

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФГБОУ ВО “УДМУРТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ”  
ИНСТИТУТ НЕФТИ И ГАЗА

Кафедра теплоэнергетики

# ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

## ЧАСТЬ 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ



Ижевск  
2021

УДК 621.3 (075.8) + 621.38 (075.8)

ББК 31.2я73 + 32.85я73-5

Э45

*Рекомендовано к изданию Учебно-методическим советом УдГУ*

**Рецензент:** к.т.н, доцент кафедры Электротехника ИжГТУ А.А. Штин

**Э45      Электротехника и электроника. Лабораторный практикум. Часть 2. Электрические машины** // Авторы-составители: Мезрин В.В., Зиновьев В.В. – Ижевск: Издательский центр «Удмуртский университет», 2021. — 44 с.

Во второй части пособия представлены методические указания по проведению лабораторных работ по такому разделу электротехники, как электрические машины и аппараты. Лабораторные работы включают изучение однофазного трансформатора, двигателя постоянного тока, асинхронного двигателя, схем и элементов управления электрическими машинами. Кратко изложены теоретические сведения изучаемого раздела электротехники, представлены схемы и порядок проведения экспериментов, состав оборудования и средств измерения, даны рекомендации по обработке результатов измерений.

Лабораторные работы проводятся на стендах “Квазар-02”. Для проведения лабораторных работ студенты самостоятельно подключают электрические машины и аппараты управления к электрической цепи, включают измерительные приборы контроля режимов работы устройств.

Лабораторные работы предназначены для использования в лабораторном практикуме по электротехническим дисциплинам студентами специальностей “Теплоэнергетика и теплотехника”, “Электроэнергетика и электротехника”, а также студентами других инженерных специальностей.

Методические указания разработаны в соответствии с действующим федеральным государственным образовательным стандартом по направлениям подготовки 13.03.02 – “Электроэнергетика и электротехника” и 13.03.01 – “Теплоэнергетика и теплотехника”.

© В.В. Мезрин, В.В. Зиновьев, сост., 2021

© ФГБОУ ВО “Удмуртский

государственный университет”, 2021

## ВВЕДЕНИЕ

Электрические машины – устройства преобразования электрической энергии в механическую и механической в электрическую – широко применяются в различных производственных процессах. Знание принципов работы и систем управления электрическими машинами, их рабочих и эксплуатационных характеристик необходимо технологу и инженеру большинства специальностей.

К изучению электрических машин нужно подходить, изучив основы электротехники. Настоящее пособие является продолжением первой части лабораторного практикума [1]. В этом разделе изучается работа трансформатора, асинхронного двигателя, двигателя постоянного тока и схем и коммутирующих устройств управления двигателями.

Лабораторные работы выполняются на стендах “Квазар-02” модульного типа, позволяющих собрать из отдельных элементов схему для исследования электрических машин и схем управления. В основе методических указаний лежит учебное пособие [2], разработанное коллективом авторов Уфимского государственного авиационного технического университета, существенно переработанное и исправленное.

Выполнение лабораторных работ на стендах позволяет студентам ознакомиться с приборами и методами измерения электротехнических величин, методиками проведения экспериментов, представлять структуру технологических устройств преобразования электрической энергии в механическую.

Отчет по лабораторной работе должен содержать название и цель работы, электрические схемы экспериментов, таблицы с измеренными и вычисленными величинами. Также отчет должен содержать необходимые графики, механические и внешние характеристики изучаемых устройств, сравнение полученных результатов с теоретическими формулами и паспортными данными двигателя, анализ возможного отклонения от теоретических формул и графиков. В заключении необходимо сделать выводы о проделанной работе.

В содержание лабораторных работ включены контрольные вопросы для самоподготовки, задачи, которые нужно уметь решать.

## **Основные правила техники безопасности и проведения работ в электротехнической лаборатории**

Перед началом выполнения лабораторных работ проводится инструктаж по технике безопасного проведения работ.

### **Основные правила техники безопасности при проведении лабораторных работ:**

- а) не загромождать рабочее место оборудованием, не относящимся к данной работе и посторонними предметами;
- б) перед сборкой электрической цепи убедиться, что питание стенда отключено;
- в) для сборки использовать провода с исправными клеммами и неповрежденной изоляцией;
- г) не прикасаться к выводам отключенных конденсаторов, разрядить конденсатор до сборки электрической цепи и после окончания работы, замкнув его выводы накоротко;
- д) после сборки цепи пригласить преподавателя для проверки правильности сборки и получить разрешение на включение стенда;
- е) все изменения в схемах проводить при отключенном стенде;
- ж) немедленно отключить стенд при появлении дыма, специфического запаха горелой изоляции, при срабатывании устройств защиты;
- з) при поражении электрическим током, отключить стенд, сообщить преподавателю и оказать первую помощь пострадавшему.

### **Правила сборки электрической цепи:**

- 1) при сборке электрической цепи в первую очередь собирается последовательная цепь, а затем подключаются параллельные ветви; вольтметры, параллельные обмотки ваттметров, фазометров подсоединяются в последнюю очередь;
- 2) при подключении какого бы-то ни было элемента, не имеющего обозначения полярности, входной клеммой считается левая (верхняя), а выходной – правая (нижняя);
- 3) перед включением стенда регуляторы напряжения устанавливаются в положение, обеспечивающее минимальный ток, делители напряжения – на минимум напряжения на выходе, сопротивления реостатов увеличиваются до максимума;
- 4) исследуемая цепь включается только после ее проверки преподавателем;
- 5) вносить изменения в электрическую цепь, разбирать ее можно только с разрешения преподавателя после отключения всех источников питания;
- 6) по окончании работ собрать соединительные провода по типоразмерам и сложить их на нижнюю полку стола.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

## Исследование однофазного трансформатора

### 1. Цели и задачи работы

*Цель:* изучение конструкции, принципа действия и режимов работы трансформатора; построение внешних характеристик трансформатора; опытное определение основных параметров и построение Т-образной схемы замещения трансформатора.

*Задачи:* в результате выполнения лабораторной работы должны:

*знать* конструкцию, принцип работы и технические характеристики трансформатора;

*уметь* рассчитать напряжение вторичной обмотки, потери мощности и КПД трансформатора в зависимости от коэффициента нагрузки;

*получить навыки* проведения опытов холостого хода и короткого замыкания.

### 2. Теоретическая часть

Трансформатор – статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования электрической энергии переменного тока одного напряжения в электрическую энергию переменного тока другого напряжения при неизменной частоте.

Трансформатор состоит из замкнутого магнитопровода и двух или более обмоток (рис. 1.1).

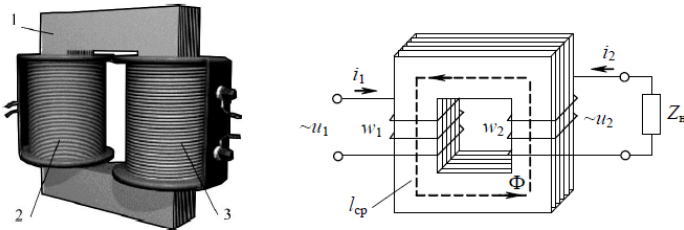


Рис. 1.1. Внешний вид и конструкция трансформатора

К одной обмотке с числом витков  $w_1$ , которая называется первичной, подается переменное напряжение  $u_1$ . Ток первичной обмотки  $i_1$  создает переменный магнитный поток  $\Phi$ , который индуцирует в обмотках эдс  $e_1$  и  $e_2$ .

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{и} \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.1)$$

Для обмоток идеализированного трансформатора (без потерь) по второму закону Кирхгофа

$$u_1 = -e_1 \quad \text{и} \quad u_2 = e_2 \quad (1.2)$$

Как следует из вышеприведенных формул, если к первичной обмотке приложено синусоидальное напряжение  $u_1 = U_{1\max} \sin \omega t$ , то и эдс в обмотках и магнитный поток изменяются также по синусоидальному за-

кону. Вид тока во вторичной обмотке зависит от характера нагрузки – при линейной нагрузке ток во вторичной обмотке также будет изменяться по синусоидальному закону. А вот ток в первичной обмотке будет не синусоидальным и отстает по фазе от напряжения. Это связано с нелинейной зависимостью магнитной индукции от напряженности магнитного поля для ферромагнитного материала сердечника. При номинальном режиме работы трансформатора форма тока в первичной обмотке не сильно отличается от синусоидальной, поэтому при расчете цепей с трансформатором полагают, что ток в первичной обмотке изменяется по синусоидальному закону с действующим значением, равным фактическому действующему значению тока. В этом случае при линейной нагрузке можно применить символический метод расчета.

Согласно уравнениям (1.1) действующие значения эдс первичной и вторичной обмоток

$$E_1 = 4,44w_1f\Phi_m \text{ и } E_2 = 4,44w_2f\Phi_m \quad (1.3)$$

где  $\Phi_m$  – амплитуда магнитного потока.

Отношение эдс обмоток трансформатора

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{E_1}{E_2} = k \approx \frac{U_1}{U_2} \quad (1.4)$$

называют **коэффициент трансформации**.

Как следует из уравнения (1.2) для первичной обмотки амплитуда магнитного потока  $\Phi_m$  определяется величиной напряжения первичной обмотки и при неизменном напряжении  $U_1$  во всех режимах работы идеализированного трансформатора должна оставаться постоянной.

В **режиме холостого хода** магнитный поток создается током первичной обмотки  $\dot{I}_{10}$ . Векторная диаграмма показана на рис.1.2, а уравнения, записанные по законам Кирхгофа для реального трансформатора имеют вид

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + R_1\dot{I}_{10} + jx_{1рас}\dot{I}_{10} \quad (1.5)$$

$$\dot{U}_{20} = \dot{E}_2 \quad (1.6)$$

Здесь учтено падение напряжения на активном сопротивлении первичной обмотки  $R_1$  и магнитный поток рассеяния  $\Phi_{рас}$ , который замыкается не по магнитному сердечнику, то есть не пронизывает обе обмотки.

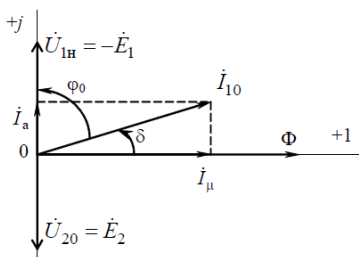


Рис.1.2. Векторная диаграмма для трансформатора в режиме холостого хода

**Опыт холостого хода** проводят при номинальном напряжении первичной обмотки  $U_{1ном}$ . В этом опыте определяют **коэффициент трансформации**

$$k = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_{1ном}}{U_{2ном}}, \quad (1.7)$$

ток холостого хода, который выражают в процентах от номинального тока первичной обмотки

$$i_0(\%) = \frac{I_{10}}{I_H} \cdot 100\% \quad (1.8)$$

и потери мощности в магнитопроводе  $\Delta P_{cm}$ .

