 В /1,6 А
<b>A1</b>	Регулируемый автотрансформатор	318.1	-0...240В / 2 А
<b>A2</b>	Однофазный трансформатор	372.1	80 ВА 220/198...242 В
<b>P1</b>	Блок мультиметров	509.2	2 мультиметра 0... 1000 В / = 0...10A / 0...20МОм
<b>P2</b>	Измеритель мощностей	507.2	15; 60; 150; 300; 600 В/ 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 А.

## Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" автотрансформатора А1.
- Соедините электрическим шнуром приборную вилку электропитания «220 В» источника G1 с розеткой однофазной трехпроводной электрической сети питания лаборатории напряжением 220 В.
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
- Поверните регулировочную рукоятку автотрансформатора А1 в **крайнее** против часовой стрелки положение.
- В трансформаторе А2 переключателем установите желаемый коэффициент трансформации, например, 1,0.
- Включите устройство защитного отключения и автоматические выключатели источника G1.
- Включите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.
- Активизируйте мультиметры блока Р1.
- **Медленно** вращая регулировочную рукоятку автотрансформатора А1 по часовой стрелке, увеличивайте ток 1к первичной обмотки испытуемого однофазного трансформатора до тех пор пока показания амперметра не достигнут **0,5 А (не более!)** и занесите показания амперметра (ток I), вольтметра (напряжение II) блока Р1, а также ваттметра и варметра измерителя Р2 (активная Рк и реактивная Qк мощности, потребляемые трансформатором) в таблицу 1.

*Таблица 1*

I <sub>k</sub> , А									
U, В									
P <sub>k</sub> , Вт									
Q <sub>k</sub> , Вт									

- Отключите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.
- Отключите автоматические выключатели источника 01.
- Используя данные таблицы 1, вычислите соответствующие напряжению U значения коэффициента мощности по формуле

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{P_k^2 + Q_k^2}};$$

Занесите полученные результаты в таблицу 3.2.

*Таблица 3.2*

U, В									
COS $\varphi_k$									

- Используя данные таблиц 1 и 2 постройте искомые характеристики короткого замыкания  $I_k=f(U)$ ,  $P_k=f(U)$ ,  $\cos \varphi_k=f(U)$  трансформатора.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБТА № 4/1

Определение коэффициента трансформации трансформатора

Цель работы: собрать схему, произвести измерения, определить коэффициент трансформации однофазного трансформатора, сделать вывод.

- Электрическая схема соединений
- Перечень аппаратуры
- Указания по проведению эксперимента

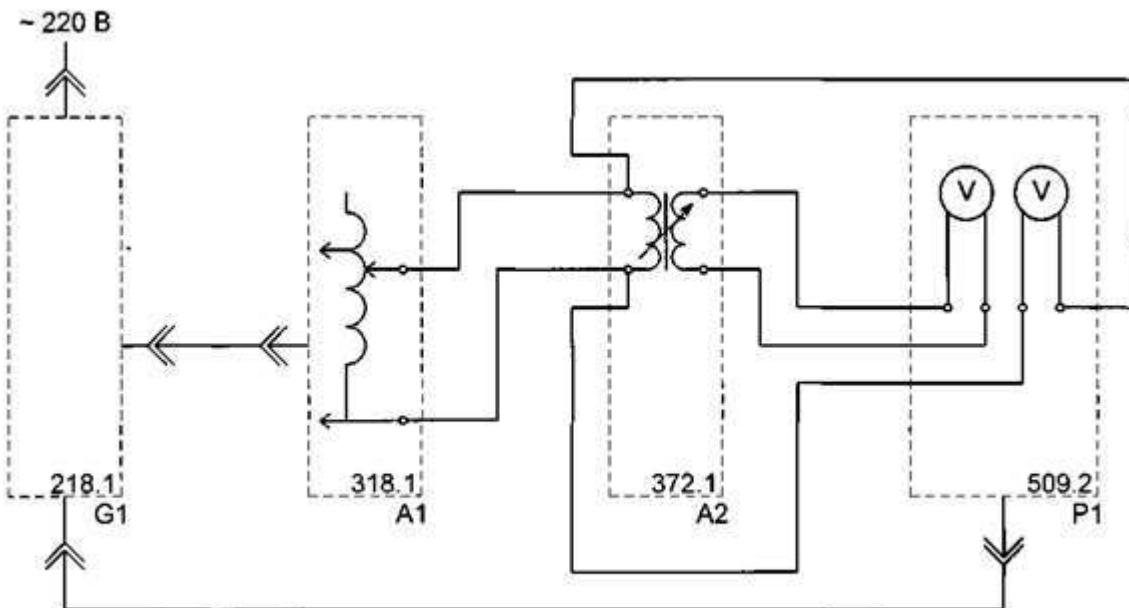


Рисунок 1. Электрическая схема соединения  
Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Однофазный источник питания	218.1	~ 220 В / 1,6 А
A1	Регулируемый автотрансформатор	318.1	~ 0...240 В / 2 А
A2	Однофазный трансформатор	372.1	80 ВА 220 / 198...242 В
P1	Блок мультиметров	509.2	2 мультиметра = 0...1000 В / = 0...10 А / 0...20 МОм

## Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" автотрансформатора A1.
- Соедините электрическим шнуром приборную вилку электропитания «220 В»

источника 01 с розеткой однофазной трехпроводной электрической сети питания лаборатории напряжением 220 В.

- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
- Поверните регулировочную рукоятку автотрансформатора А1 в крайнее против часовой стрелки положение.
- В трансформаторе А2 переключателем установите желаемый коэффициент трансформации, например, 1,0.
- Включите устройство защитного отключения и автоматические выключатели источника 01.
- Включите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров Р1 и автотрансформатора А1.
- Активизируйте мультиметры блока Р1.
- Вращая регулировочную рукоятку автотрансформатора А1, выставьте напряжение 11! на его выходе (выводах первичной обмотки испытуемого трансформатора А2) равным, например 220 В.
- Измерьте с помощью мультиметра блока Р1 напряжение 1<sup>^</sup> на выводах вторичной обмотки испытуемого трансформатора А2.
- Отключите выключатели «СЕТЬ» блока мультиметров Р1 и автотрансформатора А1.
- Отключите автоматические выключатели источника 01.
- Вычислите искомый коэффициент трансформации однофазного трансформатора по формуле

$$K_{TP} = U_1 / U_2.$$

### ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 4/3

Исследование двухобмоточного трансформатора. Определение параметров двухобмоточного силового трансформатора опытным путем. Опыты холостого хода и короткого замыкания

**Цель работы.** Ознакомиться с устройством трансформатора; усвоить практические приемы лабораторного исследования трансформатора методом холостого хода и короткого замыкания.

Студент должен знать:

- принцип действия и устройство силового трансформатора;
- уметь:
  - определять опытным путем потери мощности однофазного трансформатора, строить внешние характеристики и графики зависимости трансформатора.

### Программа работы

1. Ознакомиться с устройством трансформатора; записать его паспортные данные, а также данные измерительных приборов и регулятора напряжения.
2. Собрать схему опыта холостого хода трансформатора и после проверки ее преподавателем выполнить опыт холостого хода.
3. Собрать схему опыта короткого замыкания трансформатора и после проверки ее преподавателем выполнить опыт короткого замыкания.
4. Используя результаты опытов холостого хода и короткого замыкания, построить внешние характеристики трансформатора при коэффициентах мощности нагрузки  $\cos\varphi_2 = 1$  и  $\cos\varphi_2 = 0,8$ .
5. Используя результаты опытов холостого хода и короткого замыкания, построить графики зависимостей КПД трансформатора от нагрузки при  $\cos\varphi_2 = 0,8$  и  $\cos\varphi_2 = 1$  и определить нагрузку трансформатора, соответствующую максимальному значению КПД.
6. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

### Подготовка к работе

1. Повторить теоретический материал: принцип действия и устройство силового трансформатора, уравнения ЭДС, МДС и токов, схему замещения трансформатора; трехфазный трансформатор; опыты холостого хода и короткого замыкания, потери и КПД; внешние характеристики трансформатора.
2. Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатные сетки для построения графиков.

### Теоретическое обоснование

Внешние характеристики. С увеличением нагрузки трансформатора напряжение на клеммах его вторичной обмотки изменяется. Зависимость этого напряжения от нагрузки выражается графически внешними характеристиками трансформатора  $U_2 = f(I_2)$ .

Вид внешней характеристики зависит от характера нагрузки и от величины коэффициента мощности  $\cos\varphi_2$ : при активной и активно-индуктивной нагрузках внешние характеристики имеют падающий вид, причем чем меньше коэффициент мощности  $\cos\varphi_2$ , тем больше наклон характеристики к оси абсцисс; при активно-емкостной нагрузке внешняя характеристика имеет восходящий вид (рис. 1.3, а).

При анализе характеристик х. х. трансформатора следует обратить внимание на их криволинейность, обусловленную магнитным насыщением магнитопровода, наступающим при некотором значении первичного напряжения. Ток х. х.  $i_{0\text{ном}}$  и мощность х. х.  $P_{0\text{ном}}$ , полученные опытным путем, сравнивают с их значениями по каталогу на исследуемый трансформатор. Значительное превышение опытных значений  $i_{0\text{ном}}$  и  $P_{0\text{ном}}$  над каталогными указывает на наличие дефектов в трансформаторе: к. з. между частью пластин в магнитопроводе или межвитковое к. з. в небольшой части витков какой-либо из обмоток.

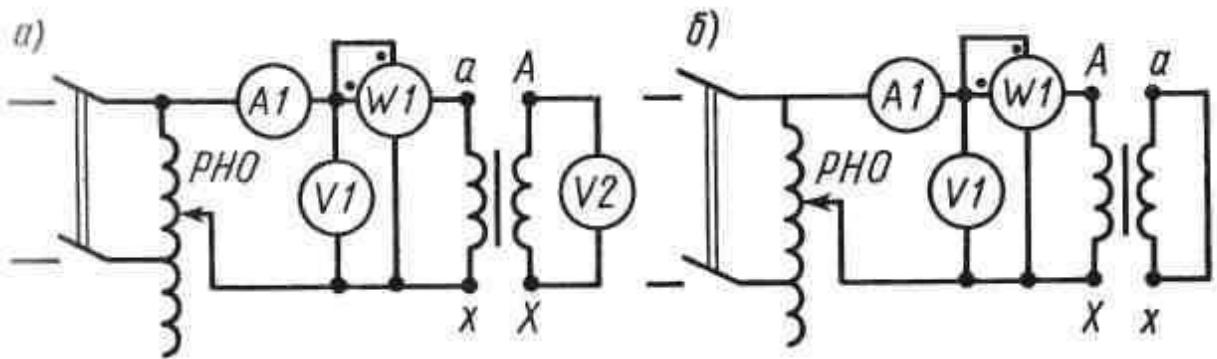


Рисунок 1.1 - Схемы включения однофазного трансформатора при опытах х. х. (а) и к. з.

### Порядок выполнения работы

По указанию преподавателя лабораторную работу выполняют на однофазном или трехфазном трансформаторе.

#### 1) Опыт холостого хода.

В схеме включения однофазного трансформатора при опыте х. х. применен регулятор напряжения РНО (рисунок 1.1, а), позволяющий плавно регулировать подводимое к первичной обмотке напряжение. В качестве первичной обычно используют обмотку низшего напряжения НН. Всего делают не менее пяти замеров через приблизительно одинаковые интервалы тока х. х., изменяя подводимое к трансформатору напряжение от  $0,5U_{1\text{ном}}$  до  $1,15U_{1\text{ном}}$ . Показания измерительных приборов заносят в таблицу 1.1.

Затем выполняют расчеты: ток х. х. в процентах от номинального первичного тока,

$$i_0 = (I_0 / I_{1\text{ном}})100; \quad (1.1)$$

коэффициент мощности в режиме х. х.

$$\cos\phi_0 = P_0 / (U_1 I_0); \quad (1.2)$$

коэффициент трансформации

$$k = U_{20} / U_1; \quad (1.3)$$

Полученные значения вычисленных величин занести в таблицу 1.1. Величины, соответствующие номинальному первичному напряжению  $U_{1\text{ном}}$ , следует выделить, например, подчеркнув их жирной линией. По данным таблицы строят характеристики х. х. трансформатора (на общей координатной сетке):  $I_0$ ;  $P_0$ ;  $\cos\phi_0 = f(U_1)$ . На характеристиках отмечают точки  $I_{0\text{ном}}$ ;  $P_{0\text{ном}}$  и  $\cos\phi_{0\text{ном}}$ , соответствующие номинальному напряжению  $U_{1\text{ном}}$  (рисунок 1.2, а).

#### 2) Опыт короткого замыкания.

При опыте к. з. трансформатора (рисунок 1.1, б) напряжение обычно подводят к обмотке ВН, номинальное значение тока в которой меньше, чем в обмотке НН. В некоторых случаях это позволяет включать ваттметр в первичную цепь без трансформатора тока.

Вторичную обмотку трансформатора замыкают накоротко медным проводом достаточного поперечного сечения, чтобы не создавать во вторичной цепи трансформатора значительного электрического сопротивления.

Опыт к. з. проводят в такой последовательности: устанавливают рукоятку РНО на нулевую отметку, а затем, включив рубильник, медленно повышают напряжение посредством РНО, изменяя величину тока к. з. от нуля до значения  $1,2I_{1\text{ном}}$ . Показания измерительных приборов, снятые через приблизительно одинаковые интервалы тока к. з., а также результаты вычислений заносят в таблицу 1.2. Значения величин, соответствующих значению тока к. з.  $I_{1k} = I_{1\text{ном}}$ , подчеркивают жирной линией.

Затем выполняют расчеты: напряжение к. з. в процентах от номинального первичного напряжения

$$u_k = (U_k/U_{1\text{ном}})100; \quad (1.4)$$

коэффициент мощности при опыте к. з.

$$\cos\phi_k = P_k/(U_k I_k); \quad (1.5)$$

По данным таблицы строят характеристики к. з. (на общей координатной сетке):  $P_k$ ;  $I_k$ ;  $\cos\phi_k = f(U_k)$ . На характеристиках отмечают точки  $U_{k\text{ном}}$ ,  $P_{k\text{ном}}$ , соответствующие току к. з.  $I_{k1} = I_{1\text{ном}}$  (рис. 1.2, б).

Полученные из опыта к. з. значения  $P_{k\text{ном}}$  и  $u_{k\text{ном}}$  следует привести к рабочей температуре  $\theta_2 = 75^\circ\text{C}$ .

Приведенное значение мощности к. з. (Вт)

$$P'_{k\text{ном}} = P_{k\text{ном}} [1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1)] \quad (1.6)$$

где  $\alpha = 0,004$  - температурный коэффициент для меди и алюминия;

$\theta_1$  = температура обмоток трансформатора при проведении опыта,  $^\circ\text{C}$ . В связи с тем что температура обмоток трансформатора влияет лишь на активную составляющую напряжения к. з.

$$u_{ka} = u_{k\text{ном}} \cdot \cos\phi_k \quad (1.7)$$

то и приводить к рабочей температуре следует лишь активную составляющую напряжения к. з.

$$u'_{ka} = u_{k\text{ном}} [1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1)] \quad (1.8)$$

Приведенное к рабочей температуре напряжение к. з.

$$u'_{k\text{ном}} = \sqrt{u_{ka}^2 + u_{kp}^2} \quad (1.9)$$

где

$$u_{k,p} = \sqrt{u_{\kappa, nom}^2 + u_{\kappa,p}^2} \quad (1.10)$$

$u_{k,p}$  - реактивная составляющая к. з.

При любой нагрузке напряжение на клеммах вторичной обмотки трансформатора

$$U_2 = U_{20}(1 - 0,01 \cdot \Delta U); \quad (1.11)$$

где  $U_{20}$  - напряжение на вторичной обмотке в режиме х. х., принимаемое за номинальное напряжение на выходе трансформатора, В;

$\Delta U$  - изменение вторичного напряжения, вызванное нагрузкой трансформатора.

Для построения внешней характеристики необходимо рассчитать не менее пяти значений напряжения  $U_2$  при разных значениях коэффициента нагрузки  $\beta = I_2/I_{2 nom}$ . например при  $\beta = 0,25; 0,50; 0,75; 1,0$  и  $1,2$ .

Расчет  $\Delta U$  ведут по формуле (%):

$$\Delta U = \beta u'_k (\cos \varphi_k \cos \varphi_2 + \sin \varphi_k \sin \varphi_2) \quad (1.12)$$

Расчеты  $\Delta U$  выполняют три раза: при  $\cos \varphi_2 = 1$ ,  $\cos \varphi_2 = 0,8$  (нагрузка активно-индуктивная) и  $\cos \varphi_2 = 0,8$  (нагрузка активно-емкостная). В последнем случае получают отрицательные значения  $\Delta U$ . Результаты вычислений заносят в таблице 1.3 и строят на общей координатной сетке три внешние характеристики.

Проведя ординату при  $\beta = 1,0$  (номинальная нагрузка), отмечают на характеристиках напряжения, соответствующие номинальной нагрузке трансформатора (рисунок 1.3, а).

Зависимость КПД трансформатора от нагрузки. Для построения графика  $\eta = f(\beta)$  при  $\cos \varphi_2 = 1$  и  $\cos \varphi_2 = 0,8$  определяют КПД трансформатора для ряда значений коэффициента нагрузки  $\beta = 0,25; 0,50; 0,75; 1,0$  и  $1,2$ , воспользовавшись для этого выражением

$$\eta = 1 - \frac{P_{0, nom} + \beta^2 P_{\kappa, nom}}{\beta S_{nom} \cos \varphi_2 + P_{0, nom} + \beta^2 P_{\kappa, nom}} \quad (1.13)$$

где  $S_{nom}$  - номинальная мощность трансформатора, В·А.

Результаты вычислений заносят в таблицу 1.4.

По этим данным строят графики  $\eta = f(\beta)$  при  $\cos \varphi_2 = 1$  и  $\cos \varphi_2 = 0,8$  (рисунок 1.3, б).

Максимальное значение КПД трансформатора соответствует такой нагрузке, при которой электрические потери трансформатора равны магнитным потерям.

Коэффициент нагрузки, соответствующий максимальному значению КПД,

$$\beta' = \sqrt{P_{0, nom} / P_{\kappa, nom}} \quad (1.14)$$

На оси абсцисс отмечают значение  $\beta'$ , и проведя в этой точке ординату,

определяют максимальные значения КПД. Максимальное значение КПД можно получить по (1.13), если подставить в это выражение  $\beta$ :

$$\eta_{max} = 1 - \frac{P_{0nom}}{0,5\beta / S_{nom} \cos \varphi_2 + P_{0nom}} \quad (1.15)$$

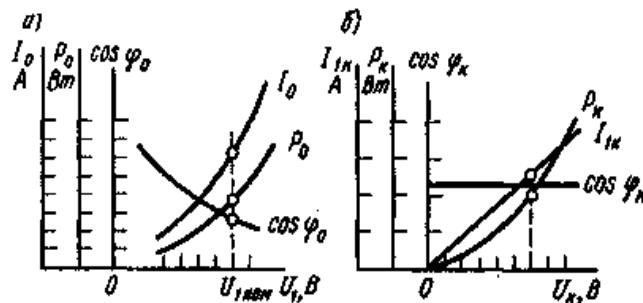


Рисунок 1.2 - Характеристики х. х (а) и к. з. (б) трансформатора

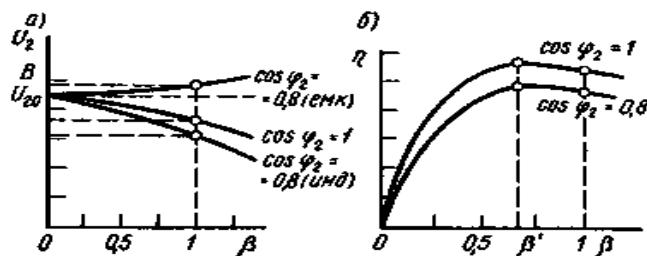


Рисунок 1.3 - Внешние характеристики (а) и графики зависимости КПД трансформатора от нагрузки (б)

Таблица 1.1 Результаты измерений и вычислений

Номер измерения и вычисления	Измерения				Вычисления	
	U <sub>1</sub> , В	I <sub>0</sub> , А	P <sub>0</sub> , Вт	U <sub>20</sub> , В	i <sub>0</sub> , %	cosφ <sub>2</sub>

Таблица 1.2 Результаты измерений и вычислений

Номер измерения и вычисления	Измерения			Вычисления	
	U <sub>k</sub> , В	I <sub>1k</sub> , А	P <sub>k</sub> , Вт	u <sub>k</sub> , %	cosφ <sub>k</sub>

Таблица 1.3 – Результаты измерений и вычислений

cosφ <sub>2</sub> = 1	cosφ <sub>2</sub> = 0,8 (инд)	cosφ <sub>2</sub> = 0,8 (емк)
-----------------------	-------------------------------	-------------------------------

$\beta$	$\Delta U, \%$	$U_2, \text{В}$	$\Delta U, \%$	$U_2, \text{В}$	$\Delta U, \%$	$U_2, \text{В}$
---------	----------------	-----------------	----------------	-----------------	----------------	-----------------

Таблица 1.4 – Результаты измерений и вычислений

$\beta$	0,25	0,50	0,75	1,0	1,2
$\eta$	при $\cos\phi_2 = 1$				
	при $\cos\phi_2 = 0,8$				

### Анализ результатов лабораторной работы

- 1 При анализе характеристик холостого хода трансформатора следует обратить внимание на их криволинейность, обусловленную магнитным насыщением магнитопровода, наступающим при некотором значении первичного напряжения  $U_1$ . Ток холостого хода  $I_1$  и мощность холостого хода  $P_1$  полученные опытным путем, сравнивают с их значениями по каталогу на исследуемый трансформатор. Значительное превышение опытных значений над каталожными указывает на наличие дефектов в трансформаторе: короткого замыкания между частью пластин в магнитопроводе или межвитковое короткое замыкание в небольшой части витков какой-либо из обмоток.
- 2 При анализе характеристик короткого замыкания следует обратить внимание на прямолинейность графика тока короткого замыкания, обусловленную ненасыщенным состоянием магнитопровода при опыте короткого замыкания из-за малой величины основного магнитного потока, которое пропорционально подведенному
- 3 Написать вывод по анализу результатов и достижению цели работы;
- 4 Ответить на контрольные вопросы:
  - 1) Объясните устройство и принцип действия трансформатора.
  - 2) Что такое коэффициент трансформации и как его определить опытным путем?
  - 3) Почему токи холостого хода в обмотках трехфазного трансформатора не одинаковы?
  - 4) Почему с увеличением первичного напряжения при опыте холостого хода уменьшается коэффициент мощности трансформатора?
  - 5) Почему мощность холостого хода принимают за магнитные потери, а мощность короткого замыкания за электрические потери?
  - 6) Почему при опыте короткого замыкания ток в первичной обмотке достигает номинального значения при напряжении, в несколько раз меньшем номинального?

### Содержание отчета

- 1) Номер, тема и цель работы.
- 2) Паспортные данные трансформаторов, измерительных приборов и регулятора напряжения.

- 3) Схемы включения однофазного трансформатора при опытах х.х. и к.з. (рисунок 1.1).
- 4) Ход работы.
- 5) Результаты измерений и расчетов (таблицы 1.1...1.4).
- 6) Характеристики х.х. и к.з. (рисунок 1.2), внешние характеристики и графики зависимости КПД трансформатора от нагрузки (рисунок 1.3).
- 7) Ответы на контрольные вопросы.
- 8) Вывод о проделанной работе.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 4

### ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРОВ.ИЗУЧЕНИЕ УСЛОВИЙ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ МЕЖДУ НИМИ

**Цель работы:** ознакомление с условиями включения силовых трансформаторов на параллельную работу.

#### Общие сведения

##### Назначение параллельной работы трансформаторов

При параллельной работе трансформаторы первичными обмотками включены на общую первичную сеть, а вторичными — на общую вторичную сеть. Параллельно могут быть включены два и более трансформаторов. Использование параллельной работы целесообразно при суточных или сезонных колебаниях нагрузки или когда нагрузка подстанции увеличивается постепенно, в течение ряда лет. Параллельная работа трансформаторов позволяет при снижении нагрузки отключать часть трансформаторов, уменьшая в них расход энергии на покрытие магнитных потерь. При этом более просто решается проблема резервирования, так как в случае выхода из строя какого-либо трансформатора остальные могут полностью или частично принять на себя его нагрузку. Когда нагрузка подстанции увеличивается постепенно, целесообразно устанавливать несколько трансформаторов последовательно по мере роста нагрузки.

Параллельное включение трансформаторов применяют также и в более сложных случаях, например, когда сеть НН (осветительная) имеет большую протяженность. Такую сеть питают несколькими трансформаторами в различных местах, что уменьшает падение напряжения в линии и дает возможность применять для такой линии провода меньшего поперечного сечения. Так как нагрузка обычно неравномерно распределена по длине линии, трансформаторы целесообразно размещать в главных пунктах нагрузки. Иногда используют совместную работу нескольких трансформаторов на общую сеть нагрузки, первичные обмотки которых включены в различные сети с различными напряжениями. Так, например, в местности, где много гидравлической энергии, сооружают несколько гидравлических электростанций и линий электропередач. В точках пересечения этих линий возникают пункты отбора энергии, поэтому электроснабжение определенного района производится несколькими электростанциями. Трансформаторы, включенные на одну и ту же сеть НН в нескольких ее пунктах со стороны ВН, включены в различные сети с различными первичными напряжениями.

