



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Белорусский национальный
технический университет

Кафедра «Электротехника и электроника»

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Лабораторный практикум

Часть 2

Минск
БНТУ
2015

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Электротехника и электроника»

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Лабораторный практикум
для студентов неэлектротехнических специальностей

В 3 частях

Часть 2

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
по образованию в области энергетики и энергетического оборудования*

Минск
БНТУ
2015

УДК [621.3+621.38](076.32)

ББК 31.2я7

Э45

Составители:

*Е. С. Счастлиная – 1; С. В. Домников – 2; Т. Т. Розум – 3; Г. А. Михальцевич – 4;
Р.Р. Мороз – 5; Г. В. Згаевская, Л. И. Новикова – 6; Л. И. Новикова, О. А. Пекарчик – 7;
Т. Т. Розум, М. Д. Алабдаллах – 8, 9; И. В. Новаш – 10*

Под редакцией Ю. А. Куварзина и Ю.В. Бладыко

Рецензенты:

В. А. Булат, М. И. Полуянов

Электротехника и электроника: лабораторный практикум для
Э45 студентов неэлектротехнических специальностей : в 3 ч. / сост.:
И. В. Новаш [и др.] ; под ред. Ю. А. Куварзина, Ю. В. Бладыко. –
Минск : БНТУ, 2013 – . – Ч. 2 : Электрические машины и аппара-
ты. – 2015. – 102 с.
ISBN 978-985-550-493-2 (Ч.2).

Настоящий лабораторный практикум предназначен для студентов неэлектротехнических специальностей при выполнении лабораторных работ по курсам «Электротехника», «Электротехника и основы электроники», «Электротехника, электрические машины и аппараты» и включает 10 работ по разделам: «Трансформаторы», «Асинхронные машины», «Машины постоянного тока», «Синхронные машины», «Электропривод».

Каждая лабораторная работа содержит общие сведения, предварительное задание к эксперименту, порядок выполнения работы, указания о содержании отчета, контрольные вопросы.

Расчет предварительного задания к эксперименту должен производиться в период подготовки к занятиям; полученные результаты проверяются опытным путем в процессе выполнения работы.

Часть 1 данного издания «Электрические цепи» вышла в свет в БНТУ в 2013 году.

УДК [621.3+621.38](076.32)

ББК 31.2я7

ISBN 978-985-550-493-2 (Ч. 2)

ISBN 978-985-550-243-3

© Белорусский национальный
технический университет, 2015

ПРАВИЛА РАБОТЫ В ЛАБОРАТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ

1. К работе в лаборатории студенты допускаются только после инструктажа по технике безопасности.

2. Каждый студент должен подготовиться к занятию по данному учебному изданию и рекомендуемой литературе: выполнить предварительный расчет к эксперименту, начертить необходимые схемы, графики и таблицы. Не подготовившиеся студенты к занятиям не допускаются.

3. Перед сборкой электрической цепи необходимо убедиться в отсутствии напряжения на элементах цепи.

4. Сборку цепи следует начинать от зажимов источника, прежде всего собрать цепи тока, а затем – цепи напряжения.

5. Перед включением источника питания на регулируемых элементах должны быть установлены заданные параметры, а регулятор ЛАТРа должен находиться в нулевом положении.

6. Включение цепи под напряжение производится только после проверки ее преподавателем или лаборантом.

7. Изменения в структуре цепи производятся при отключенном источнике питания.

8. Согласно программе работы сделать необходимые измерения и заполнить соответствующие таблицы.

9. Показать результаты преподавателю и получить разрешение на разборку цепи.

10. Привести в порядок рабочее место: разобрать цепи, аккуратно сложить провода.

11. Оформить отчет о выполненной работе согласно требованиям.

12. Представить отчет преподавателю, ответить на контрольные вопросы, получить зачет по выполненной работе и задание к следующему занятию.

Лабораторная работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Цель работы: изучение устройства и принципа действия трансформатора; построение схемы замещения и эксплуатационных характеристик трансформатора.

Общие сведения

Трансформатор – это электромагнитный аппарат для преобразования в цепях переменного тока электрической энергии с одним соотношением напряжения и тока в электрическую энергию с другим соотношением напряжения и тока при неизменной частоте. Он позволяет передавать от источника приемникам одну и ту же мощность при разных напряжениях и токах $S = U_1 I_1 = U_2 I_2$.

Трансформатор имеет замкнутый сердечник (магнитопровод), на котором находятся две (или более) обмотки, выполненные изолированным медным или алюминиевым проводом (см. рис. 1.1). Сердечник, собранный из тонких пластин или лент электротехнической стали с хорошей магнитной проницаемостью, служит для усиления магнитной связи между обмотками. Обмотку, подключаемую к источнику преобразуемой энергии, называют *первичной* (w_1), обмотку, к которой подключают приемник, – *вторичной* (w_2).

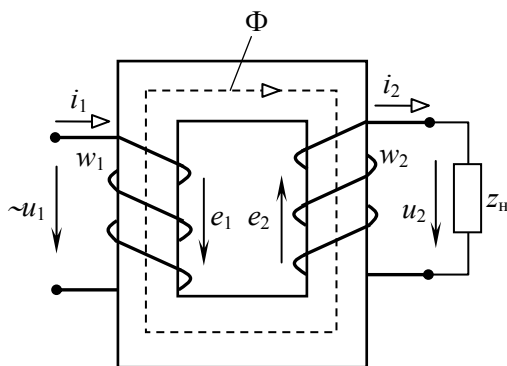


Рис. 1.1. Трансформатор с замкнутым сердечником

Переменное напряжение источника u_1 вызывает в первичной обмотке ток i_1 , который возбуждает магнитный поток. Основная часть магнитного потока (Φ) замыкается по магнитопроводу и наводит в обмотках ЭДС:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

При потоке, изменяющемся с угловой частотой $\omega = 2\pi f$ по синусоидальному закону $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, действующие значения ЭДС:

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m; \quad E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m.$$

где f – частота питающего тока;

Φ_m – амплитудное значение основного магнитного потока;

w_1, w_2 – количество витков первичной и вторичной обмоток.

Данные соотношения используют при расчете трансформатора и называются уравнениями трансформаторных ЭДС.

Отношение ЭДС обмоток

$$n = E_{\text{вн}} / E_{\text{нн}} = w_1 / w_2$$

называется *коэффициентом трансформации*, зависящем от соотношения чисел витков обмоток.

Для определения технико-экономических показателей, построения характеристик отдельных трансформаторов, анализа аварийных режимов и в других случаях необходима схема замещения трансформатора (см. рис. 1.2), являющаяся его электрической моделью. Физическая модель (см. рис. 1.1) с указанием номинальных параметров и конструктивных данных магнитопровода и обмоток трансформатора делает такие расчеты излишне сложными, неточными, а часто и невозможными.

Параметры Т-образной схемы замещения трансформатора (см. рис. 1.2) вычисляются по данным опытов холостого хода и короткого замыкания.

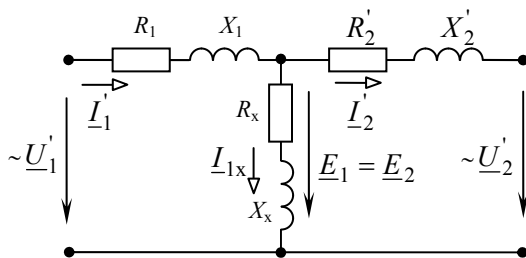


Рис. 1.2. Схема замещения трансформатора

В опыте холостого хода к первичной обмотке подводится номинальное напряжение $U_{\text{ном}} = U_{1x}$, а вторичная обмотка размыкается ($I_{2x} = 0$). В опыте измеряются ток первичной обмотки I_{1x} , потери мощности в трансформаторе P_x и напряжение на вторичной обмотке U_{2x} .

Ток холостого хода I_{1x} у мощных трансформаторов составляет 1...5 % от номинального тока $I_{\text{ном}}$, у трансформаторов малой мощности – до 40 %, и в паспортных данных трансформатора указывают его процентное значение

$$i_x = (I_{1x} / I_{\text{ном}}) \cdot 100 \text{ \%}.$$

Такой небольшой ток создает ничтожно малые потери мощности в первичной обмотке (пропорциональные квадрату тока), следовательно, потери холостого хода P_x – это потери в стали сердечника, пропорциональные квадрату магнитного потока, а значит, квадрату напряжения: $P_x = P_{\text{ст}} \equiv \Phi_m^2 \equiv U_{1\text{ном}}^2$. Кроме того, небольшой ток холостого хода в сопротивлениях первичной обмотки создает незначительные падения напряжения (около 0,25 %), вследствие чего $U_{1x} = U_{\text{ном}} \approx E_{1\text{вн}}$, а $U_{2x} = E_{2\text{нн}}$, так как $I_{2x} = 0$.

По результатам измерений вычисляются:

$$n = E_{\text{вн}} / E_{\text{нн}} \approx \frac{U_{1x}}{U_{2x}}; \quad Z_x = \frac{U_{1x}}{I_{1x}}; \quad R_x = \frac{P_x}{I_{1x}^2}; \quad X_x = \sqrt{Z_x^2 - R_x^2}.$$

Сопротивления R_x , X_x , Z_x заменяют сердечник трансформатора. В опыте короткого замыкания вторичную обмотку замыкают коротко, а на первичную обмотку подают такое пониженное напряже-

ние $U_{1к}$, при котором токи в обмотках равны номинальным значениям $I_{1ном}$ и $I_{2ном}$. Значение

$$u_k \% = U_{1к} \cdot 100 \% / U_{1ном}.$$

называют напряжением короткого замыкания.

Оно составляет 5...10 % и определяет падение напряжения в обмотках и распределение нагрузки при параллельной работе трансформаторов.

В опыте короткого замыкания измеряются токи обмоток $I_{1к} = I_{1ном}$, $I_{2к} = I_{2ном}$, а также напряжение $U_{1к}$ и потери мощности P_k . Так как $U_{1к} \ll U_{1ном}$, то потери мощности в магнитопроводе, пропорциональные квадрату приложенного напряжения, ничтожны. И поскольку токи в обмотках равны номинальным значениям, то потери P_k – это мощность потерь в обмотках трансформатора.

По данным опыта короткого замыкания вычисляются:

$$Z_k = U_{1к} / I_{1ном} ; \quad R_k = P_k / I_{1ном}^2 ; \quad X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} .$$

Данные сопротивления заменяют собой обе обмотки трансформатора. Реальные сопротивления обмоток с разными номинальными напряжениями и токами имеют различные значения, но потери мощности в них и относительные потери напряжения (отнесенные к номинальным величинам) примерно одинаковы. Следовательно, по значимости, оцениваемой потерями мощности и относительными потерями напряжения, обе обмотки равноценны. Эти обстоятельства позволяют приравнять сопротивления одной (обычно первичной) обмотки к приведенным сопротивлениям другой (обычно вторичной) обмотки:

$$Z_1 = Z'_2 = Z_2 n^2 ; \quad R_1 = R'_2 = R_2 n^2 ; \quad X_1 = X'_2 = X_2 n^2 .$$

Кроме сопротивлений приводятся также напряжения, ЭДС и токи:

$$U'_2 = U_2 n ; \quad E'_2 = E_2 n ; \quad I'_2 = I_2 / n .$$

С учетом приведения сопротивления обмоток равны:

$$Z_1 = Z'_2 = Z_K/2; \quad R_1 = R'_2 = R_K/2; \quad X_1 = X'_2 = X_K/2,$$

где R_1 , X_1 , Z_1 – сопротивления заменяют первичную обмотку. Приведенные сопротивления R'_2 , X'_2 , Z'_2 заменяют вторичную обмотку.

По рассчитанным параметрам строится Т-образная схема замещения трансформатора (см. рис. 1.2). Так как для расчета схемы замещения использованы данные опытов холостого хода и короткого замыкания, то потери мощности в этих опытах, ток холостого хода (в процентах от номинального тока первичной обмотки) и напряжение короткого замыкания являются обязательными паспортными данными каждого трансформатора.

Эксплуатационные характеристики трансформатора строят в функции от коэффициента загрузки. По паспортным данным расчет зависимости вторичного напряжения U_2 , коэффициента мощности $\cos \varphi_1$, КПД η от тока нагрузки I_2 или коэффициента загрузки $\beta = I_2/I_{2\text{ном}}$ выполняют по следующим формулам:

$$1) \quad U_2 = U_{2x} \left[1 - \beta (u_{\text{к. а}} \cos \varphi_2 + u_{\text{к. р}} \sin \varphi_2) \frac{1}{100} \right],$$

где активная $u_{\text{к. а}}$ и реактивная $u_{\text{к. р}}$ составляющие напряжения короткого замыкания равны:

$$u_{\text{к. а}} = \frac{100 \cdot P_K}{S_{\text{ном}}}; \quad u_{\text{к. р}} = \sqrt{u_K^2 - u_{\text{к. а}}^2};$$

φ_2 – угол сдвига фаз между напряжением и током приемника;

$$2) \quad \cos \varphi_1 = P_1/S_1 = P_1/\sqrt{P_1^2 + Q_1^2};$$

$$P_1 = \beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_x + \beta^2 P_K;$$

$$Q_1 = \beta S_{\text{ном}} \sin \varphi_2 + \frac{i_x}{100} S_{\text{ном}} + \beta^2 \frac{u_{\text{к.р}}}{100} S_{\text{ном}},$$

где $S_{\text{ном}}$ — полная номинальная мощность;

$$3) \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_x + \beta^2 P_k}.$$

Типичный вид этих характеристик приведен на рис. 1.3. КПД имеет наибольшее значение при равенстве постоянных P_x и переменных $\beta^2 P_k$ потерь

$$\beta_{\eta \max} = \sqrt{P_x / P_k}.$$

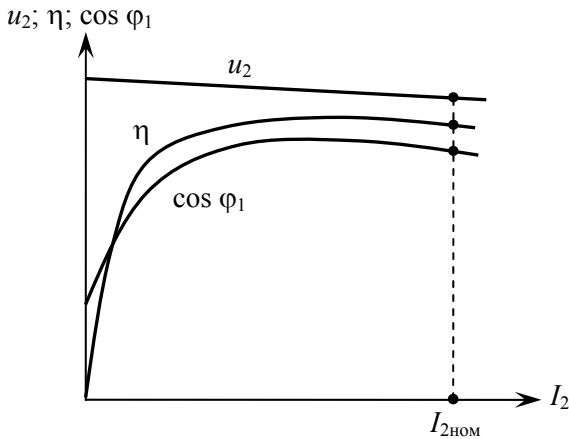


Рис. 1.3. Характеристика трансформатора

Характеристики трансформаторов небольшой мощности, имеющих обычно низкий КПД, можно получить методом непосредственной нагрузки (см. рис. 1.4), что и предполагается в данной работе. Измерительные приборы в цепях первичной и вторичной обмоток позволяют измерить напряжения, токи, мощности, затем

рассчитать коэффициент мощности $\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{U_1 I_1}$ и КПД $\eta = \frac{P_2}{P_1}$

(при активной нагрузке).

Предварительное задание

По паспортным данным трансформатора (табл. 1.1) определить коэффициент трансформации n , номинальные токи первичной и вторичной обмоток $I_{1\text{ном}}$ и $I_{2\text{ном}}$, их активные R_1 , R_2 и реактивные X_1 , X_2 сопротивления, сопротивления холостого хода R_x , X_x , а также коэффициент загрузки $\beta_{\eta\text{max}}$, при котором КПД трансформатора максимален. Результаты расчета записать в табл. 1.2.

Таблица 1.1

Данные	S , В·А	U_1 , В	U_2 , В	P_x , Вт	P_k , Вт	u_k , %	i_x , %
Паспортные	1000	220	127	25	30	3,5	20
Опытные	1000	220					

Таблица 1.2

n	$I_{1\text{ном}}$, А	$I_{2\text{ном}}$, А	R_1 , Ом	X_1 , Ом	R_2 , Ом	X_2 , Ом	R_x , Ом	X_x , Ом	$\beta_{\eta\text{max}}$	$\beta = (\text{из табл. 1.3})$		
										U_2 , В	η	$\cos\varphi_1$

Начертить Т-образную схему замещения трансформатора, записать возле каждого элемента значение сопротивлений.

Для заданного вариантом в табл. 1.3 значения β рассчитать U_2 , η , $\cos\varphi_1$ при активной нагрузке трансформатора ($\varphi_2 = 0$), результаты записать в табл. 1.2. При расчете U_2 значение U_{2x} принять равным 130 В.

Таблица 1.3

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
$\beta = I_2/I_{2\text{ном}}$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с приборами и аппаратами лабораторной установки. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 1.4 для испытания трансформатора. Установить регулятор автотрансформатора АТ в нулевое (крайнее левое) положение, отключить выключатель В_к.

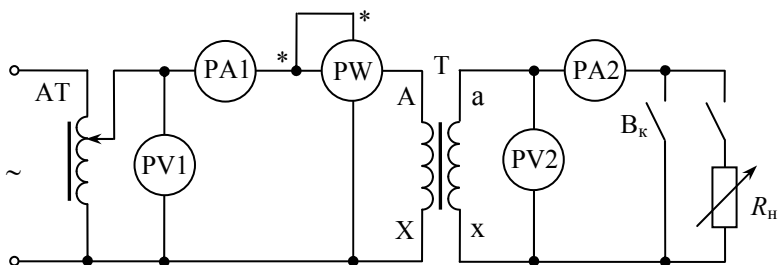


Рис. 1.4. Метод непосредственной нагрузки

2. После проверки цепи руководителем установить на зажимах первичной обмотки номинальное напряжение $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$ и записать показания приборов в табл. 1.4 при холостом ходе трансформатора.

Таблица 1.4

Опыты	Измерено					Вычислено		
	$U_1, \text{В}$	$I_1, \text{А}$	$P_1, \text{Вт}$	$U_2, \text{В}$	$I_2, \text{А}$	β	$\cos\varphi_1$	η
ХХ								
1								
2								
3								
4								
5								
КЗ								

3. Подключить нагрузку $R_{\text{н}}$ трансформатора и, поддерживая $U_1 = U_{\text{ном}} = \text{const}$, изменять вторичный ток до значения $I_{2\text{ном}}$. Результаты пяти опытов записать в табл. 1.4. Один из опытов выполнить для β , заданного вариантом табл. 1.3.

4. Установить регулятор автотрансформатора в нулевое положение, включить выключатель B_K и выполнить опыт короткого замыкания, для чего к первичной обмотке подать пониженное напряжение U_{1K} , при котором $I_{1K} = I_{1ном}$. Показания приборов записать в табл. 1.4.

5. По опытным данным определить коэффициент трансформации n , процентное значение тока холостого хода i_x , %, потери в стали и обмотках трансформатора, напряжение короткого замыкания u_K , %. Сравнить полученные значения с номинальными (см. табл. 1.1).