При включении во вторичную обмотку трансформатора нагрузки, в ней возникает ток  $i_2$ , который создает свой магнитный поток  $\dot{\Phi}_2$ , направленный (см. рис.1,1) против основного магнитного потока  $\dot{\Phi}_{10}$ . Чтобы скомпенсировать связанное с этим изменение магнитного потока, ток в первичной обмотке возрастает таким образом, чтобы суммарный магнитный поток, определяемый приложенным к первичной обмотке напряжением, оставался неизменным

$$\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 = \dot{\Phi} = const$$

По закону полного тока

$$w_1 i_{10} = w_1 i_1 + w_2 i_2 = H_M l_M \approx 0$$

амплитуда магнитного напряжения в трансформаторе  $H_{Mmax} l_M$  на несколько порядков меньше амплитуд магнитодвижущих сил  $w_1 I_{1max}$  и  $w_2 I_{2max}$  обмоток в рабочем режиме. Отсюда, для токов можно записать отношение

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{k}, \quad (1.9)$$

а для мощности  $u_1 i_1 \approx u_2 i_2$  или  $p_1 \approx p_2$ .

Уравнения для обмоток трансформатора в рабочем режиме с учетом потерь принимают следующий вид:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + R_1 \dot{I}_1 + jx_{1pac} \dot{I}_1 \quad (1.10)$$

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_2 + R_2 \dot{I}_2 + jx_{2pac} \dot{I}_2 \quad (1.11)$$

Помимо опыта холостого хода проводят также **опыт короткого замыкания**, который проводят при пониженном напряжении первичной обмотки  $U_k$ , при котором токи в обмотках трансформатора устанавливаются номинальными. Значение напряжения короткого замыкания обычно выражают в процентах от номинального

$$U_k(\%) = \frac{U_k}{U_{1ном}} \cdot 100\%. \quad (1.12)$$

Также в этом опыте определяют потери мощности в обмотках при номинальной нагрузке  $\Delta P_{мр.ном}$ , поскольку в них протекают номинальные токи, а потери мощности в магнитопроводе малы при пониженном напряжении первичной обмотки.

В паспортные данные трансформатора заносятся:

**номинальные напряжения**  $U_{1ном}/U_{2хх}$ ,

**номинальная мощность**  $S_{ном}$ ,

**номинальный коэффициент мощности**  $\cos\varphi_{ном}$

**потери мощности в проводах** при номинальной нагрузке  $\Delta P_{м, ном}$

**потери мощности в стали**  $\Delta P_{ст}$

**номинальный коэффициент полезного действия**  $\eta_{ном}$

**напряжение короткого замыкания**  $U_k(\%)$

**ток холостого хода**  $i_0(\%)$

К основным характеристикам трансформатора относятся

**внешняя характеристика** – зависимость напряжения вторичной обмотки от тока вторичной обмотки  $U_2(I_2)$  или от коэффициента нагрузки  $\beta = \frac{I_2}{I_{2ном}}$ . Изменение напряжения на вторичной обмотке при работе трансформатора обычно выражают в процентах от номинального

$$\Delta U_2(\%) = \frac{U_{2ном} - U_2}{U_{2ном}} \cdot 100\%$$

**рабочие характеристики** – зависимость потребляемой мощности  $P_1$ , коэффициента мощности  $\cos\varphi$ , коэффициента полезного действия  $\eta$ , изменение напряжения на вторичной обмотке  $\Delta U_2 = U_{2хх} - U_2$  от тока вторичной обмотки или коэффициента нагрузки.

Коэффициент полезного действия трансформатора можно рассчитать по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\beta S_{ном} \cos\varphi_2}{\beta S_{ном} \cos\varphi_2 + \beta^2 \Delta P_{м, ном} + \Delta P_{ст}} \quad (1.13)$$

Максимального значения КПД трансформатора достигает при нагрузке

$$\beta_{max} = \sqrt{\frac{P_0}{P_k}} \quad (1.14)$$

Изменение напряжения на вторичной обмотке в зависимости от величины и характера нагрузки также можно рассчитать по формуле

$$\Delta U_2(\%) = U_k(\%) \cdot \beta (\cos\varphi_k \cos\varphi_2 + \sin\varphi_k \sin\varphi_2) \quad (1.15)$$

### 3. Описание лабораторного оборудования

Экспериментальные исследования проводятся на универсальном лабораторном стенде.

При сборке цепи используется следующее оборудование:

1) автотрансформатор (АТ), обеспечивающий изменение напряжения 0 ÷ 250 В, со встроенным вольтметром, расположенным в “Блоке включения”;

2) однофазный трансформатор Т4, расположенным в “Блоке трансформаторов”;

3) резистор сопротивлением 20 Ом, расположенный в “Блоке нагрузок”;

4) переменный резистор сопротивлением 30 Ом, расположенные в “Блоке трансформаторов”;

5) катушки индуктивности L6 и L7 с активным сопротивлением 90 Ом, расположенные “Блоке индуктивностей”;

6) магазин конденсаторов, расположенный в “Блоке нагрузок”;



7) электронные измерительные приборы с автоматическим выбором предела измерения и рода тока, расположенные в “Блоке измерительных приборов”:

- а)  $pA$  – амперметр с верхним пределом измерения 2,5 А;
- б)  $pV$  – вольтметр с верхним пределом измерения 250 В;
- в)  $pW$  – ваттметр с пределами измерений по току  $0.01 \div 1$  А и по напряжению  $5 \div 250$  В, который является универсальным прибором и измеряет одновременно значение тока, напряжения, мощности и угла сдвига фаз.

## 4. Порядок выполнения работы

### 4.1. Подготовка стенда к работе

Перед сборкой электрической цепи убедитесь в отключенном состоянии стенда - тумблер пульта включения находится в нижнем положении, индикаторные лампы не горят.

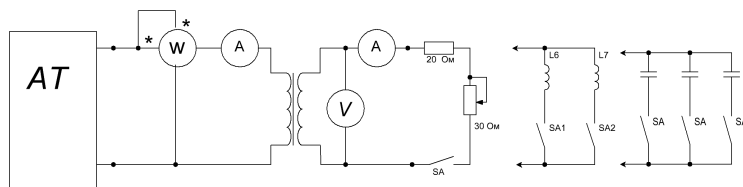


Рис.1.3. Схема эксперимента

Соберите электрическую цепь с чисто активной нагрузкой согласно рис. 1.3.

### 4.2. Опыт холостого хода

В опыте холостого хода ключ SA – разомкнут.

С помощью автотрансформатора подайте на первичную обмотку исследуемого трансформатора номинальное напряжение  $U_{I_{ном}} = 220$  В, значение напряжения контролируйте по показаниям ваттметра. Показания приборов занесите в табл.1.1.

Таблица 1.1

Опыт холостого хода

Измерено				Вычислено							
$U_{I_{ном}}$ В	$I_{10}$ А	$U_{20}$ В	$P_0$ Вт	$\cos\varphi_0$	$\varphi_0$	$\delta$	$I_{\mu}$ Гн	$\eta$	$R_0$ Ом	$x_0$ Ом	$z_0$ Ом

При вычислении угла магнитных потерь  $\delta$  и намагничивающего тока  $I_{\mu}$  руководствуйтесь векторной диаграммой рис.1.2.

### 4.3. Работа трансформатора на активную нагрузку

Подсоедините активную нагрузку, замкнув ключ SA.

С помощью нагрузочного реостата плавно изменяйте ток нагрузки  $I_2$  от минимального до номинального  $I_{2ном} = 1.2$  А и зафиксируйте, как при

этом изменяются напряжение вторичной обмотки  $U_2$ , потребляемый ток  $I_1$  и мощность  $P_1$ . Результаты измерений занесите в табл.1.2.

Таблица 1.2

Работа трансформатора под нагрузкой

Нагрузка	Измерено					Вычислено					
	$U_1$ В	$U_2$ В	$I_1$ А	$I_2$ А	$P_1$ Вт	$\cos\varphi_1$	$P_2$ Вт	$\cos\varphi_2$	$\eta$	$\beta$	$\Delta U_2$ %
Активная нагрузка											
$R_1$											
$R_2$											
$R_3$											
$R_4$											
$R_5$											
Активно-индуктивная нагрузка											
$L6$											
$L6+L7$											
Емкостная нагрузка											
$C_1$											
$C_2$											
$C_3$											

**4.4. Работа трансформатора на активно-индуктивную нагрузку.**

Снимите напряжение с трансформатора и отключите стенд.

Отсоедините нагрузочные резисторы. Вместо них подсоедините ко вторичной обмотке трансформатора катушки индуктивности L6 и L7.

Включите стенд. На первичную обмотку трансформатора подайте номинальное напряжение  $U_{ном} = 220$  В.

Проведите измерения при включенных катушках – сначала одной, а затем двух катушек согласно схемы рис. 1.3.

Результаты измерений занести в табл. 1.2.

**4.5. Работа трансформатора на емкостную нагрузку.**

Снимите напряжение с трансформатора и отключите стенд.

Вместо катушек индуктивности к вторичной обмотке трансформатора подсоедините магазин конденсаторов.

Включите стенд и подайте на первичную обмотку трансформатора номинальное напряжение.

Выставляя различные емкости конденсаторов (например, 16, 32 и 48 мкФ) проведите аналогичные измерения и результаты занесите в табл.1.2.

**4.6. Опыт короткого замыкания.**

Снимите напряжение с трансформатора и отключите нагрузку.

Вторичную обмотку трансформатора замкните накоротко через амперметр.

Включите автотрансформатор. Осторожно повышая напряжение автотрансформатора, установите ток вторичной обмотки, равный номинальному  $I_{2ном}$ . Результаты измерений занесите в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Опыт короткого замыкания

Измерено				Вычислено				
$I_{2ном}$	$U_{1к}$	$I_{1к}$	$R_k$	$U_k(\%)$	$\cos\varphi_k$	$R_k$	$x_k$	$z_k$
А	В	А	Вт	В		Ом	Ом	Ом

При вычислении значений требуемых величин табл. 1.1 – 1.3 руководствуйтесь вышеприведенными определениями и формулами электротехники.

### 5. Содержание отчета;

- название и цель работы,
- исследуемые схемы,
- таблицы измеренных и вычисленных величин,
- внешние характеристики трансформатора при различном характере нагрузки, построенные в одной системе координат,
- рабочие характеристики трансформатора для активной нагрузки,
- для одного из опытов рассчитать кпд трансформатора по формуле (1.13) и изменение вторичного напряжения по формуле (1.15) и сравнить полученные результаты с измеренными в опыте,
- выводы.

### 6. Задачи для самостоятельного решения.

*Задача 1.* Определите, при какой нагрузке кпд исследуемого трансформатора будет максимальным.

*Задача 2.* Трансформатор с числом витков первичной обмотки  $w_1 = 980$  включен в сеть промышленной частоты с напряжением 220 В. Определите амплитуду магнитного потока в сердечнике.

*Задача 3.* Однофазный трансформатор имеет следующие паспортные данные:  $S_{ном} = 20000$  кВА,  $U_{1ном} = 121$  кВ,  $U_{2ном} = 38,5$  кВ,  $P_0 = 47$  кВт,  $P_{к,ном} = 129$  кВт,  $U_k = 5\%$ . Определить коэффициент полезного действия  $\eta$  и напряжение на вторичной обмотке  $U_2$  при активно-индуктивной нагрузке, составляющей 60% от номинальной  $\cos\varphi_2 = 0,8$ .