Основная трудность, возникающая при параллельной работе трансформаторов, — обеспечение равномерного распределения нагрузки между ними. При включении на параллельную работу трансформаторов, одинаковых по мощности и конструкции, равномерное распределение нагрузки между ними достигается автоматически в силу симметрии всех параллельных цепей. Однако на практике приходится часто включать параллельно трансформаторы неодинаковых мощностей и различных в конструктивном отношении, и тогда равномерное распределение нагрузок между трансформаторами невозможно. При параллельном включении трансформаторов их вторичные обмотки образуют замкнутую цепь, в которой не должно возникать каких-либо неуравновешенных напряжений или э. д. с., т. е. сумма э. д. с. вторичных обмоток должна быть равна нулю. При параллельной работе трансформаторов выводы обмоток одноименных фаз

соединяет между собой как на первичной, так и на вторичной стороне. Если у трансформаторов соединяется выводы только одной стороны напряжения, то при этом получается их совместная, но не параллельная работа.

Нормальная параллельная работа трансформаторов характеризуется отсутствием между ними уравнительных токов, токи нагрузки трансформаторов одинаковы.

В случае разных коэффициентов трансформации между трансформаторами возникает уравнительный ток, который дополнительно нагружает один трансформатор и разгружает другой. При разных  $e_k\%$  нагрузка на трансформаторах распределяется обратно пропорционально величинам  $e_k\%$ , таким образом, общая нагрузка распределяется между параллельно работающими трансформаторами прямо пропорционально их номинальной мощности и обратно пропорционально их напряжениям короткого замыкания ( $e_k\%$ ).

Для параллельной работы должны быть соблюдены следующие условия:

1. Коэффициенты трансформации трансформаторов должны быть равны, т.е. линейные первичные и вторичные напряжения трансформаторов должны быть соответственно равны.
2. Напряжения короткого замыкания трансформаторов ( $e_k\%$ ) должны быть равны.
3. Трансформаторы должны иметь одинаковые группы соединений, т.е. угловые смещения векторов линейных ЭДС обмоток параллельно включенных трансформаторов должны быть одинаковы.

Трансформаторы с различными группами соединений на параллельную работу включаться не могут, так как в этом случае возникает уравнительный ток, в 3-20 раз превышающий номинальный ток. Такой уравнительный ток равнозначен току короткого замыкания на выводах трансформатора. Параллельная работа таких трансформаторов невозможна.

Перед включением трансформаторов должны быть сфазированы.

Нагрузка между параллельно работающими трансформаторами распределяется пропорционально их мощностям и обратно пропорционально напряжениям короткого замыкания

$$\frac{S_1}{S_2} = \left( \frac{S_{1\text{ном}}}{S_{2\text{ном}}} \right) \cdot \left( \frac{U_{k2*}}{U_{k1*}} \right)$$

где  $S_{1\text{ном}}$ ,  $S_{2\text{ном}}$  - номинальные мощности,  $U_{k1*}$ ,  $U_{k2*}$  - напряжение короткого замыкания трансформаторов, включаемых на параллельную работу.

Некоторое перераспределение нагрузки между параллельно работающими трансформаторами с различными напряжениями короткого замыкания осуществляют изменением их коэффициентов трансформации путем переключения ответвлений первичных обмоток. Переключение необходимо выполнять так, чтобы у недогруженных трансформаторов вторичное напряжение при холостом ходе было выше, чем у трансформаторов, работающих с перегрузкой

Для определения нагрузки трансформаторов напряжения короткого замыкания всех параллельно работающих трансформаторов должны быть приведены к одной мощности, например, к мощности первого трансформатора:

$$U'_{kz1} = U_{kz1} \cdot \frac{S_{\text{ном.тр1}}}{S_{\text{ном.тр1}}}; \quad U'_{kz2} = U_{kz2} \cdot \frac{S_{\text{ном.тр1}}}{S_{\text{ном.тр2}}}; \quad U'_{kzn} = U_{kzn} \cdot \frac{S_{\text{ном.тр1}}}{S_{\text{ном.трn}}}.$$

Нагрузка каждого параллельно работающего трансформатора определяется по соотношению:

$$S_1 = \lambda_1 \cdot S; \quad S_2 = \lambda_2 \cdot S; \quad \dots; \quad S_n = \lambda_n \cdot S, \quad (2.24)$$

где  $S$  – суммарная нагрузка подстанции;  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  – коэффициенты загрузки трансформаторов:

$$\lambda_1 = \frac{1}{\left(\frac{1}{U'_{k31}} + \frac{1}{U'_{k32}} + \dots + \frac{1}{U'_{k3n}}\right) \cdot U'_{k31}}; \quad \lambda_2 = \frac{1}{\left(\frac{1}{U'_{k31}} + \frac{1}{U'_{k32}} + \dots + \frac{1}{U'_{k3n}}\right) \cdot U'_{k32}};$$

.....

$$\lambda_n = \frac{1}{\left(\frac{1}{U'_{k31}} + \frac{1}{U'_{k32}} + \dots + \frac{1}{U'_{k3n}}\right) \cdot U'_{k3n}}.$$

При обозначении величины, заключенной в скобки, через « $k$ » получается:

$$\lambda_1 = \frac{1}{k \cdot U'_{k31}}; \quad \lambda_2 = \frac{1}{k \cdot U'_{k32}}; \quad \dots; \quad \lambda_n = \frac{1}{k \cdot U'_{k3n}}. \quad (2.26)$$

При параллельной работе двух трансформаторов коэффициенты загрузки соответственно равны:

$$\lambda_1 = \frac{U'_{k32}}{U'_{k31} + U'_{k32}}; \quad \lambda_2 = \frac{U'_{k31}}{U'_{k31} + U'_{k32}}.$$

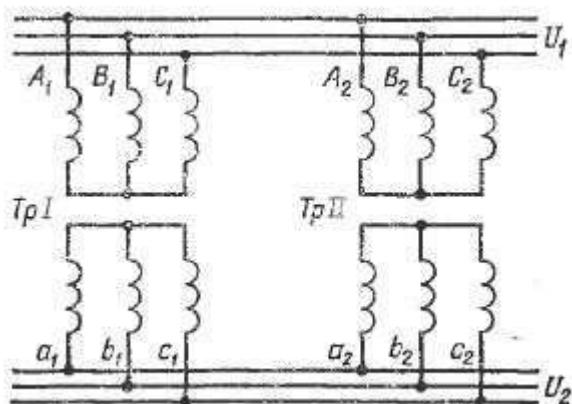


Рис 1. Схема включения двух трехфазных трансформаторов на параллельную работу

### Практическая часть

1. Пользуясь специализированными сайтами, специальной и учебной литературой, возможность параллельной работы трехфазных трансформаторов. Данные внести в таблицу.

Таблица

№ поз	Технические данные	Трансформатор 1	Трансформатор 2
1.	Номинальная мощность		
2.	Коэффициент трансформации		
3.	Ступень регулирования		
4.	Напряжение короткого замыкания		

5.	Группа соединения обмоток		
----	---------------------------	--	--

2. Изобразить схему фазировки трехфазного трехобмоточного трансформатора.

3. Написать вывод о возможности (невозможности) параллельной работы выбранных вами трансформаторов.

#### **Вопросы для контроля**

1. Почему для включения на параллельную работу номинальные мощности трансформаторов должны быть близки?
2. Как регулируется коэффициент трансформации?
3. Почему для ПБВ достаточно 1-2 ступеней регулирования в каждую сторону?
4. Что характеризует напряжение короткого замыкания трансформатора? 5. Что характеризует группа соединения обмоток трансформатора?

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 5

### ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ АСИНХРОННЫХ МАШИН ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ УЗЛОВ АСИНХРОННЫХ МАШИН И ИХ НАЗНАЧЕНИЕ.

**Цель:** рассчитать основные параметры трехфазного асинхронного двигателя.

Студент должен знать:

- устройство трехфазного асинхронного двигателя;
- понятие о скольжении;
- электромагнитный момент асинхронного двигателя;
- зависимость момента от скольжения;
- рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя.

Теоретическое обоснование

Номинальные величины и основные определения

По конструктивному исполнению асинхронные машины бывают трехфазного и однофазного тока, с фазным и короткозамкнутым ротором, общепромышленного и специального назначения. Асинхронные машины могут работать в режимах двигателя, генератора и электромагнитного тормоза; могут возбуждаться как со стороны статора, так и со стороны ротора.

Номинальными данными электрической машины называются данные, указанные на заводском щитке и характеризующие ее номинальный режим работы: номинальная мощность, номинальное напряжение, номинальный ток, номинальная частота вращения, номинальные коэффициент полезного действия и коэффициент мощности. Термин «номинальный» может применяться также и к данным, не указанным на заводском щитке электрической машины, но относящимся к ее номинальному режиму работы, например: номинальный момент вращения, номинальное скольжение. Номинальные данные машины относятся к ее работе в условиях высоты над уровнем моря до 1000 м и при температуре окружающей среды до +40°C.

Номинальным режимом работы электрической машины называется такой режим, для которого машина предназначена заводом-изготовителем и при котором она должна работать в течение всего срока службы. Согласно ГОСТ 183-74 «Машины электрические вращающиеся. Общие технические условия» рассматривают следующие номинальные режимы электрической машины: продолжительный (S1); кратковременный (S2) и повторно-кратковременный (S3).

Кратковременный номинальный режим работы электрической машины характеризуется длительностью рабочего периода соответственно 10, 30, 60, 90 мин.

Повторно-кратковременный режим работы характеризуется относительной продолжительностью включения (ПВ), т.е. отношением продолжительности рабочего периода к продолжительности цикла (суммарной продолжительности рабочего периода и паузы). Согласно стандарту ПВ составляет 15, 25, 40, 60 % с продолжительностью одного цикла не более 10 мин, если иное не указано в технических условиях или заводских требованиях.

Нагрузкой электрической машины называется мощность, которую развивает электрическая машина в данный момент времени. Нагрузка выражается в ваттах или в киловаттах, а также в процентах или в долях от номинальной мощности. Нагрузка может быть задана током, потребляемым или отдаваемым электрической машиной в данный момент времени, и выражена в амперах, в процентах или в долях от номинального тока. Нагрузка двигателя задается величиной тормозящего момента на выходном валу. Чтобы изменить нагрузку двигателя, следует изменить тормозящий момент на его валу.

Направление вращения электрического двигателя с горизонтальным валом определяется со стороны присоединения его к рабочему механизму: по часовой стрелке – правое вращение, против часовой стрелки – левое вращение.

Неподвижная часть асинхронного двигателя называется *статор*, подвижная – *ротор* (рисунок 9.1). Сердечник статора набирается из листовой электротехнической стали и запрессовывается в станину. Станина (1) выполняется литой, из немагнитного материала. Чаще всего станину выполняют из чугуна или алюминия. На внутренней поверхности листов (2), из

которых выполняется сердечник статора, имеются пазы, в которые закладывается *трёхфазная обмотка* (3).

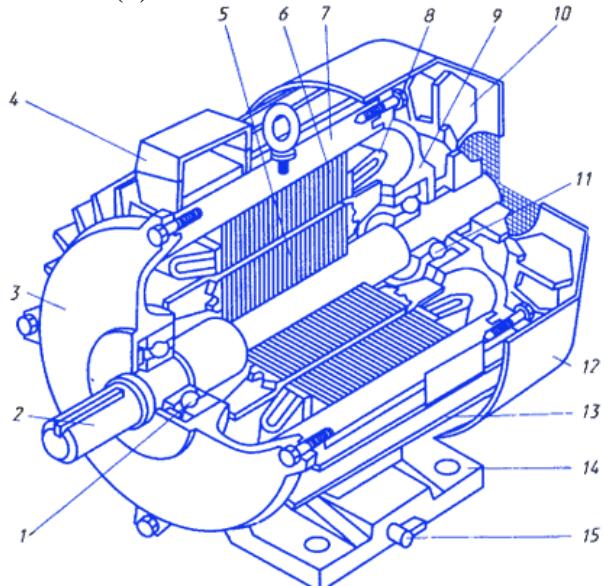


Рисунок 1 – Асинхронный двигатель

**1, 11** – подшипники; **2** – вал;  
**3, 9** - подшипниковые щиты; **5** – ротор;  
**6** – статор; **10** – вентилятор; **12** – колпак;  
**13** – ребра; **14** - лапы

Обмотка статора выполняется в основном из изолированного медного провода круглого или прямоугольного сечения, реже – из алюминия.

Обмотка статора состоит из трёх отдельных частей, называемых *фазами*. Начала фаз обозначаются буквами  $C_1, C_2, C_3$ , концы –  $C_4, C_5, C_6$ .

Начала и концы фаз выведены на клеммную коробку, закреплённую на станине. Обмотка статора может быть соединена по схеме звезда или треугольник. Выбор схемы соединения обмотки статора зависит от линейного напряжения сети и паспортных данных двигателя. В паспорте трёхфазного двигателя задаются линейные напряжения сети и схема соединения обмотки статора.

*Сердечник ротора* набирается из листов электротехнической стали, на внешней стороне которых имеются пазы, в которые закладывается обмотка ротора. Обмотка ротора бывает двух видов: *короткозамкнутая* и *фазная*. Соответственно этому асинхронные двигатели бывают с короткозамкнутым ротором и фазным ротором (с контактными кольцами).

Короткозамкнутая обмотка ротора состоит из стержней, которые закладываются в пазы сердечника ротора. С торцов эти стержни замыкаются торцевыми кольцами. Такая обмотка напоминает «беличье колесо» и называют её типа «беличьей клетки». Двигатель с короткозамкнутым ротором не имеет подвижных контактов. За счёт этого такие двигатели обладают высокой надёжностью. Обмотка ротора выполняется из меди, алюминия, латуни и других материалов.

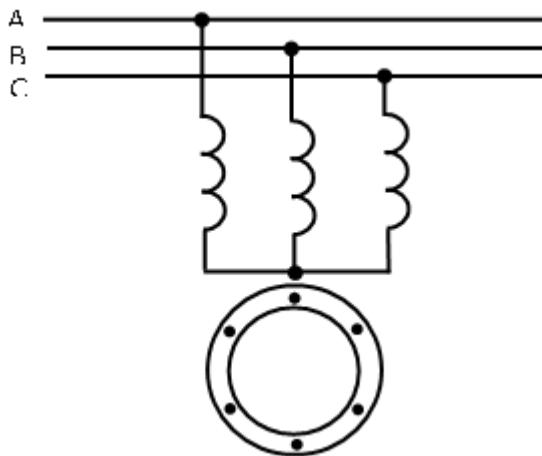


Рисунок 2 – Схема включения асинхронного двигателя

*Параметры трехфазного асинхронного двигателя*

- 1 Номинальное линейное напряжение сети –  $U$ , В
- 2 Номинальный ток двигателя (ток в каждой фазе статора) –  $I_H$ , А
- 3 Частота тока сети –  $f$ , Гц
- 4 Число полюсов двигателя –  $2p$ , число пар полюсов –  $p$
- 5 Частота вращения магнитного поля статора

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p}, \text{ об/мин}$$

5 Скольжение – частота вращения магнитного поля статора относительно ротора ( $n_1 - n_2$ ), выраженная в процентах от частоты вращения магнитного поля

6

$$S = \frac{(n_1 - n_2) \cdot 100}{n_1}, \text{ \%}$$

7 Частота вращения ротора асинхронного двигателя в номинальном режиме

$$n_{2H} = \left(1 - \frac{S_H}{100}\right) \cdot n_1, \frac{\text{об}}{\text{мин}}$$

или

$$n_{2H} = \frac{\left(1 - \frac{S_H}{100}\right) \cdot 60 \cdot f}{p}, \frac{\text{об}}{\text{мин}}$$

8 Номинальная активная мощность, развиваемая двигателем –  $P_{2H}$ , Вт

9 Мощность, потребляемая двигателем из сети в номинальном режиме:  
- активная

$$P_{1H} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_H \cdot \cos \varphi, \text{ Вт}$$

или

$$P_{1H} = \frac{P_{2H}}{\eta_H}, Bm$$

- полная

$$S_H = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_H, BA$$

10 Потери энергии в двигателе складываются из потерь в обмотках статора и ротора, потерь в магнитопроводе, механических и добавочных потерь

$$\Delta P = P_1 - P_2, Bm$$

11 Коэффициент полезного действия двигателя

$$\eta_H = \frac{P_{2H}}{P_{1H}} = \frac{(P_{1H} - \Delta P)}{P_{1H}}$$

12 Коэффициент мощности асинхронного двигателя показывает, какая часть полной мощности, поступающей из сети, расходуется на покрытие потерь и преобразуется в механическую работу

$$\cos\varphi_H = \frac{P_{1H}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I_H}$$

13 Вращающий момент асинхронного двигателя в номинальном режиме

$$M_H = 9,55 \cdot \frac{P_{2H}}{n_{2H}}, H \cdot m$$

### Порядок выполнения расчета

1 Выписать исходные данные согласно варианту (таблица 1) и вычертить схему включения двигателя в цепь (рисунок 9.2).

2 Ознакомиться с параметрами трехфазного асинхронного двигателя.

3 Выполнить расчет неизвестных параметров, отмеченных в таблице 9.1 прочерками.

4 В заключении пояснить принцип действия асинхронного двигателя, возможность его реверсирования.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета

Вариант		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
<i>U, B</i>		660	-	380	-	220	-	380	-	1000	380
<i>I<sub>H</sub>, A</i>		-	24	-	20	-	48	65	20	-	-
<i>2p</i>		6	-	8	-	10	4	6	-	4	8
<i>n<sub>1</sub></i>	<i>об/мин</i>	-	1500	-	1000	-	-	-	1000	-	-
<i>n<sub>2H</sub></i>		-	-	-	970	-	1460	960	-	-	-
<i>S, %</i>		2	2,9	2,3	-	3	-	-	2,5	3,8	2
<i>P<sub>2H</sub></i>	<i>кВт</i>	21	-	30	-	34	-	40	-	30	45

$P_{1H}$		-	-	-	24	38	-	-	30	-	-
$\Delta P$		-	1,2	1,8	-	-	-	-	2,7	-	-
$S_H, \text{kVA}$		-	-	-	33	43,2	11	-	40	-	-
$\eta_H$		0,9	-	-	0,91	-	0,93	0,95	-	0,92	0,91
$\cos \varphi_H$		0,8	0,75	0,92	-	-	-	-	-	0,82	0,87
$M_H, \text{H}\cdot\text{м}$		-	80	-	-	-	60	-	-	-	-

### Пример расчета

Дано:

- линейное напряжение сети  $U=380 \text{ В}$ ;
- число полюсов двигателя  $2p=4$ ;
- частота вращения ротора  $n_2 = 1460 \text{ об/мин}$ ;
- номинальная активная мощность, развиваемая двигателем  $P_{2H}=12 \text{ кВт}$ ;
- коэффициент полезного действия двигателя  $\eta_H=0,9$ ;
- коэффициент мощности двигателя  $\cos \varphi_H=0,85$ .

Определить:

- активную и полную мощности, потребляемые двигателем из сети;
- номинальный ток двигателя;
- мощность потерь в двигателе;
- частоту вращения магнитного поля статора;
- номинальное скольжение;
- вращающий момент двигателя.

### Порядок расчета

#### 1 Мощности, потребляемые двигателем из сети

- активная

$$P_{1H} = \frac{P_{2H}}{\eta_H} = \frac{12000}{0,9} = 13333 = 13,33 \text{ кВт};$$

- полная

$$S = \frac{P_{1H}}{\cos \varphi_H} = \frac{13333}{0,85} = 15686 \text{ ВА} = 15,7 \text{ кВА}$$

#### 2 Номинальный ток двигателя

$$I_H = \frac{P_{1H}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi_H} = \frac{13333}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,85} = 23,9 \text{ А}$$

#### 3 Мощность потерь в двигателе

$$\Delta P = P_{1H} - P_{2H} = 13333 - 12000 = 1333 \text{ Вт} = 1,33 \text{ кВт}$$

#### 4 Частота вращения магнитного поля статора

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ об/мин}$$

## 5 Номинальное скольжение

$$S_H = \frac{(n_1 - n_2) \cdot 100}{n_1} = \frac{(1500 - 1460) \cdot 100}{1500} = 2,67 \%$$

## 6 Вращающий момент двигателя

$$M_H = 9,55 \cdot \frac{P_{2H}}{n_{2H}} = 9,55 \cdot \frac{12 \cdot 10^3}{1460} = 78,6 \text{ Нм}$$

### Содержание отчета

- 1 Тема и цель занятия.
- 2 Задание.
- 3 Исходные данные.
- 4 Схема включения двигателя в цепь.
- 5 Расчетная часть.
- 6 Вывод.

### Контрольные вопросы

- 1) На чем основан принцип действия асинхронного двигателя?
- 2) Что такое скольжение, и каким, оно обычно бывает у асинхронных двигателей общего применения?
- 3) Какие характеристики асинхронного двигателя называют рабочими?
- 4) Как изменится вращающий момент асинхронного двигателя, если напряжение на его выводах обмотки статора уменьшить в  $\sqrt{3}$  раз?
- 5) Что такая перегрузочная способность, асинхронного двигателя и какова, ее зависимость от напряжения питания двигателя?
- 6) Почему двигатель трехфазного тока называется асинхронным?
- 7) Что такое номинальные значения?

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №5/1

### ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

**1. Цель работы.** Изучить конструкции и принцип действия трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутой обмоткой и с фазным ротором, устройство отдельных узлов машины, ознакомиться с электротехническими материалами, применяемыми в асинхронных электродвигателях.

#### 2. Основные положения.

Асинхронные машины — это электрические машины переменного тока, у которых магнитное поле (статора) и проводники (обмотки ротора) имеют разные частоты вращения.

Асинхронные машины используют преимущественно в качестве электрических двигателей. Их преимущества — простота, технологичность изготовления, высокая надежность при эксплуатации. В качестве генераторов электрической энергии асинхронные машины не получили

распространения из-за сложности их возбуждения и регулирования напряжения. Генераторный режим асинхронных машин используют в основном для их торможения, когда они нормально работают двигателями. Например, в крановых механизмах.

Асинхронные двигатели для массового применения выпускают единичными сериями. Единая серия представляет собой ряд асинхронных двигателей возрастающей мощности однотипной конструкции и удовлетворяющих общим техническим требованиям.

Первая единая серия асинхронных двигателей (серия А) была разработана и освоена в производстве в 1951 г. Она охватывала диапазон мощностей от 0,6 до 100 кВт.

В последующие годы были разработаны и освоены следующие серии асинхронных двигателей: А2 и АО2 (1959 г.), 4А и 4АМ (1972 г.), АИР (1981 г.), РА (1992 г.), 5А (1996 г.)

Основная единая серия асинхронных двигателей 4А включает в себя двигатели мощностью 0,06-400 кВт и содержит в этом диапазоне 32 номинальных значения мощностей. Двигатели мощностью 0,06-0,37 кВт выполняют на напряжениях 220 и 380 В, мощностью 0,55-11 кВт — 220, 380 и 660 В. Обмотка статора этих двигателей соединена звездой или треугольником и имеет три выходных конца. Двигатели мощностью 15-110 кВт выполняют на напряжения 200/380 В и 380/660 В; мощностью 132-400 кВт — 380/660 В. обмотка статора содержит 6 выводных концов; схема соединения Д/У.

Двигатели предназначены для работы от сети с частотой 50 Гц и их изготавливают на синхронные частоты вращения 500-3000 мин<sup>-1</sup>.

Асинхронные двигатели серии АИР разработаны в рамках Международной организации по экономическому и научно-техническому сотрудничеству в электротехнической промышленности (ИНТЕРЭЛЕКТРО).

Эта серия включает в себя двигатели мощностью 0,025-315 кВт с напряжением питания 220/380 В и 380/660 В и частотой 50 Гц. Синхронные частоты вращения двигателей 500-3000 мин<sup>-1</sup>. По сравнению с двигателями серии 4А двигатели АИР имеют более высокий КПД, пониженные шумы и вибрации, меньшую материалоемкость.

Асинхронные двигатели серии 5А полностью взаимозаменяемы с двигателями серии 4А и АИР.

## 2.1. Рабочий процесс асинхронных двигателей.

Принцип действия асинхронных машин основан на явлении электромагнитной индукции и возникновения электромагнитных сил. При подключении обмотки статора к сети трехфазного синусоидального тока возникает вращающееся магнитное поле с синхронной частотой вращения  $n_1$ :

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}$$

где

$f_1$  — частота питающего напряжения, Гц;

$p$  — число пар полюсов магнитного поля.

Вращающееся магнитное поле пересекает проводники ротора и в соответствии с законом электромагнитной индукции индуцирует в них ЭДС  $E_2$ , направление которой по правилу правой руки.