6. Рассчитать для проведенных опытов коэффициент мощности и КПД трансформатора, результаты записать в табл. 1.4.

7. Построить в общей системе координат характеристики $U_2(\beta)$, $\cos\varphi_1(\beta)$ и $\eta(\beta)$ при $U_1 = \text{const}$ и $\cos\varphi_2 = 1$. Здесь же показать расчетные точки предварительного задания (см. табл. 1.2).

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Полный расчет предварительного задания к эксперименту, включая табл. 1.1, 1.2 и схему замещения трансформатора.
3. Схема цепи для испытаний трансформатора.
4. Таблица измерений и вычислений 1.4.
5. Графики зависимостей $U_2(\beta)$, $\cos\varphi_1(\beta)$ и $\eta(\beta)$.
6. Анализ результатов и выводы.

Контрольные вопросы

1. Объясните устройство и принцип действия однофазного трансформатора.
2. От чего зависят ЭДС обмоток трансформатора?
3. Для какой цели в трансформаторе используют ферромагнитный сердечник?
4. Как определяется коэффициент трансформации?
5. Какие потери энергии имеют место в трансформаторе и от чего они зависят?
6. Как выполняют опыты ХХ и КЗ? Каково их назначение?
7. Назначение схемы замещения трансформатора и как определить ее параметры?

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Цель работы: изучение устройства и принципа действия асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором; освоение расчета основных электрических и механических величин; снятие и анализ рабочих характеристик двигателя.

Общие сведения

Асинхронный двигатель (АД) с короткозамкнутым ротором – наиболее распространенный в народном хозяйстве тип электрического двигателя. Он имеет простую конструкцию, сравнительно недорог, надежен и удобен в эксплуатации. АД преобразует электрическую энергию переменного тока в механическую энергию, отдаваемую посредством вала рабочей машине. Основными частями АД являются неподвижный статор и вращающийся ротор, разделенные воздушным зазором (0,25...1 мм).

Статор состоит из литого корпуса (стального, чугунного или алюминиевого), внутрь которого вмонтирован сердечник статора – полый цилиндр, набранный из отдельных пластин (колец) электротехнической стали, толщиной 0,5 мм. Для уменьшения потерь от вихревых токов пластины изолируют друг от друга. Сердечник статора имеет пазы, в которые помещена трехфазная обмотка из медного или алюминиевого изолированного провода. Фазы обмотки (А, В, С) смещены друг относительно друга по окружности статора на 120° и могут соединяться звездой или треугольником (в зависимости от номинального напряжения фаз обмотки и питающей сети).

Ротор представляет собой цилиндр, собранный из тонких изолированных дисков электротехнической стали, насаженный и закрепленный на валу. В дисках выштампованы пазы, в которые закладывают медные или заливают алюминиевые стержни обмотки, соединяемые по торцам накоротко кольцами из того же материала. Полученная таким образом короткозамкнутая обмотка ротора напоминает по конфигурации «беличье колесо» (ее часто так называют).

Работа АД основана на способности трехфазной системы токов, протекающей по трем катушкам, оси которых смещены в пространстве на 120° , возбуждать *вращающееся магнитное поле*.

Подобные условия созданы в статоре АД, подключенном к трехфазной сети (см. рис. 2.1, а).

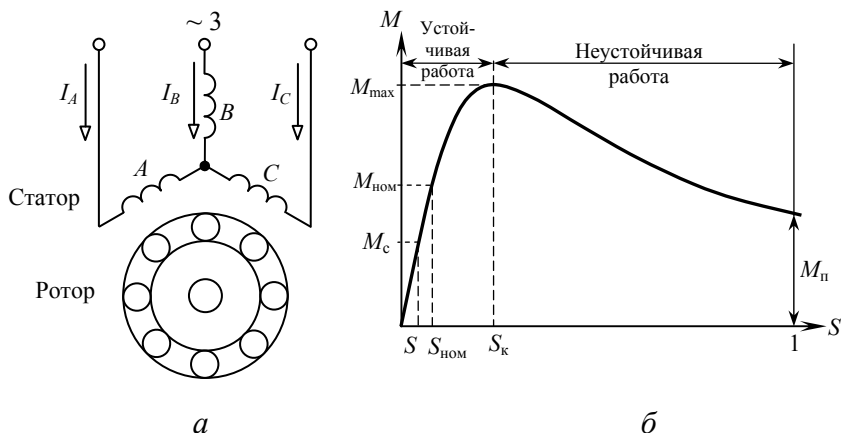


Рис. 2.1: а) асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором; б) график зависимости $M(S)$

Протекание в фазах обмотки статора трех синусоидальных токов, сдвинутых во времени на $1/3$ периода, возбуждает в АД магнитное поле, бегущее вдоль окружности статора (вращающееся) с постоянной скоростью. Число магнитных полюсов вращающегося поля зависит от конструкции обмотки статора (числа катушек в фазе обмотки). При выполнении каждой фазы в виде одной катушки, вращающееся поле будет двухполюсным (число пар полюсов $p = 1$). Для получения вращающегося поля с p парами полюсов окружность статора разбивают на p частей и на каждой из них размещают три катушки разных фаз. В этом случае одна пара полюсов образуется на каждой части окружности, занятой тремя катушками, поле в целом имеет p пар полюсов, каждая фаза обмотки состоит из p последовательно соединенных катушек.

Направление вращения поля совпадает с направлением чередования токов по фазам обмотки. Для изменения направления враще-

ния достаточно переключить (поменять местами) провода, подающие токи в любые две фазы обмотки.

Частота вращения магнитного поля, называемая синхронной, определяется формулой

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}, \text{ мин}^{-1},$$

где f_1 – частота питающего тока, Гц;

p – число пар полюсов статора.

При промышленной частоте тока $f_1 = 50$ Гц синхронная частота вращения определяется числом пар полюсов:

p	1	2	3	4	5	6
$n_1, \text{ мин}^{-1}$	3000	1500	1000	750	600	500

Принцип действия АД. В обмотку статора от трехфазной сети подается трехфазная система токов, возбуждающая вращающееся магнитное поле. Магнитные линии вращающегося поля пересекают обмотки статора и ротора и по закону электромагнитной индукции индуцируют в них синусоидальные ЭДС E_1 и E_2 . ЭДС E_1 уравновешивает основную часть напряжения питающей сети U_1 , а E_2 вызывает в проводниках короткозамкнутой обмотки ротора токи I_2 . Взаимодействие токов ротора и вращающегося магнитного поля создает электромагнитный *вращающий момент* M , приводящий ротор в движение в направлении вращения поля. Частота вращения ротора n меньше частоты вращения поля n_1 , так как ЭДС E_2 , ток I_2 и момент M появляются только при условии перемещения магнитного поля относительно ротора, т. е. при $n < n_1$. В связи с этим рассматриваемый двигатель называют асинхронным.

Относительную разность частот вращения магнитного поля и ротора называют *скольжением*

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1}. \quad (2.1)$$

При холостом ходе двигателя частота вращения ротора n близка к частоте вращения магнитного поля n_1 и $S \approx 0$, с увеличением нагрузки на валу скольжение возрастает (n уменьшается), при номинальной нагрузке $S_{\text{ном}} = 0,02 \dots 0,08$ (малые значения относятся к мощным двигателям). В момент пуска $n = 0$ и $S = 1$.

Скольжение играет важную роль в теории АД. Частота вращения ротора n выражается через S формулой, вытекающей из (2.1)

$$n = n_1 (1 - S).$$

При неизменных частоте и напряжении питающей сети вращающий момент M однозначно определяется скольжением. График зависимости $M(S)$ показан на рис. 2.1, б. Наибольшему вращающему моменту M_{max} соответствует критическое скольжение S_k , которое делит график $M(S)$ на два участка: устойчивой работы ($0 < S \leq S_k$) и неустойчивой работы ($S_k < S \leq 1$). На устойчивом участке двигатель автоматически развивает вращающий момент M , равный моменту сопротивления M_c рабочей машины. При возрастании M_c скольжение S и вращающий момент M будут увеличиваться до тех пор, пока не наступит новое равновесие $M = M_c$. При уменьшении M_c скольжение S и вращающий момент M соответственно уменьшаются. Это свойство АД называют саморегулированием вращающего момента.

На неустойчивом участке $M(S)$ двигатель, не обладая свойством саморегулирования, работает кратковременно и, как правило, в условиях неравенства моментов M и M_c . При этом, если $M > M_c$, двигатель увеличивает скорость (уменьшает S) и переходит на устойчивый участок (таков процесс пуска АД), если же $M < M_c$, скорость АД уменьшается до полной остановки.

В установившемся режиме вращающий момент M (Н·м), механическая мощность на валу P (Вт) и частота вращения n (мин⁻¹) связаны соотношением

$$M = 9,55 \frac{P}{n}.$$

Момент и мощность на валу, которые двигатель может длительно развивать, не перегреваясь сверх допустимой температуры, называют номинальными ($M_{\text{ном}}$, $P_{\text{ном}}$).

Номинальный режим характеризуют также номинальная частота вращения $n_{\text{ном}}$, номинальный КПД $\eta_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / P_{1\text{ном}}$, номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_{\text{ном}}$, номинальное линейное напряжение сети $U_{\text{ном}}$, номинальный линейный ток

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\sqrt{3} U_{\text{ном}} \eta_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}}}.$$

При кратковременных перегрузках ($M_c > M_{\text{ном}}$) АД работает устойчиво при условии, что наибольший момент сопротивления рабочей машины $M_{c, \text{max}}$ не превышает M_{max} АД. Отношение $K_M = M_{\text{max}} / M_{\text{ном}}$ называют перегрузочной способностью АД. K_M приводится в каталогах ($K_M = 1,8 \dots 2,5$) и используется для вычисления M_{max}

$$M_{\text{max}} = K_M M_{\text{ном}}.$$

Пусковые свойства АД характеризуют пусковой момент $M_{\text{п}}$ и пусковой ток $I_{\text{п}}$ в начальный момент пуска (при $n = 0$, $S = 1$). Для короткозамкнутых АД $M_{\text{п}} = (1 \dots 1,5) M_{\text{ном}}$, $I_{\text{п}} = (5 \dots 7) I_{\text{ном}}$. Пусковой момент должен быть достаточным, чтобы преодолеть M_c рабочей машины и обеспечить быстрый (в течение нескольких секунд) разгон до рабочей скорости. Начальный пусковой ток по мере разгона АД быстро уменьшается и поэтому не опасен для двигателя. Зависимость $M(S)$ приближенно выражается упрощенной формулой Клосса

$$M = \frac{2M_{\text{max}}}{S/S_K + S_K/S},$$

где критическое скольжение

$$S_K = S_{\text{НОМ}} \left(K_M + \sqrt{K_M^2 - 1} \right).$$

Рабочие характеристики отражают эксплуатационные свойства АД и представляют зависимости величин n , M , I_1 , η , $\cos\varphi$ от мощности на валу P . Выразив эти величины в относительных единицах ($n_* = n/n_1$, $M_* = M/M_{\text{НОМ}}$, $I_{1*} = I_1/I_{1\text{НОМ}}$, $P_* = P/P_{\text{НОМ}}$), можно построить рабочие характеристики в общей системе координат (см. рис. 2.2).

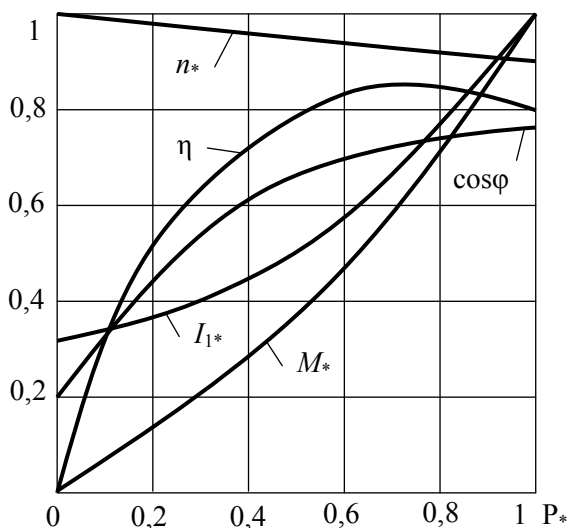


Рис. 2.2. Общая система координат рабочих характеристик

В данной работе в качестве короткозамкнутого используется АД с фазным ротором, обмотка которого замыкается накоротко. Нагрузку на валу АД создает генератор постоянного тока, работающий на регулируемый нагрузочный резистор.

Предварительное задание

Для трехфазного асинхронного двигателя заданы следующие номинальные величины: мощность на валу $P_{\text{НОМ}} = 750$ Вт; частота враще-

ния ротора $n_{\text{ном}} = 900 \text{ мин}^{-1}$; коэффициент мощности $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,7$; КПД $\eta_{\text{ном}} = 0,7$; а также перегрузочная способность, $K_M = M_{\text{max}}/M_{\text{ном}} = 2,0$ и зависимость $\eta = P_* - 0,6P_*^2 + 0,3$, где $P_* = P/P_{\text{ном}}$.

Необходимо определить:

1. Синхронную частоту вращения n_1 (при частоте питающего тока $f_1 = 50 \text{ Гц}$) и число пар полюсов p вращающегося магнитного поля.

2. Номинальную мощность $P_{\text{ном}}$, потребляемую двигателем, и номинальный ток $I_{\text{ном}}$ (линейное напряжение сети $U_{\text{л}} = 220 \text{ В}$).

3. Номинальный $M_{\text{ном}}$ и максимальный M_{max} моменты на валу, номинальное $S_{\text{ном}}$ и критическое S_K скольжение.

4. Для режима со скольжением S , заданным по вариантам из табл. 2.1, определить частоту вращения ротора n , момент M (по формуле Клосса), мощность на валу P , потребляемую мощность $P_1 = P/\eta$.

Таблица 2.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Скольжение	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,11	0,12

Результаты расчета занести в табл. 2.2.

Таблица 2.2

		$n, \text{мин}^{-1}$	$M, \text{Н}\cdot\text{м}$	$P, \text{Вт}$	$P_1, \text{Вт}$	$I_1, \text{А}$
Номинальный режим	паспортные данные					
	опыт					
Режим по п. 4 предварительного задания	расчет					
	опыт					

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с оборудованием, приборами, электрической схемой лабораторной установки.

2. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 2.3. Пригласить преподавателя для проверки правильности сборки.

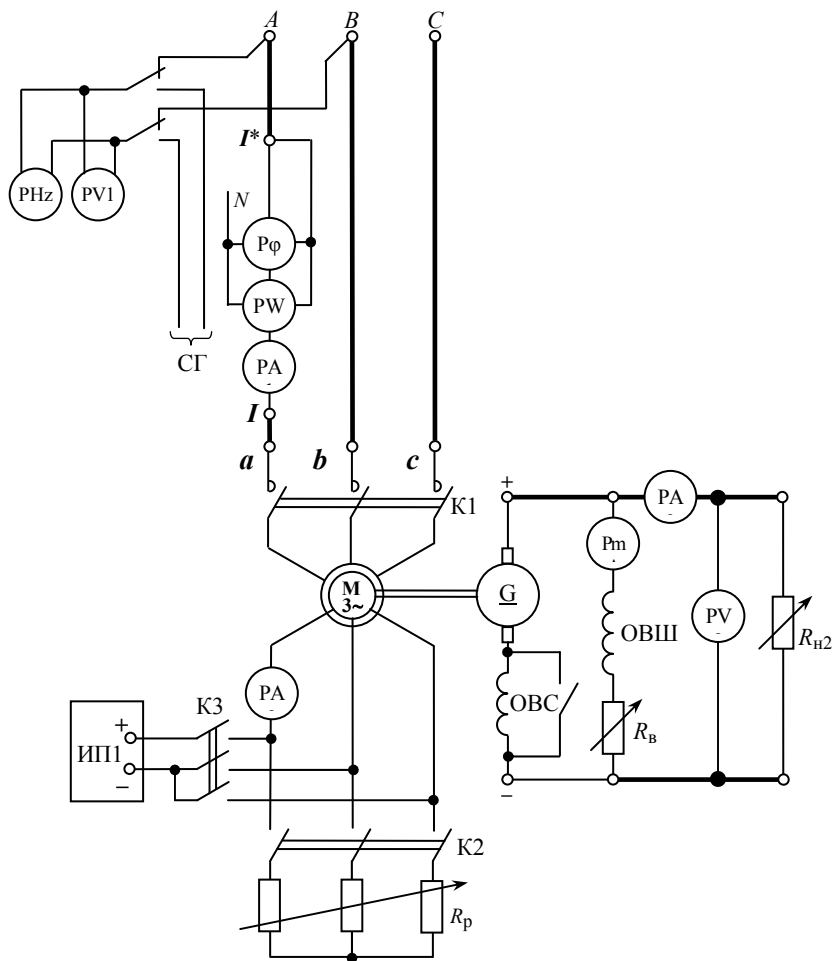


Рис. 2.3. Схема электрической цепи

3. Подготовить установку к работе:

а) вывести реостат R_p (кроме последней ступени, оставляемой для небольшого ограничения пускового тока);

б) ввести реостат возбуждения генератора постоянного тока (ГПТ) R_B (ручку R_B повернуть в крайнее левое положение);

в) переключатель обмотки ОВС ГПТ установить в положение «Вкл. согл.» (по шкале $\underline{G}$);

г) переключатель нагрузки ГПТ R_{H2} установить в положение «0»;

д) подать напряжение на лабораторный стенд, включив трехфазный автомат на питающем щитке;

е) включить источник питания ИП1 и контактор К3, регулятором ИП1 установить ток, подаваемый в ротор при его синхронизации с вращающимся полем, $I_p = 10$ А (по амперметру А2);

ж) контактором К2 подключить к цепи ротора реостат R_p .

4. Запустить АД включением контактора К1, проследить за броском пускового тока I_1 (по амперметру А1).

Вывести последнюю ступень реостата R_p . Перевести ротор в синхронное вращение с полем, включив контактор К3, подающий в ротор постоянный ток. Сравнить измеренную синхронную частоту вращения n_1 с вычисленной. Вернуть двигатель в асинхронный режим (включить контактор К2).

5. Снять рабочие характеристики АД. Для этого возбудить реостатом R_B ГПТ до наибольшего напряжения и, увеличивая нагрузку от нуля до максимальной (переключателем R_{H2}), записать показания приборов в табл. 2.3. В числе устанавливаемых режимов должны быть номинальный (установить $n_{ном}$) и заданный в п. 4 предварительного задания (установить требуемую n). Плавная регулировка нагрузки в небольших пределах осуществляется реостатом R_B .

Таблица 2.3

Измерено							Вычислено		
АД					ГПТ		P , Вт	M , Н·м	η
n , мин^{-1}	U_1 , В	I_1 , А	P_1 , Вт	$\cos\varphi$	U_2 , В	I_2 , А			

Примечание. Мощность P на валу АД вычислить приближенно по формуле, исходящей из равенства потерь в АД и ГПТ

$$P = 0,5(P_1 + P_2),$$

где $P_2 = U_2 I_2$ – мощность, отдаваемая ГПТ нагрузке.