*Задача 4.* Для трехфазного трансформатора с номинальной мощностью 75 кВА определили потери из опыта холостого хода 490 Вт и мощность, потребляемую трансформатором в лпыте короткого замыкания 1875

Вт. Определить коэффициент полезного действия трансформатора, если нагрузка номинальная, симметричная и чисто активная.

*Задача 5.* В трансформаторе с данными задачи 3 произошло аварийное короткое замыкание вторичной обмотки. Определите токи в обмотках.

### **Контрольные вопросы**

1. Перечислите варианты конструкций трансформаторов.
2. Почему сердечники большинства трансформаторов изготавливают из листов специальной электротехнической стали с повышенным содержанием кремния?
3. Иногда при работе трансформатора слышно гудение. Объясните это явление.
4. Какая обмотка повышающего трансформатора – первичная или вторичная укладывается на катушку вначале?
5. Почему понижающие трансформаторы подстанций рассчитываются на номинальное напряжение вторичной обмотки 0,4 кВ?
6. Плотность алюминия в 3,3 раза меньше плотности меди, а удельное сопротивление алюминия в 1,6 раза больше удельного сопротивления меди. Изготовлены два трансформатора одинаковой мощности и напряжений первичной и вторичной обмоток с медными и алюминиевыми проводами. Который из них будет весить больше?
7. Почему в опыте холостого хода пренебрегают потерями мощности в обмотках?
8. Почему в опыте короткого замыкания потерями в стали можно пренебречь?
9. В чем особенности работы измерительных трансформаторов тока и напряжения?
10. С какой целью сварочные трансформаторы изготавливают с воздушным зазором в магнитопроводе?
11. Назовите преимущества и недостатки автотрансформатора по сравнению с обычным трансформатором.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2

### Исследование двигателя постоянного тока

#### 1. Цели и задачи работы.

*Цель:* изучение конструкции и принципа работы двигателей постоянного тока. Построение механических и рабочих характеристик двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.

*Задачи:* в результате выполнения лабораторной работы студенты должны:

*знать* принцип работы, технические характеристики, конструктивные особенности двигателей постоянного тока;

*уметь* составлять и читать электротехнические схемы, содержащие двигатели постоянного тока;

*получить навыки* включения двигателей постоянного тока в электрическую цепь и расчета механических характеристик по паспортным и справочным данным двигателей постоянного тока.

#### 2. Теоретическая часть.

##### 2.1. Конструкция и принцип действия машин постоянного тока

Двигатели постоянного тока (ДПТ) имеют достаточно широкое распространение в связи с тем, что они позволяют плавно и в большом диапазоне регулировать скорость вращения, имеют сравнительно малые габариты и вес и высокий коэффициент полезного действия.

ДПТ, как и большинство электрических машин, являются обратимыми, и могут работать в одном из следующих режимов: двигательном, генераторном и электромагнитного тормоза.

Электрическая машина постоянного тока состоит из двух основных частей: неподвижного статора и вращающегося якоря.

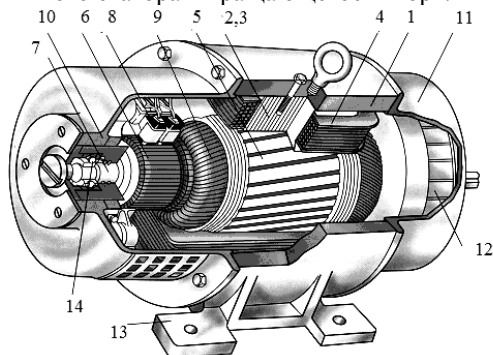


Рис.2.1. Конструкция машины постоянного тока

Устройство ДПТ представлено на рис. 2.1, где 1 – статор; 2,3 – главный полюс; 4 – обмотка возбуждения; 5 – ротор; 6 – коллектор; 7 – вал; 8 – щеткодержатели со щетками; 9 – якорная обмотка; 10 – задний подшипниковый щит; 11 – передний подшипниковый щит; 12 – вентилятор; 13 – лапы; 14 – подшипник.

Упрощенная модель ДПТ представлена на рис.2.2. Статор 1 состоит из стального цилиндра, внутри которого крепятся главные полюса 2 с полюсными наконечниками 3, образуя вместе с корпусом магнитопровод машины. Полюсные наконечники служат для равномерного распределения магнитного потока в зазоре между полюсами статора-индуктора и якоря. На главных полюсах расположены катушки обмотки возбуждения (ОВ) 4, предназначенные для создания неподвижного магнитного потока Фв машины, стрелочками показаны пути замыкания магнитного потока. Концы обмотки возбуждения выводят на клеммный щиток, расположенный на корпусе машины. Обозначения выводов обмотки возбуждения: С1, С2 – в двигателе с последовательным возбуждением, Ш1, Ш2 – в двигателе с параллельным возбуждением.

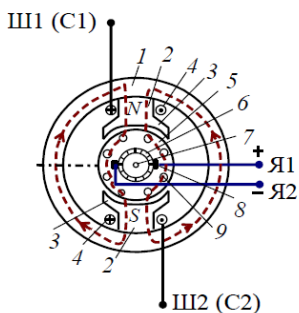


Рис.2.2. Поперечный разрез ДПТ.

Подвижная часть машины – ротор 5 состоит из цилиндра, набранного из листов электротехнической стали, на внешней поверхности которого имеются пазы и в них уложена якорная обмотка 9. Отводы секций обмотки якоря (ОЯ) припаивают к пластинам коллектора 6, расположенного на вращающемся в подшипниках валу 7. Коллектор представляет собой цилиндр, набранный из медных пластин, изолированных друг от друга и от вала и закрепленных (по технологии "ласточкина хвоста") на стальной втулке.

К коллектору с помощью пружин прижимаются неподвижные щетки 8, соединенные с клеммами Я1 и Я2 выведенными на щиток. Образовавшиеся скользящие контакты дают возможность соединить вращающуюся ОЯ с внешней электрической цепью (снять выпрямленное напряжение с коллектора (генераторный режим) или соединить якорную обмотку с источником постоянного напряжения и распределить токи в ОЯ таким образом, чтобы их направления под разноименными полюсами были бы противоположными (двигательный режим)).

С помощью коллектора и щеток, образующих щеточно-коллекторный механизм, вращающаяся обмотка якоря соединяется с

внешней электрической цепью. Основным элементом, снижающим надежность ДПТ, является щеточно-коллекторный узел.

Обмотка возбуждения питается от независимого источника – машина с независимым возбуждением, либо включается последовательно или параллельно якорной цепи – машина с самовозбуждением.

*Принцип действия* двигателя постоянного тока основан на взаимодействии тока в проводниках обмотки якоря  $I_{я}$  с магнитным полем, создаваемым током обмотки возбуждения.

На проводник с током в магнитном поле действует сила  $\mathbf{F} = I \cdot \mathbf{l} \times \mathbf{B}$ , где  $\mathbf{l}$  – длина проводника,  $I$  – величина тока в проводнике,  $\mathbf{B}$  – вектор магнитной индукции. А поскольку два проводника одного контура располагаются около противоположных полюсов, на контур действует вращающий момент. Очевидно, что вращающий момент будет пропорционален току якоря и магнитному потоку

$$M = c_M \Phi I_{я} \quad (2.1)$$

Здесь  $\Phi$  – магнитный поток,  $I_{я}$  – ток обмотки якоря,  $c_M$  – постоянная для данной машины, зависящая от конструктивных особенностей машины – размеров, количества проводников обмотки якоря, числа пар полюсов.

В генераторе электромагнитный момент  $M$  направлен против внешнего вращающего механического момента. В стационарном режиме  $M_{мех} = M_{э-м}$ .

При вращении ротора проводники якоря пересекают линии магнитного поля обмотки возбуждения, следовательно, в них наводится эдс. Эдс, индуцируемая в элементе проводника длиной  $dl$ , перемещающемся со скоростью  $\mathbf{v}$  в магнитном поле индукцией  $\mathbf{B}$   $de = [\mathbf{v} \times \mathbf{B}]dl$ . Следовательно, эдс обмотки якоря машины постоянного тока будет пропорциональна магнитному потоку и частоте вращения якоря

$$E = c_E n \Phi \quad (2.2)$$

Постоянная  $c_E$ , так же как постоянная  $c_M$ , зависит от конструктивных особенностей машины. Частота вращения  $n$  в формулах для электрических машин имеет размерность об/мин. В двигателях направление эдс противоположно направлению тока якоря, поэтому ее чаще называют *противо-эдс*.

## 2.2. Схемы двигателей постоянного тока

Двигатели постоянного тока различаются способом включения обмотки возбуждения относительно обмотки якоря. Различают двигатели

– с независимым возбуждением, когда обмотка возбуждения подключается к собственному источнику, сюда же можно отнести двигатели без обмотки возбуждения – на постоянных магнитах

– двигатели параллельного возбуждения (рис.2.3а)

– двигатели последовательного возбуждения (рис.2.3б)

– двигатели со смешанным возбуждением, в которых две обмотки возбуждения, одна включается параллельно якорю (шунтовая), другая – последовательно (серийная).

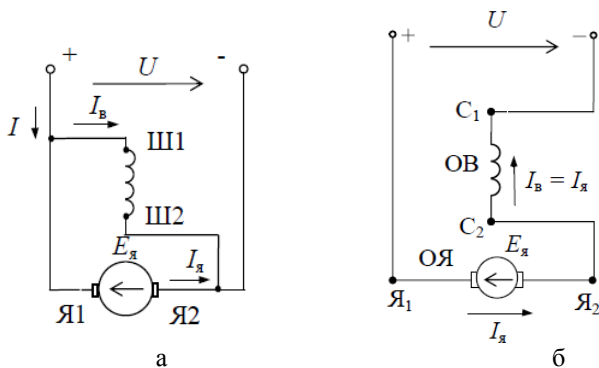


Рис.2.3. Схемы двигателя параллельного (а) и последовательного (б) возбуждения

Уравнения, записанные по законам Кирхгофа для двигателя с параллельным возбуждением будут

$$\begin{aligned} I &= I_{\text{я}} + I_{\text{в}} \\ U &= I_{\text{я}} R_{\text{я}} + E \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$I_{\text{в}} = \frac{U}{R_{\text{в}}}$$

Для двигателя с последовательным возбуждением  $I = I_{\text{я}} = I_{\text{в}}$  и

$$U = I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{с}}) + E \quad (2.4)$$

### 2.3. Механическая характеристика и способы регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока

Под механической характеристикой двигателя понимают зависимость частоты вращения от момента на валу  $n(M)$ .

Из уравнений (10.2) и (10.3) можно получить формулу для расчета частоты вращения якоря

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{c_E \Phi} \quad (2.5)$$

Из формулы видно, что возможны три способа регулирования частоты вращения двигателя

- изменением подводимого напряжения (наиболее простой и часто применяемый способ)

- изменением сопротивления цепи якоря путем введения добавочного сопротивления

- изменением магнитного потока (введение дополнительного сопротивления в цепь обмотки возбуждения).