Под действием ЭДС  $E_2$  в короткозамкнутой обмотке ротора будут протекать токи  $I_2$ . На проводники ротора с током  $I_2$ , находящиеся в магнитном поле статора, по закону Ампера будет действовать электромагнитные силы  $F$ , направление которых определяют по правилу левой руки. Образуемая от сил, приложенных ко всем проводникам, результирующая пара сил создает электромагнитный вращающий момент, увлекающий ротор за вращающимся магнитным полем.

Двигатель асинхронный с короткозамкнутым ротором — вращающаяся электрическая машина переменного тока, принцип работы которой основан на явлении электромагнитной индукции. В асинхронном двигателе электрическая энергия преобразуется в механическую путем подключения обмотки статора к сети переменного тока. При этом частота вращения ротора меньше частоты вращения электромагнитного поля. Обычно асинхронный двигатель называют также асинхронную машину, преобразующую электрическую энергию переменного тока,

поступающего в обмотку статора, в механическую энергию вращающегося ротора.

Рабочий процесс асинхронного двигателя можно условно разделить на 4 стадии:

1 — «возбуждение» и 2 — «подведение первичной энергии» проходят одновременно. На трехфазную обмотку статора подается трехфазный переменный ток. Создается вращающееся электромагнитное поле статора. В короткозамкнутой обмотке ротора под действием вращающегося магнитного поля наводится

ЭДС, вызывающая протекание токов в стержнях обмотки ротора двигателя. Эти токи создают собственное магнитное поле.

3 — «преобразование энергии». В результате взаимодействия магнитного поля ротора с магнитным полем статора в соответствии с законом Ленца возникает вращающий момент, стремящийся устранить причину, вызвавшую появление тока в короткозамкнутой обмотке ротора. Работоспособность двигателя поддерживается только в том случае, если частота вращения магнитного поля статора отличается от частоты вращения ротора, поскольку в этом случае обеспечивается взаимное перемещение магнитного поля статора относительно стержней обмотки ротора, а, следовательно, и появление в них тока и вращающего момента. По этой причине рассматриваемые двигатели называются асинхронными.

4 — «передача энергии нагрузке». К валу двигателя подключается нагрузка, которая создает тормозной момент. Для преодоления этого тормозного момента двигатель потребляет из сети больший ток и восстанавливает частоту вращения.

Частота вращения ротора асинхронного двигателя прямо пропорциональна частоте напряжения питания, обратно пропорциональна числу пар полюсов обмотки статора и определяется из выражения

$$n_2 = (1-s) * 60f_1 / 2p,$$

где  $s$  — скольжение;

$f$  — частота питающего напряжения, Гц;

$p$  — число пар полюсов.

Ротор приходит во вращение, и его установившаяся частота вращения  $n_2$  будет определяться из условия равновесия электромагнитного момента  $M$  и тормозного момента, создаваемого силами трения и приводимым во вращение рабочим механизмом.

Частота вращения ротора  $n_2$  принципиально всегда меньше частоты вращения магнитного поля  $n_1$ . Разность частот вращения магнитного поля и ротора, выражается в долях или процентах от частоты вращения магнитного поля, называют скольжением  $S$ :

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} . \quad s, \% = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100 .$$

Конструктивно асинхронный двигатель состоит из **станины**, неподвижного **статора** и размещенного внутреннего вращающегося **ротора** (рис. 5). Их поверхности разделены равномерным воздушным зазором 0,2-1,5 мм.

**Станина** предназначена для крепления всех основных узлов машины. Станины машин переменного тока в основном изготавливают чугунными литьими; при этом обеспечивается высокая надежность машин благодаря достаточной механической прочности и коррозийной стойкости чугуна, а также стабильности размеров при сборочных операциях. Наряду с чугунными применяют также станины из алюминиевых сплавов, образуемые обливкой сердечника статора в машинах для литья под давлением.

Для размещения коробки выводов в станине предусматривают прилитые или приваренные фланцевые основания с окнами для выводных проводов обмотки. Для обеспечения требований по технике безопасности на станине размещают наружные зажимы для заземления корпуса машины.

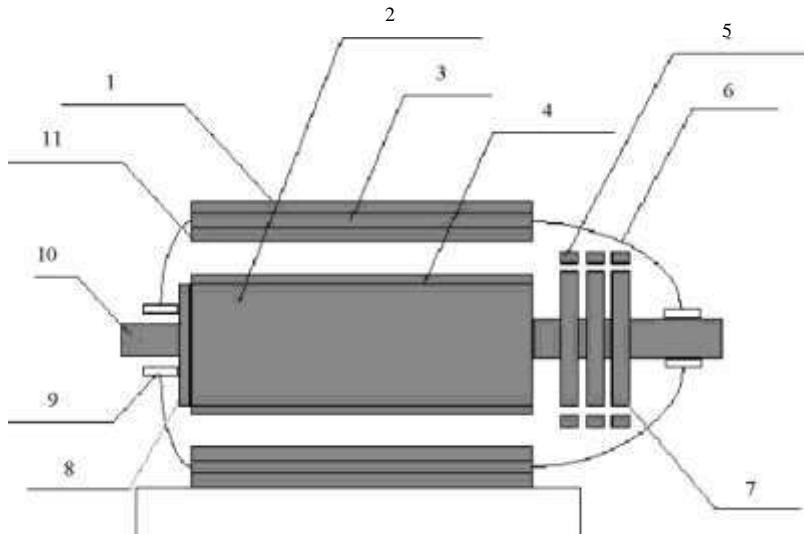


Рис. 5. Конструкция асинхронного двигателя: 1-станина; 2-сердечник ротора; 3 — сердечник статора; 4 — обмотка ротора; 5 — щеточный аппарат; 6 — подшипниковые щиты; 7 — контактные кольца; 8 — крыльчатка вентилятора; 9 — подшипники; 10 — вал; 11 — обмотка статора

На станине в верхней части предусмотрены рым-болты или транспортные ушки, предназначенные для подъема машины. К станине на видном месте крепят табличку из некоррозийных материалов с техническими данными машины.

**Статор** синхронной машины состоит из **сердечника** и **обмотки** и впрессовывается в станину. Сердечник в виде полого цилиндра собирают из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,35-0,5 мм, которые скрепляют скобами, шпильками или сварным швом. Листы имеют кольцевую форму с пазами по окружности внутреннего диаметра, что позволяет создать на внутренней поверхности сердечника при его сборке продольные пазы, в которые затем укладывают обмотку. Магнитопровод асинхронного двигателя набирают из листовой электротехнической стали марки 2214. Таким образом, сердечник статора служит для проведения и усиления магнитного потока.

**Обмотка статора** предназначена для создания вращающегося магнитного поля и укладывается в пазы сердечника статора. Обмотки статоров с высотой оси вращения 56-250 мм выполняют из круглого провода; с высотой оси вращения 280-355 мм — из жестких катушечных групп. Марки обмоточного провода ПЭТ-155 (ПЭТМ-155) — провод обмоточный, изолированный теплостойкой эмалью на основе полиэфиримидов (М — для механизированной укладки). Для изготовления станины и подшипниковых щитов используют алюминий и его сплавы, сталь, чугун.

**Роторы** асинхронных двигателей бывают двух видов: с короткозамкнутой и фазной обмотками. В зависимости от этого и сами асинхронные двигатели называют двигателями с короткозамкнутым и фазным ротором.

**Сердечник ротора** выполняют из неизолированных листов электротехнической стали. В них выштампывают пазы для обмотки и отверстия для вала. В фазных роторах в пазы укладывают **обмотку**, аналогичную статорной обмотке и образующую такое же число полюсов. Концы этой обмотки обычно соединяют в звезду, а начала выводят на три медных контактных кольца, на кото-

рые накладывают щетки. При таком исполнении ротора можно через щеточные контакты включать в цепь ротора трехфазный реостат для изменения силы тока и момента двигателя при пуске или для регулирования частоты вращения. Наиболее распространены короткозамкнутые роторы. В таком роторе обмотка выполнена в виде так называемой «беличьей клетки». Ее выполняют путем заливки под давлением в пазы алюминия А5 или алюминиевых сплавов АКМ12-4. При этом одновременно отливают стержни (проводники), лежащие в пазах, короткозамыкающие их кольца и лопасти для вентиляции.

**Контактные кольца** предназначены для присоединения пускового или регулировочного реостата. Контактные кольца применяют в асинхронных двигателях с фазным ротором. Контактные кольца располагают на валу, обычно за подшипниковым щитом, и заключают их в коробку. Контактные кольца медные или латунные у машин мощностью до 100 кВт и стальные или чугунные в машинах большей мощности. Наружный диаметр контактных колец принимают меньше наружного диаметра подшипника качения для того, чтобы коробка контактных колец и подшипниковый щит машины могли быть при разборке сняты без предварительного съема контактных колец с вала.

На корпусе двигателя прикреплена табличка, на которой приведены номинальные данные двигателя, в том числе указаны схема соединения обмоток статора и соответствующее ей номинальное напряжение питающей сети, например схема Д/У, номинальное напряжение 220/380 В.

### **3. Методика выполнения работы.**

- 3.1. Изучить теоретические положения методического указания к лабораторной работе.
- 3.2. Составить конструктивную схему изучаемого образца асинхронного электродвигателя и указать позиционные обозначения основных узлов машины.
- 3.3. Записать паспортные данные образца АД.
- 3.4. Разобрать электродвигатель.
- 3.5. Определить количество, применяемые материалы и назначение отдельных узлов машины. Данные внести в таблицу.
- 3.6. Собрать электродвигатель и сдать рабочее место лаборанту.
- 3.7. Составить отчет и сдать преподавателю.

### **4. Порядок выполнения работы.**

- 4.1. Произвести внешний осмотр электродвигателя: определить тип электродвигателя (с короткозамкнутым или фазным ротором) и наметить порядок разборки.
- 4.2. Открыть клеммную коробку на двигателе и определить схему соединения обмоток статора.
- 4.3. Составить конструктивную схему машины и расписать соответствующие позиционные обозначения.
- 4.4. Изучить и записать в рабочую тетрадь паспортные данные электродвигателя.
- 4.5. Разобрать электродвигатель, осмотреть взаимное расположение основных узлов и определить их назначение и материалы, применяемые при их изготовлении.
- 4.6. Определить способ охлаждения внутренних и наружных частей электродвигателя.
- 4.7. Осмотреть подшипниковые щиты, определить, где передний, а где задний щит. Описать их назначение.
- 4.8. Для двигателей с фазным ротором изучить назначение и применяемые материалы для щеточного аппарата и контактных колец.
- 4.9. Составить отчет и сдать преподавателю.
- 4.10. Собрать электродвигатель и сдать инструмент лаборанту.

4.11. Сделать выводы по проделанной работе. В выводе отразить основные конструктивные отличия, преимущества и недостатки двигателей с короткозамкнутым ротором по сравнению с двигателями с фазным ротором.

### **5. Контрольные вопросы**

- 5.1. Какие машины называются асинхронными?

- 5.2. Объяснить область применения асинхронных машин.
- 5.3. Объяснить рабочий процесс асинхронного электродвигателя на основе законов электромагнитной индукции и закона Ампера.
- 5.4. Объяснить, почему частота вращения ротора меньше частоты вращения магнитного поля статора.
- 5.5. Объяснить понятие и привести аналитическое выражение скольжения.
- 5.6. Объяснить назначение, устройство и применяемые материалы статора асинхронного электродвигателя.
- 5.7. Описать назначение, конструктивное исполнение и применяемые материалы в двигателях с короткозамкнутым ротором.
- 5.8. Описать назначение, конструктивное исполнение и применяемые материалы в двигателях с фазным ротором.
- 5.9. Объяснить понятие «единая серия» и описать существующие единые серии асинхронных электродвигателей.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫВОДОВ ОБМОТОК СТАТОРА ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ.

Цель работы: освоить приемы опытной проверки обозначений выводов обмотки статора и экспериментального исследования асинхронного двигателя методом непосредственной нагрузки.

Студент должен

уметь:

- экспериментально проверять обозначение выводов обмотки статора;
- собирать схему, производить пробный пуск двигателя и реверсирование двигателя.

Теоретическое обоснование

#### **Обозначение выводов обмоток асинхронных машин**

В электрических машинах выводы обмоток должны обозначаться в соответствии с ГОСТ 183-74 для машин, разработанных до 1987 г. или модернизируемых, и в соответствии с ГОСТ 26772-85 «Машины электрические вращающиеся. Обозначение выводов и направления вращения» для машин, выпускаемых с 01.01.87 г.

Согласно ГОСТ 183-74 выводы асинхронных машин обозначаются следующим образом: обмотки статора – буквой «С»; обмотки ротора – буквой «Р». Трехфазные обмотки кроме букв обозначаются цифрами: начала фаз – цифрами «1, 2, 3», концы фаз – цифрами «4, 5, 6»; нулевая точка (независимо от того, заземлена она или нет) – цифрой «0».

Если трехфазная машина не имеет секционированных и составных обмоток на статоре, то обозначения выводов обмоток на статоре должны производиться в соответствии с табл. 1.1. Обозначения выводов обмоток статора однофазных машин производятся согласно данным, приведенным в табл. 1.2.

Контактные кольца роторов трехфазных асинхронных двигателей, согласно стандарту, обозначаются буквами, соответствующими обозначениям присоединенных к ним выводов обмотки ротора (табл. 1.3). При этом расположение колец выполняется в порядке следования фаз, а кольцо Р1, соответствующее первой фазе, должно быть наиболее удаленным от обмотки ротора. При трех выводах нулевая точка обмотки не выводится.

В соответствующих таблицах приведены обозначения согласно ГОСТ 26772-85.

Таблица 1.1. Наименование выводов обмоток статора асинхронных машин и их обозначения

Схема соединения обмоток	Число выводов	Наименование фазы и вывода	Обозначения выводов			
ГОСТ 183-74	ГОСТ 26772-85					
начало	конец	начало	конец			
Открытая схема		Первая фаза	C1	C4	U1	U2
Вторая фаза	C2	C5	V1	V2		
Третья фаза	C3	C6	W1	W2		
Соединение в звезду	или	Первая фаза	C1	U		
Вторая фаза	C2		V			
Третья фаза	C3		W			
		Нулевая фаза (точка звезды)		N		
Соединение в треугольник		Первый вывод	C1	U		
Второй вывод	C2		V			
Третий вывод	C3		W			

Таблица 1.2. Обозначение выводов однофазных машин

Число выводов	Название выводов обмоток статора	Обозначение выводов			
ГОСТ 183-74	ГОСТ 26772-85				
начало	конец	начало	конец		
	Главная обмотка	C1	C2	U1	U2
	Вспомогательная обмотка	B1	B2	Z1	Z2

Таблица 1.3. Обозначение выводов обмотки ротора

Число выводов	Название фазы и вывода	Обозначение вывода	
ГОСТ 183-74	ГОСТ 26772-85		
3 или 4	Первая фаза	P1	K
Вторая фаза	P2	L	
Третья фаза	P3	M	
Нулевая фаза (точка звезды)		Q	

#### Напряжения сети и схемы статорных обмоток электродвигателя

Если в паспорте электродвигателя указано, например, 220/380 в, это означает, что электродвигатель может быть включен как в сеть 220 в (схема соединения обмоток - треугольник),

так и в сеть 380 в (схема соединения обмоток - звезда). Статорные обмотки асинхронного электродвигателя имеют шесть концов.

По ГОСТу обмотки асинхронного двигателя имеют следующие обозначения: I фаза - C1 (начало), C4 (конец), II фаза - C2 (начало), C5 (конец), III фаза - C3 (начало), C6 (конец).

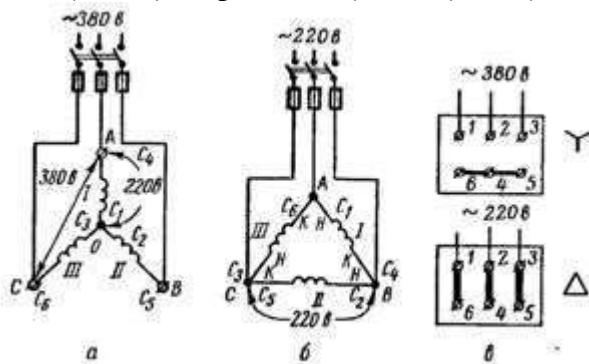


Рис. 1. Схема подключения обмоток асинхронного двигателя: а - в звезду, б - в треугольник, в - исполнение схем "звезды" и "треугольник" на доске зажимов.

Если в сети напряжение равно 380 В, то обмотки статора двигателя должны быть соединены по схеме "звезда". В общую точку при этом собраны или все начала (C1, C2, C3), или все концы (C4, C5, C6). Напряжение 380 в приложено между концами обмоток AB, BC, CA. На каждой же фазе, то есть между точками О и А, О и В, О и С, напряжение будет в  $\sqrt{3}$  раз меньше:  $380/\sqrt{3} = 220$  В.

#### Определение согласованных выводов (начал и концов) фаз статорной обмотки.

На выводах статорных обмоток двигателя обычно имеются стандартные обозначения па металлических обжимающих кольцах. Однако эти обжимающие кольца теряются. Тогда возникает необходимость определить согласованные выводы. Это выполняют в такой последовательности.

Сначала при помощи контрольной лампы определяют пары выводов, принадлежащих отдельным фазным обмоткам (рис. 2).

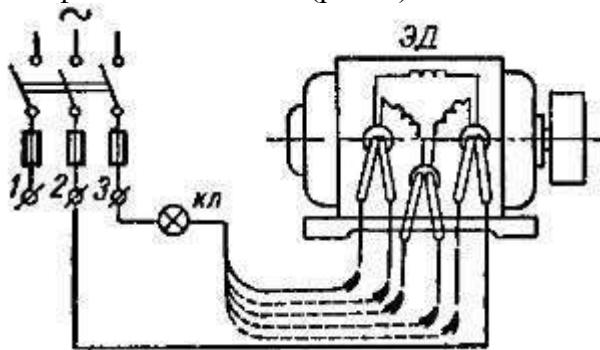


Рис. 2 . Определение фазных обмоток при помощи контрольной лампы.

К зажиму сети 2 подключают один из шести выводов статорной обмотки двигателя, а к другому зажиму сети 3 подключают один конец контрольной лампы. Другим концом контрольной лампы поочередно касаются каждого из остальных пяти выводов статорных обмоток до тех пор, пока лампа не загорится. Если лампа загорелась, значит, два вывода, присоединенные к сети, принадлежат одной фазе.

Необходимо следить при этом, чтобы выводы обмоток не замыкались друг с другом. Каждую пару выводов помечают (например, завязав ее узелком).

Определив фазы статорной обмотки, приступают ко второй части работы - определению согласованных выводов или "начал" и "концов". Эта часть работы может быть выполнена двумя способами.

**1. Способ трансформации.** В одну из фаз включают контрольную лампу. Две другие фазы

соединяют последовательно и включают и сеть на фазное напряжение.

Если эти две фазы оказались включенными так, что и точке О условный "конец" одной фазы соединен с условным "началом" другой (рис. 3, а), то магнитный поток  $\Sigma\Phi$  пересекает третью обмотку и индуцирует в ней ЭДС.

Лампа укажет наличие ЭДС небольшим накалом. Если накал незаметен, то следует применить в качестве индикатора вольтметр со шкалой до 30 - 60 В.

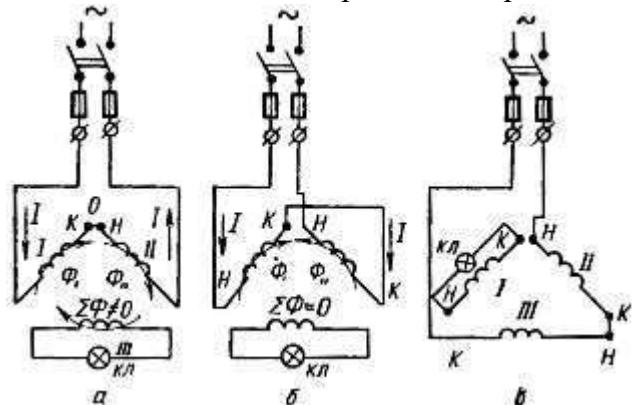


Рис. 3. Определение начал и концов в фазных обмотках двигателя методом трансформации

Если в точке О встретятся, например, условные "концы" обмоток (рис. 3, б), то магнитные потоки обмоток будут направлены противоположно друг другу. Суммарный поток будет близок к нулю, и лампа не даст накала (вольтметр покажет 0). В данном случае выводы, принадлежащие какой-либо из фаз, следует поменять местами и включить снова.

Если накал у лампы есть (или вольтметр показывает некоторое напряжение), то концы следует пометить. На один из выводов, которые встретились в общей точке О, надевают бирку с пометкой Н1 (начало I фазы), а на другой вывод - К3 (или К2).

Бирки К1 и Н3 (или Н2) надевают па выводы, находящиеся в общих узелках (заявленных при выполнении первой части работы) с Н1 и К3 соответственно.

Для определения согласованных выводов третьей обмотки собирают схему, представленную на рисунке 3, в. Лампу включают в одну из фаз уже обозначенными выводами.

**2. Способ подбора фаз.** Этот способ определения согласованных выводов (начал и концов) фаз статорной обмотки можно использовать для двигателей небольшой мощности - до 3 - 5 кВт.

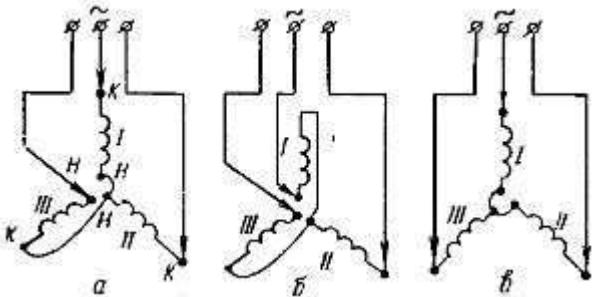


Рис. 4. Определение "начал" и "концов" обмотки методом подбора схемы "звезда".

После того как определены выводы отдельных фаз, их наугад соединяют в звезду (по одному выводу от фазы подключают к сети, а по одному — соединяют в общую точку) и включают двигатель в сеть. Если в общую точку попали все условные "начала" или все "концы", то двигатель будет работать нормально.

Но если одна из фаз (III) оказалась "перевернутой" (рис. 4, а), то двигатель сильно гудит, хотя и может вращаться (но легко может быть заторможен). В этом случае выводы любой из обмоток наугад (например, I) следует поменять местами (рис. 4, б).

Если двигатель опять гудит и плохо работает, то фазу следует снова включить, как прежде (как в схеме а), но повернуть другую фазу - III (рис. 3, в).

Если двигатель и после этого гудит, то эту фазу следует также поставить по-прежнему, а повернуть следующую фазу - II.

Когда двигатель станет работать нормально (рис. 4, в), все три вывода, которые соединены в общую точку, следует пометить одинаково, например "концами", а противоположные -

"началами". После этого можно собирать рабочую схему, указанную в паспорте двигателя.

### Ход работы

#### 1) Проверка обозначения выводов обмотки статора.

Для правильного соединения обмотки статора в звезду или в треугольник необходимо точно знать маркировку выводов обмотки статора. Это делают следующим образом. Сначала определяют пары выводов каждой фазной обмотки статора. Это можно сделать с помощью «сигнальной» лампы, включенной, как это показано на рисунке 1, *а*. Прикоснувшись концом одного из проводов этой лампы какого-либо вывода обмотки статора, концом другого провода, подключенного к сети, касаются поочередно других выводов обмотки. При прикосновении к одному из выводов лампа загорается. Это свидетельствует о том, что пара выводов, которых касаются в данный момент концы проводов, принадлежат одной фазной обмотке. Этую пару выводов отмечают и переходят к отысканию выводов второй, а затем и третьей фазных обмоток.

Затем определяют начала и концы каждой фазной обмотки. Для этого, обозначив произвольно начала и концы всех трехфазных обмоток соединяют последовательно какие-либо две из них (например, фазные обмотки *A* и *B*), как это показано на схеме рисунок 1, *б*, и подключают их к источнику переменного тока. Последовательно в цепь включают резистор *r* такого сопротивления, чтобы ток в цепи этих обмоток превысил номинального значения. К оставшейся третьей фазной обмотке подключают вольтметр (можно воспользоваться «сигнальной лампой»). Если предварительная маркировка выводов обмоток *A* и *B* была правильной, то вольтметр, подключенный к выводам фазы *C*, не покажет напряжения (лампа не загорится). Объясняется это тем что ось результирующего потока фазных обмоток *A* и *B*  $\Phi = \Phi_A + \Phi_B$  направлена под углом  $90^\circ$  к оси фазной обмотки *C* и поэтому не наводит в ней ЭДС. Если же предварительная маркировка выводов одной из обмоток, например обмотки *B*, оказалась неправильной и схема имела вид, представленный на рисунке 1, *в*, то ось результирующего потока обмоток *A* и *B* совпадает с осью фазной обмотки *C* и наводит в той обмотке некоторую ЭДС, при этом вольтметр на выводах обмотки *C* покажет напряжение (лампа загорится).