6. Построить в общей системе координат графики рабочих характеристик АД $n_*(P_*)$, $M_*(P_*)$, $\eta(P_*)$, $\cos\varphi(P_*)$.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Расчет предварительного задания к эксперименту.
3. Схема лабораторной установки.
4. Таблицы результатов измерений и вычислений.
5. Графики рабочих характеристик двигателя.

Контрольные вопросы

1. Как устроен АД с короткозамкнутым ротором?
2. Изложите принцип действия АД.
3. Что такое синхронная частота вращения и скольжение? Напишите формулы для этих величин.
4. Как изменяются скольжение и частота вращения АД при росте момента нагрузки?
5. Как изменить направление вращения ротора АД?
6. Как выражается момент двигателя через мощность и частоту вращения?
7. Запишите формулу Клосса и охарактеризуйте входящие в нее величины.
8. Почему ток холостого хода АД относительно велик?
9. Как изменятся КПД и коэффициент мощности с увеличением нагрузки АД?
10. Какие достоинства и недостатки имеют АД с короткозамкнутым ротором? Где эти двигатели используются?

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

Цель работы: изучение конструктивных особенностей, способов пуска и регулирования частоты вращения двигателя с фазным ротором; построение естественной и реостатной механических характеристик двигателя по его паспортным данным; снятие естественной и реостатной механических характеристик.

Общие сведения

Асинхронные двигатели с фазным ротором имеют лучшие пусковые свойства (большой пусковой момент, меньший пусковой ток), чем короткозамкнутые АД, позволяют сравнительно просто (изменением сопротивления реостата в цепи ротора) регулировать частоту вращения. Вместе с тем, эти двигатели конструктивно сложнее и дороже короткозамкнутых, менее надежны и более трудоемки в эксплуатации. Поэтому двигатели с фазным ротором применяют лишь в случаях, оправданных необходимостью: для привода оборудования с большим начальным моментом сопротивления и большим моментом инерции (молоты и прессы, снабженные маховиками), при частых пусках, грозящих перегреть двигатель пусковыми токами, при необходимости регулирования скорости (электрические краны).

Устройство статора двигателя с фазным ротором не отличается от устройства статора АД с короткозамкнутым ротором: полый цилиндрический сердечник, набранный из изолированных друг от друга листов электротехнической стали, имеет на внутренней поверхности пазы, в которых размещена трехфазная обмотка, включаемая непосредственно в сеть. Роторы у них различны. В пазах фазного ротора, называемого также ротором с контактными кольцами, находится трехфазная обмотка, выполненная изолированным проводом и размещенная в пазах ротора с пространственным смещением фаз на 120° , подобно обмотке статора. Фазы обмотки ротора соединяют звездой, а три свободных ее конца подключают к трем контактными кольцам, укрепленным на валу машины, но изолиро-

ванным от вала. На кольца наложены медно-графитовые щетки, установленные в неподвижных щеткодержателях. Через кольца и щетки, образующие при вращении скользящий контакт, в цепь ротора включается трехфазный реостат R_p (см. рис. 3.1), чем обеспечивается улучшение пусковых и регулировочных свойств машины. Щетки также позволяют замкнуть обмотку накоротко. Условное обозначение АД с фазным ротором приведено на рис. 3.2, б.

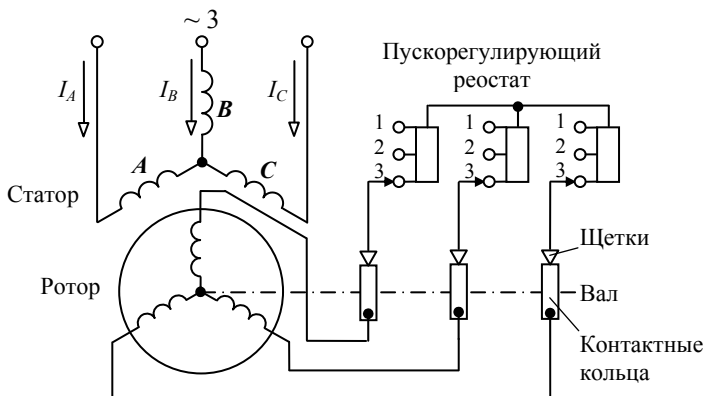


Рис. 3.1. Устройство статора двигателей с фазным ротором

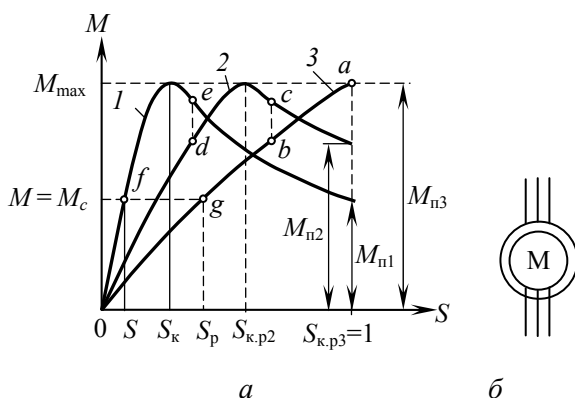


Рис. 3.2: а) характеристики $M(S)$;
б) условное обозначение АД с фазным ротором

Введение реостата в цепь ротора изменяет зависимость вращающего момента M от скольжения S , не влияя на величину наибольшего момента $M_{\max}$, который двигатель способен развить. На рис. 3.2, *a* показаны три характеристики $M(S)$: естественная характеристика 1 соответствует замкнутой накоротко обмотке ротора (сопротивление реостата $R_p = 0$), реостатные характеристики 2 и 3 соответствуют введенным одной и двум ступеням реостата. Как естественная, так и реостатные характеристики $M(S)$ описываются формулой Клосса:

$$M = \frac{2M_{\max}}{S/S_k + S_k/S};$$

$$M_p = \frac{2M_{\max}}{S_p/S_{k,p} + S_{k,p}/S_p},$$

где S_k – критическое скольжение при $R_p = 0$;

$$S_k = S_{\text{ном}} \left(K_M + \sqrt{K_M^2 - 1} \right);$$

$S_{k,p}$ – критическое скольжение при данном R_p ;

$$S_{k,p} = S_k \left(1 + R_p/R_2 \right);$$

R_2 – сопротивление фазы обмотки ротора;

$K_M = M_{\max}/M_{\text{ном}}$ – перегрузочная способность двигателя.

С увеличением сопротивления реостата R_p растет критическое скольжение $S_{k,p}$, кривая $M(S)$ наклоняется вправо и возрастает пусковой момент M_p (рис. 3.2, *a*). При $S_{k,p} = 1$ (кривая 3) пусковой момент достигает максимального: $M_{пз} = M_{\max}$. Дальнейшее увеличение R_p приводит к $S_{k,p} > 1$ и снижению пускового момента. Введение реостата в цепь ротора положительно влияет также на пусковой ток, снижая его примерно в 2 раза по сравнению с короткозамкнутым АД (до $I_{п}/I_{\text{ном}} = 2,5 \dots 4$).

Рассмотрим процесс пуска двигателя с фазным ротором, в цепь которого введен двухступенчатый реостат (рис. 3.1 и 3.2). При подаче на статор напряжения сети двигатель под действием пускового момента $M_{пз}$ трогается с места и начинает разгон. Момент M и

скольжение S изменяются по характеристике 3 (участок $a - в$). По мере увеличения частоты вращения n (уменьшения S) выводят сначала первую, а затем и вторую ступени реостата, чему соответствует последовательный переход на характеристики 2 (скачок $в - с$) и 1 (скачок $д - е$). Вывод ступеней реостата производят, ориентируясь на то, чтобы пуск происходил по возможности при больших значениях M , что сокращает время пуска. Процесс пуска заканчивается на естественной характеристике в точке f , где момент двигателя M уравнивается моментом сопротивления M_c на валу.

С помощью реостата в цепи ротора можно регулировать частоту вращения двигателя. Регулировочный реостат в отличие от пускового должен быть рассчитан на длительное протекание тока ротора. Например, двигатель работает на естественной характеристике при моменте $M = M_c$, скольжении S (точка f) и частоте вращения

$$n = n_1 (1 - S),$$

где $n_1 = \frac{60f_1}{p}$ – частота вращения магнитного поля статора.

Если ввести в ротор две ступени реостата, то двигатель перейдет на реостатную характеристику 3, где моменту $M = M_c$ соответствуют точка g , возросшее скольжение S_p и более низкая частота вращения $n_p = n_1 (1 - S_p)$. В регулировочном реостате имеются потери энергии, поэтому КПД двигателя снижается.

При расчете предварительного задания и проведении эксперимента помимо приведенных формул используются также следующие:

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1}; \quad M = 9,55 \frac{P}{n},$$

где M в Н·м, n в мин^{-1} .

Предварительное задание

По паспортным данным асинхронного двигателя: $P_{\text{ном}} = 750$ Вт, $n_{\text{ном}} = 900 \text{ мин}^{-1}$, $K_M = M_{\text{max}} / M_{\text{ном}} = 2$.

1. Рассчитать номинальный $M_{\text{ном}}$, максимальный M_{max} и пусковой $M_{\text{п}}$ моменты на валу двигателя; номинальное $S_{\text{ном}}$, критическое $S_{\text{к}}$ скольжения и соответствующую скольжению $S_{\text{к}}$ частоту вращения ротора $n_{\text{к}}$. Результаты расчетов записать в табл. 3.1 ($R_{\text{р}} = 0$) и на их основе построить естественную механическую характеристику $n(M)$.

Таблица 3.1

Величина Режим	$R_{\text{р}} = 0$			$R_{\text{р}}/R_2 =$ (из табл. 3.2)		
	$M, \text{Н} \cdot \text{м}$	S	$n, \text{мин}^{-1}$	$M_{\text{р}}, \text{Н} \cdot \text{м}$	$S_{\text{р}}$	$n_{\text{р}}, \text{мин}^{-1}$
Идеальный XX	0	0	1000	0	0	1000
Номинальный			900			
Критический						
Пуск		1	0		1	0

2. Определить величины п. 1 при введении в цепь ротора реостата $R_{\text{р}}$. Число ступеней реостата и относительное сопротивление $R_{\text{р}}/R_2$ приведены в табл. 3.2, где R_2 – активное сопротивление фазы ротора. Результаты расчетов записать в табл. 3.1.

Расчетные формулы:

$$S_{\text{ном. р}} = S_{\text{ном}} \left(1 + R_{\text{р}}/R_2\right), \quad n_{\text{ном. р}} = n_1 \left(1 - S_{\text{ном. р}}\right);$$

$$S_{\text{к. р}} = S_{\text{к}} \left(1 + R_{\text{р}}/R_2\right), \quad n_{\text{к. р}} = n_1 \left(1 - S_{\text{к. р}}\right);$$

$$M_{\text{ном. р}} = M_{\text{ном}}; \quad M_{\text{max. р}} = M_{\text{max}}; \quad M_{\text{п. р}} = \frac{2M_{\text{max}}}{1/S_{\text{к. р}} + S_{\text{к. р}}/1}.$$

Примечание. При двух и более ступенях регулировочного реостата $R_{\text{р}} \quad S_{\text{к. р}} > 1$.

Таблица 3.2

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Число ступеней реостата	1	2	3	4	1	2	3	4
$R_{\text{р}}/R_2$	1,2	2,4	3,8	5,5	1,2	2,4	3,8	5,5

3. По расчетам п. 2 построить реостатную механическую характеристику двигателя $n_p(M_p)$, совместив ее с ранее полученной естественной характеристикой $n(M)$. Определить кратность пускового момента $M_{п.р}/M_{п.}$.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с оборудованием, приборами, электрической схемой лабораторной установки.
2. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 3.3. Пригласить преподавателя для проверки правильности сборки.

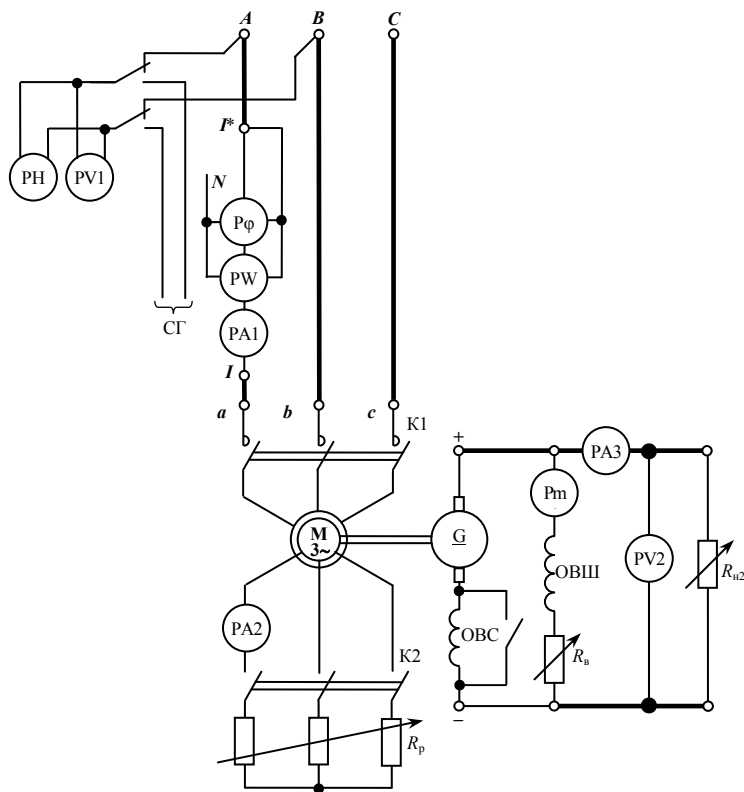


Рис. 3.3. Схема электрической цепи

3. Подготовить установку к пуску:
 - а) ввести пусковой реостат АД R_p ;
 - б) ввести реостат возбуждения R_v генератора постоянного тока (ГПТ) (ручку регулятора R_v установить в крайнее левое положение);
 - в) переключатель обмотки ОВС ГПТ установить в положение «Вкл. согл.» (по шкале $\underline{G}$);
 - г) переключатель нагрузки ГПТ $R_{н2}$ установить в положение «0»;
 - д) подать напряжение на лабораторный стенд, включив трехфазный автомат на питающем щитке;
 - е) контактором К2 подключить к цепи ротора АД реостат R_p .
 4. Запустить АД включением контактора К1, обратить внимание на величину пускового тока (амперметр А1). По мере разгона двигателя выводить реостат R_p .
 5. Снять естественную и реостатную механические характеристики $n(M)$. Для этого, возбуждив ГПТ реостатом R_v до наибольшего напряжения, увеличивать переключателем $R_{н2}$ нагрузку от нуля до максимальной, вначале при выведенном реостате R_p , затем при введенном (согласно варианту из табл. 3.2).
- Результаты измерений записать в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Число введенных ступеней R_p	Ступени нагрузки $R_{н2}$	Измерено					Вычислено		
		АД			ГПТ		ГПТ	АД	
		U_1 , В	P_1 , Вт	n , мин ⁻¹	U_2 , В	I_2 , А	P_2 , Вт	P , Вт	M , Н·м
0	0 ⋮ 5								
R_p/R_2 (см. табл. 3.2)	0 ⋮ 5								

Примечание. Мощность P на валу АД принять $P = 0,5(P_1 + P_2)$, где $P_2 = U_2 I_2$ – мощность, отдаваемая ГПТ нагрузке.

6. На построенные в предварительном задании естественные и искусственные механические характеристики нанести эксперимен-

тальные точки (M ; n) из табл. 3.3. Сопоставить расчетные и опытные значения частоты вращения $n_{\text{ном}}$ и $n_{\text{ном. р}}$, соответствующие моменту $M_{\text{ном}}$.

7. Снять зависимость частоты вращения n от сопротивления реостата R_p . С этой целью ввести 4 ступени R_p , установить переключателем R_{H2} 2-ю ступень нагрузки ГПТ и, поддерживая реостатом R_B напряжение ГПТ неизменным (для получения неизменной мощности $P_2 = U_2 I_2$), выводить реостат R_p .

Значения n для каждой ступени R_p записать в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Число ступеней R_p	0	1	2	3	4
Относительное сопротивление R_p/R_2	0	1,2	2,4	3,8	5,5
Частота вращения n , мин ⁻¹					

Построить график $n(R_p/R_2)$.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Расчет предварительного задания к эксперименту.
3. Схема лабораторной установки.
4. Таблицы результатов измерений и вычислений (см. табл. 3.1, 3.3, 3.4).
5. Графики естественной и реостатной механических характеристик и зависимость $n(R_p/R_2)$.

Контрольные вопросы

1. Как устроен АД с фазным ротором?
2. Каким образом и с какой целью в цепь обмотки ротора включается реостат?
3. Изложите принцип действия АД с фазным ротором.
4. Будет ли вращаться ротор АД, если разомкнуть его обмотку?

5. Как изменяются критическое скольжение, пусковой момент и пусковой ток при введении реостата в цепь ротора?

6. Объясните изменение частоты вращения АД при изменении сопротивления реостата в цепи ротора.

7. Каковы достоинства и недостатки АД с фазным ротором? Где эти двигатели применяются?

Лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Цель работы: изучение устройства, принципа действия, способов пуска и регулирования коэффициента мощности синхронного двигателя; исследование работы двигателя под нагрузкой; снятие и анализ основных характеристик двигателя.

Общие сведения

Синхронными называют электрические машины переменного тока, ротор которых в установившемся режиме вращается с той же частотой, что и вращающееся магнитное поле статора

$$n = \frac{60f}{p},$$

где f – частота электрического тока в обмотке статора, Гц;

p – число пар полюсов синхронной машины.

Синхронные машины применяют в качестве генераторов и двигателей. Синхронные двигатели используют для привода машин, работающих с неизменной скоростью: крупных компрессоров, насосов, прокатных станов и др. Синхронные микродвигатели применяют в устройствах, требующих строгого постоянства скорости вращения: электрочасах, самопишущих измерительных приборах, аппаратах записи и воспроизведения звука, устройствах автоматики.

Основными частями синхронной машины являются статор и ротор. Статор синхронной машины устроен так же, как у асинхронной. В литой корпус запрессован цилиндрический сердечник статора, набираемый из тонких изолированных друг от друга листов (колец) электротехнической стали. На внутренней стороне сердечника имеются пазы, в которых размещена трехфазная обмотка статора.

Ротор синхронной машины представляет двух- или многополюсный электромагнит, возбуждаемый постоянным током, который подают в обмотку ротора (обмотку возбуждения). Ротор может быть неявнополюсным и явнополюсным (см. рис. 4.1).