Выразив из (2.1) выражение для тока якоря и подставив в (2.5) получим выражение для механической характеристики двигателя

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{c_E c_M \Phi^2} M, \quad (2.6)$$

которая снимается при  $U = \text{const}$ .



На рис.2.4 приведены механические характеристики двигателей.

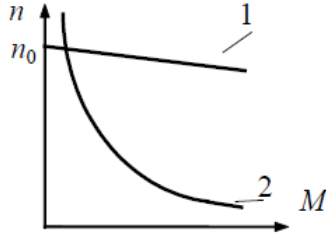


Рис.2.4. Механические характеристики ДПТ с параллельным (1) и последовательным (2) возбуждением.

Как следует из (2.6) и графиков частота вращения ДПТ с параллельным возбуждением линейно уменьшается с ростом момента на валу.

Для двигателя с последовательным возбуждением механическая характеристика более сложная: с ростом момента на валу и тока якоря возрастает и магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения. При этом в рабочем режиме частота вращения слабо зависит от момента на валу, а режиме, близком к холостому ходу (при малых токах якоря и обмотки возбуждения), частота вращения резко возрастает, что может привести к разрушению якоря

#### 2.4. Рабочие характеристики двигателя

Под рабочими характеристиками устройств понимают зависимость различных величин от полезной мощности. Для ДПТ – это зависимость потребляемой мощности  $P_1$ , потребляемого тока  $I$ , частоты вращения  $n$ , момента на валу двигателя  $M$  и КПД  $\eta$  от  $P_2$  или  $P_2/P_{2н}$  при  $U=const$ . Характер изменения этих величин в относительных единицах показан на рис.2.5.

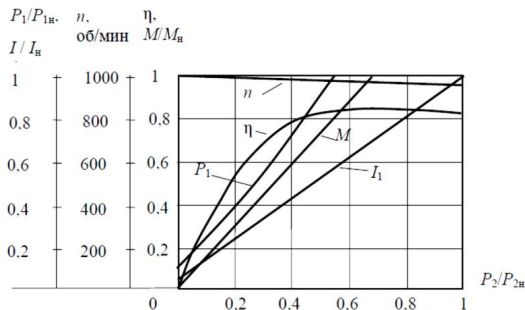


Рис.2.5. Рабочие характеристики ДПТ с параллельным возбуждением

#### 2.5. Пуск двигателя постоянного тока

В момент включения двигателя в сеть ротор двигателя неподвижен, и противо-эдс якоря  $E_a=0$ . Поэтому в соответствии с формулами (2.3) и

(2.4) пусковой ток определяется сопротивлением якоря, которое обычно мало, и может значительно превышать номинальный ток. Это может вызвать быстрый разогрев обмотки якоря и короткое замыкание, опасное искрение на коллекторе, чрезмерно большой пусковой момент, создающий рывок или удар на валу. Для предотвращения этого в цепь обмотки якоря при пуске вводят пусковой реостат, ограничивающий пусковой ток до кратковременно допустимого

$$I_{\text{п}} = \frac{U_{\text{ном}}}{R_{\text{я}} + R_{\text{п}}} \leq (2 \div 2,5)I_{\text{ном}} \quad (2.7)$$

## 2.6. Потери мощности и кпд двигателя

Полезная мощность  $P_2$  связана с моментом на валу

$$P_2 = M\Omega = M \frac{\pi n}{30} \quad (2.8)$$

и меньше потребляемой мощности  $P_1$  на величину потерь  $\Delta P$ .

Потери мощности состоят из электрических  $\Delta P_{\text{э}}$ , магнитных  $\Delta P_{\text{м}}$  и механических  $\Delta P_{\text{мех}}$  потерь.

Электрические потери в обмотках и щеточно-коллекторном механизме

$$\Delta P_{\text{э}} = \Delta P_{\text{я}} + \Delta P_{\text{в}} + \Delta P_{\text{щ}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} + I_{\text{в}}^2 R_{\text{в}} + I_{\text{я}} \Delta U_{\text{щ}} \quad (2.9)$$

Здесь  $\Delta U_{\text{щ}}$  – переходное напряжение между щетками и коллектором и лежит в пределах от 0,6 В (для металлографитовых щеток) до 2 В (для графитовых).

Электрические потери в обмотке якоря составляют примерно 50% всех потерь при номинальной нагрузке. Остальные потери практически остаются неизменными при работе двигателя и их можно оценить в режиме холостого хода.

Кпд машины постоянного тока определяется по общей формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} \quad (2.10)$$

Номинальное значение кпд двигателей постоянного тока лежит в пределах

## 3. Описание лабораторного оборудования.

Экспериментальные исследования проводятся на универсальном лабораторном стенде.

При сборке электрической цепи используется следующее оборудование:

1) двигатель постоянного тока параллельного возбуждения типа ПЛ-062 У4 с нагрузочным устройством (рис.2.6). Кабель, содержащий выводы обмоток якоря и возбуждения, а также питание электромагнитного тормоза подключается к “Блоку подключения электрических двигателей”

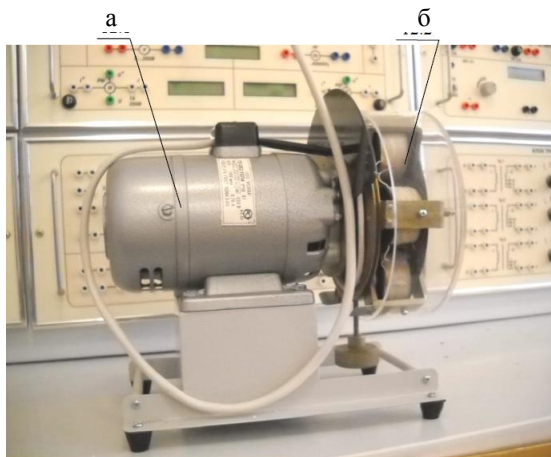


Рис.2.6. Двигатель постоянного тока (а)  
с электромагнитным тормозом (б)

Основными частями электромагнитного тормоза являются алюминиевый диск, соединенный с валом исследуемого двигателя посредством муфты, и система электромагнитов, укрепленных на кольце. К кольцу, которое может поворачиваться в направлении вращения диска, прикреплен маятник с грузами и указательная стрелка. По углу отклонения маятника на шкале определяется величина момента. Нагрузка изменяется током в обмотке электромагнитного тормоза, питание которого осуществляется от автотрансформатора через мостовой выпрямитель.

2) автотрансформатор (АТ), обеспечивающий изменение напряжения ( $0 \div 250$  В) со встроенным вольтметром, расположенным в “Блоке включения”;

3) резисторы с сопротивлением 100 Ом (используется как добавочное сопротивление обмотки якоря) и 500 Ом (используется как добавочное сопротивление в обмотке возбуждения), расположенные в “Блоке включения электрических двигателей”;

4) выпрямители UZ1, UZ2, расположенные в “Блоке включения”;

5) электронные измерительные приборы с автоматическим выбором предела измерения и рода тока, расположенные в “Блоке измерительных приборов”

а)  $pA1$  – амперметр с верхним пределом измерения 2,5 А для измерения тока якоря;

б)  $pA2$  – амперметр с верхним пределом измерения 1 А для измерения тока обмотки возбуждения;

в)  $pV$  – вольтметр с верхним пределом измерения 250 В;

б) тахометр для измерения частоты вращения, расположенный в “Блоке подключения электрических двигателей”.

## 4. Порядок выполнения работы

### 4.1. Подготовка стенда к работе.

Перед сборкой электрической цепи убедитесь в отключенном состоянии стенда – выключатель пульты включения находится в нижнем положении, индикаторные лампы не горят. Установите напряжение на АТ равным нулю, для этого ручку регулятора поверните против часовой стрелки до упора.

Осмотрите двигатель: запишите паспортные данные двигателя постоянного тока

- напряжение  $U_{ном}$  =
- мощность  $P_{2ном}$  =
- номинальный ток  $I_{ном}$  =
- КПД  $\eta_{ном}$  =
- частота вращения  $n_{ном}$  =

Измерьте сопротивления обмоток якоря и возбуждения  $R_{я} =$  ,  $R_{6} =$  .

Соберите электрическую цепь – рис.2.7.

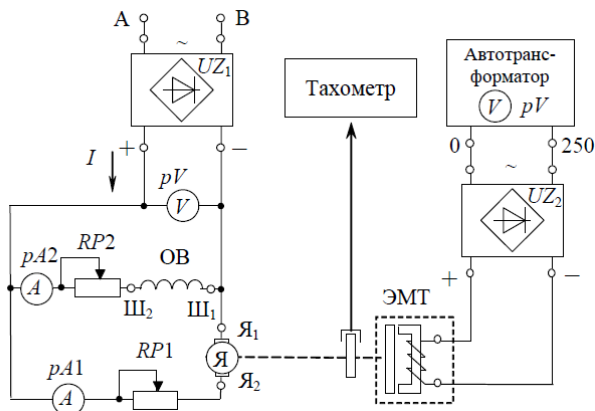


Рис.2.7. Схема подключения двигателя

## 4.2. Проведение экспериментов

### 4.2.1. Снятие механической и рабочих характеристик

Выведите добавочные реостаты в обмотках якоря и возбуждения до нуля.

Включите двигатель в режиме холостого хода. Для этого при отключенном питании электромагнитного тормоза подайте с выпрямителя  $UZ1$  напряжение питания двигателя и установите его, равное номинальному. Проведите измерения токов якоря и обмотки возбуждения и частоты вращения.

Постепенно повышая напряжение, подаваемое на электромагнитный тормоз, снимите показания приборов при различных значениях момента на валу (до значения  $M = 0.15$  Н·м). Результаты измерений занести в табл.2.1.

#### 4.2.2. Получение экспериментальных данных для построения искусственных механических характеристик. Регулирование частоты вращения.

Для этого:

- введите в цепь якоря двигателя добавочное сопротивление  $R_{я.д.}$  и повторите измерения (реостатное регулирование);
- введите в цепь обмотки возбуждения добавочное сопротивление  $R_{в.д.}$  и повторите измерения (полюсное регулирование);
- установите пониженное напряжение питания двигателя  $U < U_{ном}$  и повторите измерения (якорное регулирование). Для этого на вход выпрямителя UZ1 подайте фазное напряжение от источника питания стенда.

Результаты занесите в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Исследование работы двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением

		U, В	I <sub>я</sub> , А	I <sub>в</sub> , А	M, Н·м	n, об/мин	I, А	P <sub>1</sub> , Вт	P <sub>2</sub> , Вт	η, %
естественная характеристика	U <sub>н</sub>									
	R <sub>я.д.</sub> =0									
	R <sub>в.д.</sub> =0									
реостатное регулирование	U <sub>н</sub>									
	R <sub>я.д.</sub> =const									
	R <sub>в.д.</sub> =0									
полюсное регулирование	U <sub>н</sub>									
	R <sub>я.д.</sub> =0									
	R <sub>в.д.</sub> =const									
якорное регулирование	U <sub>н</sub> < U <sub>ном</sub>									
	R <sub>я.д.</sub> =0									
	R <sub>в.д.</sub> =0									
реверс										

#### 4.2.3. Реверс двигателя постоянного тока.

Измените направление тока в обмотке якоря или возбуждения и снимите показания приборов в режиме холостого хода ( $M = 0$ ).