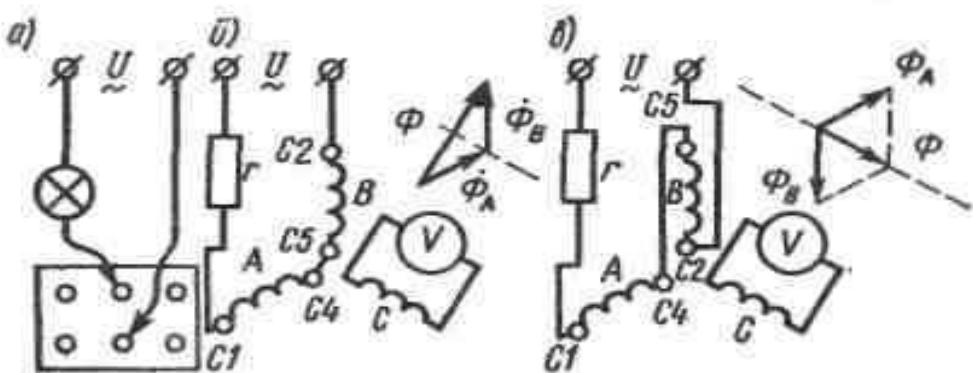


Рисунок 1. Схемы для определения выводов «начало» и «конец» фазных обмоток статора асинхронного двигателя.

#### 2) Ответить на контрольные вопросы:

- 1) С какой целью у асинхронного двигателя обычно делают все шесть выводов обмотки статора?
- 2) Как определить начало и конец фазной обмотки статора?

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6**  
**ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С**  
**КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ**

**Цель:** исследовать способ регулирования частоты вращения АД с короткозамкнутым ротором с помощью согласованного изменения частоты  $f$  и напряжения  $U$ , снять показания с приборов, заполнить таблицу и построить зависимость  $n = f(U)$ , сравнить практическую характеристику с теоретической, сделать вывод.

-Схемы электрические соединений

- Перечень аппаратуры
- Указания по проведению экспериментов

**Перечень аппаратуры**

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Преобразователь частоты	217	0...100 Гц 3x220 В; 3А
G2	Однофазный источник питания	218.4	~ 220 В / 6 А
G3	Машина постоянного тока	101.1	90 Вт; 220 В 2,4 А (якорь) 220 В (возбуждение)
G4	Преобразователь угловых перемещений	104	6 выходных сигналов
M1	Асинхронный двигатель	106	120 Вт; 220/380 В; 1350 мин <sup>-1</sup>
A1	Регулируемый автотрансформатор	318.2	-0...240 В / 2 А
A2	Выпрямитель	322.1	-400 В / 2 А
A3	Активная нагрузка	306.1	220/380 В; 50Гц; 3x0...50 Вт
P1	Блок мультиметров	508.2	3 мультиметра 0...1000 В~; 0...10 А-; 0...20 МОм
P2	Указатель частоты вращения	506.3	2000...0...2000 мин <sup>-1</sup>
P3	Вольтамперметр	531	-0...240 В / - 0,1...0,5 А

**Порядок выполнения:**

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините гнезда защитного заземления, устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" преобразователя частоты G1.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рис. 3.3.

- Включите устройство защитного отключения и автоматические выключатели однофазного источника питания G2.
- Включите выключатель «СЕТЬ» указателя частоты вращения P2.
- Включите выключатель «СЕТЬ» преобразователя частоты G6. Кнопками «ВЫБОР СТРОКИ / СТРАНИЦЫ НА ДИСПЛЕЕ» выберите режим работы «Эксперимент №1: Исследование режимов работы асинхронного двигателя».
- Кнопкой «ВЫБОР ИНФОРМАЦИИ НА ДИСПЛЕЕ» выберите «МАССИВ ИЗМЕНЯЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ», далее кнопками «ВЫБОР СТРОКИ / СТРАНИЦЫ НА ДИСПЛЕЕ» и «ИЗМЕНЕНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРА» выберите, например, следующие значения параметров: U номинальное - 220 В, тип характеристики - линейная, выход 1 - скорость, выход 2 - скорость, управление - ручное.
- Кнопкой «ВЫБОР ИНФОРМАЦИИ НА ДИСПЛЕЕ» выберите «МАССИВ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ».
- Вращая регулировочную рукоятку, установите задание скорости вращения магнитного поля двигателя M1, например, 157 рад/с (соответствует 1500 об/мин). Нажмите кнопку «ВПЕРЕД» и убедитесь, что электродвигатель M1 пришел во вращение и на дисплее преобразователя G6 по завершении разгона двигателя M1 отображается скорость вращения его магнитного поля 157 рад/с.
- Меняя положение регулировочной рукоятки преобразователя частоты G6, варьируйте частоту вращения **n** и напряжение U двигателя M1 и заносите показания указателя P2 (частота вращения **n**) и вольтметра (напряжение U) в таблицу.

Таблица 1

<b>п, об/мин</b>								
<b>U, В</b>								

- По завершении эксперимента нажмите кнопку «СТОП» и отключите выключатель «СЕТЬ» преобразователя частоты G6. Отключите выключатель "СЕТЬ" указателя частоты вращения P2. Отключите автоматические выключатели однофазного источника питания G2.
- Используя данные табл.1, постройте зависимость **n** = **f(U)**

## СДЕЛАЙТЕ ВЫВОД

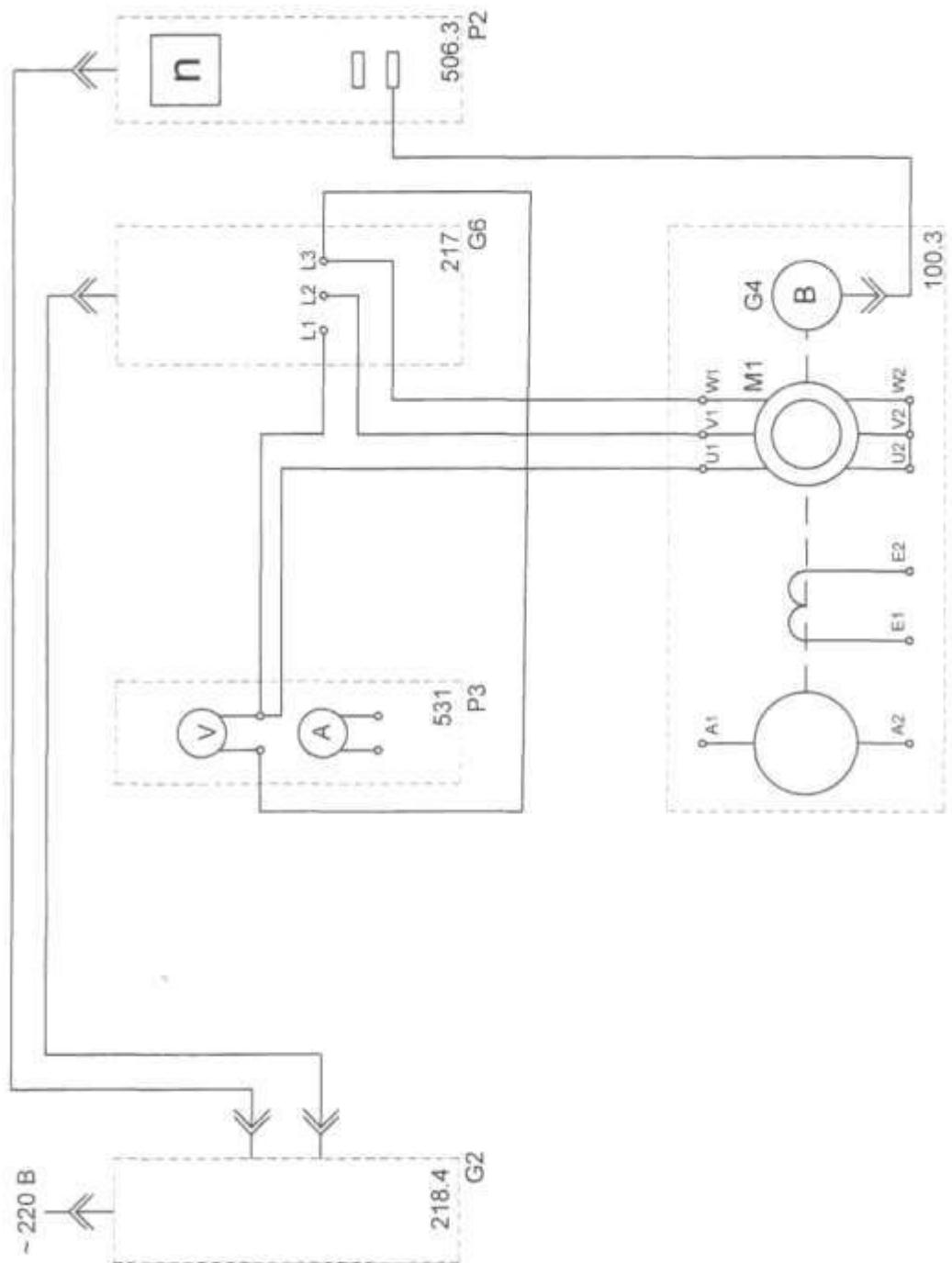


Рис. 3.3. Схема для регулирования скорости вращения трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором согласованным изменением частоты и напряжения статора.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6/1

Исследование двигателя переменного тока (снятие механической характеристики  $n=f(M)$  трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором)

Цель: Опытным путем установить зависимость вращающего момента от скольжения; перегрузочную способность асинхронного двигателя

Студент должен знать:

- принцип действия и устройство трехфазного асинхронного двигателя;
- электромагнитный момент асинхронного двигателя; скольжение;
- зависимость момента от скольжения; перегрузочная способность асинхронного двигателя;

- рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя.

уметь:

- собирать схему, производить пробный пуск двигателя и реверсирование двигателя.

### Содержание

- Схема электрических соединений
- Перечень аппаратуры
- Указания по проведению эксперимента

Таблица 1

### Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Преобразователь частоты	217	0...100 Гц 3x220 В; 3А
G2	Однофазный источник питания	218.4	~ 220 В / 6 А
G3	Машина постоянного тока	101.1	90 Вт; 220 В 2,4 А (якорь) 220 В (возбуждение)
G4	Преобразователь угловых перемещений	104	6 выходных сигналов
M1	Асинхронный двигатель	106	120 Вт; 220/380 В; 1350 мин <sup>-1</sup>
A1	Регулируемый автотрансформатор	318.2	-0...240 В / 2 А
A2	Выпрямитель	322.1	-400 В / 2 А
A3	Активная нагрузка	306.1	220/380 В; 50Гц; 3x0...50 Вт
P1	Блок мультиметров	508.2	3 мультиметра 0...1000 В~; 0...10 А-; 0...20 МОм
P2	Указатель частоты вращения	506.3	2000...0...2000 мин <sup>-1</sup>
P3	Вольтамперметр	531	-0...240 В / - 0,1...0,5 А

## Определение механической характеристики $n=f(M)$ трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" трехфазного источника G1.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений, приведенной на рисунке.
- Регулировочную рукоятку автотрансформатора A1 поверните против часовой стрелки до упора.
- Регулировочные рукоятки активной нагрузки A3 установите в крайнее по часовой стрелке положение.
  - Включите устройство защитного отключения и автоматические выключатели однофазного источника питания G2.
  - Включите выключатель «СЕТЬ» блока мультиметров Р1 и указателя частоты вращения Р2.
  - Активизируйте мультиметры блока Р1, задействованные в эксперименте.
  - Включите выключатель «СЕТЬ» преобразователя частоты G1. Кнопками «ВЫБОР СТРОКИ / СТРАНИЦЫ НА ДИСПЛЕЕ» выберите режим работы «Эксперимент №1: Исследование режимов работы асинхронного двигателя».
- Кнопкой «ВЫБОР ИНФОРМАЦИИ НА ДИСПЛЕЕ» выберите «МАССИВ ИЗМЕНЯЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ», далее кнопками «ВЫБОР СТРОКИ / СТРАНИЦЫ НА ДИСПЛЕЕ» и «ИЗМЕНЕНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРА» выберите, например, следующие значения параметров: У номинальное - 150 В, тип характеристики - линейная, выход 1 - скорость, выход 2 - скорость, управление - ручное.
- Кнопкой «ВЫБОР ИНФОРМАЦИИ НА ДИСПЛЕЕ» выберите «МАССИВ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ».
- Вращая регулировочную рукоятку преобразователя частоты G1, установите задание скорости вращения магнитного поля двигателя M1 157 рад/с (соответствует 1500 об/мин / частоте выходного напряжения 50 Гц) и нажмите кнопку «ВПЕРЕД».
- Включите выключатель «СЕТЬ» автотрансформатора A1.
- Вращая регулировочную рукоятку автотрансформатора A1 по часовой стрелке, увеличивайте нагрузку двигателя M1 и заносите показания амперметра (ток I генератора G3) и вольтметра (напряжение U генератора 03) блока Р3 и

указателя Р2 (частота вращения  $\pi$  двигателя М1) в таблицу ниже. **При этом ток генератора G3 длительно не должен превышать 0,6 А!**

Таблица 2

I, А								
U, В								
n, мин <sup>-1</sup>								

- По завершении эксперимента выведите рукоятку автотрансформатора А1 в крайнее против часовой стрелки положение и отключите выключатель «СЕТЬ». Нажмите кнопку «СТОП» и отключите выключатель «СЕТЬ» преобразователя частоты G1. Отключите выключатель "СЕТЬ" указателя частоты вращения Р2 и блока мультиметров Р1. Отключите автоматические выключатели однофазного источника питания G2.

- Вычислите момент  $M$  на валу асинхронного двигателя М1 для каждого значения тока  $I$  из таблицы по формуле (см.ниже) и занесите в таблицу.

Таблица 3

M,								
n, мин <sup>-1</sup>								

- Используя данные таблицы, постройте зависимость  $\pi=f(M)$ .

#### Содержание отчета

- 1) Номер, тема и цель работы.
- 2) Схема опыта (рисунок 3.2).
- 3) Ход работы.
- 4) Паспортные данные асинхронного двигателя, измерительных приборов и регулировочных устройств.
- 5) Результаты измерений и расчетов (таблицы 2,3).
- 6) Рабочие характеристики двигателя.
- 7) Вывод о проделанной работе.

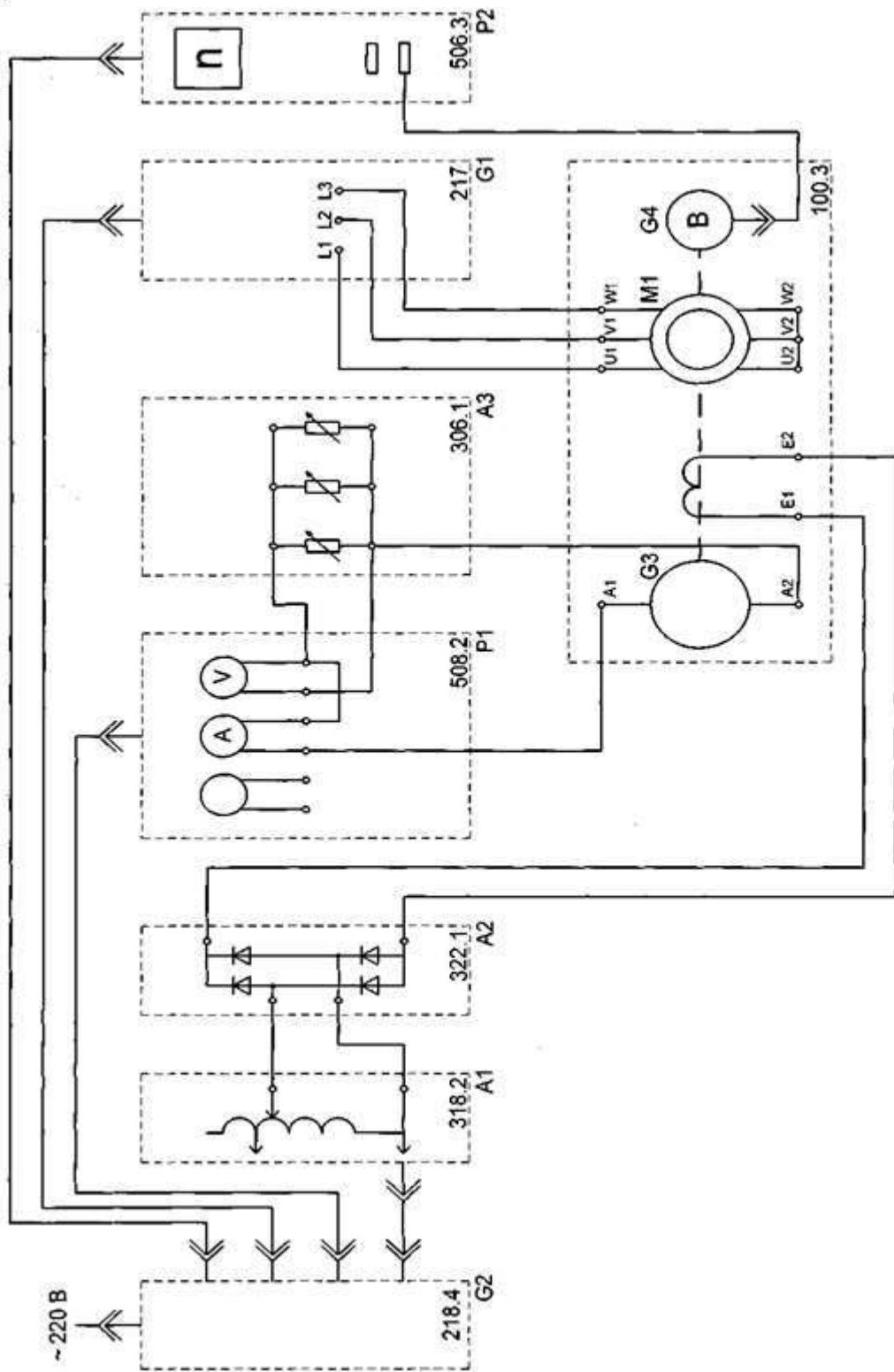


Рис. 3.2. Схема для определения механической характеристики трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №6

### Расчет параметров асинхронного двигателя.

Изучение влияния величины нагрузки на параметры асинхронного двигателя.

Цель: изучить методы расчета параметров асинхронного двигателя

Студент должен знать:

- принцип действия и устройство трехфазного асинхронного двигателя;
- электромагнитный момент асинхронного двигателя;
- виды потерь в электродвигателе;

#### Задание 1.

Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором имеет номинальную мощность  $P_{\text{ном}}$  и потребляет из сети полную мощность  $S_1$  при коэффициенте мощности  $\text{Cos}\phi_{\text{н}}$  и  $\eta_{\text{ном}}$ . Суммарные потери мощности в двигателе  $\Sigma P$ . Двигатель развивает номинальный момент  $M_{\text{ном}}$ , максимальный момент  $M_{\text{max}}$ , пусковой момент  $M_{\text{пуск}}$ . Способность двигателя к перегрузке  $M_{\text{max}}/M_{\text{ном}}$ , кратность пускового момента  $M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}}$ . Номинальная частота вращения ротора  $n_{\text{ном}}$ ; скольжение двигателя при этом  $S_{\text{ном}}$ . Частота тока тока в статоре  $f_1$ , в роторе  $f_2$ . Номинальное напряжение сети  $U_{\text{ном}}$ . Определить величины, отмеченные прочерками в таблице 1.

Таблица 1

№ вар	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
$P_{\text{ном}}, \text{kVt}$	-	10	-	28	10	2,8	10	28	-	-
$S_{\text{1}}, \text{kVA}$	3,97	13.9	-	36,2	-	-	-	-	-	36,2
$\text{Cos}\phi_{\text{н}}$	-	0,84	0,86	-	0,84	0,86	0,84	0,86	0,83	0,86
$\eta_{\text{ном}}$	-	-	0,9	-	0,86	0,85	0,86	-	0,85	0,9
$\Sigma P, \text{kVt}$	0,5	-	-	3,1	-	-	1,62	-	-	-
$M_{\text{ном}}, \text{Нм}$	18,5	-	93	93	-	-	97,5	-	18,8	-
$M_{\text{пуск}}, \text{Нм}$	24,4	117	-	-	-	-	117	102	24,4	102
$M_{\text{max}}, \text{Нм}$	-	176	-	140	-	32	176	140	-	140
$M_{\text{max}}/M_{\text{ном}}$	1,7	-	1,5	-	1,8	-	-	-	1,7	-
$M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}}$	-	1,2	1,1	1,1	1,2	1,3	-	-	-	1,1
$n_{\text{ном}}, \text{об/мин}$	1425	-	2880	-	980	1425	-	2880	-	-
$f_1, \text{Гц}$	-	50	50	-	50	-	-	50	50	-
$f_2, \text{Гц}$	2,5	-	-	4	-	2,5	1,0	-	-	4
$S_{\text{ном}}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$U_{\text{ном}}, \text{В}$	380	380	500	-	380	-	-	500	380	500
$I_{\text{н}}, \text{A}$	-	-	-	41,7	-	6,2	21	41,7	6,2	-

#### Задание 2

Пользуясь техническими данными двигателей серии 4А, приведенными в таблице № 2 определить: номинальную  $P_{\text{ном}}$  и потребляемую  $P_1$  мощность; номинальный  $I_{\text{ном}}$  и пусковой  $I_{\text{пуск}}$  токи; синхронную частоту вращения  $n_1$  и скольжение  $S_{\text{ном}}$ ; номинальный  $M_{\text{ном}}$ , максимальный  $M_{\text{max}}$  и пусковой  $M_{\text{пуск}}$  моменты. Номинальное напряжение двигателя 380 В.

№ вар	Тип двигателя	P <sub>ном</sub> , кВт	n <sub>н</sub> ; об/мин	Cosφ <sub>н</sub>	I <sub>пуск</sub> /I <sub>ном</sub>	M <sub>пуск</sub> /M <sub>ном</sub>	M <sub>max</sub> /M <sub>ном</sub>	η <sub>ном</sub>
1.	4A100S2Y3	4	2880	0,89	7,5	2,0	2,2	0,86
2.	4A100L2Y3	5,5	2880	0,91	7,5	2,0	2,2	0,87
3.	4A112M2CY3	7,5	2900	0,9	7,5	2,0	2,2	0,87
4.	4A132M2CY3	11	2900	0,9	7,5	1,6	2,2	0,88
5.	4A80A4Y3	1,1	1400	0,83	6,0	2,0	2,2	0,85
6.	4A90 L4Y3	2,2	1400	0,83	6,0	2,0	2,2	0,8
7.	4A100S4Y3	3	1425	0,83	6,6	2,0	2,2	0,82
8.	4A100 L4Y3	4	1425	0,84	6,5	2,0	2,2	0,84
9.	4A112M4CY1	5,5	1425	0,85	7,0	2,0	2,2	0,85
10.	4A132M4CY1	11	1450	0,87	7,5	2,0	2,2	0,87
11.	4AP160S4Y3	15	1465	0,83	7,5	2,0	2,2	0,87
12.	4AP160M4Y3	18,5	1465	0,87	7,5	2,0	2,2	0,89
13.	4AP180S4Y3	22	1460	0,87	7,5	2,0	2,2	0,9
14.	4A180M4Y3	30	1460	0,87	7,5	2,0	2,2	0,93
15.	4A250S4Y3	75	1480	0,9	7,5	1,2	2,2	0,93
16.	4A250M4Y3	90	1480	0,91	7,5	1,2	2,2	0,81
17.	4A100L6Y3	2,2	950	0,93	5,5	2,0	2,2	0,86
18.	4AP160S6Y3	11	975	0,83	7,0	2,0	2,2	0,88
19.	4AP160M6Y3	15	975	0,83	7,0	2,0	2,2	0,86
20.	4AP180M6Y3	18,5	970	0,8	6,5	2,0	2,2	0,87

Таблица №2

**Задача № 3**

Выбрать асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором и синхронной частотой вращения  $n_1$  по таблице №2 для работы на соответствующую нагрузочную диаграмму. Данные своего варианта определить по таблице № 3. Проверить двигатель по перегрузочной способности.