Неявнополюсный ротор (см. рис. 4.1, *а*) имеет два магнитных полюса ($p = 1$, $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$) и представляет собой цилиндрическую поковку из специальной стали, на поверхности которой выфрезерованы пазы для обмотки возбуждения. При числе пар полюсов $p \geq 2$ ($n \leq 1500 \text{ мин}^{-1}$) ротор выполняют явнополюсным (см. рис. 4.1, *б*). Явно выраженные полюсы набирают из листовых стали и закрепляют на ободу ротора, обмотку возбуждения выполняют в виде катушек, насаженных на полюсы. Число полюсов ротора и магнитного поля статора делают одинаковым.

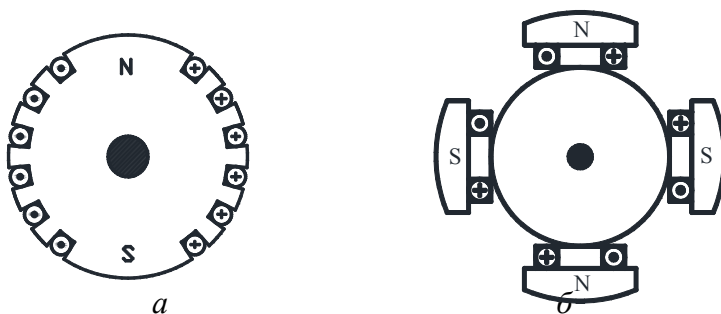


Рис. 4.1. Ротор:
а) неявнополюсный; *б*) явнополюсный

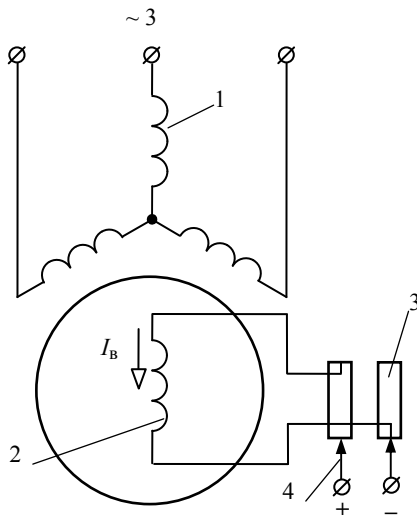


Рис. 4.2. Электрическая схема синхронной машины:
 1 – обмотка статора; 2 – обмотка возбуждения; 3 – контактные кольца; 4 – щетки

Концы обмотки возбуждения присоединены к двум контактным кольцам, закрепленным на валу, изолированно от него. К кольцам прилегают неподвижные щетки, образующие с кольцами скользящие контакты, позволяющие подавать в обмотку возбуждения вращающегося ротора постоянный ток от внешнего источника (возбудителя). Электрическая схема синхронной машины приведена на рис. 4.2.

Синхронный двигатель (СД), как и всякий электродвигатель, преобразует электрическую энергию в механическую.

Принцип действия СД состоит в следующем.

Выводы обмотки статора подключают к трехфазной сети. Трехфазная система токов, протекающая в фазах статорной обмотки, создает, как и в асинхронном двигателе, вращающееся магнитное поле с частотой вращения n и магнитным потоком полюса Φ_d . Предположим, что ротор разогнан до скорости $n_2 \approx 0,95n$ (о пуске СД см. ниже) и в его обмотку подан постоянный ток I_B , который возбуждает магнитное поле ротора с потоком Φ_0 . Полюсы вращающегося магнитного поля статора будут медленно перемещаться относительно магнитных полюсов ротора, при сближении разноимен-

ных полюсов они притягиваются, на ротор действует синхронизирующий электромагнитный момент, и он втягивается в синхронное вращение с полем статора. Возникает результирующее вращающееся магнитное поле машины $\Phi = \Phi_0 + \Phi_{\text{я}}$.

Уподобляя магнитные силовые линии упругим нитям, можно представить образование электромагнитного момента M как результат натяжения упругих «нитей», связывающих магнитные полюсы ротора и статора. Ведущим является магнитное поле статора. При отсутствии момента сопротивления на валу оси полюсов ротора и статора совпадают. Если двигатель нагрузить моментом M_c (момент сопротивления), то ротор будет смещаться относительно вращающегося поля статора в сторону отставания до тех пор, пока M за счет растяжения упругих «нитей» не возрастет до значения $M = M_c$, после чего синхронное вращение восстанавливается. При этом между полюсами статора и ротора образуется угол рассогласования θ . При снижении M_c после короткого переходного периода соответственно уменьшаются θ и M . Способность СД автоматически развивать вращающий момент, равный моменту сопротивления ($M = M_c$), называют саморегулированием вращающего момента.

На рис. 4.3, а приведена схема замещения одной фазы статора. Здесь E_0 – ЭДС, индуцируемая в обмотке статора магнитным потоком ротора Φ_0 , пересекающим обмотку статора при вращении ротора; X – синхронное индуктивное сопротивление обмотки статора, обусловленное собственными потоками статора: вращающимся $\Phi_{\text{я}}$ и небольшим пульсирующим потоком рассеяния $\Phi_{\text{рас}}$. Активным сопротивлением обмотки статора обычно пренебрегают. Схема замещения соответствует уравнению электрического состояния обмотки статора

$$\underline{U}_{\phi} = \underline{E}_0 + jX\underline{I},$$

на основании которого построена векторная диаграмма (см. рис. 4.3, б). Угол между векторами $\underline{E}_0$ и $\underline{U}_{\phi}$ равен углу рассогласования θ .

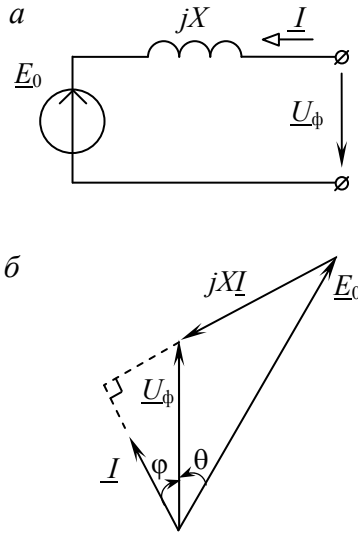


Рис. 4.3. Замещение одной фазы статора:
а) схема; б) диаграмма

Электромагнитный момент и электромагнитная мощность СД выражаются формулами:

$$M = \frac{3U_{\phi}E_0}{\Omega X} \sin \theta; \quad P_{\text{эм}} = M \Omega = \frac{3U_{\phi}E_0}{X} \sin \theta,$$

где Ω – синхронная угловая скорость вращения, рад/с;

$$M_{\text{max}} = \frac{3U_{\phi}E_0}{\Omega X} \text{ – наибольший электромагнитный момент.}$$

При постоянных значениях U_{ϕ} и E_0 момент $M_{\text{max}} = \text{const}$, а M определяется углом θ . Зависимость $M(\theta)$, представляющая в этих условиях синусоиду (см. рис. 4.4), называется угловой характеристикой СД.

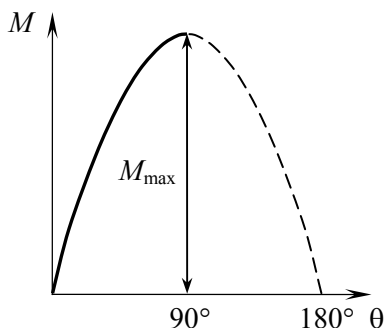


Рис. 4.4. Угловая характеристика СД

Двигатель работает устойчиво, если θ находится в пределах $\theta = 0 \dots 90^\circ$ (в номинальном режиме $\theta_{\text{ном}} = 25 \dots 30^\circ$). Именно в этом диапазоне момент M автоматически уравнивает момент сопротивления M_c при его изменениях. При увеличении M_c соответственно растут θ и M . При угле $\theta = 90^\circ$ двигатель развивает максимальный момент M_{max} . Если M_c превысит M_{max} , то θ перейдет в область $\theta > 90^\circ$, M снизится и не сможет больше уравнивать M_c . В этом случае двигатель выпадает из синхронного вращения, что проявляется в качаниях или полной остановке ротора. Отношение $M_{\text{max}}/M_{\text{ном}} = 1/\sin \theta_{\text{ном}}$ называется перегрузочной способностью двигателя и для различных СД находится в пределах от 2 до 3. Чем выше перегрузочная способность, тем устойчивее работает двигатель при случайных перегрузках. Перегрузочную способность можно повысить, увеличив ток возбуждения I_v , что приводит к росту E_0 и M_{max} .

Пуск синхронного двигателя сопряжен с определенными трудностями. Это вызвано тем, что при неподвижном роторе СД не развивает начального пускового момента, так как силы, действующие на полюсы неподвижного ротора со стороны вращающегося магнитного поля статора, изменяют направление 100 раз в секунду, и среднее значение момента равно нулю. Для пуска СД ротор необходимо предварительно разогнать до скорости, близкой к синхронной, а затем подать постоянный ток в обмотку возбуждения. Раньше для

разгона СД использовали небольшой вспомогательный электродвигатель. В настоящее время, как правило, применяют асинхронный пуск СД. Для этого в полюсные наконечники ротора закладывают короткозамкнутую пусковую обмотку по типу «белычье колесо». Запускают СД как асинхронный двигатель, а по достижении скорости, близкой к синхронной, в обмотку возбуждения подают постоянный ток, и двигатель втягивается в синхронизм.

Важным достоинством СД является способность изменять потребляемую реактивную мощность и коэффициент мощности $\cos \varphi$ при изменении тока возбуждения ротора. Если ток возбуждения, отвечающий $\cos \varphi = 1$, обозначить $I_{в1}$, то при токе $I_{в} < I_{в1}$ (недовозбуждение) двигатель наряду с активной мощностью будет потреблять индуктивную мощность, а при токе $I_{в} > I_{в1}$ (перевозбуждение) – емкостную мощность.

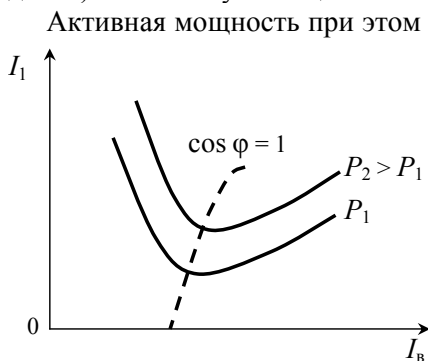


Рис. 4.5. Зависимость тока статора от тока возбуждения

Активная мощность при этом не изменяется, так как определяется нагрузкой на валу. Обычно СД работают без потребления реактивной мощности, при этом $\cos \varphi = 1$, или с потреблением емкостной мощности, что позволяет частично компенсировать индуктивную мощность, потребляемую другими потребителями электроэнергии предприятия, это – асинхронные двигатели, сварочные трансформаторы и другие. При токе возбуждения

$I_{в1}$ ($\cos \varphi = 1$) СД потребляет минимальный ток, равный активной составляющей тока. При изменении тока возбуждения $I_{в}$ в сторону уменьшения или увеличения потребляемый ток СД возрастает, так как появляется реактивная составляющая (индуктивная или емкостная). Зависимость тока статора I_1 от тока возбуждения $I_{в}$ при неизменной нагрузке на валу по форме напоминает букву *U* (см. рис. 4.5), поэтому кривые $I_1(I_{в})$ называют *U*-образными характеристиками.

Допустимый диапазон изменения I_B ограничен снизу пределом устойчивой работы СД (при уменьшении I_B снижается $M_{\max}$), а сверху – наибольшим $I_{B \max}$, на который рассчитан СД.

Обычно СД рассчитаны на работу с коэффициентом мощности $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,9$ в режиме перевозбуждения при номинальной нагрузке на валу.

В данной лабораторной работе в качестве СД используется асинхронный двигатель с фазным ротором, который переводится в синхронный режим путем подачи в обмотку ротора постоянного тока (синхронизируемый АД). Момент сопротивления на валу двигателя создает генератор постоянного тока, работающий на регулируемую нагрузку.

Предварительное задание

Для синхронного двигателя с обмоткой статора, соединенной звездой, заданы: линейное напряжение сети $U_L = 220$ В; мощность $P = 600$ Вт; ток возбуждения ротора I_B (табл. 4.1); синхронное индуктивное сопротивление $X = 70$ Ом; зависимость ЭДС фазы от тока возбуждения $E_0(I_B) = 30 + 16I_B$, В.

Таблица 4.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Ток возбуждения СД I_B , А	7	8	9	10	11	12	13	14

1. Вычислить угол рассогласования θ , пренебрегая потерями в статоре, т. е. принимая электромагнитную мощность $P_{\text{эм}}$ равной потребляемой P_1 .

2. Начертить схему замещения и построить векторную диаграмму СД.

3. Используя векторную диаграмму, определить падение напряжения $X I_1$, вычислить ток I_1 , потребляемый СД.

4. Определить коэффициент мощности $\cos\varphi$ СД в заданном режиме (из формулы $P_1 = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_1 \cos\varphi$).

Результаты расчета занести в табл. 4.4.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с оборудованием, приборами, электрической схемой лабораторной установки.

2. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 4.6. Пригласить преподавателя для проверки правильности сборки.

3. Подготовить установку к асинхронному пуску СД. Для этого:

а) ввести реостат R_p ;

б) ввести реостат R_v (ручку R_v установить в крайнее левое положение);

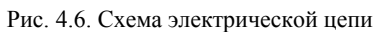
в) переключатель обмотки ОВС ГПТ установить в положение «Вкл. согл.» (по шкале $\underline{G}$);

г) включить трехфазный автомат на питающем щитке;

д) включить источник питания ИП1 и контактор К3, регулятором ИП1 установить ток ротора $I_v = 6$ А (по амперметру А2);

е) контактором К2 подключить к цепи ротора реостат R_p .

4. Осуществить асинхронный пуск СД. Включив контактор К1, подать напряжение на статор СД, по мере разгона двигателя вывести реостат R_p . После полного вывода R_p подать постоянный ток в обмотку ротора СД (включить контактор К3). Проследить за изменением частоты вращения двигателя, тока статора I_1 и коэффициента мощности при переходе от асинхронного к синхронному режиму. Результаты наблюдений занести в табл. 4.2.



Режим	f , Гц	n , мин ⁻¹	I_1 , А	$\cos \varphi$
Асинхронный				
Синхронный				

5. Изменяя регулятором ИП1 ток возбуждения ротора в пределах от 6 до 20 А, проследить, как он влияет на $\cos \varphi$ и ток статора I_1 .

6. Установить ток возбуждения ротора СД $I_b = 15$ А. Возбудить генератор постоянного тока, установив с помощью реостата R_b ток в цепи обмотки возбуждения ОВШ такой, чтобы на выходе генератора было напряжение $U_2 = 120$ В. Изменяя нагрузку генератора постоянного тока (ГПТ) переключателем $R_{н2}$ от нуля до максимальной, убедиться, что частота вращения СД не зависит от нагрузки.

7. Снять зависимость тока статора I_1 и $\cos \varphi$ от тока возбуждения ротора СД при холостом ходе ГПТ и при нагрузке (1-я ступень $R_{н2}$). Для этого при неизменной нагрузке ГПТ и, следовательно, фиксированной нагрузке на валу СД $P = \text{const}$ изменять ток возбуждения ротора СД от наибольшего ($I_b = 20$ А) до наименьшего, определяемого устойчивостью СД ($I_b = 5 \dots 6$ А при холостом ходе, $I_b = 7 \dots 8$ А при нагрузке). В числе устанавливаемых режимов должен быть отвечающий $\cos \varphi = 1$.

Результаты измерений занести в табл. 4.3.

Таблица 4.3

№ п/п	Измерено						Вычислено		
	СД				ГПТ		φ	tg φ	Q ₁ , вар
	I _в , А	I ₁ , А	P ₁ , Вт	cos φ	U ₂ , В	I ₂ , А			
	Холостой ход ГПТ								
1									
2									
3									
4									
5									
	ГПТ нагружен (P =)								
1									
2									
3									
4									
5									

Примечания:

а) мощность P на валу СД определить приближенно по формуле

$$P = 0,5(P_1 + P_2),$$

где P_1 – мощность, потребляемая СД при ($\cos \varphi = 1$);

$P_2 = U_2 I_2$ – мощность, отдаваемая ГПТ нагрузке;

б) потребляемая реактивная мощность $Q_1 = P_1 \tan \varphi$.

8. Регулируя нагрузку и возбуждение ГПТ, установить указанные в предварительном задании мощность P_1 , потребляемую СД, и ток возбуждения СД I_B . Сопоставить опытные данные с расчетом (табл. 4.4).

Таблица 4.4

	P_1 , кВт	I_1 , А	$\cos \varphi$
Расчет			
Опыт			

9. По данным табл. 4.3 построить U -образные характеристики $I_1(I_B)$ и (в общей системе координат) зависимости $\cos \varphi$ (I_B), $Q_1(I_B)$.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Расчет предварительного задания.
3. Электрическая схема лабораторной установки.
4. Таблицы результатов измерений.
5. Графики U -образных характеристик, зависимостей $\cos \varphi$ (I_B), Q_1 (I_B).

Контрольные вопросы

1. Как устроена синхронная машина?
2. Изложите принцип действия синхронного двигателя.
3. Что такое угол рассогласования θ ? В каком диапазоне θ работа СД устойчива?

4. В чем заключается свойство саморегулирования вращающего момента СД?
5. Как осуществляется асинхронный пуск СД?
6. Какую зависимость дает угловая характеристика СД?
7. Как увеличить устойчивость работы СД в синхронном режиме?
8. Как регулируют $\cos \varphi$ СД? При каких значениях $\cos \varphi$ СД обычно работают?
9. Что представляют собой U -образные характеристики СД?
10. Для чего используется способность СД работать с потреблением емкостной мощности?

Лабораторная работа № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО И СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Цель работы: изучение устройства, электрической схемы и принципа действия генератора; ознакомление с самовозбуждением и регулированием напряжения генератора; снятие и анализ характеристик холостого хода, внешних и регулировочной.

Общие сведения

Генератор постоянного тока преобразует механическую энергию первичного двигателя в электрическую энергию постоянного тока.

Неподвижная часть машины – *статор* – представляет цилиндрический стальной корпус, внутри которого расположены магнитные полюсы с обмотками возбуждения, питаемыми постоянным током. Полюсы создают внутри статора постоянное по величине и направлению магнитное поле.

Вращающаяся часть – *якорь* – это насаженный на вал барабан, набранный из тонких, изолированных друг от друга листов (дисков) электротехнической стали. На внешней поверхности якоря имеются пазы, в которых размещена обмотка якоря из медного изолированного провода. Обмотка якоря состоит из отдельных частей (секций). Каждая секция образует замкнутую цепь, отводы секций присоединяются к *коллектору* – цилиндру из клинообразных изолированных

друг от друга медных пластин. Коллектор укрепляется на валу и вращается вместе с якорем. Неподвижные графитовые щетки прилегают к тем пластинам коллектора, к которым присоединены секции якоря, находящиеся под полюсами. В этот момент времени в этих секциях наводится максимальная ЭДС. *Щеточно-коллекторное* устройство образует скользящий контакт между вращающейся обмоткой якоря и внешней цепью. Кроме того, оно позволяет получать максимальное постоянное по направлению напряжение на щетках.