При вычислениях воспользуйтесь формулами (2.3), (2.8), (2.10).

По данным табл.2.1 в одной системе координат следует построить естественную механическую и искусственные механические характеристики  $n(M)$  при различных способах регулирования. Построить рабочие характеристики двигателя по данным опыта п.4.2.1.

## 5. Содержание отчета;

- название и цель работы,
- схема экспериментальной установки,
- паспортные данные двигателя,
- таблица измеренных и вычисленных величин,
- механические характеристики двигателя,
- рабочие характеристики двигателя,
- выводы.

## 6. Задачи для самостоятельного решения.

*Задача 1.* Определите мощность, потребляемую двигателем 2ПН90МУХЛ4 при номинальной нагрузке, суммарные потери мощности, электрические потери в обмотках якоря и возбуждения, магнитные и механические потери, электромагнитную мощность. Паспортные данные двигателя с параллельным возбуждением следующие:

$P_{ном} = 0,25$  кВт,  $U_{ном} = 220$  В,  $n_{ном} = 1120$  об/мин,  $\eta = 57\%$ ,  $R_{я} = 15,47$  Ом,  $R_{в} = 610$  Ом.

*Задача 2.* Для двигателя предыдущей задачи определите сопротивление пускового реостата для ограничения пускового тока до  $I_n = 3,5 I_{ном}$ .

*Задача 3.* Для двигателя задачи 1 определите номинальный вращающий момент.

*Задача 4.* Генератор постоянного тока с параллельным возбуждением имеет следующие паспортные данные:  $P_{ном} = 2,5$  кВт,  $U_{ном} = 230$  В,  $n_{ном} = 3000$  об/мин,  $\eta = 75\%$ ,  $R_{я} = 0,788$  Ом,  $R_{в} = 156$  Ом.

Начертите схему включения генератора и определите номинальный ток обмотки якоря, ЭДС обмотки якоря, мощность и момент на валу генератора, потери мощности в обмотках генератора и суммарные магнитные и механические потери в номинальном режиме.

## Контрольные вопросы

1. Какие основные физические законы лежат в основе принципа действия электрических машин постоянного тока?
2. Перечислите основные элементы машины постоянного тока и укажите их назначение.
3. В чем конструктивное отличие двигателей и генераторов постоянного тока?
4. Какую роль играет коллектор в машинах постоянного тока?
5. Перечислите способы включения обмотки возбуждения в машинах постоянного тока.
6. За счет чего создается вращающий момент в двигателях постоянного тока?

7. От чего зависит ЭДС в машинах постоянного тока и какую роль играет ЭДС в двигателях?

8. Поясните саморегулирование частоты вращения двигателя при изменении нагрузки на валу.

9. Перечислите способы регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока.

10. От чего зависит пусковой ток двигателя постоянного тока?

11. Как можно изменить направление вращения двигателя постоянного тока?

12. Почему с увеличением нагрузки на валу КПД сначала растет, а затем начинает снижаться (рис.10.5)?

13. В чем преимущества и недостатки двигателей постоянного тока перед асинхронными двигателями?

14. Перечислите области применения двигателей постоянного тока с параллельным возбуждением.

15. Перечислите области применения двигателей постоянного тока с последовательным возбуждением.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3

### Исследование характеристик трехфазного асинхронного двигателя

#### 1. Цели и задачи работы.

*Цель:* изучение конструкции, принципа действия и экспериментальное исследование характеристик трехфазного асинхронного двигателя (АД) с короткозамкнутым ротором.

*Задачи:* в результате выполнения лабораторной работы студенты должны:

*знать* принцип работы, технические характеристики, конструктивные особенности асинхронных двигателей;

*уметь* составлять и читать электротехнические схемы, содержащие асинхронные двигатели;

*получить навыки* включения АД и расчета механических характеристик по паспортным и справочным данным.

#### 2. Теоретическая часть.

##### 2.1. Устройство асинхронного двигателя

Асинхронная электрическая машина переменного тока получила свое название вследствие того, что вращающееся магнитное поле, создаваемое токами обмоток неподвижного статора, и ротор имеют разные скорости вращения.

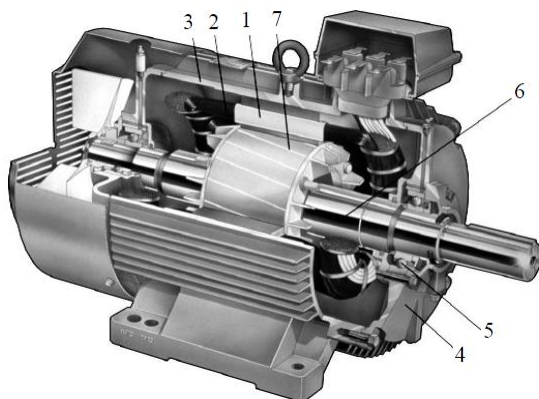


Рис.3.1. Конструкция асинхронного двигателя

Асинхронные двигатели выпускаются различной мощности от долей ватта до нескольких сотен киловатт, в двух классических вариантах исполнения – с короткозамкнутым и фазным ротором. Однако конструкции асинхронных машин малой мощности могут существенно отличаться от классических. Благодаря простоте, технологичности производства, небольшой себестоимости и высокой эксплуатационной надежности широкое применение в промышленных и бытовых устройствах получил трехфазный АД с короткозамкнутым ротором.



Устройство асинхронного двигателя показано на рис.3.1. Статор трехфазного АД представляет собой полый цилиндр 1 в виде пакета тонких пластин электротехнической стали (рис. 3.2), изолированных друг от друга для уменьшения потерь на вихревые токи. На внутренней стороне цилиндра выполнены пазы, в которые укладывается многовитковая трехфазная обмотка 2. Магнитопровод с обмотками закреплен в литом алюминиевом, чугунном или сварном стальном корпусе 3. К боковым сторонам корпуса крепятся подшипниковые щиты 4 с подшипниками 5, в которых устанавливается ротор 6.

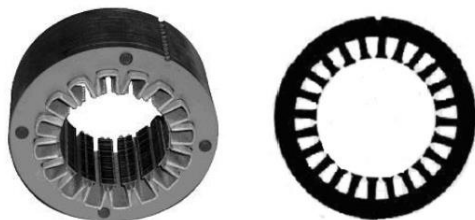


Рис.3.2. Статор АД без обмоток

Пакет магнитопровода ротора трехфазного АД также набирается из пластин электротехнической стали (рис. 3.3,а), изолированных друг от друга. В пазы, выполненные по внешней стороне цилиндрического ротора, укладывается или заливается короткозамкнутая обмотка 7 (“беличья клетка”) (рис. 3.3,б). Обмотка может быть выполнена из медных или латунных неизолированных стержней и замыкающих по торцам колец (рис. 3.3,в). Для машин до 100 кВт наиболее широко применяется литая алюминиевая обмотка с углубленными пазами (рис. 3.3,г), для более мощных машин может применяться двойная «беличья клетка» (рис. 3.3,д).

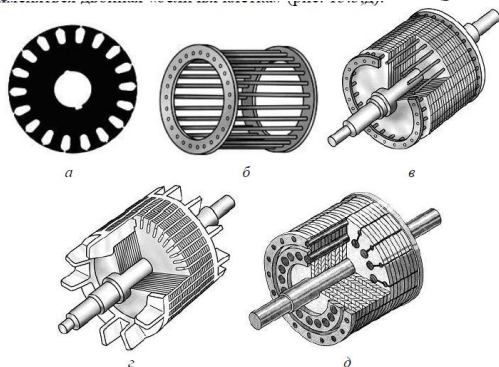


Рис.3.3. Конструкция короткозамкнутого ротора АД

Условные изображения АД с короткозамкнутым ротором представлено на рис. 3.4 а (с указанием, как соединены обмотки) и б (без указания способа соединения обмоток).

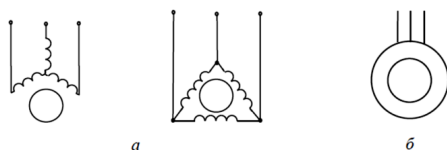


Рис.3.4. Условное изображение АД с короткозамкнутым ротором на схемах

В случае необходимости плавного регулирования частоты вращения ротора, а также для механизмов с особо тяжелыми условиями пуска используются двигатели с фазным ротором. Трехфазная обмотка фазного ротора выполняется и укладывается в пазы ротора аналогично статорной обмотке и соединяется по схеме “звезда”. Начала обмоток подсоединяют к контактным кольцам, расположенным на валу, изолированным как от вала, так и друг от друга (рис. 3.5,а). АД с такой конструкцией ротора имеют еще одно название – АД с контактными кольцами. С помощью контактных колец и неподвижных щеток обмотка ротора АД может быть замкнута накоротко или соединена с трехфазным реостатом (рис. 3.5,в). Реостат используется для запуска двигателя и для регулирования скорости вращения ротора. Условно-графическое обозначение АД с фазным ротором приведено на рис. 3.5,б.

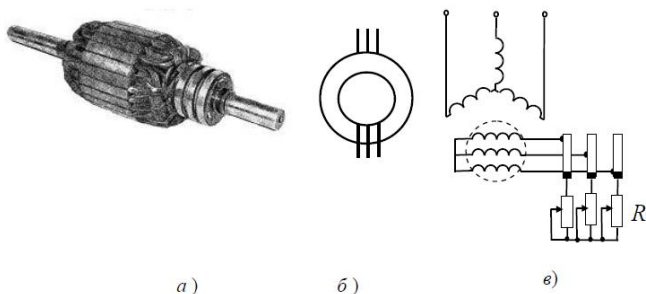


Рис.3.5. Конструкция и изображение АД с фазным ротором

## 2.2. Принцип действия асинхронного двигателя

В асинхронном двигателе статорные обмотки уложены в пазах статора таким образом, что при подключении обмоток к симметричной трехфазной сети, токи обмоток индуцируют вращающееся магнитное поле. Частота вращения магнитного поля в об/мин

$$n_1 = \frac{60f}{p}, \quad (3.1)$$

где  $f$  – частота тока,  $p$  – число пар полюсов вращающегося магнитного поля.

В большинстве АД предусмотрена возможность соединения статорных обмоток звездой и треугольником в зависимости от напряжения сети.

Направление вращения магнитного поля определяется порядком следования фаз.

Вращающееся магнитное поле индуцирует в проводниках ротора ЭДС  $E_2$ , под действием которой в короткозамкнутой обмотке ротора возникает ток  $I_2$ . На проводники с током ротора действуют силы, образующие вращающий момент, и ротор вращается в направлении вращения магнитного поля статора. Частота вращения ротора  $n_2$  меньше частоты вращения магнитного поля, почему и называется двигатель асинхронным. Относительно поля статора ротор вращается с частотой  $n_s = n_1 - n_2$ . Величина

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (3.2)$$

называется **скольжением** и играет фундаментальную роль в теории асинхронных машин. Частота тока в роторе  $f_2 = sf_1$ .