Таблица 3

№ вар	P <sub>1</sub> , кВт	t <sub>1</sub> , мин	P <sub>2</sub> , кВт	t <sub>2</sub> , мин	P <sub>3</sub> , кВт	t <sub>3</sub> , мин	P <sub>4</sub> , кВт	t <sub>4</sub> , мин	n <sub>1</sub> , об/мин
01	1,7	3	2,5	6	4,3	9	2,3	5	3000
02	2,3	5	1,8	6	5,0	4	5,4	8	3000
03	5,4	6	4,3	7	3,8	3	6,7	5	3000
04	6,7	3	5,0	3	1,7	6	2,5	6	3000
05	2,5	4	3,8	5	2,3	8	1,8	4	3000
06	1,8	5	3,5	9	5,4	5	4,3	3	3000
07	4,3	7	4,6	4	6,7	7	5,0	5	3000
08	5,0	5	2,8	3	2,5	9	3,8	4	3000
09	3,8	6	8,6	6	9,4	6	1,7	8	3000
10	3,5	4	10	8	5,7	7	2,3	6	3000
11	4,4	5	9,4	5	7,2	3	5,4	7	1500
12	6,8	8	6,3	7	5,4	5	6,7	3	1500
13	7,7	5	8,4	3	3,6	9	2,5	5	1500
14	5,9	6	8,4	5	5,9	4	4,3	9	1500
15	3,9	4	6,7	6	1,7	3	5,0	4	1500
16	9,0	3	4,3	3	2,3	6	3,8	3	1500
17	1,7	5	5,7	4	5,4	8	3,5	6	1500
18	2,3	4	7,2	5	6,7	5	4,4	3	1500
19	5,4	8	5,4	7	2,5	7	6,8	4	1500
20	6,7	6	3,6	5	1,8	3	7,7	5	1500
21	2,5	7	5,9	6	4,3	11	5,9	7	1000
22	1,8	3	1,7	4	5,0	9	3,9	5	1000
23	4,3	5	2,3	5	1,7	8	9,0	6	1000
24	5,0	9	5,4	8	2,3	5	1,7	4	1000
25	3,8	4	6,7	5	5,4	6	2,3	5	1000
26	1,7	3	2,5	6	6,7	4	5,4	3	1000
27	2,3	6	1,8	4	2,5	3	6,7	8	1000
28	5,4	8	4,3	3	1,8	5	8,8	4	1000
29	6,7	5	5,0	5	4,3	4	7,0	7	1000
30	2,5	7	3,8	4	5,0	8	4,3	10	

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №6/1

### Исследование трехфазного асинхронного двигателя

Цель работы: по справочным данным рассчитать основные параметры и построить механическую характеристику АД.

Задание: Трехфазный АД с коротко замкнутым ротором серии 4А имеет технические данные, приведенные в таблице:

№ вар-та	Тип двигателя	P <sub>ном</sub> кВт	n <sub>2ном</sub> , об/мин	КПД <sub>ном</sub> , %	cosφ1	I <sub>п</sub> /I <sub>1ном</sub>	M <sub>п</sub> /M <sub>ном</sub>	M <sub>max</sub> /M <sub>ном</sub>	U <sub>1</sub> , В
1	4A100SY3	4	2880	86,5	0,89	7,5	2	2,5	220/380
2	4A160SY3	15	2940	88	0,91	7	1,4	2,2	220/380
3	4A200MY3	37	2945	90	0,89	7,5	1,4	2,5	380/660
4	4A112MY3	5,5	1445	85,5	0,85	7	2	2,2	220/380
5	4A132MY3	11	1460	87,5	0,87	7,5	2,2	3	220/380
6	4A280MY3	90	985	92,5	92,5	5,5	1,4	2,2	380/660

Определить: 1. Число полюсов 2р

2. Скольжение при номинальной нагрузке S<sub>ном</sub> и критическое скольжение

S<sub>кп</sub>.

3. Момент двигателя на валу M<sub>ном</sub>.
4. Начальный пусковой M<sub>п</sub> и максимальный M<sub>max</sub> моменты.
5. Номинальный I<sub>ном</sub> и пусковой I<sub>п</sub> токи в питающей сети при соединении обмоток статора звездой и треугольником.
6. Относительные значения моментов, соответствующие значениям скольжения - S<sub>ном</sub>, S<sub>кп</sub>, 0,1, 0,4, 0,8, 1,0, пользуясь формулой:

$$M^* = \frac{M}{M_{\max}} = \frac{2}{S/S_{kp} + S_{kp}/S}$$

Результаты свести в таблицу.

Построить: механическую характеристику АД в относительных единицах M\* = f(S)

Сделать вывод о характере изменения электромагнитного момента M при изменении величины скольжения S от 0 до 1.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 7

### Изучение работы трехфазного синхронного генератора

Цель: изучить устройство синхронного генератора и приобрести практические навыки в сборке схем и снятии характеристик; получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о свойствах синхронного генератора.

Студент должен знать:

- типы синхронных генераторов, их устройство и способы возбуждения реакции якоря синхронного генератора при активной, индуктивной емкостной и смешанной нагрузках;
- характеристики холостого хода, короткого замыкания внешние и регулировочные;
- номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки и номинальное изменение тока возбуждения;
- отношение короткой замыкания синхронного генератора;
- потери и КПД синхронной машины;

### Теоретическое обоснование

Внешняя характеристика — это зависимость напряжения на выходе генератора  $U_1$  от тока нагрузки  $I_1$ , при неизменных частоте вращения ( $n_2 = n_1$ ), токе возбуждения  $I_b = \text{const}$  и коэффициенте мощности  $\cos \varphi_1 = \text{const}$ .

Характеристика холостого хода — эта характеристика представляет собой зависимость ЭДС генератора в режиме х. х. Ей от тока возбуждения  $I_b$  при номинальной частоте вращения  $n_2 = n_1$ . Характеристику х. х. принято строить в относительных величинах ЭДС  $E_0^*$  и тока возбуждения  $I_b^*$  :  $E_0 = f(I_b^*)$ , где

$E_0^* = E_0$ :  $U_{1\text{ном}}$  и  $I_b^* = I_b/I_{b\text{ном}}$ . За базовые величины при определении относительных значений ЭДС и тока возбуждения принимают соответственно номинальное значение напряжения на выходе генератора  $U_{1\text{ном}}$  и ток возбуждения  $I_{b\text{ном}}$  соответствующий ЭДС х. х., равной номинальному напряжению генератора  $U_{1\text{ном}}$ .

Регулировочная характеристика — это зависимость тока возбуждения генератора  $I_b$  от тока нагрузки  $I_1$  при неизменных частоте вращении  $n_2 = n_1$  и напряжении  $U_1 = U_{1\text{ном}}$ .

Характеристика короткого замыкания — это зависимость тока статора при опыте к. з.  $I_{1k}$  от тока возбуждения  $I_b$  при неизменной частоте вращения  $n_2 = n_1$ . Характеристику к. з. принято строить в относительных единицах:  $I_{1k}^* = f(I_b^*)$ , где  $I_{1k}^* = I_{1k}/I_{1\text{ном}}$ ,  $I_b^* = I_b/I_{b\text{ном}}$ .

Анализируя результаты лабораторной работы, дают заключение о соответствии характеристик генератора, полученных опытным путем, типовым характеристикам, введенным в учебнике. При этом объясняют физические процессы, уловившие форму того или иного графика. Например, объясняют, почему характеристика х.х. имеет криволинейный вид, а ее ветви при намагничивании и размагничивании не совпадают. При сравнении опытной характеристики х. х. с нормальной следует дать количественную оценку.

Расхождению этих характеристик, рассчитав наибольшую величину этого расхождения (%):

$$E_{0,\text{наиб}} = (E_{*0,\text{оп}} - E_{*0,\text{нор}}) \quad (8.1)$$

где  $E_{*0,\text{оп}}$  и  $E_{*0,\text{нор}}$  - относительные значения напряжений х. х., взятых по опытной и нормальной характеристикам х. х. соответственно при токе возбуждения  $I_B$ , соответствующем наибольшему расхождению этих характеристик.

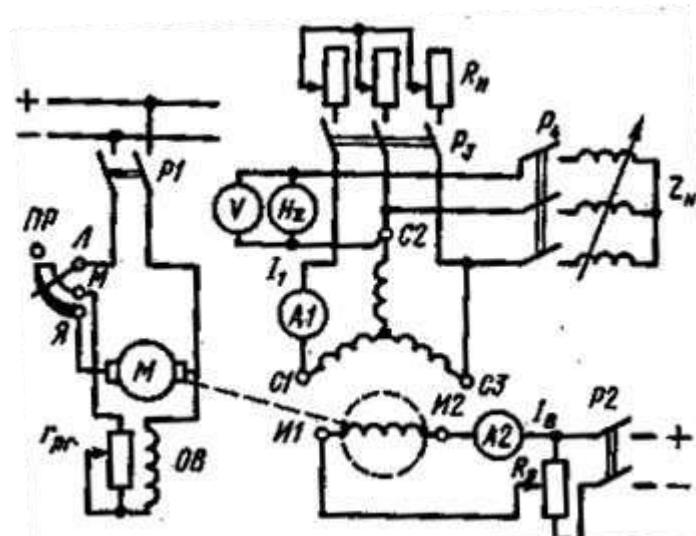
При анализе внешних и регулировочных характеристик генератора следует объяснить причины, вызвавшие их расхождение при активной и активно-реактивной видах нагрузки. Анализируя свойства генератора, целесообразно воспользоваться понятиями номинального изменения напряжения при сбросе нагрузки (8.2) и номинального изменения тока возбуждения (8.3).

Анализируя результат опыта к. з., необходимо объяснить прямолинейный вид характеристики к. з. Показания приборов, снятые при увеличении тока возбуждения (при намагничивании), соответствуют восходящей ветви характеристики х. х., а показания, снятые при уменьшении тока возбуждения (при размагничивании), - нисходящей ветви этой характеристики.

За характеристику х. х. принимают среднюю линию, проведенную между восходящей и нисходящей ветвями. При снятии данных восходящей ветви характеристики х. х. необходимо, чтобы изменение тока возбуждения  $I_B$  происходило только в направлении нарастания, а при снятии данных нисходящей ветви - только в направлении убывания. Для сравнения характеристики х. х., полученной опытным путем, с нормальной характеристикой х. х. синхронной машины следует обе характеристики строить в одних осях координат.

Ниже приведены данные нормальной характеристики х. х. синхронной машины:

$I_{*B}$ ....	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	5
$E_{*0}$ ....	0,58	1,0	1,21	1,33	1,40	1,46	1,51	



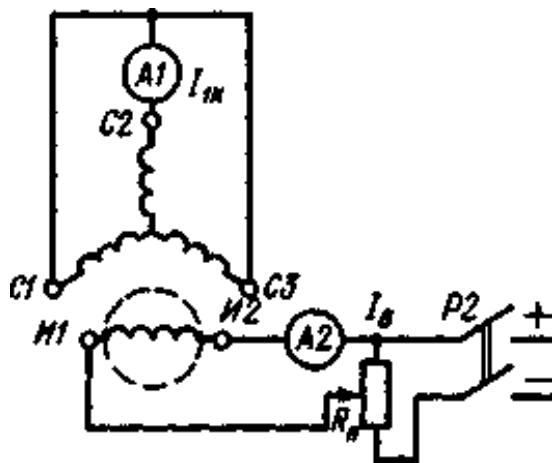


Рисунок 2 Схема включения трехфазного синхронного генератора при опыте

трехфазного к. з.

Задание 1

### Контрольные вопросы

- 1) Какова конструкция синхронных машин с явнополюсным и неявнополюсным роторами?
- 2) Какие способы возбуждения применяются в синхронных генераторах?
- 3) Можно ли регулировать напряжение синхронного генератора изменением частоты вращения ротора?
- 4) Почему характеристики х. х. синхронного генератора при намагничивании и размагничивании не совпадают?
- 5) Почему внешние и регулировочные характеристики синхронного генератора, снятые при разных видах нагрузки, не совпадают?
- 6) Чем объясняется прямолинейный вид характеристики к. з. синхронного генератора?
- 7) Что такое отношение короткого замыкания синхронного генератора и как влияет его величина на свойства генератора?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

### ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

**Цель:** изучить практически конструкцию двигателей специального исполнения и приобрести практические навыки проверки основных технических данных.

#### Оборудование и материалы:

8. Фильм по устройству и работе электромашинного усилителя.
9. Фильм по устройству и работе тахогенератора.
10. Фильм по устройству и работе сварочного генератора.

#### Теоретическая часть

Изучение устройства машин и аппаратов, эксплуатация и ремонт электрооборудования невозможно без знания свойств применяемых в устройствах электротехнических материалов. В ходе работы необходимо ознакомиться с наименованиями, свойствами и областями применения основных электротехнических материалов.

К машинам постоянного тока специального назначения относят электромашинные усилители (ЭМУ), тахогенераторы, бесконтактные двигатели постоянного тока и исполнительные двигатели постоянного тока (рис. 17.).

1). ЭМУ – это машины, работающие в генераторном режиме и усиливающие электрические сигналы. Простейшие ЭМУ – это генераторы постоянного тока независимого возбуждения, но они не нашли широкого распространения из за небольшого коэффициента усиления (не более 100). Наибольшее распространение получили ЭМУ поперечного поля, у которых основным магнитным потоком является поток, создаваемый током обмотки якоря. На его коллекторе установлено два комплекта щёток: один  $g_1$  и  $g_2$  – на поперечной оси главных полюсов (на геометрической нейтрали), а другой  $d_1$  и  $d_2$  – по продольной оси главных полюсов. Щётки  $g_1$  и  $g_2$  замкнуты накоротко, а к щёткам  $d_1$  и  $d_2$  подключена нагрузка. Помимо обмотки якоря ЭМУ имеет одну или несколько обмоток управления ( $u_1$ ;  $u_2$ ), компенсационную обмотку (ОК), поперечную подмагничивающую обмотку (ОП) и обмотку добавочных полюсов (ОД). Якорь ЭМУ вращается электродвигателем. Коэффициент усиления может достигать 2000-20 000.

2). Тахогенераторы постоянного тока служат для измерения частоты вращения по значению выходного напряжения. Они представляют собой генераторы малой мощности с возбуждением от постоянного магнита или с электромагнитным независимым возбуждением. На выходе включен электроизмерительный прибор магнитоэлектрической системы, шкала которого проградуирована в единицах измерения частоты вращения.

3). Бесконтактные двигатели постоянного тока (БДПТ) отличаются от коллекторных двигателей традиционной конструкции тем, что в них щёточно-коллекторный узел заменён полупроводниковым коммутатором (инвертором), управляемым сигналами, поступающими с бесконтактного датчика положения ротора (ДПР). ДПР расположен на валу двигателя. Рабочая обмотка двигателя – обмотка якоря – расположена на сердечнике статора, а постоянный магнит на роторе. В качестве чувствительного элемента ДПР чаще всего применяют датчики ЭДС Холла. Назначение ДПР – выдавать в блок коммутатора

управляющий сигнал в соответствии с положением полюсов постоянного магнита относительно секций якоря, Блок коммутатора меняет соответственно направление магнитного потока в обмотках, что приводит к вращению двигателя. КПД БДПТ по сравнению с коллекторными выше, они более надёжны и долговечны, но имеют повышенную стоимость за счёт полупроводникового коммутатора, датчиков Холла и постоянного магнита. Мощность БДПТ обычно до 120 Вт.

4). Исполнительные двигатели постоянного тока применяют в системах автоматики для преобразования электрического сигнала в механическое перемещение. В качестве исполнительных двигателей в настоящее время применяют чаще всего двигатели с независимым возбуждением, реже – с возбуждением от постоянных магнитов.

### Практическая часть

Пользуясь специализированными сайтами, фильмами, специальной и учебной литературой, изучить конструкцию и действие электромашинного усилителя, тахогенератора, сварочного генератора. соответствующие данные внести в таблицу.

Таблица 1

№ поз .	Технические данные	Электромашинный усилитель	Тахогенератор	Сварочный генератор
1.	Тип статора			
2.	Способ крепления обмотки статора			
3.	Способ привода			
4.	Тип конструкции обмотки статора			
5.	Количество фазных обмоток			
6.	Режим работы			
7.	Конструкция обмотки ротора			

Изобразить схемы включения машин специального назначения.

Вывод:

### Вопросы для контроля

1. Назначение электромашинного усилителя
2. Назначение тахогенератора
3. Назначение сварочного генератора
4. Применение электромашинного усилителя
5. Применение тахогенератора
6. Применение сварочного генератора
7. Способ включения электромашинного усилителя
8. Назначение тахогенератора
9. Назначение сварочного генератора

## Теоретическая часть

Электромашинный усилитель представляет собой генератор постоянного тока, в котором используется поперечная реакция якоря. Принципиальная схема ЭМУ изображена на рис. 1. На коллектор обычного якоря машины постоянного тока наложены две пары щеток — щетки 3-4 по продольной оси  $dd$  и щетки 1-2 по поперечной оси  $qq$ . Щетки по поперечной оси замкнуты накоротко.

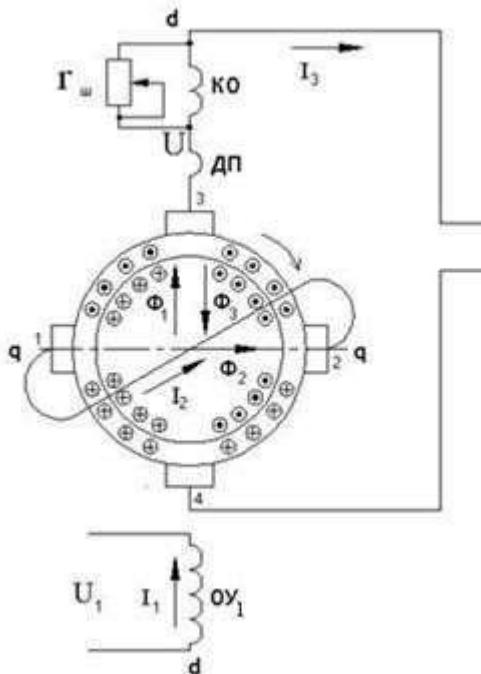


Рис. 1 — Принципиальная схема ЭМУ с поперечным полем

На статоре расположены две или в общем случае несколько обмоток управления ОУ, одна из которых (первичная обмотка) создает основной магнитный поток  $\Phi_1$ , а на другие подаются сигналы, управляющие работой усилителя. Кроме управляющих обмоток на статоре имеются компенсационная обмотка КО и обмотки добавочных полюсов ДП по продольной оси.

**Принцип действия ЭМУ.** Подведем к первичной обмотке ОУ<sub>1</sub> небольшую мощность  $P_1=U_1I_1$  и создадим поток  $\Phi_1$ . При вращении якоря в этом потоке в его обмотке между щетками 1-2 индуцируется небольшая ЭДС  $E_2$ . Так как щетки 1-2 замкнуты накоротко, то под действием этой ЭДС в обмотке якоря возникает значительный, ввиду малого сопротивления цепи якоря ток  $I_2$ , создающий магнитный поток  $\Phi_2$ . Направление тока  $I_2$ , в проводниках обмотки якоря показано на рис. 1., по внешнему кольцу якоря. Величина потока  $\Phi_2$  значительно превышает поток  $\Phi_1$ . Этот поток, который направлен по поперечной оси  $qq$ , является рабочим потоком, поэтому такие машины получили название ЭМУ поперечного поля. Поток  $\Phi_2$  в пространстве неподвижен, поэтому в той же обмотке якоря, между щетками 3-4 по продольной оси, он будет индуцировать ЭДС  $E_3$ , которая создает ток  $I_3$  в рабочей цепи. Направление тока

$I_3$  в проводниках обмотки якоря показано по внутреннему кольцу якоря. Таким образом, в обмотке якоря протекает одновременно два тока  $I_2$  и  $I_3$ .

При подключении нагрузки ток  $I_3$ , протекая по обмотке якоря, создает поток реакции якоря  $\Phi_3$ , направленный по продольной оси встречно  $\Phi_1$ , т.е. стремится размагнитить машину. Чтобы скомпенсировать размагничивающее действие МДС реакции якоря, устанавливается компенсационная обмотка КО, которая включается в цепь нагрузки последовательно. В ЭМУ с поперечным полем компенсационную обмотку делают несколько больше, чем это требуется для полной компенсации реакции якоря от тока нагрузки. Это необходимо для того, чтобы при наладке машины получить нужную степень компенсации путем изменения величины шунтирующего сопротивления  $r_{ш}$ .

Для получения благоприятной коммутации под щетками 3-4 в зоне этих щеток устанавливают добавочные полюсы.

Таким образом, электромашинный усилитель с поперечным полем имеет две ступени усиления. Первой ступенью являются обмотка управления ОУ<sub>1</sub> и обмотка якоря, замкнутая накоротко щетками 1-2. Второй ступенью является обмотка якоря с щетками 1-2, являющаяся обмоткой возбуждения для второй ступени, и обмотка якоря с щетками 3-4, создающая нагрузочный ток.

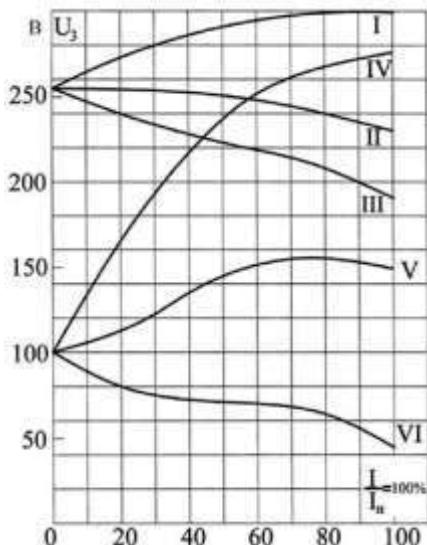


Рис. 2 – Внешние характеристики ЭМУ I – IV — при перекомпенсации; II – V – при критической компенсации; III – VI – при недокомпенсации

Рабочие свойства ЭМУ поперечного поля характеризуются мощностью на выходе, коэффициентом усиления, внешней характеристикой (рис. 2), быстродействием.

На выходе ЭМУ получают мощность  $P_3=U_3I_3$ , которая значительно превышает входную мощность  $P_1$ . Отношение мощности выхода к мощности входа называется коэффициентом усиления мощности.

В современных ЭМУ коэффициент усиления лежит в пределах 500...10000.

Быстродействие ЭМУ обычно оценивается по характеристикам переходных процессов при включении обмотки управления на постоянное напряжение.

Для оценки качества ЭМУ как машины часто пользуются коэффициентом качества. Коэффициентом качества называют отношение коэффициента усиления ЭМУ к постоянной времени его выходной ступени  $D = k_y/T_s$ .

Как отмечалось выше, в ЭМУ обычно предусматривается несколько обмоток управления. Каждая из этих обмоток создает свою МДС и магнитные потоки, которых индуцируют свои ЭДС в поперечной цепи якоря. Под действием этих ЭДС создается соответствующий ток возбуждения по поперечной оси, наводя аналогичную ЭДС между рабочими щетками. Таким образом, в ЭМУ усиливаются различные сигналы, подаваемые в обмотки управления.

ЭМУ с поперечным полем находят применение в схемах автоматического управления электроэнергетическими установками. Основными положительными качествами ЭМУ с поперечным полем являются высокое быстродействие, большой коэффициент усиления и относительная простота конструкции.

### Тахогенераторы постоянного тока

Тахогенераторы постоянного тока (рис.3) по принципу действия и конструкции представляют собой электрические **коллекторные** микромашины постоянного тока с независимым электромагнитным возбуждением или возбуждением от постоянных магнитов.

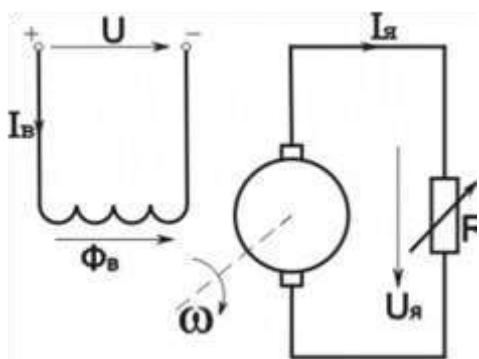


Рис.3. Тахогенератор постоянного тока

**Выходная характеристика** тахогенератора – это зависимость напряжения  $U_y$  от угловой скорости  $\omega$  якоря при  $\Phi=\text{const}$  и  $R_h = \text{const}$ . Электродвижущая сила якоря  $E_y$  прямо пропорциональна магнитному потоку возбуждения и угловой скорости якоря.  $E_y=S_{tr.0}\omega=S_{tr.0}(d\Theta/dt)$ ,

где  $S_{tr.0}=k\Phi_B$  крутизна тахогенератора при х.х.;  $\Theta$  – угол поворота якоря тахогенератора.

Данное выражение – это уравнение выходной характеристики тахогенератора постоянного тока при х.х., т.е. при разомкнутой цепи якоря. Данная линейная зависимость показана на рис.4 (для  $R_H = \infty$ ).

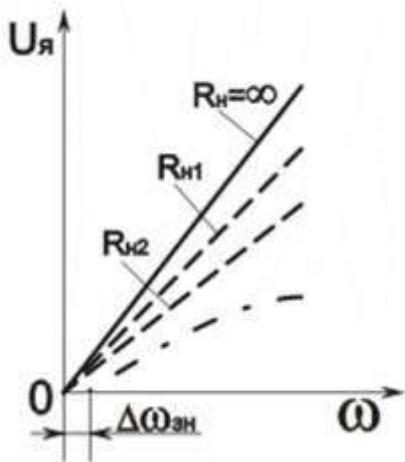


Рис.4. Выходная характеристика тахогенератора

$$U_{я} = E_{я} / (1 + R_{ця}/R_{H}) = S_{тг.0}\omega / (1 + R_{ця}/R_{H})$$

Уравнение свидетельствует о линейности выходной характеристики тахогенератора постоянного тока при постоянном магнитном потоке возбуждения и сопротивлении щеток.