Принцип действия генератора основан на явлении электромагнитной индукции. Якорь приводится во вращение первичным двигателем, обмотка якоря пересекает неподвижное магнитное поле, создаваемое главными полюсами, и в ней индуцируется переменная ЭДС, выпрямляемая с помощью коллектора и щеток. ЭДС генератора пропорциональна частоте вращения n и магнитному потоку пары полюсов Φ

$$E = C_E n \Phi,$$

где C_E – конструктивная постоянная машины.

Если к генератору подключена нагрузка, то в обмотке якоря течет ток $I_{\text{я}}$. Взаимодействие тока якоря с магнитным полем создает тормозной электромагнитный момент, уравнивающий вращающийся момент первичного двигателя.

Генераторы параллельного и смешанного возбуждения являются машинами с *самовозбуждением*. Генератор параллельного возбуждения имеет на главных полюсах обмотку возбуждения ОВШ (шунтовую), подключаемую параллельно якорю (см. рис. 5.1, а). Генератор смешанного возбуждения, кроме обмотки ОВШ, являющейся основной, имеет еще обмотку возбуждения ОВС (сериесную), размещенную на тех же полюсах и включаемую последовательно с якорем. Обмотка ОВС улучшает работу генератора в нагрузочном режиме.

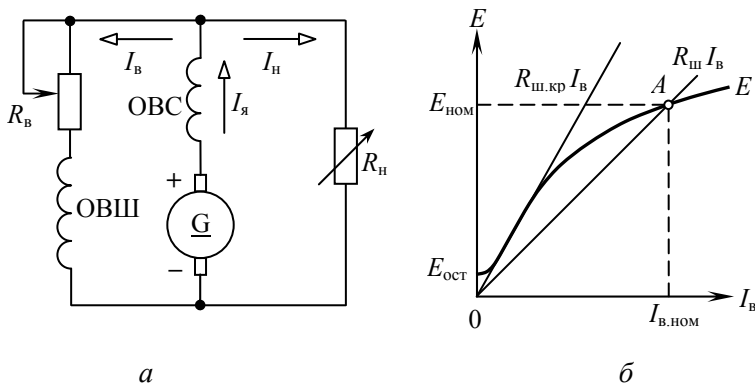


Рис. 5.1. Генератор параллельного возбуждения:
а) схема; б) диаграмма

Самовозбуждение генератора происходит за счет остаточной намагниченности полюсов машины. При вращении якоря остаточный поток полюсов $\Phi_{\text{ост}}$ наводит в обмотке якоря небольшую ЭДС $E_{\text{ост}} = (2...6) \% E_{\text{ном}}$, которая вызывает ток возбуждения I_B в обмотке ОВШ. Ток усиливает магнитное поле, что приводит к увеличению ЭДС и тока I_B . Процесс нарастает до некоторых установившихся значений I_B , Φ , E , при которых падение напряжения в цепи ОВШ $R_{\text{ш}} I_B$ равно ЭДС якоря E (точка A на рис. 5.1, б). Самовозбуждение генератора возможно, если сопротивление цепи возбуждения $R_{\text{ш}} = R_B + R_{\text{овш}}$ меньше некоторого критического значения $R_{\text{ш. кр}}$, при котором самовозбуждение не происходит.

Зависимость $E(I_B)$ при $n = \text{const}$, $I_A = 0$ называют *характеристикой холостого хода* (см. рис. 5.1, б). Так как при $n = \text{const}$ ЭДС $E \sim \Phi$, то зависимость $E(I_B)$ в другом масштабе является также магнитной характеристикой машины.

При подключении к генератору нагрузки возникает ток якоря $I_A = I_B + I_H$, который возбуждает магнитное поле якоря. Воздействие магнитного потока, созданного током якоря, на основной поток полюсов называют *реакцией якоря*. Реакция якоря несколько искажает результирующее поле машины, а при больших токах нагрузки — ослабляет его.

Напряжение на зажимах генератора параллельного возбуждения

$$U = E - R_{\text{я}} I_{\text{я}} = C_E n \Phi - R_{\text{я}} I_{\text{я}}$$

с ростом нагрузки значительно снижается вследствие увеличения падения напряжения в якоре $R_{\text{я}} I_{\text{я}}$ и уменьшения магнитного потока Φ . Причем последнее вызывается частично реакцией якоря, но главным образом – уменьшением тока возбуждения $I_{\text{в}}$ в связи с понижением напряжения U на зажимах генератора, к которым подключена обмотка ОВШ.

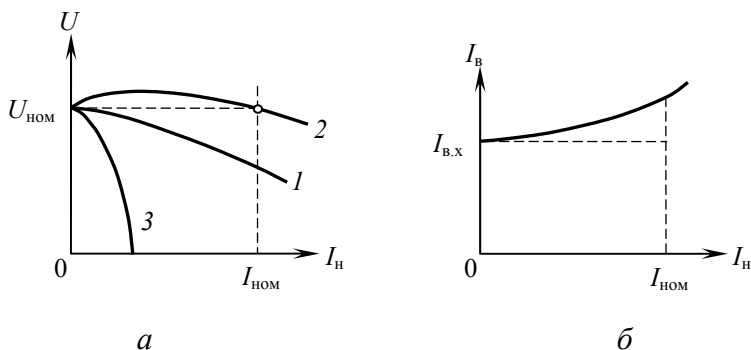


Рис. 5.2. Характеристика генератора параллельного возбуждения:
а) внешние; б) регулировочные

Зависимость $U(I_{\text{н}})$ при $R_{\text{в}} = \text{const}$ и $n = \text{const}$ называют *внешней характеристикой генератора*. Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения показана на рис. 5.2, а (кривая 1). Основным недостатком этого генератора – значительные колебания напряжения (до 20 %) при изменениях тока нагрузки $I_{\text{н}}$, в то время как для нормальной работы приемников электроэнергии отклонения напряжения от номинального не должны превышать $\pm 5\%$.

Этот недостаток устранен в генераторе смешанного возбуждения, имеющего две обмотки возбуждения ОВШ и ОВС, которые могут включаться согласно или встречно. При согласном включении результирующая магнитодвижущая сила (МДС) равна сумме МДС обеих обмоток, магнитный поток полюсов $\Phi = \Phi_{\text{ОВШ}} + \Phi_{\text{ОВС}}$, напряжение генератора

$$U = E - (R_{\text{я}} + R_{\text{овс}})I_{\text{я}} = C_E n(\Phi_{\text{овш}} + \Phi_{\text{овс}}) - (R_{\text{я}} + R_{\text{овс}})I_{\text{я}}.$$

С ростом нагрузки и тока якоря $I_{\text{я}}$ поток $\Phi_{\text{овс}}$ возрастает так, что вызванное им увеличение ЭДС E приблизительно компенсирует снижение напряжения (из-за падения напряжения $(R_{\text{я}} + R_{\text{овс}})I_{\text{я}}$ и реакции якоря), вследствие чего напряжение генератора изменяется незначительно (кривая 2, см. рис. 5.2, а).

При встречном включении ОВШ и ОВС их МДС вычитаются, что дает круто падающую внешнюю характеристику (кривая 3, см. рис. 5.2, а). Подобные генераторы используются в электродуговой сварке, где требуется постоянство тока при изменении сопротивления и напряжения на дуге.

Для поддержания напряжения генератора параллельного или смешанного возбуждения неизменным регулируют ток параллельной обмотки возбуждения $I_{\text{в}}$ реостатом $R_{\text{в}}$. Зависимость $I_{\text{в}}(I_{\text{н}})$ при $U = \text{const}$, $n = \text{const}$ называют *регулирующей характеристикой* (см. рис. 5.2, б).

В данной работе используется генератор постоянного тока смешанного возбуждения, обмотка ОВС которого с помощью переключателя может отключаться либо включаться согласно или встречно с обмоткой ОВШ. Генератор работает на регулируемую нагрузку. Вращение генератора производится синхронизированным асинхронным двигателем, обеспечивающим постоянную частоту вращения.

Предварительное задание

Для генератора постоянного тока смешанного возбуждения заданы: сопротивление цепи якоря ($R_{\text{я}} + R_{\text{овс}} = 6 \text{ Ом}$); характеристика холостого хода $E_{\text{ш}}(I_{\text{в}})$, $E_{\text{ш}} = 12 + 570I_{\text{в}} - 1400I_{\text{в}}^3 \text{ В}$. Ток возбуждения $I_{\text{в}}$ в обмотке ОВШ, ток нагрузки $I_{\text{н}}$, коэффициент увеличения результирующего магнитного потока $K_{\Phi} = \Phi/\Phi_{\text{овш}}$ выбираются в соответствии с вариантом из табл. 5.1.

Таблица 5.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
I_B, A	0,15	0,2	0,25	0,3	0,1	0,15	0,25	0,35
I_H, A	2,5	4,5	4,0	4,0	2,2	4,2	2,0	4,2
$K_\Phi = \Phi/\Phi_{овш}$	1,4	1,3	1,15	1,1	1,7	1,5	1,1	1,1

Включение обмоток возбуждения – согласное, частота вращения $n = \text{const}$.

Требуется определить напряжение U на выводах генератора.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с оборудованием, приборами, электрической схемой лабораторной установки.

2. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 5.3. Пригласить преподавателя для проверки правильности сборки.

3. Подготовить установку к работе:

а) ввести реостат R_p ;

б) ввести реостат R_B ГПТ (ручку R_B установить в крайнее левое положение);

в) переключатель обмотки ОВС ГПТ установить в положение «ОВС откл.» (по шкале $\underline{G}$);

г) переключатель нагрузки ГПТ R_{H2} установить в положение «0»;

д) подать напряжение на лабораторный стенд, включив трехфазный автомат на питающем щитке;

е) включить источник питания ИП1 и контактор К3, регулятором ИП1 установить ток, подаваемый в ротор двигателя, $I_p = 6 A$ (по амперметру А2);

ж) контактором К2 подключить к ротору реостат R_p .

4. Запустить двигатель и вывести его на синхронную частоту вращения, для чего включить контактор К1. По мере разгона двигателя выводить реостат R_p , затем включить контактор К3, подающий постоянный ток в ротор двигателя.

Таблица 5.2

I_B, A								
E, B								

6. Снять внешние характеристики генератора $U(I_H)$ при трех способах возбуждения: параллельном и смешанном с согласным и встречным включением ОВС. Для этого переключателем ОВС осуществить необходимую схему включения ОВС, реостатом R_B установить напряжение генератора при холостом ходе $U = U_{ном} = 110 B$ и, увеличивая переключателем R_{H2} ток нагрузки от нуля до наибольшего при $R_B = const$, записать показания приборов в табл. 5.3.

Чтобы обеспечить устойчивую работу двигателя при росте нагрузки ГПТ, необходимо при отключенной и включенной согласно ОВС регулятором ИП1 увеличить ток, подаваемый в ротор двигателя, до $I_B = 10 \dots 14 A$.

Таблица 5.3

ОВС отключена			ОВС вкл. согласно			ОВС вкл. встречно		
U, B	I_{H2}, A	I_B, A	U, B	I_{H2}, A	I_B, A	U, B	I_{H2}, A	I_B, A

6. Снять регулировочную характеристику $I_B(I_H)$ при $U = const$ генератора параллельного возбуждения в случаях, когда ОВС отключена, ОВС включена согласно, ОВС включена встречно. Для этого при холостом ходе генератора установить напряжение $U = U_{ном} = 110 B$ и, поддерживая его неизменным с помощью реостата R_B , увеличивать нагрузку. Результаты опыта записать в табл. 5.4.

Таблица 5.4

ОВС отключена	I_B, A					
	I_H, A					
ОВС вкл. согласно	I_B, A					
	I_H, A					
ОВС вкл. встречно	I_B, A					
	I_H, A					

8. Выполнить опытную проверку расчета предварительного задания (табл. 5.5).

Таблица 5.5

	I_B, A	I_H, A	U, B
Расчет			
Опыт			

9. По результатам измерений построить характеристики холостого хода, внешние (в одной системе координат) и регулировочные.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Расчет предварительного задания;
3. Электрическая схема лабораторной установки.
4. Таблицы результатов измерений;
5. Графики характеристик холостого хода, внешних и регулировочных;
6. Выводы о влиянии последовательной обмотки возбуждения и способа ее включения на внешнюю характеристику генератора.

Контрольные вопросы

1. Объясните устройство генераторов параллельного и смешанного возбуждения, принцип их работы.
2. Как происходит самовозбуждение генератора? При каких условиях генератор может не возбудиться?

3. Каково назначение коллектора и щеток?
4. От чего зависит ЭДС генератора?
5. Как получают характеристику холостого хода генератора? Каковы ее особенности?
6. Какие факторы вызывают снижение напряжения генератора параллельного возбуждения с ростом нагрузки?
7. Как можно регулировать напряжение генератора параллельного возбуждения при переменной нагрузке?
8. Какие преимущества имеет генератор смешанного возбуждения по сравнению с генератором параллельного возбуждения?

Лабораторная работа № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА СМЕШАННОГО И ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Цель работы: изучение устройства и принципа действия двигателя постоянного тока; освоение приемов расчета основных электрических и механических величин; снятие и анализ рабочих характеристик двигателя.

Общие сведения

Двигатель постоянного тока (ДПТ) состоит из неподвижной части (статора) и вращающейся части (якоря), разделенных воздушным зазором. Статор имеет станину, на внутренней поверхности которой крепятся основные и дополнительные полюсы. Основные полюсы с обмотками возбуждения служат для создания в машине магнитного потока, а дополнительные – для улучшения коммутации. Вращающаяся часть машины (якорь) состоит из сердечника, обмотки и коллектора. Сердечник имеет цилиндрическую форму. Он набирается из колец или сегментов листовой электротехнической стали, на внешней поверхности которых выштампованы пазы. В пазы сердечника укладываются секции, которые выводятся на коллектор и припаиваются к его пластинам, образуя замкнутую обмотку якоря. Коллектор набран из медных пластин клинообразной формы, изолированных друг от друга и от корпуса изолирующими прокладками, образующих в сборе цилиндр, который крепится на валу якоря. Электрические машины постоянного тока могут работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя, т. е. обладают свойствами обратимости. В режиме двигателя осуществляется преобразование электрической энергии постоянного тока в механическую энергию, снимаемую на валу.

По способу возбуждения различают: двигатели независимого возбуждения; двигатели параллельного возбуждения; двигатели последовательного возбуждения; двигатели смешанного возбуждения.

На рис. 6.1 приведена схема включения двигателя смешанного возбуждения. Магнитное поле двигателя возбуждается двумя обмотками: обмоткой параллельного возбуждения ОВШ и обмоткой

последовательного возбуждения ОВС. В двигательном режиме работы обмотки включены согласно. Двигатель параллельного возбуждения имеет только обмотку ОВШ.

При подаче на щетки двигателя напряжения U от внешнего источника электроэнергии по обмоткам якоря и возбуждения протекают токи, которые возбуждают магнитный поток Φ двигателя двумя обмотками: обмоткой параллельного возбуждения $\Phi_{\text{ОВШ}}$ и обмоткой последовательного возбуждения $\Phi_{\text{ОВС}}$

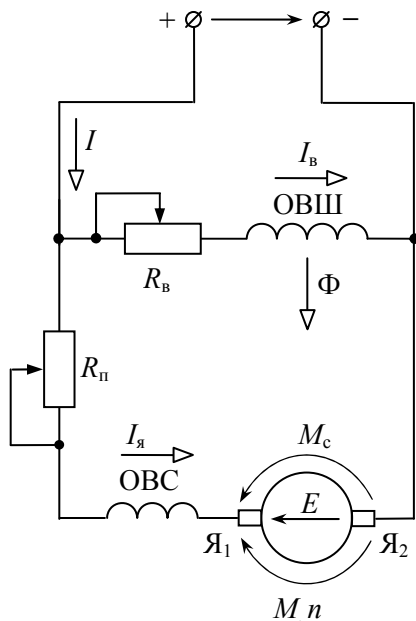


Рис. 6.1. Схема включения двигателя смешанного возбуждения

$$\Phi = \Phi_{\text{ОВШ}} + \Phi_{\text{ОВС}} .$$

В результате взаимодействия тока якоря $I_{\text{я}}$ и магнитного потока Φ создается вращающийся момент

$$M = C_{\text{м}} \Phi I_{\text{я}} , \quad (6.1)$$

где $C_{\text{м}}$ – постоянная машины, зависящая от ее конструктивных данных.

Вращающий момент M двигателя уравнивается моментом сопротивления $M_{\text{с}}$ рабочей машины. В данной работе нагрузкой на валу двигателя является трехфазный синхронный генератор (СГ) переменного тока, к которому подключается регулируемое нагрузочное сопротивление $R_{\text{н1}}$. При вращении якоря с частотой n его обмотка пересекает магнитный поток Φ и в ней согласно закону электромагнитной индукции наводится ЭДС

$$E = C_{\text{е}} \Phi n , \quad (6.2)$$

где $C_{\text{е}}$ – конструктивная постоянная машины.

Ток якоря $I_{\text{я}}$ и ЭДС E направлены навстречу друг другу (см. рис. 6.1), поэтому E обычно называют противо-ЭДС. Напряжение на зажимах якоря U равно сумме противо-ЭДС и падения напряжения на внутреннем сопротивлении якоря:

$$U = E + R_{\text{я}} I_{\text{я}}. \quad (6.3)$$

Из выражений (6.3) и (6.2) ток якоря определяется по формуле

$$I_{\text{я}} = \frac{U - C_{\text{е}} \Phi n}{R_{\text{я}}}. \quad (6.4)$$

В момент пуска, когда $n = 0$, ЭДС в обмотке якоря также равна нулю, и ток якоря достигает значения

$$I_{\text{я}} = \frac{U}{R_{\text{я}}} = (10 \dots 30) I_{\text{я. ном}},$$

что недопустимо. Для ограничения пускового тока $I_{\text{п. я}}$ в цепь якоря включается пусковой реостат $R_{\text{п}}$ (см. рис. 6.1). Величина пускового тока в этом случае

$$I_{\text{п. я}} = \frac{U}{R_{\text{я}} + R_{\text{п}}}.$$

Искусственное (с помощью пускового реостата) снижение пускового тока приводит, как это видно из формулы (6.1), к снижению пускового момента $M_{\text{п}}$. Чтобы сохранить достаточную величину $M_{\text{п}}$, необходимо запускать двигатель при максимальном потоке, для чего регулировочный реостат $R_{\text{в}}$ в цепи ОВШ должен быть в момент пуска полностью выведен, $R_{\text{в}} = 0$.