При неподвижном роторе  $n_2 = 0$  и скольжение  $s = 1$ . Если ротор вращается синхронно с магнитным полем статора ( $n_1 = n_2$ ) скольжение  $s = 0$ , но в этом случае проводники ротора не пересекают линии магнитного поля, в них не наводится эдс и на них не действует электромагнитная сила. При номинальной нагрузке скольжение асинхронного двигателя  $s_{ном} = (0,03 \div 0,08)$ .

Асинхронные двигатели, как и все электрические машины, обладают свойством саморегулирования. В установившемся режиме вращающий электромагнитный момент равен тормозному механическому моменту на валу  $M_{эм} = M_{мех}$ . Если увеличится тормозной момент, ротор начнет вращаться с замедлением, частота вращения уменьшается, скольжение возрастает, возрастает и эдс в обмотке ротора, что приводит к возрастанию тока в обмотке и увеличению вращающего момента. Равновесие моментов наступает при новой, пониженной, частоте вращения ротора.

### 2.3. Механическая характеристика асинхронного двигателя

Одна из основных характеристик асинхронного двигателя – зависимость электромагнитного момента от скольжения (рис.11.6)

$$M = \frac{2M_{max}}{\frac{s_{кр}}{s} + \frac{s}{s_{кр}}} \quad (3.3)$$

Здесь  $M_{max}$  – максимальный момент, пропорциональный квадрату магнитного потока, и значит квадрату напряжения  $U$  на двигателе,

$s_{кр}$  – критическое скольжение при максимальном моменте. Величина критического скольжения  $s_{кр} = \frac{R_2}{x_{2н}}$ , где  $R_2$  и  $x_{2н}$  – активное и реактивное сопротивление обмотки неподвижного ротора. Из формулы (3.3) можно выразить критическое скольжение через перегрузочную способность двигателя  $\lambda = \frac{M_{max}}{M_{ном}}$

$$s_{кр} = s_{ном} (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) \quad (3.4)$$

При малых значениях скольжения зависимость  $M(s)$  близка к линейной, при больших – к гиперболической.

Электromагнитный момент в начале пуска, когда  $s=1$ , называют пусковым моментом

$$M_{\Pi} = \frac{2M_{\max}}{\frac{s_{\text{кр}}}{s} + \frac{s}{s_{\text{кр}}}} \approx 2M_{\max}s_{\text{кр}} = 2M_{\max}\frac{R_2}{x_{2H}} \quad (3.5)$$

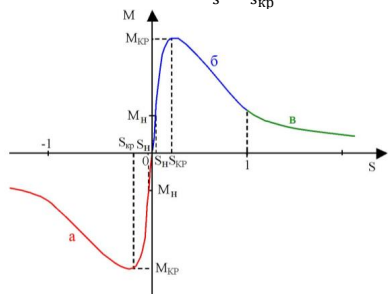


Рис.3.6. Зависимость электромагнитного момента от скольжения. а – генераторный режим, б – режим двигателя, в – режим электромагнитного тормоза.

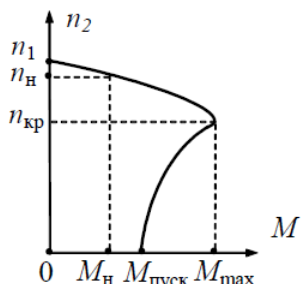


Рис.3.7. Механическая характеристика АД

Используя зависимость  $s(M)$ , можно построить механическую характеристику асинхронного двигателя (рис.3.7). Устойчивая работа двигателя возможна на участке  $n_{\text{кр}} < n_2 < n_1$  ( $M < M_{\max}$ ), на этом участке проявляется свойство саморегулирования двигателя.

Номинальный момент определяет допустимый момент на валу при длительной нагрузке. При увеличении нагрузки на валу и достижения максимального момента происходит затормаживание и остановка двигателя.

Как следует из механической характеристики, при пуске двигателя механический момент на валу должен быть меньше пускового  $M_{\Pi}$ . Чаще всего пуск асинхронного двигателя производят в режиме холостого хода.

Отношение  $\lambda = M_{\max}/M_{\Pi}$  называется перегрузочной способностью и обычно составляет  $2 \div 2,5$ . Отношение  $M_{\Pi}/M_{\Pi}$  – кратность пускового момента.

#### 2.4. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Рабочие характеристики асинхронного двигателя имеют стандартный вид – рис.3.8.

В режиме холостого хода момент  $M \approx 0$  определяется силами трения и сопротивления, а потребляемый ток  $I_{10}$  главным образом определяется магнитным сопротивлением воздушного зазора магнитопровода между ротором и статором и составляет порядка  $I_{10} = (0,2 \div 0,5)I_{\text{н}}$ , что на порядок больше тока холостого хода в трансформаторе. При росте нагрузки на валу увеличивается активная составляющая тока статора. При нагрузках до 50% от номинальной (см. рис.3.8) потребляемая мощность растет главным образом за счет увеличения коэффициента мощности, на более высоких нагрузках, когда коэффициент мощности достигает мак-

сумма, потребляемый ток уже растет пропорционально полезной мощности.

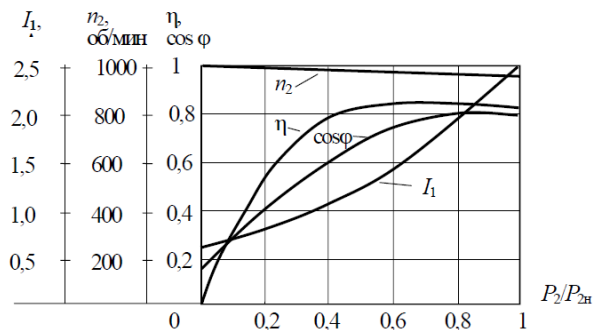


Рис.3.8. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{эл} + \Delta P_{маг} + \Delta P_{мех}} \quad (3.6)$$

Механические  $\Delta P_{мех}$  и магнитные  $\Delta P_{маг}$  потери мощности слабо меняются с нагрузкой и остаются практически постоянными, а электрические потери мощности  $\Delta P_{эл}$  пропорциональны квадрату тока. Поэтому кпд асинхронного двигателя при малых нагрузках растет пропорционально полезной мощности, достигает максимального значения при мощности порядка  $(0,7 \div 0,8)P_{2н}$ , а затем начинает снижаться.

### 2.5. Пуск асинхронного двигателя

В случае подключения статорных обмоток АД с короткозамкнутым ротором непосредственно к трехфазной сети, так называемом прямом пуске, кратность пускового тока  $I_n/I_n = 4 \div 7$ . Большой пусковой ток АД оказывает неблагоприятное воздействие на работу других потребителей электрической энергии сети. Существенное снижение пускового тока достигается при включении обмоток статора АД на пониженное напряжение. Например, если это возможно, при пуске обмотки соединяют между собой в "звезду", а после разгона ротора двигателя до частоты вращения, близкой к номинальной, – в "треугольник", и подают номинальное напряжение на обмотки.

Обмотки ротора двигателя с фазным ротором (рис.3.5) при пуске замыкают через пусковой реостат, который постепенно выводят по мере разгона двигателя.

### 3. Описание лабораторного оборудования.

Экспериментальные исследования проводятся на универсальном лабораторном стенде.

При сборке электрической цепи используется следующее оборудование:

1) трехфазный АД с короткозамкнутым ротором типа 5А50МВ4У2 и нагрузочное устройство – электромагнитный тормоз. Двигатель и нагрузочное устройство с помощью кабеля подсоединяются к “Блоку подключения электрических двигателей”, на панель которого выведены выводы статорной обмотки двигателя С1–С2, С3–С4, С5–С6 и электромагнитного тормоза.

Основными частями электромагнитного тормоза являются алюминиевый диск, соединенный с валом исследуемого двигателя с помощью муфты, и система электромагнитов, укрепленных на кольце. К кольцу, которое может поворачиваться в направлении вращения диска, прикреплены маятник с грузами и указательная стрелка. При отклонении маятника по шкале ЭМТ определяется величина тормозного момента, которая зависит от тока в обмотке электромагнитного тормоза, подключенного к автотрансформатору через мостовой выпрямитель UZ1, расположенный в “Блоке включения”;

2) пульт включения, автотрансформатор и выпрямитель, расположенные в “блоке включения”

3) электронные измерительные приборы с автоматическим выбором предела измерения и рода тока, расположенные в “Блоке измерительных приборов”:

а) рА – амперметр с верхним пределом измерения 2,5 А;

б) рW – ваттметр с пределами измерений по току (0,01 ÷ 1) А и по напряжению (5 ÷ 250) В, который является универсальным прибором и измеряет одновременно величины тока, напряжения, мощности и угла сдвига фаз на участке, к которому подключен измерительный прибор;

4) измерение частоты вращения ротора двигателя производится с помощью тахометра, расположенного в “Блоке подключения электрических двигателей”.

## 4. Порядок выполнения работы

### 4.1. Подготовка стенда к работе.

Перед сборкой цепи убедитесь в отключенном состоянии стенда – ручка выключателя стенда находится в нижнем положении, индикаторные лампы не горят. Установите напряжение на АТ равным нулю, для этого ручку регулятора поверните против часовой стрелки до упора.

Осмотрите двигатель, запишите паспортные данные трехфазного асинхронного двигателя:

тип двигателя

напряжение  $U_{ном}$  =

мощность  $P_{ном}$  =

потребляемый ток  $I_{ном}$  =

коэффициент мощности  $\cos\varphi_{ном}$  =

кпд  $\eta_{ном}$  =

частота вращения  $n_{ном}$  =

Определите частоту вращения магнитного поля статора  $n_1$  =

число пар полюсов  $p =$   
 номинальное скольжение  $s_{ном} =$   
 потребляемую мощность  $P_{Iном} =$   
 номинальный момент  $M_{ном} =$

При помощи кабеля подсоедините АД к “Блоку подключения электрических двигателей”.

#### 4.2. Исследование двигателя при соединении обмоток звездой

Соберите электрическую цепь по схеме рис. 3.9.

Запустите двигатель в режиме холостого хода, отключив питание электромагнитного тормоза. Снимите показания приборов и занесите их в табл.3.1 в соответствующую строку.

Включите электромагнитный тормоз. Постепенно увеличивая нагрузку до  $M=0,15Н\cdot м$ , для чего необходимо с помощью автотрансформатора плавно увеличивать напряжение, подводимое к обмотке электромагнитного тормоза, испытайте двигатель в нагрузочном режиме.

Результаты измерений занести в табл. 3.1.