Выходные характеристики (рис.143) для конечных значений сопротивления нагрузки  $R_{H1}$  и  $R_{H2}$ , причем  $R_{H1} > R_{H2}$ . Однако выходная характеристика реального тахогенератора может отклоняться от линейной зависимости. Это объясняется двумя факторами:

1. возникновением при нагрузке тахогенератора потока якоря, нелинейно ослабляющего поток возбуждения при росте тока якоря;
2. у тахогенераторов с графитовыми щетками постоянным является не сопротивление переходного контакта, а падение напряжения  $U_{ш}$ . В таком тахогенераторе напряжение на выводах якоря при нагрузке:

$$U_{я} = E_{я} - U_{ш} - I_{я}R_{я}.$$

У тахогенераторов постоянного тока при  $R_{H} \gg R_{я}$  крутизна  $S_{тг.0} = 3 - 100$  мВ/(об/мин). Для уменьшения погрешности целесообразно подключать на выход тахогенератора как можно большее нагрузочное сопротивление  $R_{H}$  и использовать небольшой диапазон угловых скоростей якоря ( $\omega \leq 0,5\omega_{ном}$ ), так как в этом случае реакция якоря незначительна.

Значительное уменьшение  $\Delta\omega_{зн}$  достигается применением металлических щеток с серебряными напайками в местах прикосновения к коллектору, у которых вольт-амперная характеристика линейная. К технологическим

погрешностям тахогенератора постоянного тока относится асимметрия – отклонение выходных напряжений тахогенератора от среднего значения в режиме нагрузки при равных угловых скоростях и разных направлениях вращения ротора.

### **Коллекторные сварочные генераторы**

Коллекторные генераторы являются машинами постоянного тока, содержащими статор с магнитными полюсами и обмотками, а также ротор с обмотками, концы которых выведены на пластины коллектора.

При вращении ротора витки его обмотки пересекают силовые линии магнитного поля и в них индуцируется ЭДС.

Графитовые щетки осуществляют подвижный контакт с пластинами коллектора. Щетки машины располагаются на электрической (геометрической) нейтрали коллектора, где ЭДС в витках меняет свое направление. Если сдвинуть щетки с нейтрали, то напряжение генератора снизится и переключение обмоток будет происходить под напряжением, что в сварочных генераторах под нагрузкой приведет к очень быстрому расплавлению коллектора электрической дугой.

ЭДС на щетках сварочного генератора пропорциональна магнитному потоку, создаваемому магнитными полюсами  $E_2 = c\Phi$ , где  $\Phi$  – магнитный поток;  $c$  – постоянная генератора, определяемая его конструкцией и зависящая от числа пар полюсов, количества витков в якорной обмотке, скорости вращения якоря.

Напряжение на выходе генератора при нагрузке  $U_2 = E_2 - J_{cv}R_g$ , где  $U_2$  – выходное напряжение на клеммах генератора при нагрузке;  $J_{cv}$  – сварочный ток;  $R_g$  – суммарное сопротивление участка цепи якоря внутри генератора и щеточных контактов.

Поэтому внешняя статическая характеристика такого генератора пологопадающая. Для получения круто падающей внешней статической характеристики в коллекторных генераторах применяется принцип внутреннего размагничивания машины, что обеспечивается статорной обмоткой размагничивания. При необходимости получения жесткой внешней статической характеристики используется подмагничающая обмотка статора.

**Сварочный генератор с независимым возбуждением и**

## размагничающей обмоткой

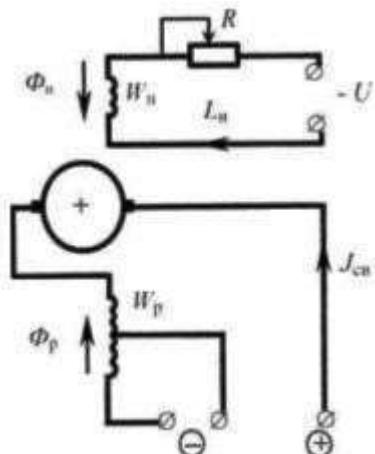


Рис. 5 Схема сварочного генератора с независимым возбуждением и размагничающей обмоткой

Отличительной особенностью такого генератора является то, что на магнитных полюсах расположены две обмотки возбуждения. Одна (намагничающая) питается от постороннего источника тока (с независимым возбуждением), а по другой (размагничающей) протекает сварочный ток.

Размагничающая обмотка, играя роль сопротивления, включенного последовательно с дугой, обеспечивает падающую характеристику генератора, а при ее секционировании ступенчато регулирует величину тока.

Включение в работу всех витков размагничающей обмотки дает ступень малых токов, а включение части витков - ступень больших токов.

Плавное регулирование сварочного тока осуществляется за счет изменения напряжения холостого хода, для чего служит реостат  $R$  в цепи намагничающей обмотки. Увеличение сопротивления  $R$  приводит к снижению намагничающего тока снижению потока намагничивания  $\Phi_n$ , напряжения холостого хода генератора и, наконец, к уменьшению сварочного тока.

Генератор обеспечивает падающую внешнюю статическую характеристику только при вращении в одну сторону, указанную на корпусе стрелкой. В сварочных преобразователях необходимо контролировать правильное направление вращения электродвигателя до проведения сварки на холостом ходу.

## Сварочный генератор с самовозбуждением и размагничающей обмоткой

Главное отличие этого типа генераторов в том, что намагничающая обмотка возбуждения питается не от постороннего источника, а от самого генератора. Поэтому они называются генераторами с самовозбуждением.

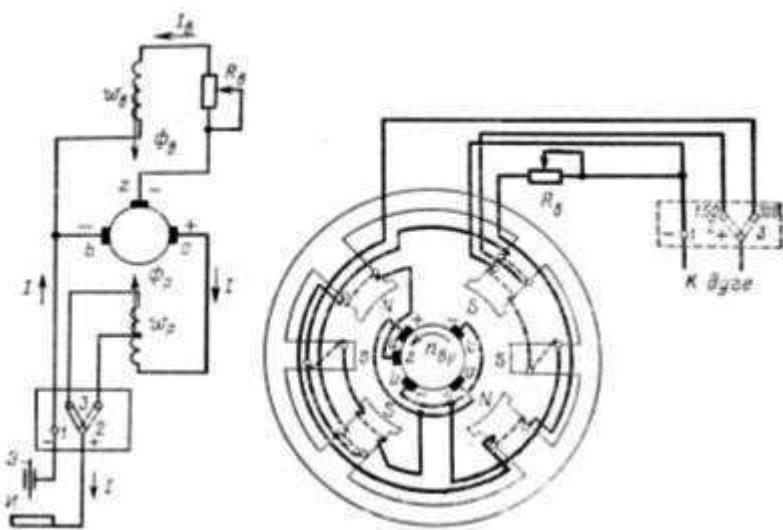


Рис. 6. Принципиальная электрическая схема и устройство магнитной системы четырех полюсного генератора с самовозбуждением

В коллекторных сварочных генераторах, кроме основных полюсов и обмоток, есть ещё две дополнительных полюса, на которых размещается по витку дополнительной последовательной обмотки. Это необходимо для компенсации магнитного потока реакции якоря и сохранения положения электрической нейтрали машины при изменении нагрузки.

Для нормальной работы генератора с самовозбуждением необходимо, чтобы напряжение, подаваемое на намагничивающую обмотку, не изменялось в процессе сварки, т.е. не зависело от режима сварки. С этой целью в генераторе установлена третья дополнительная щетка, которая располагается между двумя основными щетками.

Напряжение, питающее намагничивающую обмотку, оказывается независящим от сварочного тока. Падающая же характеристика генератора обеспечивается за счет размагничивающего действия размагничивающей обмотки, проявляющегося под второй половиной полюсов.

Особенность сварочных генераторов с самовозбуждением состоит в том, что их запуск возможен только при вращении якоря, в одном направлении, указанном стрелкой на торцевой крышке статора. Это связано с тем, что первоначальное возбуждение генератора при его запуске происходит благодаря остаточному намагничиванию полюсов.

При вращении якоря в противоположную сторону в обмотке возбуждения потечет ток обратного направления, который своим нарастающим магнитным полем в какой-то момент времени компенсирует остаточное намагничивание полюсов, т.е. суммарный магнитный поток под полюсами станет равным нулю. В этом случае для возбуждения генератора необходимо намагничивающую

обмотку временно подсоединить к независимому источнику постоянного тока.

Содержание отчета:

1. Название, цель работы;

2. Принципиальная схема ЭМУ с поперечным полем, тахогенератор постоянного тока и устройство магнитной системы четырех полюсного генератора с самовозбуждением;
3. Заполненная таблица № 1;
4. Ответы на контрольные вопросы.

## КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ

### I. КОЛЛЕКТОРНЫЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Задача. В табл. 1 даны значения параметров двигателя постоянного тока независимого возбуждения: номинальная мощность двигателя  $P_{\text{ном}}$ , напряжение питания цепи якоря  $U_{\text{ном}}$ , напряжение питания цепи возбуждения  $U_b$ , частота вращения якоря в номинальном режиме  $n_{\text{ном}}$ , сопротивления цепи якоря  $\Sigma r$  и цепи возбуждения  $r_b$ , приведенные к рабочей температуре, падение напряжения в щеточном контакте при номинальном токе  $\Delta U_{\text{щ}} = 2$  В, номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки

$\Delta n_{\text{ном}} = 8,0 \%$ , ток якоря в режиме холостого хода  $I_0$ . Требуется определить все виды потерь и КПД двигателя.

Таблица 1

Параметр	Варианты					
	1	2	3	4	5	6
$P_{\text{ном}}$ , кВт	25	40	53	75	16	11
$U_{\text{ном}}$ , В	440	440	440	440	220	220
$U_b$ , В	220	220	220	220	220	ПО
$I_0$ , А	6,0	7,5	8,0	10,8	8,7	5,8
$\Sigma r$ , Ом	0,30	0,17	0,12	0,70	0,18	0,27
$r_b$ , Ом	60	55	42	40	60	27
$n_{\text{ном}}$ , об/мин	2200	1000	2360	3150	1500	800

#### Решение варианта 1.

1. Частота вращения в режиме холостого хода

$$n_0 = n_{\text{ном}}[1 + (\Delta n_{\text{ном}}/100)] = 2200(1 + 8/100) = 2376 \text{ об/мин.}$$

2. ЭДС якоря в режиме холостого хода (падением напряжения в щеточном контакте пренебрегаем ввиду его незначительной величины в режиме холостого хода)

$$E_{a0} = U_{\text{ном}} - I_0 \Sigma r = 440 - 6 \cdot 0,3 = 438,2 \text{ В.}$$

3. Момент в режиме холостого хода

$$M_0 = 9,55 E_{a0} I_0 / n_0 = 9,55 \cdot 438,2 \cdot 6 / 2376 = 10,6 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

4. Момент на валу двигателя в режиме номинальной нагрузки

$$M_{2\text{ном}} = 9,55 P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 25 \cdot 10^3 / 2200 = 108,5 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

5. Электромагнитный момент двигателя при номинальной нагрузке

$$M_{\text{ном}} = M_0 + M_{2\text{ном}} = 10,6 + 108,5 = 119 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

6. Электромагнитная мощность двигателя в режиме номинальной нагрузки

$$P_{\text{эм.ном}} = 0,105 M_{\text{ном}} n_{\text{ном}} = 0,105 \cdot 119 \cdot 2200 = 27\,490 \text{ Вт.}$$

7. ЭДС якоря в режиме холостого хода можно представить как

$$E_{a0} = c_e \Phi n_0,$$

откуда

$$c_e \Phi = E_{a0} n_0 = 438,2 / 2376 = 0,185,$$

но так как  $c_m / c_e = 9,55$ , то

$$c_m \Phi = 9,55 c_e \Phi = 9,55 \cdot 0,185 = 1,77.$$

Из выражения электромагнитного момента в режиме номинальной нагрузки

$$M_{\text{ном}} = c_m \Phi I_{a\text{ном}}$$

определим значение тока якоря в режиме номинальной нагрузки

$$I_{a\text{ном}} = M_{\text{ном}} / (c_m \Phi) = 119 / 1,77 = 67 \text{ А.}$$

8. Сумма магнитных и механических потерь двигателя пропорциональна моменту холостого хода

$$P_{\text{магн}} + P_{\text{мех}} = 0,105 M_0 n_0 = 0,105 \cdot 10,6 \cdot 2376 = 2644 \text{ Вт.}$$

9. Электрические потери в цепи обмотки якоря

$$P_{a\text{э}} = P_{a\text{ном}} \sum r = 67^2 \cdot 0,3 = 1347 \text{ Вт.}$$

10. Электрические потери в щеточном контакте якоря

$$P_{щ.э} = I_{a\text{ном}} \Delta U_{щ} = 67 \cdot 2 = 134 \text{ Вт.}$$

11. Мощность, подводимая к цепи якоря, в номинальном режиме

$$P_{1a\text{ном}} = U_{\text{ном}} I_{a\text{ном}} = 440 \cdot 67 = 29\,480 \text{ Вт.}$$

12. Ток в обмотке возбуждения

$$I_e = U_e / r_e = 220 / 60 = 3,7 \text{ А.}$$

13. Мощность в цепи возбуждения

$$P_e = U_e I_e = 220 \cdot 3,7 = 814 \text{ Вт.}$$

14. Мощность, потребляемая двигателем в режиме номинальной нагрузки,

$$P_{1\text{ном}} = P_{1a\text{ном}} + P_{\text{в}} = 29\,480 + 814 = 30\,295 \text{ Вт или } 30,3 \text{ кВт}$$

15. КПД двигателя в номинальном режиме

$$\eta_{\text{ном}} = (P_{\text{ном}} / P_{1\text{ном}}) 100 = (25 / 30,3) 100 = 82,5\%.$$

## II. ТРАНСФОРМАТОРЫ

### Вариант № 1

1. Каков принцип работы трансформатора?

2. Из каких элементов состоит активная часть? Каковы их назначения и конструкция?

3. Как определяется номинальный ток в обмотке ВН трехфазного трансформатора?

4. Какие потери трансформатора вам известны, пояснить?

5. Что такое группа соединения обмоток трансформаторов? Какие группы предусмотрены ГОСТом?

6. Начертить схему трансформатора в режиме х.х.

7. Каковы достоинства трехобмоточных трансформаторов?

## Вариант № 2

1. Что такое трансформатор, по каким признакам классифицируются трансформаторы?

2. Какие элементы расположены на крышке бака? Пояснить их назначение.

3. Как определяется коэффициент трансформации?

4. Начертить схему трансформатора в режиме к.з.

5. Почему при нагрузках КПД трансформатора уменьшается?

6. Какие условия необходимо соблюдать, чтобы включить трансформаторы на параллельную работу?

7. Каковы достоинства автотрансформаторов?

## Вариант № 3

1. Будет ли работать трансформатор, если его включить в сеть постоянного тока? Если нет, то что произойдет?

2. Баки каких конструкций встречаются у трансформаторов? С какой целью в бак заливается трансформаторное масло?

3. Как определяется номинальный ток в обмотке НН трансформатора?

4. Начертить схему трансформатора под нагрузкой.

5. Как регулируется напряжение трансформаторов?

6. Каковы последствия нарушения условий включения трансформаторов на параллельную работу?

7. Чем автотрансформатор отличается от трансформатора?

## Вариант № 4

1. Какие разновидности трансформаторов вам известны?
2. Пояснить назначения элементов конструкции трансформатора: расширитель, воздухоосушитель, термосифонный фильтр?
3. На какие виды разделяют обмотки трансформатора и из какого материала их выполняют?
4. Какие магнитные потоки создаются в трансформаторе?
5. Начертить внешнюю характеристику трансформатора.
6. Описать принцип действия трансформатора.
7. Какие потери в трансформаторе называют постоянными и переменными?

## III.БЕСКОЛЛЕКТОРНЫЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА (общие сведения)

Ответить на вопросы, решить задачу в соответствии со своим вариантом

1. Какие машины относятся к бесколлекторным
2. Какие виды бесколлекторных машин переменного тока используется в производстве?
3. Принцип выполнения обмоток статора бесколлекторных машин переменного тока.?
4. Основные типы обмоток статора бесколлекторных машин переменного тока.?
5. Какие операции проводятся при текущем и капитальном ремонтах бесколлекторных машин переменного тока?
6. Допустимы ли большие перегрузки бесколлекторных машин в сравнении с коллекторными?
7. Какие достоинства и недостатки имеются в бесколлекторных машинах переменного тока?
8. Магнитодвижущая сила обмоток статора бесколлекторных машин переменного тока.

**Задача** Статор трехфазной бесколлекторной машины переменного тока с внутренним диаметром  $D_1$ , длиной  $l_1$ , имеет число пазов  $Z_1$ , число пар полюсов  $p$  (табл.1). Определить ЭДС одной фазы обмотки статора, если шаг обмотки по пазам  $y_1 = m$ , число витков в катушке  $W_k$ , магнитная индукция в воздушном зазоре машины  $B_b$ , а частота тока в питающей сети  $f_1 = 50\text{Гц}$ .

Таблица 1

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$D_1$ , м	0,22	0,25	0,32	0,18	0,36	0,48	0,26	0,32	0,28	0,52
$l_1$ , м	0,20	0,20	0,30	0,20	0,30	0,32	0,24	0,36	0,30	0,40
$Z_1$	36	48	48	36	48	54	30	42	48	60
$p$	2	2	2	1	4	3	1	2	3	4
$W_k$	4	3	3	3	2	2	4	3	4	2
$B_b$ , Тл	0,78	0,80	0,70	0,75	1,0	1,0	0,80	0,75	1,0	0,80
Укорочение шага пазов	1	1	1	2	1	2	2	1	1	2

Решение:

1. Полюсное деление:

$$\tau = \frac{\pi D_1}{p} = \frac{3,14 \cdot 0,2}{4} = 0,157 \text{ м};$$

2. Основной магнитный поток:

$$\Phi = (2/\pi) B_b l_1 \tau = 0,64 \cdot 0,75 \cdot 0,20 \cdot 0,157 = 0,015 \text{ Вб};$$

3. Число последовательно соединенных витков в фазной обмотке статора:

$$w_1 = \frac{Z_1 W_k}{m_1} = \frac{36 \cdot 4}{3} = 48 \text{ витков};$$

4. Число пазов на полюс и фазу:

$$q_1 = \frac{Z_1}{2pm_1} = \frac{36}{4 \cdot 3} = 3 \text{ паза};$$

5. Коэффициент распределения и обмоточный коэффициент для первой (основной) гармоники:

$$k_{p1} = 0,960; \quad k_{o61} = k_{p1} = 0,960;$$

6. ЭДС фазной обмотки:

$$E_{\phi 1} = 4,44 \Phi f_1 W_1 k_{o61} = 4,44 \cdot 0,015 \cdot 50 \cdot 48 \cdot 0,960 = 153 \text{ В};$$

7. Полный (диаметральный) шаг:

$$y_1 = \frac{Z_1}{2p} = \frac{36}{4} = 9 \text{ пазов};$$

8. Укороченный шаг:

$$y_{yk} = 9 - 1 = 8 \text{ пазов};$$

9. Относительный шаг:

$$\beta = \frac{y_{yk}}{y_1} = \frac{8}{9} = 0,89;$$

10. Угол сдвига фаз между векторами пазовых ЭДС:

$$\gamma = \frac{360p}{Z_1} = \frac{360 \cdot 2}{36} = 20^\circ;$$

11. Коэффициент укорочения шага для гармоники ЭДС:

$$k_{yv} = \sin(\nu\beta \cdot 90^\circ);$$

для первой (основной) гармоники ( $\nu=1$ ):

$$k_{y1} = \sin(\beta \cdot 90^\circ) = \sin(0,89 \cdot 90^\circ) = 0,985;$$

для пятой гармоники ( $\nu=5$ ):

$$k_{y5} = \sin(5 \cdot 0,89 \cdot 90^\circ) = 0,649;$$

для седьмой гармоники ( $\nu=7$ ):

$$k_{y7} = \sin(7 \cdot 0,89 \cdot 90^\circ) = -0,353;$$

12. Коэффициенты распределения для 1, 5 и 7 гармоник при  $q_1=3$ :

$$k_{p1} = 0,960, \quad k_{p5} = 0,217, \quad k_{p7} = -0,178;$$

13. Обмоточные коэффициенты:

$$k_{o61} = 0,985 \cdot 0,960 = 0,946,$$

$$k_{o65} = 0,649 \cdot 0,217 = 0,140,$$

$$k_{o67} = -0,353 \cdot (-0,178) = 0,062;$$

14. ЭДС фазы основной гармоники:

$$E_{\phi 1y} = 4,44 \Phi f_1 W_1 k_{o61} = 4,44 \cdot 0,015 \cdot 50 \cdot 48 \cdot 0,946 = 151 \text{ В};$$

Таким образом, укорочение шага обмотки на один паз привело к уменьшению ЭДС основной гармоники всего лишь на:

$$\frac{(E_{\phi 1} - E_{\phi 1y}) \cdot 100}{E_{\phi 1}} = \frac{(153 - 151) \cdot 100}{153} \approx 1,3\%;$$

При этом ЭДС 5-й гармоники уменьшится на 35%, а седьмой гармоники – на 65%.

15. Линейная ЭДС при соединении обмоток «треугольником» останется равной фазной ЭДС  $E_{\phi 1}=151$  В, а при соединении «звездой», она будет равна:

$$E_{\pi} = 1,73 \cdot 151 = 261 \text{ В.}$$



# ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ

## Расчет параметров трехфазной двухслойной обмотки статора бесколлекторной машины переменного тока

Рассчитать параметры трехфазной двухслойной обмотки статора ( $\tau$ ,  $u_{1d}$ ) по данным, приведенным в таблице. Выбрать укорочение шага обмотки ( $u_{1uk}$ ,  $\beta$ ,  $k_{y1}$ ,  $k_{y5}$ ,  $k_{y7}$ ), чтобы уничтожалась 9-я высшая гармоника в кривой индуцированной ЭДС обмотки. Соединение катушечных групп последовательное, фазы обмотки соединены звездой, катушки одновитковые.

Величины	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Число пазов – $Z_1$	48	60	36	48	36	36	24	60	35	54
Число полюсов – $2p$	8	4	4	4	2	6	2	10	6	6
Гармоника 9	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7

2. Используя результаты предыдущего расчета, определить эффективные значения фазной и линейной ЭДС первой, третьей, пятой и седьмой гармоник, приняв величину основного магнитного потока  $\Phi = 3/Z_1$  (В6) и частоту тока  $f_1 = 50$  Гц. Рассчитать значения этих ЭДС, если бы шаг обмотки был полным.

3. Письменно ответить на один из ниже приведенных вопросов. Номер вопроса соответствует номеру вашего варианта:

- 1) Почему в обмотке статора и нагрузке синхронного генератора протекает переменный ток?
- 2) Чем определяется форма графика ЭДС синхронного генератора?
- 3) Каково назначение контактных колец и щеток в синхронном генераторе?
- 4) Может ли ротор асинхронного двигателя вращаться синхронно с вращающимся полем статора?
- 5) Какие функции выполняет обмотка статора в синхронном генераторе и асинхронном двигателе?
- 6) К чему приводит несинусоидальность ЭДС в генераторах и двигателях переменного тока?
- 7) Какой зависимостью связаны номер высшей гармоники с ее амплитудой и частотой?
- 8) Какой может быть величина шага обмотки по пазам?
- 9) Какие средства применяют для подавления высших гармоник ЭДС в обмотке статора?
- 10) Почему отдельные фазные обмотки многофазной обмотки статора укладывают в 2/3 пазов?

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА

### ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ ТРЕХФАЗНЫХ СИНХРОННЫХ МАШИН

**1. Цель работы:** изучить конструкции и принцип действия трехфазных синхронных машин, устройство отдельных узлов и их взаимодействие, ознакомиться с электротехническими материалами, применяемыми при изготовлении синхронных машин.

#### 2. Основные положения.

Бесколлекторную машину переменного тока, у которой частота вращения ротора  $n_r$  равна частоте вращения магнитного поля статора  $n_2$ , называют синхронной машиной.

Синхронная машина может работать в качестве автономного генератора, питающего подключенную к нему нагрузку, а также может подключаться параллельно к сети, к которой присоединены другие генераторы. При работе параллельно с сетью синхронная машина может отдавать или потреблять энергию, т. е. работать генератором или двигателем. Наибольшее распространение машины получили в качестве генераторов электрической энергии. Практически вся используемая электрическая энергия вырабатывается синхронными генераторами, устанавливаемыми на электрических тепло- и гидроэлектростанциях, а также на стационарных и передвижных дизельных электростанциях небольшой мощности, эксплуатируемых в сельском хозяйстве в качестве резервных источников энергии.

Принцип действия синхронной машины основан на явлении электромагнитной индукции и взаимодействии магнитного поля с электрическим током.

##### 2.1. Рабочий процесс синхронного двигателя.

**Синхронный двигатель** — синхронная машина, предназначенная для преобразования электрической энергии в механическую.

Рабочий процесс можно разбить на 4 стадии:

1 — «возбуждение». На обмотку возбуждения ротора подается постоянный ток. Создается магнитный поток ротора.