При разгоне двигателя возрастает частота вращения n , противо-ЭДС $E = C_{\text{е}} \Phi n$ увеличивается, а ток якоря $I_{\text{я}} = \frac{U - E}{R_{\text{я}}}$ уменьшается, поэтому реостат $R_{\text{п}}$ постепенно выводится. В установившемся

режиме, когда $M = M_c$, пусковой реостат R_{Π} полностью выведен, ток якоря достигает значения, определяемого нагрузкой двигателя. С ростом нагрузки $M_c > M$, что вызывает уменьшение частоты вращения n и соответствующее увеличение тока якоря $I_{\text{я}}$ (6.4) и вращающего момента M (6.1) до тех пор, пока не наступит новое равенство $M = M_c$ при сниженной частоте вращения n . При уменьшении нагрузки на валу двигателя $M_c < M$ частота вращения n увеличивается, а ток якоря уменьшается. Таким образом, всякое изменение нагрузки на валу двигателя вызывает в нем автоматическое изменение $n, I_{\text{я}}, M$.

Подставляя в уравнение (6.3) выражение ЭДС и полагая, что в цепь якоря может быть включено добавочное сопротивление $R_{\text{д}}$ (в данной работе $R_{\text{д}} = R_{\Pi}$), получаем уравнение скоростной характеристики двигателя

$$n = \frac{U - I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\Pi})}{C_{\text{е}}\Phi}. \quad (6.5)$$

Основной характеристикой двигателя является механическая характеристика, выражающая зависимость $n(M)$. Используя соотношения (6.1) и (6.5), запишем уравнение механической характеристики

$$n = \frac{U}{C_{\text{е}}\Phi} - \frac{(R_{\text{я}} + R_{\Pi})}{C_{\text{е}}C_{\text{м}}\Phi^2} \cdot M = n_x - \Delta n.$$

Как видно, частоту вращения двигателя можно регулировать тремя способами: включением реостата $R_{\text{д}}$ в цепь обмотки якоря (реостатное регулирование); изменением магнитного потока Φ , т. е. изменением $I_{\text{в}}$ (полюсное регулирование); изменением питающего напряжения U (якорное регулирование).

Механическую характеристику $n(M)$, получаемую при $R_{\Pi} = 0$, $\Phi = \Phi_{\text{ном}}$ и $U = U_{\text{ном}}$, называют естественной. При реостатном способе регулирования искусственные механические характеристики более мягкие, чем естественные, так как с введением $R_{\text{д}}$ в цепь

обмотки якоря увеличивается наклон характеристик $n(M)$. При полном регулировании, которое обычно состоит в уменьшении тока возбуждения I_B , увеличиваются скорость идеального холостого хода n_x и наклон характеристик $n(M)$. В случае якорного регулирования изменится только величина n_x , а наклон характеристик останется неизменным. Эксплуатационные свойства двигателя определяются рабочими характеристиками n , I , M , $f(P)$ при $U = \text{const}$ и $R_B = \text{const}$.

Для построения рабочих характеристик двигателя используются следующие соотношения. Мощность, потребляемая двигателем из сети

$$P_1 = U_1 I_1.$$

Мощность, отдаваемая генератором

$$P_2 = \sqrt{3} U_2 I_2,$$

так как нагрузка синхронного генератора (СГ) чисто активная.

Коэффициент полезного действия двигателя

$$\eta = \frac{P}{P_1}.$$

Полезная мощность на валу двигателя

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

где $\Delta P = \frac{P_1 - P_2}{2}.$

Ток возбуждения двигателя параллельного и смешанного возбуждения определяется по закону Ома

$$I_B = \frac{U_{\text{НОМ}}}{R_B + R_{\text{ОВШ}}}$$

и не зависит от нагрузки двигателя ($R_{\text{в}}$ принять равным 0). Ток I , потребляемый из сети двигателем параллельного или смешанного возбуждения, определяется по первому закону Кирхгофа

$$I = I_{\text{я}} + I_{\text{в}}$$

и изменяется при изменении нагрузки.

Номинальный момент двигателя

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \frac{P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}}.$$

Момент M на валу двигателя для заданного варианта определяется по уравнению (6.1)

$$C_{\text{м}} \Phi = \frac{M_{\text{ном}}}{I_{\text{я. ном}}}.$$

Номинальный ток якоря: $I_{\text{я. ном}} = I_{\text{ном}} - I_{\text{в}}$. Против-ЭДС $E_{\text{ном}}$ определяется из уравнения (6.3).

Частота вращения якоря n для заданного варианта определяется по уравнению (6.5) при $R_{\text{п}} = 0$.

Предварительное задание

Для двигателя постоянного тока в табл. 6.1 заданы номинальные величины: мощность на валу $P_{\text{ном}}$, номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$, частота вращения якоря $n_{\text{ном}}$, КПД $\eta_{\text{ном}}$, сопротивление обмотки якоря $R_{\text{я}}$, сопротивление обмотки возбуждения $R_{\text{в}}$. Определить:

1. Номинальные значения мощности и тока $P_{\text{1ном}}$, $I_{\text{ном}}$, потребляемые двигателем из сети.
2. Номинальный ток якоря $I_{\text{я. ном}}$, ток возбуждения $I_{\text{в}}$, а также номинальную против-ЭДС $E_{\text{ном}}$.
3. Ток I_1 , потребляемый двигателем из сети, согласно своему варианту, заданному в табл. 6.1.

4. Номинальный момент $M_{\text{ном}}$, а также момент M на валу двигателя для своего варианта.

5. Частоту вращения якоря n для заданного в табл. 6.1 относительного значения тока якоря при номинальном напряжении сети $U_{\text{ном}}$ и номинальном потоке $\Phi_{\text{ном}}$ обмотки ОВШ (потоком ОВС пренебречь).

6. Результаты предварительного расчета к эксперименту записать в табл. 6.3.

Таблица 6.1

№ варианта	Тип двигателя (ДПТ)	$P_{\text{ном}}, \text{кВт}$	$U_{\text{ном}}, \text{В}$	$n_{\text{ном}}, \text{мин}^{-1}$	$\eta_{\text{ном}}$	$R_{\text{я}}, \text{Ом}$	$R_{\text{овш}}, \text{Ом}$	$I_{\text{я}}^* = \frac{I_{\text{я}}}{I_{\text{яном}}}$
1	ПЗ1УЧ	0,88	220	1 070	0,8	7,3	390	0,3
2	ПЗ1-С1-УЧ	0,88	220	1 180	0,8	4,3	564	0,4
3	ПЗ1М	0,88	220	1 088	0,8	5,7	415	0,5
4	ПЗ1УЧ	0,82	220	1 080	0,75	5,1	386	0,6
5	ПЗ1М	0,61	130	1 197	0,74	1,7	158	0,7
6	П418-5	2,7	230	1 450	0,82	2,8	217	0,8
7	П55Л183	0,8	130	1 450	0,74	2,1	163	0,9
8	ПЗ1	1,0	230	1 450	0,75	4,9	378	1

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторным стендом, приборами, электромашинным агрегатом.

2. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 6.2. Пригласить преподавателя для проверки правильности сборки электрической цепи.

3. Подготовить установку к работе:

а) ввести пусковой реостат $R_{\text{п}}$ (ручку $R_{\text{п}}$ установить в крайнее левое положение);

б) переключить обмотку возбуждения ОВС двигателя, установить в положение «Вкл. согл.» (по шкале $\underline{M}$);

в) вывести реостат возбуждения $R_{\text{в}}$ (ручку $R_{\text{в}}$ установить в крайнее правое положение);

- [illegible]

60

4. Запустить ДПТ включением контактора К4, по мере разгона ДПТ вывести пусковой реостат $R_{\text{п}}$.

5. Выполнить:

а) реостатное регулирование и проследить, как изменяется частота вращения двигателя с изменением сопротивления $R_{\text{п}}$, включенного в цепь обмотки якоря;

б) полюсное регулирование и проследить, как изменяется частота вращения двигателя с изменением $I_{\text{в}}$ и магнитного потока Φ .

6. Снять рабочие характеристики ДПТ смешанного возбуждения. Для этого, изменяя ток возбуждения СГ регулятором ИП1, записать в табл. 6.2 не менее пяти измерений (при токе возбуждения 0; 4; 8; 12; 16 А).

Таблица 6.2

Двигатель (ДПТ)								Генератор (СГ)			
Измерено				Вычислено				Измерено			
U_1 , В	I_1 , А	$I_{\text{в}}$, А	n , мин ⁻¹	P_1 , Вт	M , Н·м	η	P , Вт	U_2 , В	I_2 , А	$I_{\text{в}}$, А	P_2 , Вт

7. Сопоставить результаты расчета предварительного задания с экспериментом, установив ток I , потребляемый двигателем из сети, согласно расчету, и записать в табл. 6.3.

Таблица 6.3

	I , А	$I_{\text{в}}$, А	M , Нм	n , мин ⁻¹
Расчет				
Эксперимент				

8. Построить совмещенные графики рабочих характеристик ДПТ смешанного возбуждения η , n , I , $M = f(P)$.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Расчет предварительного задания к эксперименту.
3. Схема лабораторной установки.
4. Таблицы результатов измерений и вычислений.
5. Графики рабочих характеристик двигателя смешанного возбуждения.

Контрольные вопросы

1. Объяснить устройство двигателя параллельного и смешанного возбуждения, принцип их работы.
2. Какова роль коллектора при работе машины в режимах двигателя и генератора?
3. Почему пусковой ток I_{Π} при отсутствии реостата R_{Π} значительно превышает $I_{ном}$?
4. Почему с увеличением нагрузки двигателя уменьшается частота вращения n ?
5. Какие возможны способы регулирования частоты вращения?
6. Почему с уменьшением тока возбуждения $I_{\text{в}}$ возрастает n ?

Лабораторная работа № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Цель работы: Изучение устройства и принципа действия синхронного генератора; включение синхронного генератора на параллельную работу с сетью; исследование работы синхронного генератора в автономном режиме и построение по опытным данным характеристик генератора.

Общие сведения

Синхронный генератор (СГ) преобразует механическую энергию первичного двигателя в электрическую энергию переменного тока (см. рис. 7.1). Неподвижная часть машины – *статор* – представляет собой стальной или чугунный корпус 1, в котором закреплен цилиндрический магнитопровод 2 (сердечник), набранный из отдельных, изолированных друг от друга пластин электротехнической стали. В пазах магнитопровода размещена трехфазная обмотка 4. В пазах магнитопровода размещена трехфазная обмотка 4.

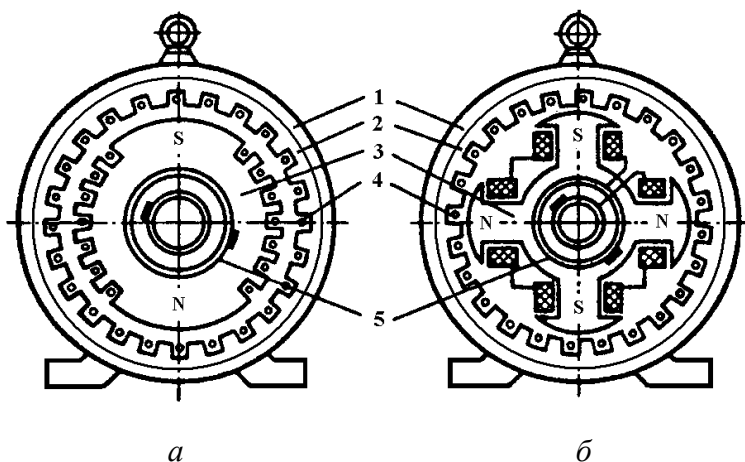


Рис. 7.1. Ротор синхронных генераторов:

а) невнополюсный; б) явнополюсный;

1 – чугунный корпус; 2 – сердечник; 3 – ротор; 4 – трехфазная обмотка;
5 – контактные кольца

Вращающаяся часть машины – *ротор* – это электромагнит постоянного тока 3. Обмотка возбуждения ротора питается от внешнего источника постоянного тока через контактные кольца 5, расположенные на валу ротора, и неподвижные щетки (угольные или медные), укрепленные на щеткодержателях на корпусе статора и прилегающие к кольцам.

Роторы синхронных генераторов могут быть явнополюсными и неявнополюсными. *Явнополюсный* ротор (см. рис. 7.1, б) представляет собой массивное стальное колесо, насаженное на вал. По внешней стороне колеса крепятся сердечники полюсов с обмоткой возбуждения. Такая конструкция позволяет размещать на роторе большое число полюсов, что необходимо для машин с небольшой частотой вращения (гидрогенераторы). *Неявнополюсный* ротор (см. рис. 7.1, а) представляет собой массивный цилиндр, насаженный на вал. На внешней поверхности цилиндра имеются пазы, в которые укладывается обмотка возбуждения. Такая конструкция ротора допускает большие окружные скорости, что необходимо для машин с большой частотой вращения (турбогенераторы).

Для синхронных генераторов характерна жесткая связь между частотой тока статора (f) и частотой вращения ротора (n)

$$f = \frac{n p}{60},$$

где p – число пар полюсов.

Принцип действия генератора основан на явлении электромагнитной индукции. Первичный двигатель (например, турбина) приводит ротор во вращение. Постоянное магнитное поле ротора, созданное током возбуждения, пересекает обмотку статора и индуцирует в каждой ее фазе синусоидальные ЭДС, одинаковые по амплитуде и частоте, но сдвинутые по фазе на $1/3$ периода. Действующее значение ЭДС

$$E_0 = 4,44 w f \Phi_0,$$

где w – число витков фазы обмотки статора;

Φ_0 – магнитный поток полюса ротора.

Если к обмотке статора подключить нагрузку, то под действием ЭДС E_0 в фазах статора и нагрузке потечет ток I . Таким образом, потребляя механическую энергию первичного двигателя, генератор отдает в нагрузку электрическую энергию.

Магнитное поле, возбужденное током статора, складывается с магнитным полем полюсов ротора и образует результирующее магнитное поле машины. Магнитный поток результирующего поля Φ , взаимодействуя с током обмотки статора I , образует тормозной электромагнитный момент $M_{эм}$, который противодействует вращающему моменту первичного двигателя $M_{вр}$. В установившемся режиме

$$M_{вр} = M_{эм}.$$

Электромагнитная мощность, развиваемая синхронным генератором,

$$P_{эм} = 3E_0 \cdot I \cdot \cos\Psi = \frac{3E_0U_{\phi}}{X} \sin\theta,$$

где Ψ – угол между векторами $\underline{E}_0$ и $\underline{I}$;

θ – угол рассогласования.

Электрическая мощность, отдаваемая генератором в нагрузку:

$$P = P_{эм} - \Delta P_{ст} = 3U_{\phi} I \cos\varphi,$$

где $\Delta P_{ст}$ – потери мощности в обмотках статора.

Пренебрегая потерями мощности в статоре ($\Delta P_{ст} = 0$), можно считать, что электромагнитная мощность и отдаваемая генератором в нагрузку электрическая мощность приближенно равны:

$$P_{эм} \approx P.$$

Схема замещения фазы статора синхронного генератора приведена на рис. 7.2, а. Этой схеме соответствуют уравнение электрического состояния фазы обмотки статора:

$$\underline{U}_{\phi} = \underline{E}_0 - jX\underline{I}$$

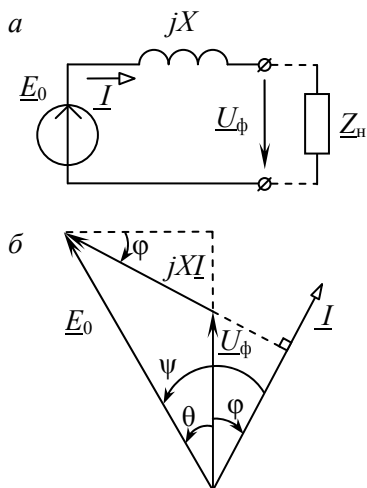


Рис. 7.2. Замещение фазы статора синхронного генератора:
а) схема; б) диаграмма

и векторная диаграмма (см. рис. 7.2, б), где X – синхронное индуктивное сопротивление фазы обмотки статора.

На электрических станциях обычно устанавливается несколько синхронных генераторов, работающих *параллельно* на общую электрическую сеть, а отдельные электрические станции объединяются в мощные энергосистемы.

Для включения синхронного генератора на *параллельную* работу с электрической сетью необходимо выполнить следующие условия:

1. Частота ЭДС подключаемого генератора f_g должна быть равна частоте сети f_c . Это достигается регулированием частоты вращения

ротора генератора первичным двигателем.

2. ЭДС подключаемого генератора E_0 должна быть равна напряжению сети U и совпадать с ним по фазе.

3. Порядок чередования фаз генератора и сети должен быть одинаковым.

Включение генератора на параллельную работу с соблюдением указанных условий называется синхронизацией. Это весьма ответственная операция, так как при неправильном включении могут возникнуть недопустимо большие токи, представляющие опасность как для самих генераторов, так и для других элементов сети.

Контроль выполнения указанных условий может осуществляться с помощью лампового (см. рис. 7.3) или стрелочного синхроскопа.

Включение контактора (К) производится в момент полного погасания всех трех ламп. На современных электростанциях пуск генераторов полностью автоматизирован. Для того чтобы генератор после включения в сеть начал отдавать активную мощность, необходимо увеличить момент первичного двигателя.

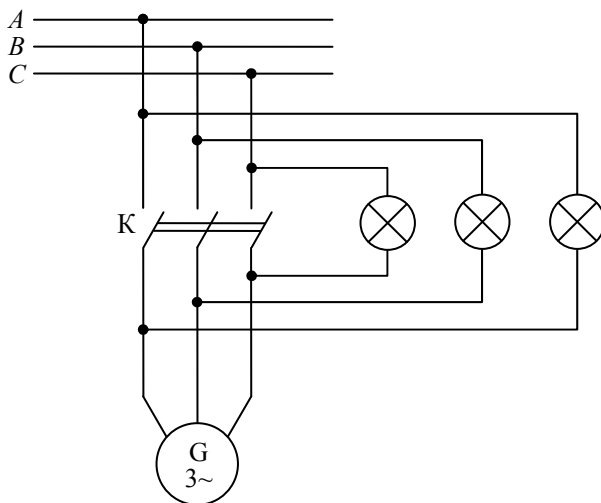


Рис. 7.3. Схема лампового синхроскопа

В автономном режиме синхронные генераторы работают в тех случаях, когда отсутствуют питающие сети энергосистемы, например, удаленные строительные площадки, нефтяные и газовые промыслы, лесозаготовительные пункты, морские и речные суда, автомобили и т. д.

Для оценки свойств генераторов используют ряд характеристик. К основным относятся характеристики холостого хода и внешняя характеристика.