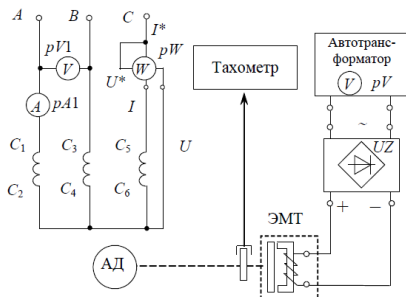


Рис.3.9. Схема эксперимента при соединении обмоток звездой

Таблица 3.1

Испытание двигателя на пониженном напряжении

	Измерено						Вычислено				
	$U_{л},$ В	$I_{л},$ А	$P_{1ф},$ Вт	$n_2,$ об/мин	$M,$ Н·м	$\varphi,$ град	$P_1,$ Вт	$P_2,$ Вт	$s$	$\cos\varphi$	$\eta,$ %
режим хх											
рабочий режим											

По значению частоты вращения двигателя определить частоту вращения магнитного поля  $n_1$  и число пар полюсов  $p$ .

При расчете потребляемую мощность можно определить через измеренную фазную мощность при симметричной нагрузке

$$P_1 = 3P_{1\phi}, \quad (3.7)$$

полезная механическая мощность на валу находится по известным формулам механики

$$P_2 = \omega M = \frac{2\pi n_2}{60} \cdot M \quad (3.8)$$

коэффициент мощности

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{S} = \frac{P_1}{\sqrt{3}U_L \cdot I_L} \quad (3.8)$$

Формулы для расчета скольжения и КПД представления выше.

### 4.3. Исследование двигателя при соединении обмоток треугольником

Соберите электрическую цепь по схеме рис. 3.10, соединив обмотки двигателя треугольником.

Проведите опыт холостого хода и испытание двигателя в нагрузочном режиме аналогично п.4.2. Результаты следует занести в таблицу, аналогичную табл.3.1.

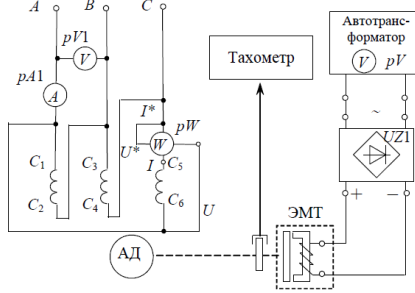


Рис.3.10. Схема эксперимента при соединении обмоток треугольником

Таблица 3.1

Испытание двигателя на номинальном напряжении

	Измерено						Вычислено				
	U <sub>л</sub> , В	I <sub>л</sub> , А	P <sub>1φ</sub> , Вт	n <sub>2</sub> , об/мин	M, Н·м	φ, град	P <sub>1</sub> , Вт	P <sub>2</sub> , Вт	s	cosφ	η, %
режим хх											
рабочий режим											
реверс											

### 4.4. Испытание двигателя при обратной последовательности фаз.

Поменяйте последовательность фаз питания двигателя. Установите момент на валу, равный одному из моментов предыдущего опыта и про-



изведите измерения показаний приборов. Результаты измерений занести в последнюю строку табл.3.2.

#### 4.5. Обработка результатов измерений.

По результатам опытов построить рабочие характеристики двигателя при пониженном (п.4.2) и номинальном напряжении (п.4.3).

По паспортным данным двигателя, используя формулы (3.3) – (3.5) построить зависимость момента от скольжения и механическую характеристику двигателя, приняв для исследуемого двигателя перегрузочную способность  $\lambda = 2$ .

По данным испытаний (табл.3.2) построить механическую характеристику и сравнить ее с рассчитанной по формулам.

#### 5. Содержание отчета;

- название и цель работы,
- паспортные данные двигателя и вычисленные по ним остальные параметры (п.4.1),
- исследуемые схемы включения двигателя,
- таблицы измеренных и вычисленных величин,
- рабочие характеристики двигателя
- зависимость момента от скольжения
- механическая характеристика двигателя
- выводы.

#### 6. Задачи для самостоятельного решения.

*Задача 1.* Номинальная частота вращения ротора асинхронного двигателя  $n_{ном}=1420$  об/мин. Определите число пар полюсов двигателя, номинальное скольжение, частоту тока в обмотке вращающегося ротора, если частота напряжения сети  $f = 50$  Гц.

*Задача 2.* На рис. 3.11 изображен паспортный щиток трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором серии 5А.

Двигатель асинхронный									
Тип	5А80МА4	№	6630152						
3ф -	50	Гц	$\Delta$	380	V	3,4	A		
	1,1	kW	1410	об/мин	КПД	73	%	cos $\varphi$	0,79
Режим	S1	Кл. изол.	F	13,0	кг				

Рис.3.11. Паспортный щиток двигателя

Определите мощность, потребляемую двигателем из сети, номинальные вращающий момент на валу двигателя и скольжение.

*Задача 3.* Начала и концы обмоток статора асинхронного двигателя выведены на щиток (рис.3.12). Как нужно их соединить, чтобы обмотки статора были включены: а) звездой; б) треугольником.

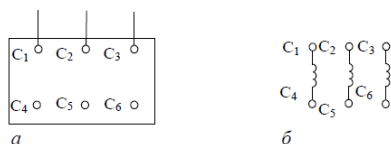


Рис.3.12. Щиток и обмотки трехфазного асинхронного двигателя

**Задача 4.** По паспортным данным асинхронного двигателя (табл.11.3) постройте естественную механическую характеристику и определите, возможен ли запуск двигателя при снижении напряжения сети на 10 % при номинальной нагрузке на валу.

Таблица 3.3

Паспортные данные двигателя

Тип	$P_n$ , кВт	$U_n$ , В	$s_n$ , %	$\eta_n$ , %	$\cos \varphi_n$	$I_p/I_n$	$M_p/M_n$	$M_{max}/M_n$
АИР71А6	0,37	220/380	8,5	65,0	0,65	4,5	2,0	2,2

**Задача 5.** В паспорте асинхронного двигателя приведены следующие величины:

- номинальная мощность 1,5 кВт ,
- номинальное напряжение 380/660 В,
- номинальная частота вращения 2850 об/мин,
- номинальный КПД 80%,
- номинальный коэффициент мощности 0,84,
- кратность пускового тока – 6,5,
- кратность пускового момента – 2,4,
- перегрузочная способность – 2,5

Рассчитать сечение проводов, с помощью которых двигатель подсоединяется к сети с линейным напряжением 380 В, приняв допустимую плотность тока 3 А/мм<sup>2</sup>.

### Контрольные вопросы

1. Почему двигатель называется асинхронным?
2. С какой целью на щиток АД выводятся начала и концы всех фаз обмотки статора?
3. Что такое критическое скольжение?
4. В чем состоит условие устойчивой работы АД?
5. Назовите существующие способы регулирования частоты вращения ротора.
6. Как зависит максимальный момент трехфазного АД от напряжения сети?
7. Как изменить направление вращения ротора АД?
8. Приведите схемы включения трехфазного АД в однофазную сеть.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4

### Изучение аппаратуры и схем управления электродвигателями

#### 1. Цели и задачи работы.

*Цель:* изучение аппаратуры и наиболее характерных схем управления электроприводом переменного тока, приобретение навыков в сборке цепей различных систем управления и защиты.

*Задачи:*

*знать* принцип работы, конструктивные особенности систем управления и защиты электроприводом переменного тока;

*уметь* составлять и читать электротехнические схемы управления электродвигателями;

*получить навыки* практического анализа работы систем электропривода, включения электродвигателей, управления ими.

#### 2. Теоретическая часть.

В схемах управления электродвигателями и другими устройствами применяется различного рода аппаратура.

По назначению различают следующие электрические аппараты:

1) коммутационные, осуществляющие замыкание и размыкание цепи (выключатели, переключатели, кнопочная станция),

2) защитные, предназначенные для защиты электрических цепей от недопустимо больших токов, перенапряжений, длительных перегрузок (предохранители, реле защиты, в том числе тепловые реле, автоматические выключатели),

3) пускорегулирующие, предназначенные для управления электроприводом и другими потребителями электроэнергии (контакторы, реле управления),

4) контролируемые и регулирующие, предназначенные для контроля и поддержания параметров процесса в заданном диапазоне (датчики, реле)

В настоящей работе используются кнопочная станция, контактор, автоматический выключатель.

Работа аппаратов электромеханического типа основывается на ряде физических явлений: взаимодействии ферромагнитных тел в магнитном поле, силовом воздействии проводника с током и магнитного поля, возникновении ЭДС в катушках и вихревых токах в массивных телах из электропроводящего материала при появлении переменного магнитного поля, тепловом действии электрического тока. Основными частями таких аппаратов являются: электрические контакты (неподвижные и подвижные, главные и вспомогательные), механический или электромагнитный привод контактной группы (приведение в соприкосновение и прижатие подвижных и неподвижных контактов), кнопки управления и рабочие обмотки.

В электрических схемах все цепи делятся на две категории: силовые цепи, по которым протекают токи основного оборудования – двигателей, генераторов, трансформаторов, и вспомогательные цепи, которые включают в себя цепи управления, защиты, сигнализации и блокировки – в этих цепях используется напряжение не выше 380 В и протекают небольшие токи.

Основными частями аппаратов являются электрические контакты (неподвижные и подвижные), механический или электромагнитный привод контактной группы, рабочие обмотки и кнопки управления. На схемах коммутирующие элементы изображаются в таких положениях, когда напряжение питания отсутствует.

**Кнопки** (рис.4.1) являются аппаратами ручного управления, включаются в цепь управления и предназначены для запуска или остановки процесса. Кнопки с нормально разомкнутыми контактами предназначены для замыкания цепи управления (для пуска оборудования), кнопки с нормально замкнутыми контактами предназначены для ручного размыкания цепи (для остановки работы оборудования – кнопка “стоп”). Коммутация с помощью кнопки происходит только при нажатии на кнопку, поэтому для того, чтобы цепь пуска оборудования не разорвалась, когда кнопку отпустили, в системе следует предусмотреть шунтирование разомкнутых контактов кнопки другой парой контактов, расположенных на контакторе, включаемом соответствующей кнопкой (см. схемы пуска двигателя рис.4.4 – 4.6).



Рис.4.1 Кнопки с нормально разомкнутыми и нормально замкнутыми контактами

Очень часто в одной кнопке совмещают нормально замкнутые и нормально разомкнутые контакты, в такой кнопке при нажатии на кнопку сначала размыкается нормально замкнутый контакт, а затем замыкается нормально разомкнутый. Такие двойные кнопки применяются в кнопочных станциях управления двигателями с необходимостью реверса. Например, перемещение груза в цехе часто производится с помощью мостового крана, на котором расположены три двигателя, работающих в прямом и обратном направлении. То или иное включение двигателя производится нажатием соответствующей кнопки кнопочной станции. Нормально разомкнутые контакты в этом случае не шунтируются контактами пускателя и двигатель работает только при нажатой кнопке. Одновременное нажатие двух кнопок одного двигателя приведет к его остановке.

**Контактор** (магнитный пускатель) состоит из катушки, которая включается в цепь управления и сердечника с подпружиненным зазором. На подвижной и неподвижной частях сердечника расположены пары кон-

тактов, некоторые из них включаются в силовую цепь, другие – в цепь управления. При подаче напряжения на катушку возникает магнитный поток и электромагнитная сила, противодействующая пружине, в результате чего сердечник замыкается, происходит замыкание контактов силовой цепи и коммутации (замыкание и размыкание) контактов цепи управления. Изображения элементов контактора на схеме показано на рис. 4.2.