2 — «подведение первичной энергии». К трехфазной обмотке статора подводится трехфазный переменный ток и создается вращающееся электромагнитное поле. Также ротор-индуктор раскручивается первичным двигателем в сторону вращения трехфазного вращающегося поля.

Синхронный двигатель не может запуститься самостоятельно, поскольку вращающееся трехфазное электромагнитное поле, созданное обмоткой якоря, не в состоянии увлечь за собой ротор, обладающий значительным моментом инерции. На роторе отсутствуют замкнутые обмотки (как в асинхронном двига-

теле), токи которых через созданное ими магнитное поле создают вращающий момент. При разгоне индуктора (от постороннего двигателя или раскручивания вручную) двигатель может разогнаться до подсинхронной частоты вращения с последующим втягиванием в синхронизм.

3 — «преобразование энергии». Магнитное поле ротора и трехфазное вращающееся электромагнитное поле сцепляются упругой синхронизирующей связью. Возникает электромагнитный синхронный момент. Ротор вращается синхронно с вращающимся магнитным полем статора.

4 — «передача энергии нагрузке». Нагрузка создает тормозной момент и для его компенсации двигатель из сети потребляет дополнительную мощность. Таким образом, электрическая энергия преобразуется в механическую.

Частота вращения двигателя прямо пропорциональна частоте  $f$  питающего напряжения и обратно пропорциональна числу пар  $2p$  полюсов, т. е.  $n = f/2p$ .

Регулирование частоты вращения СД возможно только путем изменения частоты напряжения переменного тока, поскольку частота вращения двигателя.

## 2.2. Рабочий процесс синхронного генератора.

**Синхронный генератор** — синхронная машина, предназначенная для преобразования механической энергии в электрическую.

Наиболее распространенным вариантом конструктивного исполнения СГ является конструкция с полюсами, установленными на валу ротора. Обмотка возбуждения подключается к источнику постоянного тока с помощью двух контактных колец со щетками. При вращении индуктора в рабочем воздушном зазоре СГ возникает вращающееся электромагнитное поле, которое наводит ЭДС в обмотке якоря (статора). Частота напряжения в обмотке якоря прямо пропорциональна частоте вращения  $n$  ротора и числу пар  $2p$  полюсов индуктора, т. е.  $f = n/2p$ .

Рабочий процесс можно условно разделить на 4 стадии:

1 — «возбуждение». Создание магнитного потока ротора. Обмотка возбуждения ротора подключается к источнику постоянного напряжения. По обмотке потечет ток, который создает магнитный поток ротора. Этот поток замыкается через воздушный зазор и статор.

2 — «подведение первичной энергии». К валу генератора присоединяется первичный двигатель (двигатель внутреннего сгорания, паротурбина). Ротор приводится во вращение с требуемой частотой.

3 — «преобразование энергии». Вращающееся поле ротора пересекает обмотки статора. По закону электромагнитной индукции в проводниках обмотки статора индуцируется ЭДС. На статоре имеются 3 обмотки, сдвинутые на 120 электрических градусов. Т. е. на выходе генератора получается трехфазная си-

стема токов.

4 — «передача энергии нагрузке». К зажимам обмотки статора подключают трехфазную электрическую нагрузку. Под действием напряжения по обмотке статора протекает ток, который создает магнитный поток статора — поток реакции якоря. Этот поток вызывает тормозной электромагнитный момент и стремиться снизить частоту вращения ротора. Первичный двигатель для восстановления вращения вынужден отдавать большую мощность генератору. Тем самым механическая энергия преобразуется в электрическую и передается нагрузке.

Регулирование напряжения на обмотке якоря СГ осуществляется путем изменения тока возбуждения, поскольку изменение частоты вращения ротора приведет к одновременному изменению частоты входного напряжения СГ.

Ток нагрузки создает в обмотке якоря СГ дополнительное вращающееся электромагнитное поле, имеющее те же направления и частоту вращения, что и основное поле возбуждения, т. е. оба поля вращаются синхронно. При работе в автономном режиме выходное напряжение СГ зависит от значения и характера (емкостный, индуктивный, активный) нагрузки. При подключении к обмотке якоря СГ нагрузке активного и индуктивного характера увеличение тока нагрузки сопровождается снижением выходного напряжения. Нагрузка емкостного характера приводит к увеличению входного напряжения СГ.

В синхронном генераторе генератор приводится во вращение первичным двигателем с частотой вращения  $n_2$ . При этом магнитный поток полюсов ротора (магнитный поток возбуждения) пересекает фазные обмотки статора и индуктирует в них ЭДС в соответствии с законом электромагнитной индукции:

$$\begin{aligned} & \text{---} \Phi \\ & e = - w \text{---} \\ & \text{---} \frac{dt}{.} . (1) \end{aligned}$$

Форма индуцируемой ЭДС определяется формой магнитного потока, поэтому стремятся, чтобы под полюсом магнитный поток имел распределение близкое по форме к синусоиде.

Действующее значение ЭДС определяется:

$$E = 4,44 K_a \Phi_0 R_b \frac{60}{w_a}, (2)$$

$K$

где  $K_a$  — обмоточный коэффициент обмотки якоря (статора), учитывающий распределение обмотки по пазам статора и укорочение шага;  $w_a$  — число витков обмотки якоря;  $\Phi_0$  — магнитный поток возбуждения;  $R_b$  — число пар полюсов.

В двухполюсном генераторе за один оборот ротора происходит полный

период изменения ЭДС. Поэтому частота  $f^1$  индуцированной в обмотке статора ЭДС:

$$f = \frac{\pi}{2} 2^{60}, \quad (3)$$

где  $\omega_2$  — частота вращения ротора,  $\text{мин}^{-1}$ .

Если в генераторе  $p$  пар полюсов, то за один оборот ротора в фазных обмотках будет индуцироваться  $p$  периодов ЭДС. Следовательно, частота ЭДС будет увеличиваться до значения:

$$f = p \cdot 2^{60}. \quad (4)$$

Поскольку фазные обмотки статора размещены в пространстве со сдвигом 120 электрических градусов (в общем случае со сдвигом  $120/p$ ), то ЭДС в фазных обмотках будут сдвинуты во времени одна относительно другой на  $120$  электрических градусов. Таким образом, в обмотках статора индуцируется трехфазная система ЭДС.

Если к выводам обмотки статора подключить нагрузку, то проходящий по фазным обмоткам трехфазный ток создает вращающееся магнитное поле, частота вращения которого зависит от частоты тока и числа пар полюсов обмотки, т. е.

$$\Pi = 60 f p. \quad (5)$$

С учетом выражения (4) равенство (5) примет вид:

$$\Pi = \frac{60 f}{p} = \frac{60 p n}{p^{60}} = \frac{60}{p^{59}}. \quad (6)$$

Следовательно, магнитное поле статора вращается с той же частотой, что и ротор.

При работе синхронного генератора под нагрузкой, вращающееся магнитное поле якоря взаимодействует с током  $1^e$  обмотки якоря возбуждения, создавая тормозной электромагнитный момент, который преодолевается первичным двигателем. При этом между магнитным потоком возбуждения  $\Phi_0$  и магнитным потоком якоря  $\Phi_a$  возникает угловое рассогласование в виде угла  $\theta$ . Чем больше активная электрическая мощность, отдаваемая обмоткой якоря нагрузке, тем больше угол  $\theta$  и тем большую механическую мощность надо затрачивать на вращение ротора.

### 2.3. Конструкции синхронных машин.

К основным частям синхронной машины относят станину, неподвижный статор, вращающийся ротор.

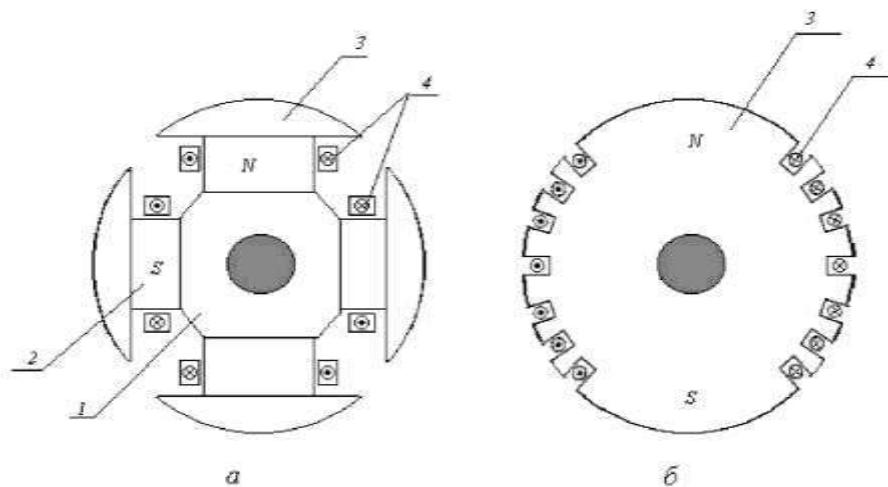
**Станина** предназначена для крепления всех основных узлов машины. Станины машин переменного тока в основном изготавливают чугунными литьими; при этом обеспечивается высокая надежность машин благодаря достаточной механической прочности и коррозийной стойкости чугуна, а также ста-

бильности размеров при сборочных операциях. Наряду с чугунными применяют также станины из алюминиевых сплавов, образуемые обливкой сердечника статора в машинах для литья под давлением.

Для размещения коробки выводов в станине предусматривают прилитые или приваренные фланцевые основания с окнами для выводных проводов обмотки. Для обеспечения требований по технике безопасности на станине размещают наружные зажимы для заземления корпуса машины. На станине в верхней части предусмотрены рым-болты или транспортные ушки, предназначенные для подъема машины. К станине на видном месте крепят табличку из некоррозийных материалов с техническими данными машины.

**Статор** синхронной машины состоит из **сердечника** и **обмотки** и впрессовывается в станину. **Сердечник статора** предназначен для проведения и усиления магнитного потока. В синхронных машинах нормального исполнения на статоре размещена **обмотка якоря**, где индуцируется ЭДС. Конструктивно статор состоит из корпуса, в который встроен полый цилиндрический сердечник (магнитопровод) набираемый из листов электротехнической стали толщиной 0,35 или 0,5 мм. У мощных машин с большими габаритными размерами листы сердечника собирают из различных сегментов. В осевом направлении сердечник может состоять из пакетов стали, разделенных вентиляционными каналами. Для удобства монтажа и транспортировки корпус статора выполняют разборным. В прямоугольных пазах сердечника размещена трехфазная обмотка, выполняемая так же, как и у асинхронных двигателей. В синхронных машинах применяется в основном двухслойная обмотка с укороченным шагом. Обмотку изготавливают из круглого медного провода в виде катушек.

Рис. 6. Схемы роторов а — явно; б — неявнополюсного: 1 — остав (обод); 2 — сердечник; 3 — полюсный наконечник; 4 — обмотка возбуждения.



В зависимости от конструкции ротора различают явно — и неявнополюсные синхронные машины (рис. 6). Конструктивное исполнение ротора обусловлено частотой его вращения, которая определяется типом первичного двигателя. В качестве приводного двигателя применяют гидравлические, паровые и газовые турбины, а так же двигатели внутреннего сгорания. В зависимости от этого синхронные генераторы называют соответственно гидро-, турбо- и дизель-генераторами.

Устройство синхронного генератора показано на рисунке. Явнополюсную конструкцию ротора применяют в тихоходных машинах, к которым относятся гидрогенераторы и дизель — генераторы. При частотах вращения ротора 1000

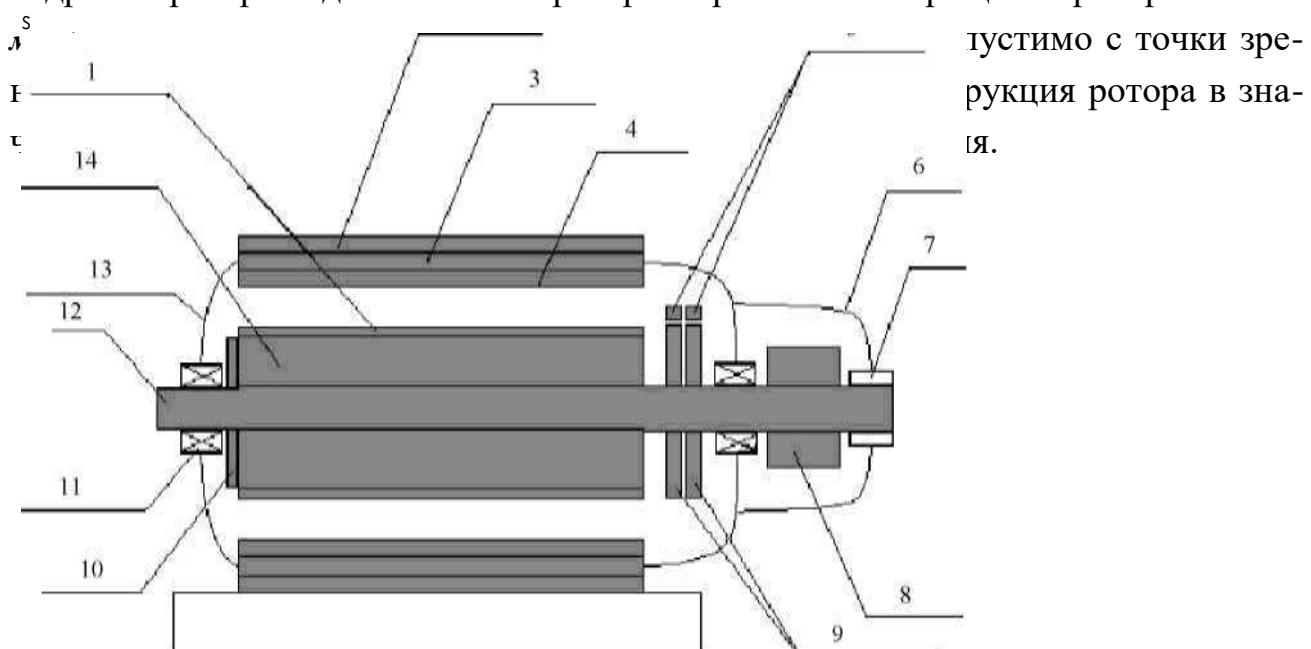


Рис. 7. Конструктивная схема синхронной машины: 1 — обмотка возбуждения ротора; 2 — станина; 3 — сердечник статора; 5 — щеточный аппарат; 6 — кожух; 7 — втулка; 8 — возбудитель; 9 — контактные кольца; 10 — крыльчатка вентилятора; 11 — подшипники; 12 — подшипники; 13 — подшипники; 14 — вал.

**Ротор** имеет явно выраженные полюсы и состоит из **остова 1, сердечников 2 с полюсными наконечниками 3** и катушек с **обмоткой возбуждения 4**. Остов ротора выполняют литым или набирают из листов стали и стягивают осевыми шпильками. **Сердечники полюсов** также собирают из штампованных стальных листов и прикрепляют к остову ротора Т — образными хвостиками или посредством шпилек. На сердечниках размещают катушки **обмотки возбуждения**, которые закрепляют с помощью полюсных наконечников. Обмотка возбуждения ротора состоит из отдельных катушек, намотанных из прямоугольных медиизолированных (в меньших машинах) или неизолированных, гнутых на ребро (в больших машинах) проводах. Выводы обмотки ротора пропускают через полый конец вала и соединяют с контактными кольцами.

**Полюсные наконечники** изготовлены из листовой стали и снабжены пазами, в которых размещают стержни демпферной (успокоительной) обмотки типа беличья клетка, замкнутые с двух сторон сегментами или пальцами. На оси ротора устанавливают стальные контактные кольца с внешней шлифованной поверхностью, к которым присоединяют выводы обмотки. Мощность гидрогенераторов достигает 640 МВА, а частота вращения не превышает  $500 \text{ мин}^{-1}$  поэтому они имеют на роторе большое число полюсов. Например, гидрогенератор Братской ГЭС мощностью  $8_{\text{ном}} = 225 \text{ МВА}$  имеет частоту вращения  $P_c = 125 \text{ мин}^{-1}$  и, следовательно, число пар полюсов на роторе  $P = 60/125 = 60 \times 50/125 = 24$ .

Гидрогенераторы выполняют с вертикальным и горизонтальным расположением вала ротора. Диаметр ротора значительно больше длины ( $D < 16 \text{ м}$ ,  $L < 1,75 \text{ м}$ ).

Неявнополюсную конструкцию ротора используют в быстроходных машинах, к которым относят турбогенераторы (с частотой вращения 1500 и  $3000 \text{ мин}^{-1}$  \*). Турбогенераторы выполняют с горизонтальным расположением вала ротора, который имеет диаметр 1-5 м при длине не более 7,5—8,5 м. Ротор представляет собой цельную цилиндрическую поковку из высококачественной стали с хорошими магнитными и механическими свойствами, имеет утолщенную часть (бочку) и концы вала. На поверхности бочки фрезеруют пазы, в которых размещают обмотку возбуждения и укрепляют немагнитными клиньями (рис 19.3, б стр. 200). Обмотка занимает 2/3 поверхности ротора. При этом образуются большие зубцы магнитопровода (полюсы). Лобовые соединения обмотки возбуждения стягивают бандажными кольцами из немагнитной стали.

В мощных гидро- и турбогенераторах применяют охлаждение статора и ротора. В качестве охлаждающей среды используют воздух, водород, минеральное масло и воду.

Системы возбуждения бывают двух типов: независимого возбуждения и самовозбуждения.

При независимом возбуждении обмотка ротора запитывается от генератора постоянного тока, называемого возбудителем, мощность которого составляет 0,3-3 % номинальной мощности синхронной машины. Возбудитель может быть непосредственно

соединен с валом ротора синхронной машины или с помощью клиноременной передачи. Возможно, также возбуждение от отдельно установленного генератора постоянного тока, приводимого во вращение асинхронным или синхронным двигателем с питанием от независимого источника напряжения.

В генераторах серии ЕСС5 в пазах статора кроме основной обмотки размещают дополнительную трехфазную обмотку, от которой через встроенный выпрямитель осуществляется питание обмотки возбуждения. Последовательно с трехфазной обмоткой включены реостаты для регулирования тока возбуждения. Начальное возбуждение генератора обеспечивается за счет кратковременного питания обмотки возбуждения от аккумуляторной батареи.

В генераторах большой мощности применяют бесщеточную систему возбуждения. В качестве возбудителя используют синхронный генератор обращенного исполнения, у которого обмотка якоря размещена на роторе, а обмотка возбуждения — на статоре. Выводы трехфазной обмотки якоря возбудителя через встроенный выпрямитель соединяют непосредственно с обмоткой возбуждения генератора. Обмотка возбуждения возбудителя питается от подвозбудителя — генератора постоянного тока.

Принципиальная конструкция синхронного двигателя не отличается от синхронного генератора. Они изготавливаются преимущественно, как явно полюсные; в неявнополюсном исполнении они встречаются относительно редко. Изготавливают на все стандартные напряжения и для скоростей вращения от 1000 до 125 об/мин, однако, конструкция двигателей имеет ряд особенностей:

- 1) синхронный двигатель имеет меньший воздушный зазор, чем синхронный генератор, что способствует уменьшению пусковых токов;
- 2) пусковую обмотку выполняют стержнями большего сечения;
- 3) ширину полюсного наконечника принимают равной 0,9т вместо 0,8т в генераторах.

#### 2.4. Способы пуска СД.

Пуск СД нельзя осуществить непосредственным включением в сеть в связи с большой инерцией ротора, которую не может преодолеть вращающееся поле статора. Для пуска СД применяются два способа:

- пуск посредством вспомогательного двигателя;
- асинхронный.

В первом случае ротор возбужденного двигателя разгоняют до синхронной частоты вращения, при этом машина работает в режиме генератора. С помощью синхронизирующего устройства добиваются синхронности вращения ротора с полем статора, после чего обмотка статора подключается к сети. При этом магнитные поля ротора и статора сцепляются упругой магнитной связью, и ротор вращается с синхронной частотой вращения. В качестве пускового двигателя обычно используют асинхронный двигатель с фазным ротором с числом полюсов

на два меньше, чем число полюсов у синхронного двигателя.

Асинхронный пуск возможен при наличии в полюсных наконечниках ротора пусковой обмотки. Она аналогична успокоительной обмотке синхронного генератора. Обмотку статора подключают к сети, и процесс запуска осуществляется аналогично запуску асинхронного двигателя. После разгона до частоты вращения близкой к синхронной обмотку возбуждения ротора подключают к источнику постоянного тока. Образующийся при этом синхронный момент втягивает ротор двигателя в синхронизм. После пуска пусковая обмотка выполняет функцию успокоительной обмотки, ограничивая качания ротора.

Синхронные двигатели широко применяются для привода мощных насосов, вентиляторов, компрессоров и компенсаторов. Для автоматизации производства, автономных установок электроснабжения, авиационном и автомобильном транспорте и других объектах применяют синхронные машины малой мощности.

### **3. Методика выполнения работы.**

3.1. Определить тип электрической машины, установленной на стенде для выполнения лабораторной работы.

3.2. Изучить общую конструкцию машины. Определить название деталей и их назначение.

3.3. Изучить принцип работы машины, назначение отдельных узлов и деталей в электромагнитном преобразовании энергии.

3.4. Составить общую конструктивную схему машины с обозначением названий узлов и деталей.

3.5. Записать паспортные данные машины.

3.6. Определить материалы, из которых изготовлены основные узлы и детали машины: станина, подшипниковые щиты, вал ротора, сердечник статора, сердечник полюса ротора, обмотка возбуждения, контактные кольца, щетки.

### **4. Порядок выполнения работы.**

4.1. Произвести внешний осмотр машины.

4.2. Составить конструктивную схему, с указанием и расшифровкой позиционных обозначений основных узлов и деталей.

5.4. Произвести запись паспортных данных.

5.5. Разобрать машину, описать взаимное расположение узлов и деталей.

4.6. Данные по работе оформить в виде отчета.

### **5. Контрольные вопросы.**

5.1. Объяснить рабочий процесс синхронного генератора.

5.2. Объяснить рабочий процесс синхронного двигателя.

- 5.3. Описать область применения синхронных машин.
- 5.4. Объяснить происхождение названия «гидрогенератор», «турбогенератор».
- 5.5. Объяснить конструкции роторов гидрогенераторов и турбогенераторов.
- 5.6. Объяснить, почему явно полюсные генераторы выполняют с большим числом полюсов.
- 5.7. Объяснить, почему у быстроходных синхронных машин ротор выполняют неявнополюсным.
- 5.8. Объяснить способы возбуждения синхронных машин.
- 5.9. Объяснить способы пуска синхронных двигателей.
- 5.10. Объяснить связь частоты вращения ротора генератора с частотой индуцируемой ЭДС.
- 5.11. Объяснить факторы, влияющие на величину индуцируемой ЭДС.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ОДНОСЛОЙНЫЕ ОБМОТКИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

**1. Цель работы:** получить практические навыки расчета параметров, со-ставления схем и технологии укладки однослойных концентрических обмоток.

**2. Основные понятия.**

Обмотка является важнейшей частью электрической машины. У асинхрон-ных двигателей имеются 2 обмотки — статора и ротора. В данной работе рас-сматриваются только обмотки статора.

Достоинством однослойных обмоток является:

- простота изготовления;
- более высокий коэффициент заполнения паза медью (по сравнению с двухслойными);
- меньший расход материала.

Недостатком этих обмоток является то, что кривые магнитодвижущих сил содержат большой спектр высших гармоник, наибольшие по амплитуде из ко-торых пятая и седьмая, что отрицательно сказывается на пусковых ха-рактери-стиках двигателя. Недостатком концентрических обмоток является необходи-мость изготовления катушек различным шагом на различных шаблонах.

Обмотка статора предназначена для создания в воздушном зазоре статора вращающегося магнитного потока. Рабочий процесс асинхронного электродви-гателя основан на взаимодействии вращающегося магнитного потока статора с ротором.

2.1. Двухфазное вращающееся магнитное поле.

Условия создания вращающегося магнитного поля для двухфазной системы токов:

2.1.1. условия, которым должны отвечать токи (напряжения):

а) токи в фазах должны изменяться во времени по синусоидальному закону;

б) сдвиг фаз токов во времени должен составлять 90 эл. гр.

2.1.2. условия, которым должны отвечать обмотки:

а) обмотки различных фаз должны располагаться в пространстве по окружности;

б) начала соседних фаз обмоток должны быть смещены в пространстве на 90 эл. гр.

в) геометрические размеры и число витков обмоток разных фаз должны быть одинаковыми.

2.1.3. элементы обмотки статора.

Обмоткой статора называется система изолированных проводников, в определенном порядке уложенных в пазы статора и определенным образом соединенных между собой в электрическую цепь. Основными элементами обмотки являются:

- проводник — отрезок изолированного провода, расположенный в магнитном поле машины;
- виток — два проводника, соединенных последовательно и расположенных под разноименными полюсами машины;
- секция (катушка) — один или несколько витков, соединенных между собой последовательно. Секция состоит из двух активных сторон и двух лобовых частей. Активные стороны — это те части секций, которые лежат в пазах статора. Лобовые части соединяют между собой активные стороны секций, они выходят за пределы статора;
- катушечная группа — это одна или несколько секций, соединенных последовательно (или параллельно) и занимающая на статоре две фазные зоны;
- фазная зона — участок статора, на котором расположены стороны секций обмотки катушечной группы одной фазы одного полюса;
- фаза обмотки — одна или несколько катушечных групп, соединенных последовательно или параллельно и участвующих в создании магнитного потока одной фазы.