Характеристика холостого хода представляет зависимость $E_0(I_B)$ при $n = \text{const}$ и $I = 0$ (см. рис. 7.4, а). Поскольку $E_0 \sim \Phi_0$, то зависимость $E_0(I_B)$ определяется свойствами магнитной цепи машины. Внешняя характеристика – это зависимость $U(I)$ при $I_B = \text{const}$ (см. рис. 7.4, б).

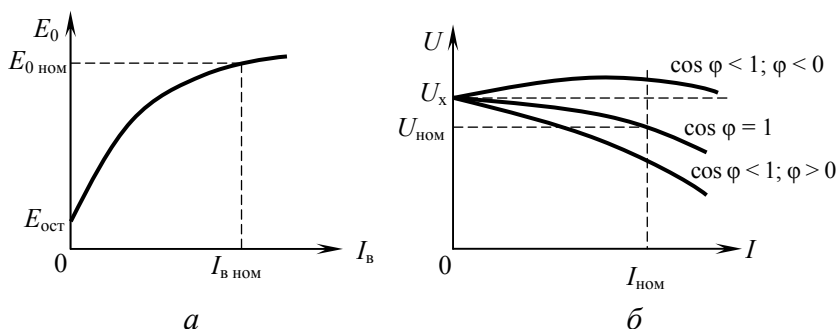


Рис. 7.4. Основные характеристики свойств генераторов:
а) холостой ход; б) внешняя

Предварительное задание

Для синхронного генератора с обмоткой статора, соединенной звездой, заданы: линейное напряжение сети $U_{\text{л}} = 220 \text{ В}$; мощность $P = 600 \text{ Вт}$, отдаваемая генератором в сеть; ток возбуждения ротора I_B (табл. 7.1); синхронное индуктивное сопротивление $X = 70 \text{ Ом}$; зависимость $E_0(I_B) = 30 + 16I_B \text{ В}$.

Таблица 7.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Ток возбуждения СГ $I_B, \text{ А}$	7	8	9	10	11	12	13	14

Требуется:

1. Определить угол рассогласования θ , учитывая, что $P = P_{\text{эм}}$.
2. Построить в масштабе векторную диаграмму СГ.
3. Найти коэффициент мощности $\cos \varphi$, падение напряжения на синхронном индуктивном сопротивлении $X \cdot I$ и ток статора I , воспользовавшись векторной диаграммой.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторным стендом и электрической схемой установки.
2. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 7.5. Пригласить преподавателя для проверки правильности сборки цепи.

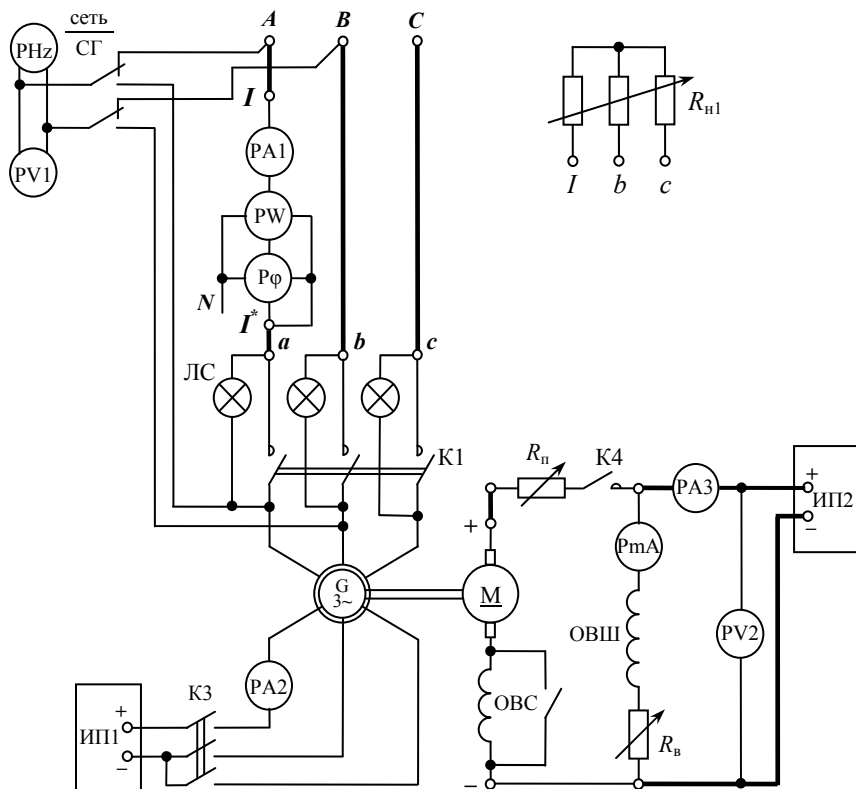


Рис. 7.5. Схема электрической цепи

3. Подготовить установку к работе:
 - а) регуляторы ИП1 и ИП2 установить в крайнее левое положение;
 - б) ввести пусковой реостат ДПТ $R_{п}$;
 - в) переключатель обмотки возбуждения ОВС ДПТ установить в положение «Вкл. согл.» (по шкале $\underline{M}$);

- г) выключатели нагрузки $R_{н1}$ отключить;
- д) реостат возбуждения $R_{в}$ ДПТ полностью вывести (ручку $R_{в}$ установить в крайнее правое положение);
- е) переключатель « $\frac{\text{сеть}}{\text{СГ}}$ » установить в положение «СГ»;
- ж) подать напряжение на лабораторный стенд, включив трехфазный автомат на питающем щитке;
- з) включить ИП1 и ИП2.
4. Регулятором ИП2 установить напряжение 150...180 В (по вольтметру PV2), запустить двигатель включением контактора К4, по мере разгона ДПТ вывести пусковой реостат $R_{п}$.
5. Для включения СГ на параллельную работу с сетью необходимо:
- а) включить контактор К3 и регулятором ИП1 установить напряжение 200...220 В (по вольтметру PV1);
- б) регулятором ИП2 установить частоту $f = 50 \pm 0,2$ Гц (по частотомеру PHz);
- в) регулятором ИП1 установить напряжение $U_{сг} = U_c$ (контроль равенства напряжений осуществляется по вольтметру PV1 с помощью переключателя « $\frac{\text{сеть}}{\text{СГ}}$ »);
- г) регулятором ИП2 добиться полной синхронизации СГ и сети. В момент, когда стрелка синхроноскопа совпадает с меткой на шкале, а лампы погаснут, необходимо включить контактор К1.
6. Выполнить опытную проверку предварительного задания. Регулятором ИП1 установить ток в роторе $I_{в}$ (по амперметру PA2), а регулятором ИП2 загрузить СГ на мощность P (по ваттметру PW), заданные вариантом. Данные измерения занести в табл. 7.2.

Таблица 7.2

	$I_{в}, \text{А}$	$P, \text{Вт}$	$I, \text{А}$	$\cos \varphi$
Расчет				
Эксперимент				

7. Для исследования работы СГ в автономном режиме необходимо:
- а) отключить трехфазный автомат на питающем щитке;

б) к зажимам I, b, c СГ подключить нагрузку $R_{н1}$;

в) последовательно выполнить все этапы п. 3, 4;

г) включить контакторы КЗ и К1.

8. Снять характеристику холостого хода СГ $E_0(I_b)$. Изменяя регулятором ИП1 ток возбуждения I_b (по амперметру РА2) от нуля до наибольшего значения, снять 6...8 значений фазной ЭДС E_0 (показания вольтметра РВ1 необходимо делить на $\sqrt{3}$), регулятором ИП2 поддерживать синхронную частоту вращения. Данные эксперимента занести в табл. 7.3.

Таблица 7.3

$E_0, \text{В}$							
$I_0, \text{А}$							

9. Снять внешнюю характеристику СГ $U(I)$. Регулятором ИП1 установить на зажимах СГ напряжение $U_d = 220 \text{ В}$. Увеличивая нагрузку $R_{н1}$ и поддерживая с помощью регулятора ИП2 синхронную частоту вращения n , снять показания приборов. Результаты измерений записать в табл. 7.4.

Таблица 7.4

$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$P, \text{Вт}$

10. По результатам измерений построить характеристику холостого хода и внешнюю характеристику.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Расчет предварительного задания.
3. Электрическая схема лабораторной установки.
4. Таблицы результатов измерений.
5. Графики характеристик холостого хода и внешней.

6. Выводы об особенностях работы синхронного генератора параллельно с сетью и в автономном режиме.

Контрольные вопросы

1. Объясните устройство синхронного генератора и принцип его работы.

2. Как подразделяются синхронные генераторы в зависимости от устройства ротора? Назначение обмотки возбуждения.

3. Назовите условия включения синхронного генератора на параллельную работу с энергосистемой.

4. Когда используется автономная работа синхронного генератора?

5. Как снимается характеристика холостого хода?

6. Как снимается внешняя характеристика?

7. Каким образом поддерживается неизменным напряжение у генератора, работающего на автономную нагрузку?

8. Как регулируют активную мощность, отдаваемую синхронным генератором в энергосистему?

9. Каким образом регулируются частота и амплитуда индуцированной в статоре ЭДС?

Лабораторная работа № 8

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Цель работы: ознакомление с аппаратами и схемами автоматизированного управления электродвигателями.

Общие сведения

Аппараты ручного управления (рубильники, пакетные выключатели, разъединители, тумблеры, переключатели, кнопки, кнопочные станции – блоки из двух и более кнопок и др.) служат для нечастого включения и отключения электрических цепей небольшой мощности. Включение и отключение аппаратов ручного управления осуществляются ручным или механическим способом путем воздействия на рычаги с укрепленными на них подвижными контактами.

При автоматизированном управлении электродвигателем переключения в его цепи производят аппаратами, контакты которых приводятся в действие силой тяги электромагнитов. Роль оператора сводится к воздействию на кнопки управления. В результате обеспечиваются быстрота и легкость управления, возможность управления на расстоянии.

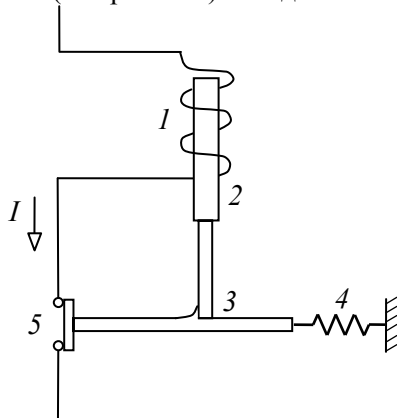
К простейшим аппаратам, обеспечивающим автоматизированное управление асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором, относятся *контакторы*. Контактор представляет электромагнитный аппарат, который служит для переключений в главной цепи электродвигателя. Он состоит из собранного из листов электротехнической стали неподвижного сердечника с катушкой и подвижного якоря. Имеет главные и вспомогательные контакты. Главные контакты служат для переключений в силовой цепи двигателя, а вспомогательные – для переключений в цепи управления. При включении катушки контактора на переменное напряжение контактор срабатывает – якорь притягивается к полюсам сердечника и замыкает главные контакты, которые присоединяют двигатель к сети. Одновременно с главными происходит переключение и вспомогательных контактов, которые отличаются от главных меньшими размерами.

Если катушка контактора отключается от питающей сети, то якорь под действием пружины отпадает от сердечника, а вместе с ним и подвижные контакты, двигатель отключается.

Управление контактором выполняют с помощью кнопочной станции, которая имеет пусковую кнопку КНП с замыкающими контактами и остановочную кнопку КНС с размыкающими контактами. Обе кнопки имеют автоматический возврат в исходное положение после их нажатия благодаря возвратным пружинам.

Так как контактор не защищает двигатель от коротких замыканий и перегрузок, то в цепь питания двигателя включают *автоматический воздушный выключатель*, часто называемый просто автоматом. Воздушный выключатель производит отключение цепи автоматически при нарушении нормальных условий работы, когда ток переходит установленное предельное значение (максимальные и минимальные автоматы). Для воздействия на защелку отключающего механизма в автоматах применяются электромагнитные, тепловые и комбинированные *расцепители*. В комбинированном расцепителе электромагнитный и тепловой элементы могут независимо отключать автомат.

Наиболее распространенным является *автомат максимального тока* (см. рис. 8.1). Когда ток в защищаемой цепи превышает допустимые значения, катушка 1



втягивает стальной сердечник 2 и защелка 3 освобождает пружину 4, которая размыкает контакты 5 и отключает цепь тока I . Обратное включение автомата производится от руки. Автоматы максимального тока применяются и в осветительных цепях жилых зданий взамен плавких предохранителей.

Чтобы избежать отключения двигателя при кратковременном увеличении тока (например, пускового тока двигателя) автоматы снабжают устройством выдержки времени. Ав-

Рис. 8.1. Схема автомата максимального тока:

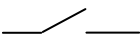
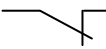
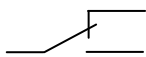
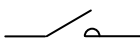
1 – катушка; 2 – стальной сердечник;
3 – защелка; 4 – пружина; 5 – контакты

томаты применяют в сетях переменного и постоянного тока напряжением до 1000 В.

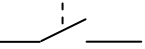
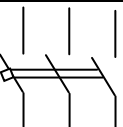
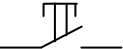
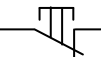
Для защиты от токов перегрузок применяют *автоматы с тепловыми расцепителями*. Основным элементом этого расцепителя является биметаллическая пластинка, охваченная спиралью, по которой протекает потребляемый двигателем ток. Если ток длительно превышает номинальное значение, пластинка от нагрева деформируется и механически воздействует на устройство, размыкающее электрическую цепь. Тепловой расцепитель не реагирует на кратковременные превышения тока в защищаемой цепи. Когда необходимо защищать установку и от кратковременных, но значительных перегрузок, применяют автомат с комбинированным расцепителем.

Аппараты управления и защиты, а также электрические машины состоят из однотипных элементов: катушек, контактов, обмоток машин и т. д. Для возможности чтения схем необходимо знать условные графические обозначения. Некоторые используемые обозначения приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Наименование	Обозначение
1	2
Контакты коммутирующего устройства:	
а) замыкающие	
б) размыкающие	
в) переключающие	
Замыкающий контакт для коммутации сильно-точной цепи	
Замыкающие контакты реле времени с выдержкой:	
а) при замыкании	
б) при размыкании	

Окончание табл. 8.1

1	2
Замыкающий контакт с механической связью	
Выключатель трехполюсный с автоматическим отключением	
Выключатель кнопочный нажимной:	
а) с замыкающим контактом	
б) с размыкающим контактом	
Катушка электромеханического устройства (контактора, реле)	
Контакт теплового реле с возвратом посредством нажатия кнопки	
Нагреватель теплового реле	
Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором	

Принципиальные схемы управления электроустановками содержат полный состав элементов устройств, входящих в установку. Схемы дают представление о принципе их работы.

На принципиальных схемах отдельные элементы аппаратов изображают раздельно для удобства отражения способ действия установки в целом. При этом буквенное обозначение элементов одного и того же аппарата обязательно должно быть одинаковым, например, катушка контактора, его главные и вспомогательные контакты обозначаются одинаково К (см. рис. 8.2).

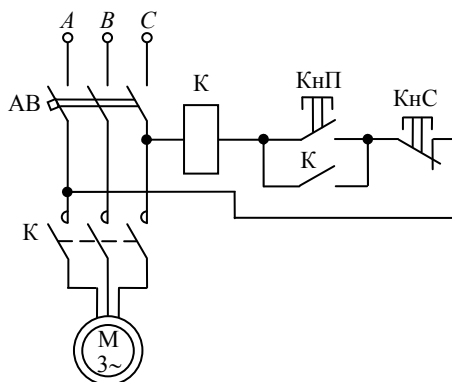


Рис. 8.2. Принципиальная схема управления асинхронным короткозамкнутым двигателем

Кроме того, на принципиальной схеме все контакты кнопок и аппаратов принято изображать в том состоянии, в котором они находятся при отсутствии электромагнитного или механического воздействия на кнопки и рычаги аппаратов.

В качестве примера рассмотрим простейшую принципиальную схему управления асинхронным короткозамкнутым двигателем с помощью контактора (см. рис. 8.2), позволяющую производить дистанционное включение и отключение двигателя. При нажатии пусковой кнопки КнП замыкается цепь управления: линейное напряжение U_{CA} питает катушку контактора К через кнопки КнП и КнС. Контактор срабатывает, замыкаются его главные и вспомогательные контакты К и двигатель включается в сеть. Вспомогательный контакт К, шунтирующий кнопку КнП, сохраняет цепь управления замкнутой после отпускания кнопки.

Для остановки двигателя необходимо нажать кнопку КнС. При этом цепь управления разрывается и якорь контактора под действием силы тяжести или пружины отпадает, размыкая главные и вспомогательные контакты К. После отпускания кнопки, цепь остается разомкнутой. Разрыв цепи образует кнопка КнП. Повторное включение двигателя возможно только нажатием пусковой кнопки КнП.

Кнопочные станции из двух кнопок КнП и КнС могут устанавливаться вместе с контактором или раздельно. В последнем случае достигается дистанционное управление двигателем. С помощью двух

комплектов кнопочных станций, установленных в разных местах, обеспечивается дистанционное управление из двух мест. При этом кнопки КнП включаются параллельно, а КнС – последовательно.

На рис. 8.3 приведена принципиальная схема управления реверсивным асинхронным двигателем.

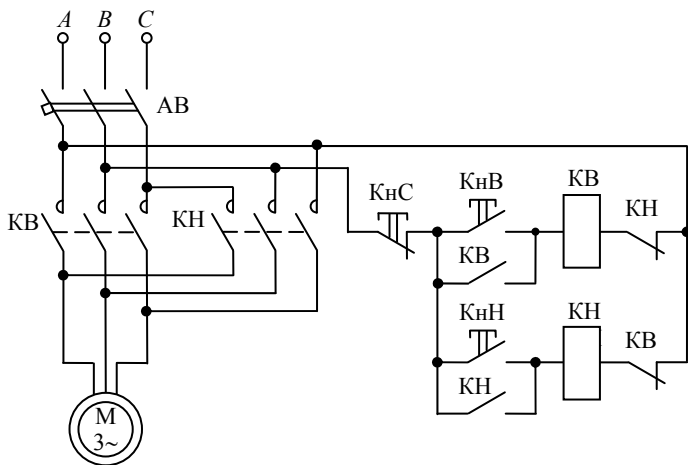


Рис. 8.3. Принципиальная схема управления реверсивным асинхронным двигателем

Автоматическим выключателем АВ установка вручную подключается к трехфазной сети. Этот выключатель защищает установку от перегрузок, автоматически отключая ее. Контактор KB предназначен для включения в условном направлении «Вперед», а контактор КН – в условном направлении «Назад». При срабатывании контактора KB линейные провода подключаются к зажимам двигателя в порядке *A, B, C*; при срабатывании контактора КН – в порядке *C, B, A*. Таким образом, магнитное поле и ротор двигателя будут вращаться соответственно «Вперед» или «Назад».