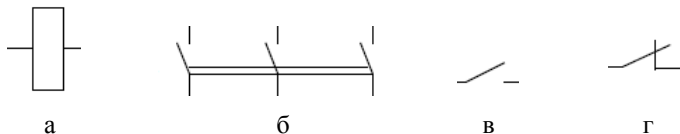


Рис.4.2. Элементы контактора: катушка (а), контакты силовой цепи (б), контакты цепи управления (в,г)

**Автоматический выключатель** (рис.4.3) предназначен для подключения оборудования к внешней силовой цепи. Однофазный выключатель имеет две пары контактов, трехфазный – три. Замыкание контактов осуществляется вручную. Отключение по окончании работы – также вручную. Но в автоматическом выключателе предусмотрено отключение от сети в двух случаях: при коротком замыкании в схеме и при длительных перегрузках. При выборе автоматического выключателя нужно учитывать, что в момент пуска потребляемый ток может значительно (раз в 6 – 7) превышать номинальный (см. лабораторные работы 2 и 3).

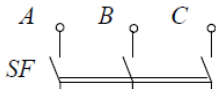


Рис.4.3. Трехфазный автоматический выключатель

*При срабатывании автоматического выключателя, прежде, чем снова включить цепь, необходимо выявить и устранить причину срабатывания.*

### 3. Описание лабораторного оборудования.

Экспериментальные исследования проводятся на универсальном лабораторном стенде.

При сборке цепи используется следующее оборудование:

1) трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Выводы обмоток статора двигателя (С1-С2, С3-С4, С5-С6) расположены в “Блоке подключения электрических двигателей”;

2) панель управления, расположена в “ Блоке аппаратуры управления ”. Панель управления содержит два контактора (магнитных пускателя) переменного тока КМ1 и КМ2, три кнопки выключателя SB1, SB2 и SB3. Обмотки электромагнитов магнитных пускателей рассчитаны на переменное напряжение 220 В. Контактные соединения выведены на соединительные гнезда;

3) резисторы с сопротивлением 30 Ом, 50 Вт, расположенный в “Блоке трансформаторов ”, используемый в качестве нагрузки в одной из ветвей цепи;

4) резисторы с сопротивлением 30 Ом, расположенные в “Блоке трансформаторов”;

5) электронные измерительные приборы с автоматическим выбором предела измерения и рода тока, расположенные в “Блоке измерительных приборов”

а)  $pA$  – амперметр с верхним пределом измерения 2,5 А;

## 4. Порядок выполнения работы

### 4.1. Подготовка стенда к работе.

Перед сборкой цепи убедитесь в отключенном состоянии стенда – ручка выключателя стенда находится в нижнем положении, индикаторные лампы не горят.

Выпишите паспортные данные аппаратов управления.

Подсоедините асинхронный двигатель к “Блоку подключения электрических двигателей ”.

### 4.2. Прямой пуск асинхронного двигателя

Соберите электрическую цепь согласно рис. 4.4.

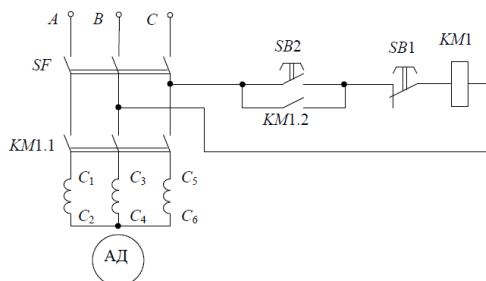


Рис.4.4. Схема пуска асинхронного двигателя

Подайте питание на стенд, включив автоматический выключатель SF.

Нажмите на кнопку “Пуск” SB2. При этом замыкается цепь катушки контактора KM1, в результате чего сердечник замыкается, замыкая главные контакты KM1.1. Одновременно замыкается контакт в цепи управления KM1.2, шунтирующий кнопку “Пуск” для того, чтобы сохранить питание катушки после отпускания кнопки. Двигатель начинает вращаться.

Остановка двигателя производится нажатием кнопки “Стоп” SB1, цепь катушки контактора при этом разрывается и подвижная часть сердечника перемещается под действием пружины, главные контакты KM1.1 разрываются.

### 4.3. Пуск двигателя через добавочные сопротивления.

Соберите схему рис.4.5, включив добавочные сопротивления в фазы обмотки статора.

Включите автоматический выключатель SF.

Нажатием кнопки SB3 замыкается цепь катушки контактора KM2, сердечник катушки перемещается. При этом замыкаются главные контакты магнитного пускателя KM2.1 и контакты в цепи управления KM2.2, шунтирующие кнопку. На обмотки двигателя подается пониженное напряжение, пусковой ток также снижается.

Зафиксируйте потребляемый ток в установившемся режиме.

После достижения двигателем установившегося режима, нажимается кнопка SB2. Замыкается цепь катушки контактора KM1, замыкаются основные контакты KM1.1 и на обмотки двигателя подается номинальное напряжение, механическая характеристика перемещается вверх в соответствии с новым значением напряжения на обмотках.

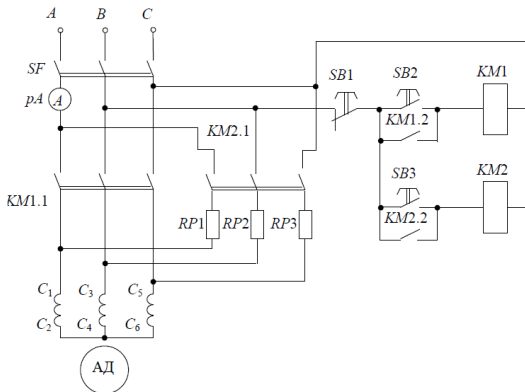


Рис.4.5. Схема пуска с добавочными сопротивлениями

Зафиксируйте потребляемый ток.

Отключение двигателя производится нажатием кнопки “Стоп” SB1.

### 4.4. Пуск двигателя с реверсом

Для изменения направления вращения асинхронного двигателя достаточно изменить порядок следования фаз. Схема управления двигателем с возможностью реверса представлена на рис.4.6.

Для пуска двигателя в прямом направлении следует нажать кнопку SB2. При этом замыкается цепь с катушкой контактора KM1 и через главные контакты магнитного пускателя на обмотки двигателя подается напряжение прямой последовательности. В цепь управления контактора KM1 включены нормально замкнутые контакты KM2.3 второго контактора. При срабатывании контактора KM1 помимо замыкания главных KM1.1 и вспомогательного KM1.2 контактов происходит размыкание

контактов КМ1.3, включенных в цепь управления контактора КМ2, поэтому даже случайное нажатие кнопки SB3 не приведет к срабатыванию контактора КМ2 и короткому замыканию.

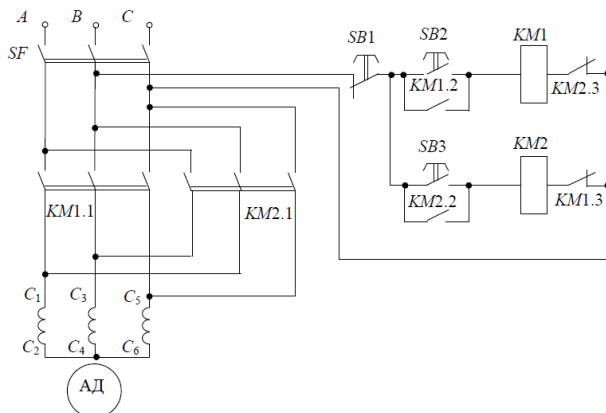


Рис.4.6. Пуск двигателя с реверсом

Для того, чтобы изменить направление вращения двигателя, необходимо сначала отключить двигатель от сети нажатием кнопки SB1, а уже только после этого нажать кнопку SB3, что приведет к срабатыванию контактора КМ2 и подаче на обмотки двигателя напряжения обратной последовательности.

### 5. Содержание отчета.

- название и цель работы,
- исследуемые схемы,
- выводы.

### Контрольные вопросы.

1. Поясните назначение элементов схемы рис. 4.5.
2. Поясните назначение контакторов, магнитных пускателей, электромагнитных реле.
3. Как производится выбор магнитных пускателей?
4. В чем отличие силовых цепей от цепей управления?
5. В чем заключается устройство и принцип работы автоматов?
6. Как учесть влияние пусковых токов двигателей на выбор плавкойставки предохранителя?



## Список литературы

1. Мезрин в.в., Зиновьев В.В. Электротехника и электроника. Лабораторный практикум. Часть I. Электрические цепи. – Ижевск: Издательский центр “Удмуртский университет”, 2021
2. Электротехника и электроника. Лаборатория: учебное пособие/ под ред. И.С.Лукманова; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т: УГА-ТУ, 2013
3. Иванов И.И. Электротехника: основные положения, примеры и задачи. – СПб.: Лань, 2002.
4. Электротехника и электроника: Учебник для вузов. В 3 кн. / Под общ.ред. В.Г. Герасимова. – Кн.2: Электромагнитные устройства и электрические машины. – М.: ООО ТИД «Арис», 2011.
5. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов. В 2 т. – М.: Изд-во МЭИ, 2004
6. Касаткин А.С. Электротехника: учеб. для неэлектротехн. спец. вузов, рек. МО РФ. – М.: Академия, 2007
7. Немцов М.В. Электротехника и электроника : Учеб. для вузов рек. МО РФ. – М.: Изд-во МЭИ, 2003
8. Рекус Г.Г. Сборник задач и упражнений по электротехнике и основам электроники: учеб. пособие рек. МО РФ, - М.: Высш. шк., 2002
9. Электротехника: Учебник для вузов. / Под ред. В.Г. Герасимова. – 4-е изд., стереотипное. – М.: ООО ТИД «Арис», 2010.
10. Электротехника и электроника: учебное пособие/ Р.В.Ахмадеев и др. Уфа: УГАТУ, 2012
11. Авдеев А.Н., Николаева О.В., Кузнецов Э.В. Тесты. Электротехника: Учебно-методическое пособие для студентов и преподавателей технических вузов. – М.: Центр тестирования МО РФ, 2002.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Основные правила техники безопасности и проведения работ в электротехнической лаборатории	4
Лабораторная работа 1. Исследование однофазного трансформатора	5
Лабораторная работа 2. Исследование двигателя постоянного тока	13
Лабораторная работа 3. Исследование характеристик трехфазного асинхронного двигателя	24
Лабораторная работа 4. Изучение аппаратуры и схем управления электродвигателями	35
Список литературы	41

ДЛЯ ЗАМЕТОК

*Учебное издание*

Авторы-составители:  
**Мезрин Владимир Васильевич**  
**Зиновьев Виталий Валерьевич**

**Электротехника и электроника**  
**Лабораторный практикум**  
**Часть 2. Электрические машины**

*Авторская редакция*

Подписано в печать 08.07.21. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Усл. печ. л. 2,56. Уч.-изд. л. 1,7.  
Тираж 30 экз. Заказ № 1348.

Типография  
Издательского центра «Удмуртский университет»  
426034, Ижевск, Университетская, д. 1, корп. 2  
Тел. 68-57-18