2.3. Классификация обмоток.

2.3.1. По конструктивному исполнению: катушечные и стержневые.

Катушечные обмотки изготавливаются из провода круглого сечения диа-

метром до 3 мм в виде многовитковых катушек. Катушки получаются мягкими, они укладываются в пазы статора путем проталкивания (всыпания) по одному проводнику в паз.

Стержневые обмотки выполняются из медных стержней прямоугольного сечения размера сторон до 30 мм.

2.3.2. По числу слоев в пазу: однослойные и многослойные.

Однослойной обмоткой называется такая обмотка, у которой в пазу располагается одна активная сторона секции.

Многослойной обмоткой называется такая обмотка, у которой в одном пазу статора располагается две и более активных стороны секции.

2.3.3. По технологии укладки: всыпные и впротяжку.

2.3.4. По типу катушек однослойные обмотки делятся:

- концентрические (каждая последующая секция входит внутрь предыдущей);
- шаблонные (секции одинаковых размеров, выполненные в форме трапеции; одна активная сторона секции больше второй);
- цепные.

Концентрические обмотки в свою очередь на:

- двухплоскостные;
- трехплоскостные;
- «вразвалку».

Шаблонные делятся на:

- простые шаблонные;
- цепные шаблонные;
- «вразвалку».

2.4. Общие требования, предъявляемые к обмоткам машин переменного тока.

Обмотка должна обеспечивать заданные значения магнитного потока и ЭДС при минимальном расходе проводникового материала.

Обмотка должна обладать достаточной электрической, механической и термической прочностью, необходимой для обеспечения срока службы электродвигателя не менее 20 лет.

Обмотка должна быть технологична в изготовлении и легко поддаваться ремонту.

Обмотка должна обеспечивать форму индуктируемых ЭДС и НС, близкой к синусоидальной.

2.5. Параметры однослойных обмоток.

Полюсное деление — т. Это число пазов статора, приходящихся на один полюс

$$T=z/2p \text{ [пазов].}$$

Число пазов на полюс и фазу —  $q$   $q=z/2pt$ , где  $t$  — число фаз.

Шаг обмотки — у. Это расстояние в пазах между первой и второй активными сторонами одной секции.

$$yN=2(q+N) - 1,$$

где  $N$  — номер секции в катушечной группе.

Так как секции концентрической обмотки имеют различные размеры, то и шагов будет несколько. Количество секций в катушечной группе равно  $q$ , следовательно, и число частичных шагов равно  $q$ .

Угол сдвига ЭДС между соседними пазами статора в электрических градусах —  $a$

$$a=p 360/z.$$

2.6. Правила составления схемы однослойной обмотки.

- 1) Число катушечных групп в каждой фазе  $n$  равно числу пар полюсов  $p$ :  $n=p$ .
- 2) Начала соседних катушечных групп одной фазы смешены на 360 электрических градусов или на 2 полюсных деления.
- 3) Число секций в каждой катушечной группе  $s$  равно числу пазов на полюс и фазу  $q$ :  $s=q$ .
- 4) Начала обмоток соседних фаз смешены на 120 электрических градусов.
- 5) Катушечные группы одной фазы соединяются по схеме: конец предыдущей секции соединяется с началом последующей.

2.7. Методика укладки однослойной двухплоскостной обмотки на статоре.

В соответствии с правилами составления схем обмоток число катушечных групп в каждой фазе равно  $p$ , соответственно во всей обмотке —  $3p$ . Причем половина катушечных групп в каждой фазе (а следовательно и во всей обмотке) будет иметь малые размеры, а половина — большие.

В свою очередь, каждая катушечная группа и большого, и малого размера состоит из нескольких секций, концентрически входящих друг в друга.

1. Перед укладкой обмотки следует отобрать необходимое количество катушечных групп каждого размера.
2. Затем определить начало и конец каждой катушечной группы. При этом нужно строго следить за тем, чтобы направление намотки всех секций было неизменным.
3. Промаркировать пазы статора, выбрав первый паз произвольно.
4. Укладку обмотки следует начинать с укладки всех катушечных групп

малого размера.

5. Затем укладываются катушечные группы большого размера. Лобовые части секций отгибаются к спинке статора. Они не должны попадать в расточку статора.

6. Производится соединение катушечных групп одной фазы в соответствии со схемой-таблицей. Начала и концы фаз маркируются бирками.

7. По заданию руководителя, обмотки фаз соединяются по схеме «звезда» или «треугольник».

### **3. Содержание и методика выполнения работы.**

Для выполнения работы необходимо:

- изучить назначение и устройство однослойной двухплоскостной обмотки;
- изучить расчет параметров и способы построения схем-разверток обмоток;
- изучить виды и классификацию электрических материалов для приготовления обмоток;
- изучить методику укладки обмотки;
- рассчитать параметры и построить схему-развертку однослойной двухплоскостной обмотки по исходным данным;
- выполнить укладку однослойной двухплоскостной обмотки на статор.

### **4. Порядок выполнения работы:**

- получить исходные данные для расчета обмотки; рассчитать параметры обмотки;
- составить схему-таблицу обмотки, используя правила составления схемы; составить схему-развертку трехфазной обмотки;
- на схеме-развертке указать направление токов в пазах и обозначить магнитные полюса;
- уложить обмотку на статоре;
- оформить отчет и сдать руководителю занятия.

### **5. Обработка результатов.**

Пример выполнения и оформления отчета по лабораторной работе.

Исходные данные:

число пазов  $z=12$ ;

число полюсов  $2p=4$ ;

число фаз  $m=3$ ;

тип обмотки — однослочная концентрическая.

По исходным данным требуется:

- рассчитать параметры обмотки;
- составить схему-таблицу;
- вычертить схему-развертку, указать на ней направления токов в пазах и обозначить магнитные полюса;
- вычертить «звезду» пазовых ЭДС;
- уложить обмотку на статоре.

*Расчет параметров обмотки.*

1. Полюсное

деление  $T=z/2p=12/4=3$

паза.

2. Число пазов на полюс и

фазу  $q=z/2pm=12/12=1$  паз.

3. Шаг обмотки  $y=2^k+K)-1=$

$2(1+1)-1=3$  паза.

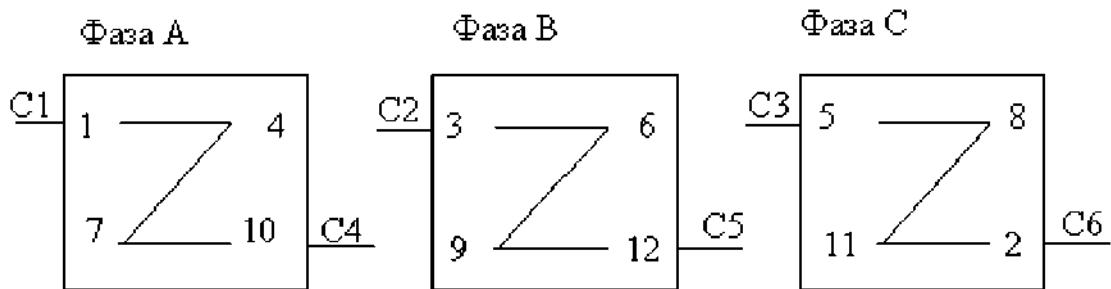
4. Угол сдвига пазовых

ЭДС  $a=360p^k=360 * 2/12=60$  эл.

гр.

**Составление схемы-таблицы обмотки.**

В соответствии с правилами составления схем обмоток получаем следующую схему-таблицу:



Вычертить схему-развертку.

В соответствии со схемой — таблицей вычертываем развернутую схему обмотки. Указываем на ней направления токов в фазах. При этом в 2-х фазах ток следует направлять от начала фазы к концу, а в третьей — от конца к началу. Группа пазов, имеющих одинаковое направление тока, образует магнитный полюс. Можно условно принять, что направление тока вверх соответствует северному полюсу, а вниз — южному.

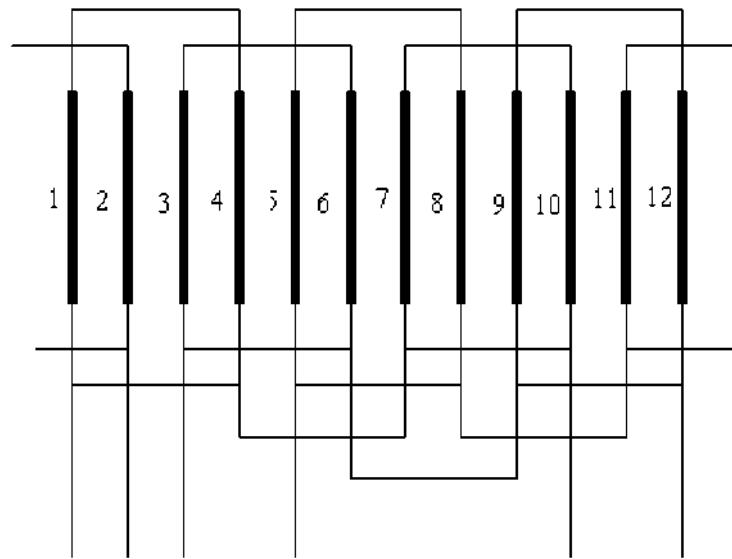


Рис. 8. Схема-развертка однослойной концентрической обмотки.

Сделать выводы по работе.

## 6. Контрольные вопросы

- 6.1. Описать условия создания вращающегося магнитного потока в двухфазной обмотке.
- 6.2. Перечислить общие требования к обмоткам машин переменного тока.
- 6.3. Дать классификацию обмоток по всем признакам.
- 6.4. Описать преимущества и недостатки однослойных обмоток.
- 6.5. Дать определения всех элементов обмотки (проводник, виток, секция, катушечная группа, фазная зона, фаза).
- 6.6. Описать параметры однослойной обмотки.
- 6.7. Описать правила построения однослойных концентрических обмоток.
- 6.8. Объяснить методику укладки однослойной двухплоскостной обмотки на статоре.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ДВУХСЛОЙНЫЕ ОБМОТКИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. Цель работы: получить практические навыки расчета параметров, составления схем и технологии укладки двухслойных концентрических обмоток.

## 2. Основные понятия.

Обмотки статоров двигателей с высотой оси вращения 56-250 мм выполняют встыпными из круглого провода; с высотой оси вращения 280-355 мм —

из жестких катушечных групп (из провода прямоугольного сечения). Марка обмоточного провода ПЭТ — 155 (табл. 1).

Катушки после укладки в пазы сердечников закрепляют пазовыми клиньями из стеклотекстолита и пропитывают компаундом. Лобовые части катушечных групп бандажируют изоляционным чулком из стекловолокна и покрывают лаком.

Основное внимание при проектировании двигателей серии АИ было уделено повышению их надежности, которая достигнута за счет применения материалов класса нагревостойкости F при допустимом перегреве обмоток, соответствующем классу нагревостойкости В.

Таблица 1

Наименование	Примечание
ПЭТ-155 (ПЭТМ-155) — провод обмоточный, изолированный теплостойкой эмалью на основе полиэфиримидов (М — для механизированной укладки)	Обмоточный провод
ПСК (ПСК-М) — пленкосинтокартон	
Аривсан — полиэтилентерефталатная пленка, оклеенная с двух сторон полиарелатной пленкой	Пазовая изоляция
КП-50, КП-34 — смесь полиэфиров, отверженных пастой перекиси бензолина	То же
ТКСП — трубки изоляционные (кремнийорганическая резина в оплете из стеклошнур-чулка)	Пропиточные компаунцы
ПВКФ — провод выводной с изоляцией из кремний-органической резины во фторсилоксиновой оболочке	Выводные провода и изоляционные трубы
РКГМ — провод выводной с изоляцией из кремнийорганической резины в оплете из стекловолокна	То же
Сталь 2214 холоднокатаная электротехническая	То же
	Сталь магнитопровода

Класс нагревостойкости изоляционных материалов в соответствии с ГОСТ 8865 определяется максимальной допустимой температурой. Предельно-допустимое превышение температуры обмотки получается путем вычитания из температурного индекса изоляции (табл. 2) номинальной температуры окружающей среды, значение которой для умеренного климата принято 40 °С.

Таблица 2

**Нагревостойкость изоляционных материалов**

Класс нагревостойкости изоляции	Температурный индекс материала, °C	Максимальное превышение температуры наиболее нагретой точки обмотки, °C	Максимально допустимое превышение средней температуры обмотки, измеренное по методу сопротивления, °C
E	120	80	75
B	130	90	80
F	155	115	100
H	180	140	125

**2.1 Трехфазное вращающееся магнитное поле.**

Условия создания вращающегося магнитного поля для трехфазной системы токов

2.1.1. Условия, которым должны отвечать токи (напряжения):

- токи в фазах должны изменяться во времени по синусоидальному закону;
- сдвиг фаз токов во времени должен составлять 120 эл. гр.

2.1.2. Условия, которым должны отвечать обмотки:

- обмотки различных фаз должны располагаться в пространстве по окружности;
- начала соседних фаз обмоток должны быть смещены в пространстве на 120 эл. гр.
- геометрические размеры и число витков обмоток разных фаз должны быть одинаковыми.

2.2. Параметры двухслойных обмоток

2.2.1. Полюсное деление —  $t$ . Это число пазов статора, приходящихся на один полюс

$$m = z/2p \text{ [пазов].}$$

2.2.2. Число пазов на полюс и фазу —  $q$

$$q = z/2pm,$$

где  $m$  — число фаз.

2.2.3. Шаг обмотки —  $u$ . Это расстояние в пазах между первой и второй активными сторонами одной секции

$$u = z/2p.$$

2.2.4. Угол сдвига ЭДС между соседними пазами статора в электрических градусах —  $a$

$$a = p \cdot 360/z.$$

2.3. Правила составления схемы двухслойной обмотки

- Число катушечных групп в каждой фазе  $n$  равно числу полюсов  $p$ :  $n = 2p$ .
- Начала соседних катушечных групп одной фазы смещены на 180 элек-

трических градусов или на 1 полюсное деление.

- 3) Число секций в каждой катушечной группе  $s$  равно числу пазов на полюс и фазу  $q$ :  $s=q$ .
- 4) Начала обмоток соседних фаз смещены на 120 электрических градусов.
- 5) Катушечные группы одной фазы соединяются по схеме: конец предыдущей секции соединяется с концом последующей, начало предыдущей секции соединяется с началом последующей.

### 2.3. Методика укладки двухслойной обмотки статора.

Перед укладкой обмотки следует отобрать необходимое количество катушечных групп, промаркировать концы и начала катушечных групп и проверить направление намотки секций. Оно должно быть одинаковым у всех секций.

Укладку обмотки следует начинать с нижних слоев секций. В нашем примере первой укладывается нижняя активная сторона первой секции с номером 6'. Затем укладываются стороны секций с номерами 7', 8', 9', 10', 11', 12'. Активные стороны секции 1, 2, 3, 4, 5, которые должны лежать в верхнем слое, укладываются в пазы в последнюю очередь после укладки в эти пазы нижнего слоя. Начиная с 6-го паза, можно укладывать и первую, и вторую активные стороны секций, они автоматически будут ложиться на свое место в верхнем и нижнем слоях.

Завершая укладку обмотки, необходимо уложить нижние активные стороны секций 1', 2', 3', 4', 5', а затем на них уложить верхний слой — секции 1, 2, 3, 4, 5.

По окончании укладки соединить катушечные группы одной фазы в соответствии со схемой-таблицей.

По заданию руководителя соединить фазные обмотки по схеме «звезда» или «треугольник».

## 3. Содержание и методика выполнения работы.

Для выполнения работы необходимо:

- изучить назначение и устройство двухслойной обмотки;
- изучить расчет параметров и способы построения схем—разверток обмоток;
- изучить виды и классификацию электрических материалов для приготовления обмоток;
- изучить методику укладки обмотки;
- рассчитать параметры и построить схему—развертку двухслойной обмотки по исходным данным;
- выполнить укладку двухслойной обмотки на статор.

#### **4. Порядок выполнения работы.**

- 4.1. Получить исходные данные для расчета обмотки.
- 4.2. Рассчитать параметры обмотки.
- 4.3. Составить схему-таблицу обмотки, используя правила составления схемы.
- 4.4. Составить схему-развертку трехфазной обмотки.
- 4.5. На схеме-развертке указать направление токов в пазах и обозначить магнитные полюса.
- 4.6. Уложить обмотку на статоре.
- 4.7. Оформить отчет и сдать руководителю занятия.

#### **5. Обработка результатов.**

Пример выполнения лабораторной работы

Исходные данные:

число пазов  $z=12$ ;

число полюсов  $2p=2$ ;

число фаз  $m=3$ ;

коэффициент укорочения  $P=0,8$ ;

тип обмотки — двухслойная с укороченным шагом.

По исходным данным требуется:

- рассчитать параметры обмотки;
- составить схему-таблицу;
- вычертить схему-развертку, указать на ней направления токов в пазах и обозначить магнитные полюса;
- уложить обмотку на статоре.

Расчет параметров обмотки

1. Полюсное деление

$T=z/2p=12/2=6$  пазов.

2. Число пазов на полюс и фазу

$q=z/2pm=12/6=2$  паза.

3. Шаг обмотки

$y=Pr=0,8x6=5$  пазов.

4. Угол сдвига пазовых ЭДС

$a=360p/z=360x1/12=30$  эл. гр.

*Составление схемы-таблицы обмотки в соответствии с правилами составления схем обмоток получаем следующую схему-таблицу. При этом стороны секций, укладываемых в верхний слой, обозначаем цифрой без индекса, а стороны секций, укладываемых в нижний слой,*

— цифрой с индексом.

При вычерчивании схемы-развертки следует учитывать следующие рекомендации.

Стороны секций, лежащих в верхнем слое, изображаются сплошной линией, расположенной слева от условного изображения паза, и нумеруются цифрой без индекса. А стороны секций, лежащих в нижнем слое, изображаются штриховой линией справа от линии условного изображения паза и нумеруются цифрой с индексом.

Указываем направления токов в фазах. При этом в 2-х фазах ток следует направлять от начала фазы к концу, а в третьей — от конца к началу. Группа пазов, имеющих одинаковое направление тока, образуют магнитный полюс.

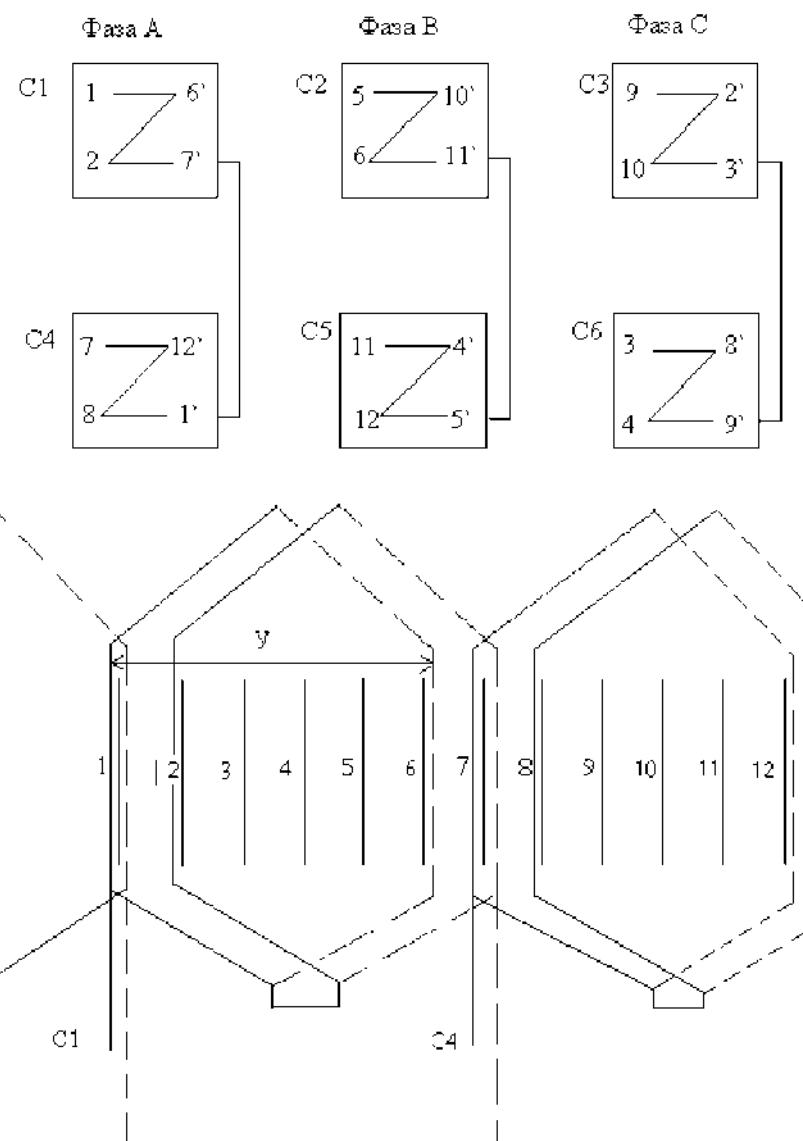


Рис. 9. Схема-таблица и схема-развертка одной фазы двухслойной обмотки

Можно условно принять, что направление тока «вверх» соответствуют северному полюсу, а «вниз» — южному.

Сделать выводы по работе.

## **6. Контрольные вопросы.**

- 6.1. Описать условия создания вращающегося магнитного потока в трехфазной обмотке.
- 6.2. Перечислить общие требования к обмоткам машин переменного тока.
- 6.3. Дать классификацию обмоток по всем признакам.
- 6.4. Описать преимущества и недостатки двухслойных обмоток.
- 6.5. Дать определения всех элементов обмотки (проводник, виток, секция, катушечная группа, фазная зона, фаза).
- 6.6. Описать параметры двухслойной обмотки.
- 6.7. Описать правила построения двухслойных обмоток.
- 6.8. Объяснить методику укладки двухслойной обмотки на статоре.

## ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА И ИНТЕРНЕТ-ИСТОЧНИКИ

### 1. Печатные издания

1. Акимова Н.А., Котеленец Н.Ф., Сентюрихин Н.И., Монтаж, техническая эксплуатация и ремонт электрического и электромеханического оборудования (14-е изд. стер.). - М.: Академия, 2017
2. Кацман М.М. Электрические машины (17-е изд. стер.) -М.: Академия, 2018.
3. Москаленко В.В. Электрические машины и приводы (1-е изд.) - М.: Академия, 2018
4. Сибикин Ю.Д. Электробезопасность при эксплуатации электроустановок промышленных предприятий. – М.; 2014г.

### 2. Электронные издания (электронные ресурсы)

1. Информационный портал. (Режим доступа): URL: <http://www.elektroshema.ru> (дата обращения: 20.11.2018).
2. Информационный портал. (Режим доступа): URL: [http://www.iselectro.ru/Products.html?fn\\_tab2doc=4](http://www.iselectro.ru/Products.html?fn_tab2doc=4) (дата обращения: 20.11.2018).
3. Информационный портал. (Режим доступа): URL: <http://electricalschool.info/spravochnik/electroteh/> (дата обращения: 20.11.2018).
4. Информационный портал. (Режим доступа): URL: <http://electrolibrary.info/electrik.htm> (дата обращения: 20.11.2018).

### 3. Дополнительные источники

1. ГОСТ 16110 – 82, СТСЭВ 1103 – 78. Трансформаторы силовые. Термины и определения.

2. ГОСТ 16364.1 – 85 СТ СЭВ 4438 – 83. Двигатели асинхронные. Общие технические условия
3. ГОСТ 16264.2 – 85. Двигатели синхронные. Общие технические условия.
4. ГОСТ 16264.4 – 85. Двигатели постоянного тока бесконтактные. Общие технические условия.
5. ГОСТ Р 50571.15-97 Электроустановки зданий. Глава 52. Электропроводки.
6. ГОСТ 21.614-88. СПДС. Изображения условные графические электрооборудования и проводок на планах.
7. ГОСТ Р 50571.10-96 Заземляющие устройства и защитные проводники.
8. ГОСТ Р 51628-2000 Щитки распределительные для жилых зданий. Общие технические условия.
9. ГОСТ 21.101-97 СПДС «Основные требования к проектной и рабочей документации».
10. СНиП 3.05.06-85. Электротехнические устройства
11. Кацман М.М.- Электрический привод: учебник для студ. образовательных учреждений сред. проф. образования. М.: Издательский центр “Академия” 2005г.
12. Кацман М.М.- Лабораторные работы : учебник для студ. образовательных учреждений сред. проф. образования. М.: Издательский центр “Академия” 2004г.
13. Соколова, Е.М.- “Электрическое и электромеханическое оборудование”, Учебное пособие для сред. проф. образование- М. Издательский центр “Академия” 2003 г.