В обоих контакторах кроме главных контактов, обозначенных так же, как и катушки (KB и КН), использованы по два вспомогательных контакта – один замыкающий, другой – размыкающий. Замыкающий подключен параллельно соответствующей кнопке, а размыкающий включен последовательно в цепь катушки «чужого» контактора, например, контакт KB в цепь катушки контактора КН.

Такое включение называют *электрической блокировкой*. Она исключает одновременное включение обоих контакторов во избежание короткого замыкания.

Запуск двигателя осуществляется с помощью кнопок КнВ или КнН, остановка – кнопкой КнС. При нажатии кнопки КнВ цепь катушки контактора КВ питается линейным напряжением U_{AB} через кнопку КнС и размыкающий контакт КН. Якорь контактора КВ втянется и его главные контакты замкнутся. Обмотка статора подключается к сети, ротор начнет вращаться «Вперед».

Для изменения направления вращения сначала отключают двигатель нажатием кнопки КнС, а затем включают кнопку КнН. При этом катушка контактора КН получает питание (через кнопку КнС и замыкающий контакт КВ) и обмотка двигателя подключается к линейным проводам C, B, A – ротор изменит направление вращения.

Предварительное задание

По рекомендуемой литературе изучить устройство и назначение аппаратов ручного и автоматического управления асинхронными двигателями: пакетного выключателя, автоматического воздушного выключателя (автомата), контактора переменного тока. Письменно дать обоснованный ответ на вопрос соответствующего варианта из табл. 8.2.

Таблица 8.2

Вариант	Вопрос
1	2
1	Какие нежелательные последствия вызовет отсутствие вспомогательного контакта контактора КВ, шунтирующего пусковую кнопку КнВ, при управлении асинхронным двигателем по схеме рис. 8.3?
2	Начертите схему дистанционного управления асинхронным двигателем с двух мест, используя два комплекта кнопочных станций и контактор.
3	Почему в схемах автоматизированного управления двигателем (см. рис. 8.2, 8.3) используются нажимные кнопки, но не пакетные выключатели?

1	2
4	Какие нежелательные последствия может вызвать замена остановочной кнопки КнС пакетным выключателем при управлении двигателем по схеме рис. 8.2?
5	Какие нежелательные последствия вызовет отсутствие вспомогательного контакта КН, включенного параллельно кнопке КнН, при управлении асинхронным двигателем по схеме рис. 8.3?
6	Каково назначение вспомогательного размыкающего контакта контактора КН в цепи катушки контактора КВ в схеме рис. 8.3?
7	Возможно ли одновременное включение контакторов КВ и КН в схеме рис. 8.3?
8	Каково назначение вспомогательного размыкающего контакта контактора КВ в цепи катушки контактора КН в схеме рис. 8.3?

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с аппаратами управления и оборудованием экспериментальной установки.
2. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 8.2 и после проверки цепи руководителем осуществить запуск и остановку двигателя.
3. В присутствии преподавателя экспериментально проверить правильность ответа на вопрос предварительного задания.
4. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 8.3 и после проверки цепи руководителем включить двигатель, затем остановить его и снова включить, изменив направление вращения с помощью реверсивного контактора.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схемы экспериментальных установок (см. рис. 8.2 и 8.3).
3. Обоснованный ответ на вопрос предварительного задания.

4. Сравнительный анализ использованных аппаратов ручного и автоматизированного управления двигателем.

Контрольные вопросы

1. Каковы устройство и назначение автоматического воздушного выключателя, контактора, пакетного выключателя, нажимных кнопок?

2. Какие типы расцепителей используются в автоматических воздушных выключателях? Для каких целей служат расцепители?

3. Возможно ли автоматическое управление двигателем с помощью автоматического воздушного выключателя?

4. Почему в схемах автоматизированного управления двигателем используются нажимные кнопки, но не пакетные выключатели?

5. Объясните условные обозначения элементов на схемах (см. рис. 8.2 и 8.3).

6. Как работают схемы автоматизированного управления рис. 8.2 и 8.3?

7. Объясните, что такое электрическая блокировка в схеме рис. 8.3.

8. Произойдет ли реверс АД без использования кнопки КнС в схеме рис. 8.3? Почему?

Лабораторная работа № 9

ЗАЩИТА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ОТ ПЕРЕГРУЗКИ И ОБРЫВА ФАЗЫ

Цель работы: изучение устройства магнитного пускателя, теплового реле, электромагнитного реле максимального тока, реле времени; изучение и анализ работы защиты асинхронного двигателя от перегрузки и обрыва фазы.

Общие сведения

Электротехнические устройства должны быть защищены от перегрева при коротких замыканиях и длительных перегрузках. При коротком замыкании резко увеличивается ток, тепловое действие которого может вызвать разрушение изоляции и пожар, возникают опасные электродинамические силы взаимодействия токов. Простейшую защиту от коротких замыканий обеспечивает *плавкий предохранитель*, отключающим элементом которого является плавкая вставка – сменяемая часть предохранителя, плавящаяся при увеличении тока свыше определенного значения. Так как вставки не должны плавиться при кратковременных перегрузках, например, от пусковых токов электродвигателей, то плавкий предохранитель надежно не защищает электроустановки от длительных перегрузок.

Перегрузка электродвигателя возникает, если момент на его валу больше номинального, в результате токи в питающих проводах и обмотке двигателя превышают номинальные значения. Кроме того, опасный для трехфазного двигателя режим наступает при обрыве одной из фаз. Так как двигатель работает на двух фазах, а момент на валу сохраняется прежним, то токи возрастают. Защита двигателей от перегрузки и от обрыва фазы осуществляется с помощью тепловых или электромагнитных реле.

Тепловое реле (см. рис. 9.1) состоит из биметаллической пластинки 1, резистора-нагревателя 2, рычага 3, пружины 4, контактов 5, кнопки возврата 6.

Для защиты двигателя от перегрузки и от обрыва фазы в контактор встраивают два тепловых реле. Полученный аппарат называют *магнитным пускателем*. Применение двух тепловых реле необходимо для отключения двигателя при обрыве любого соединительного провода.

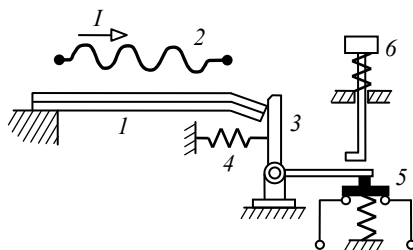


Рис. 9.1. Схема теплового реле:
1 – биметаллическая пластинка; 2 – резистор-нагревателя; 3 – рычаг;
4 – пружина; 5 – контакты; 6 – кнопки возврата

На рис. 9.2 приведена схема управления и защиты двигателя с помощью магнитного пускателя. Схема имеет две цепи: силовую и цепь управления.

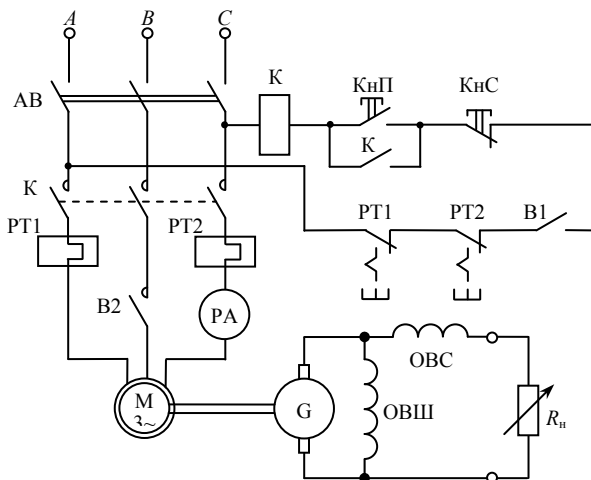


Рис. 9.2. Схема управления и защиты двигателя с помощью магнитного пускателя

Силовая цепь содержит три главных контакта пускателя K , нагреватели тепловых реле $PT1$, $PT2$ и обмотку двигателя, а цепь управления – катушку контактора K , пусковую $КнП$ и остановочную $КнС$ кнопки, вспомогательный контакт контактора K и контакты тепловых реле $PT1$ и $PT2$.

При нажатии пусковой кнопки КнП замыкается цепь управления – от фазы *A* сети через контакты тепловых реле, контакты кнопок КнС и КнП, катушку контактора к фазе *C* сети (выключатель В1 замкнут). Под действием тока в катушке К электромагнит контактора притянет подвижный якорь, при этом замыкаются главные и вспомогательный контакты К. Посредством трех главных контактов включается силовая цепь и двигатель запускается. Вспомогательный контакт, шунтирующий кнопку КнП, сохраняет замкнутой цепь управления, когда названная кнопка будет отпущена.

Отключение двигателя обеспечивается кнопкой КнС, нажатием которой разрывается цепь управления. При отсутствии тока в катушке контактора якорь отпадает и размыкаются главные контакты К, вызывая автоматическое отключение двигателя.

Нагреватели тепловых реле включены последовательно с обмоткой двигателя и по ним протекают линейные токи. При перегрузке или обрыве фазы токи превышают номинальные значения и биметаллическая пластинка теплового реле под влиянием тепла, излучаемого нагревателем, изгибается вверх и освобождает рычаг 3 (см. рис. 9.1), после чего под действием пружины 4 размыкается контакт теплового реле 5, чем разрывается цепь управления, ток в катушке контактора К исчезает, якорь отпадает и размыкает главные контакты пускателя, отключая двигатель (см. рис. 9.2). В исходное положение рычаг теплового реле можно вернуть нажатием кнопки возврата 6 после охлаждения биметаллической пластинки, на что требуется примерно 0,5...3 мин. Время срабатывания теплового реле зависит от тока нагревателя, предварительного режима нагрузки и температуры окружающей среды.

Вследствие значительной тепловой инерции тепловые реле не срабатывают от кратковременных пусковых токов двигателей, но и не обеспечивают защиту от токов короткого замыкания. Поэтому для защиты от коротких замыканий в силовой цепи устанавливают плавкие предохранители или автоматический выключатель АВ с максимальным электромагнитным расцепителем (см. рис. 9.2).

Схема защиты двигателя с применением электромагнитных реле изображена на рис. 9.3. Управление двигателем осуществляется с помощью контактора. В один из линейных проводов (фаза *A*) последовательно включена катушка максимального токового реле КА электромагнитной системы. В реле между полюсами электромагнита установ-

лен на оси Z-образный стальной якорь, который удерживается в исходном положении пружиной. Когда ток в катушке реле (линейный ток двигателя) превышает допустимые значения, якорь поворачивается и замыкаются контакты – реле срабатывает. Ток срабатывания реле можно регулировать, изменяя натяжение пружины. Через контакты токового реле включается реле времени КТ, которое спустя некоторый промежуток времени, называемый выдержкой времени, замкнет свои контакты и включит промежуточное реле КЛ. Промежуточное реле размыкает свои нормально замкнутые контакты и разрывает цепь катушки контактора К, в результате чего двигатель автоматически отключается. Реле времени необходимо для того, чтобы пусковые токи не вызывали отключения двигателя. Для должной чувствительности и четкости работы подвижный контакт реле времени выполняют легким, рассчитанным на малый ток. Чтобы контакты реле времени не обгорали, отключение катушки контактора К осуществляется достаточно мощными контактами промежуточного реле.

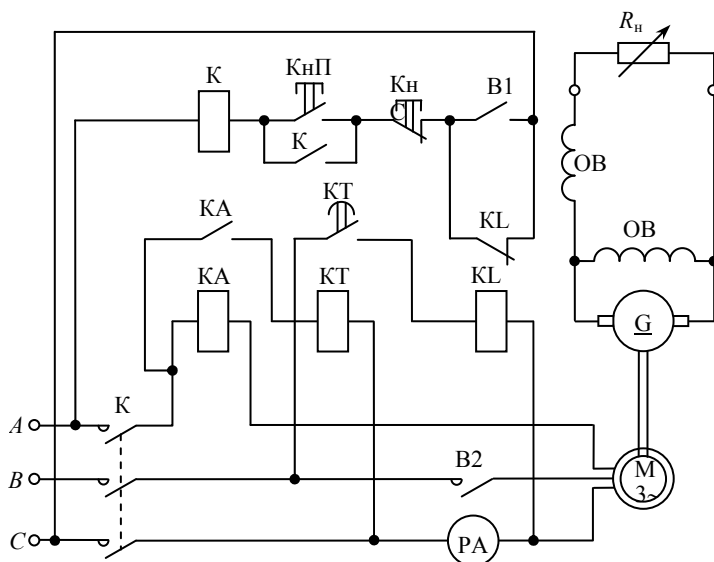


Рис. 9.3. Схема защиты двигателя с применением электромагнитных реле

Релейная защита двигателя имеет сравнительно высокую стоимость, поэтому применяется для двигателей большой мощности.

Предварительное задание

По литературным источникам изучить устройство, принцип действия и назначение всех элементов схем рис. 9.2 и 9.3. Письменно дать обоснованный ответ на вопрос соответствующего варианта из табл. 9.1.

Таблица 9.1

Вариант	Вопрос
1	Как работает трехфазный асинхронный двигатель при подключении его к трехфазной сети в случае обрыва фазы <i>B</i> питающей сети (характер магнитного поля, момент, ток, частота вращения)? Сработает ли при этом режиме защита двигателя по схеме рис. 9.3?
2	Изменится ли время срабатывания защиты двигателя от перегрузки в цепи рис. 9.2 при увеличении тока перегрузки?
3	Сработает ли защита двигателя от перегрузки в цепи рис. 9.3 при замкнутом выключателе В1 и разомкнутом В2, если момент на валу двигателя равен номинальному?
4	Как изменится режим работающего с номинальной нагрузкой на валу двигателя после обрыва фазы <i>B</i> питающей сети? Сработает ли при этом защита по схеме рис. 9.2?
5	Сработает ли защита двигателя от перегрузки в цепи рис. 9.2 при замкнутом выключателе В1 и разомкнутом В2, если момент на валу двигателя равен номинальному?
6	Изменится ли время срабатывания защиты двигателя от перегрузки в цепи рис. 9.3 при увеличении тока перегрузки?
7	Сработает ли защита двигателя от перегрузки в цепи рис. 9.3 при замкнутых выключателях В1 и В2, если двигатель развивает мощность $P = 1,2 P_{\text{ном}}$?
8	Сработает ли защита двигателя от перегрузки в цепи рис. 9.3 при разомкнутых выключателях В1 и В2, если момент на валу двигателя равен номинальному?

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с приборами, аппаратами и оборудованием экспериментальной установки.

2. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 9.2, замкнуть выключатели В1 и В2, переключатель нагрузки установить в положение «холостой ход».

3. После проверки руководителем правильности соединений включить цепь управления и убедиться в нормальной работе всех аппаратов.

4. В присутствии преподавателя экспериментально проверить правильность ответа на вопрос предварительного задания.

5. Загрузить двигатель до номинальной мощности, записать номинальный ток $I_{\text{ном}}$ в табл. 9.2. Увеличив нагрузку двигателя до $P = 1,2 P_{\text{ном}}$, зафиксировать ток перегрузки I и время срабатывания теплового реле t_1 .

Таблица 9.2

Режим	$I_{\text{ном}} =$		
	I, A	$t_1, \text{с}$	$t_2, \text{с}$
$P = 1,2 P_{\text{ном}}$			
Обрыв провода $P = P_{\text{ном}}$			

6. При номинальной мощности на валу двигателя выключателем В2 оборвать линейный провод питающей цепи. Записать значение тока при обрыве I и время срабатывания защиты t_1 в табл. 9.2.

7. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 9.3, выключатель В1 разомкнуть, а В2 – замкнуть.

8. После проверки руководителем правильности соединений включить цепь управления и обратить внимание на работу реле тока и времени при запуске двигателя.

9. Загрузить двигатель до мощности $P = 1,2 P_{\text{ном}}$ и зафиксировать время срабатывания защиты t_2 в табл. 9.2.

10. При номинальной мощности на валу двигателя оборвать линейный провод питающей цепи (В2 – разомкнут) и зафиксировать время срабатывания защиты t_2 в табл. 9.2.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схемы экспериментальной установки (см. рис. 9.2 и 9.3).

3. Обоснованный ответ на вопрос предварительного задания.
4. Таблица измерений (см. табл. 9.2).
5. Анализ полученных результатов и выводы.

Контрольные вопросы

1. Какие аппараты управления и защиты использовались в работе?
2. Каково устройство и назначение магнитного пускателя? Чем он отличается от контактора?
3. Каково назначение главных контактов магнитного пускателя?
4. Для чего применяют вспомогательные контакты магнитного пускателя в цепях рис. 9.2 и 9.3?
5. Как устроены кнопочная станция и тепловое реле?
6. Почему в цепях с магнитными пускателями необходимо еще устанавливать плавкие предохранители или автоматические выключатели с максимальными электромагнитными расцепителями?
7. Как устроены токовое реле, реле времени и промежуточное реле? Каково их назначение в цепи рис. 9.3?
8. Почему большой пусковой ток двигателя не вызывает срабатывания защиты в цепях рис. 9.2 и 9.3?
9. Почему при обрыве одного провода двигатель потребляет ток больше номинального, когда момент на валу двигателя равен номинальному?

Лабораторная работа № 10

ВЫБОР АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ ПО НАГРУЗОЧНОЙ ДИАГРАММЕ РАБОЧЕГО МЕХАНИЗМА

Цель работы: расчет мощности электродвигателя и выбор по каталогу асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Общие сведения

Выбор мощности электродвигателей определяет затраты и стоимость эксплуатационных расходов промышленных установок. Применение двигателей недостаточной мощности не обеспечивает нормальной работы механизма, приводит к снижению производительности, возникновению аварий и преждевременному выходу двигателя из строя. Применение двигателей чрезмерной мощности ухудшает экономические показатели установки, приводит к ее удорожанию и большим потерям энергии.

Правильно выбранный двигатель должен быть полностью загружен и при этом работать, не перегреваясь сверх допустимых пределов. Также двигатель должен обеспечивать нормальную работу при возможных временных перегрузках и обладать достаточным пусковым моментом для обеспечения требуемой длительности пуска рабочего механизма.

Режим рабочего механизма может быть определен *нагрузочной диаграммой* (рис. 10.1), под которой понимается зависимость вращающего момента (мощности, тока) двигателя от времени.

В большинстве случаев выбор мощности электродвигателя производится по нагреву, а затем осуществляется его проверка по перегрузочной способности.

По условиям нагревания различают три основных режима работы.

Продолжительный режим работы (см. рис. 10.1, *а*) – это режим, при котором за рабочий период t_p температура двигателя достигает своего установившегося значения. В таком режиме работают двигатели вентиляторов, насосов, электроприводы зубофрезерных, зубошлифовальных, тяжелых токарных, карусельных и некоторых других станков, периоды работы которых могут измеряться часами и даже сутками.

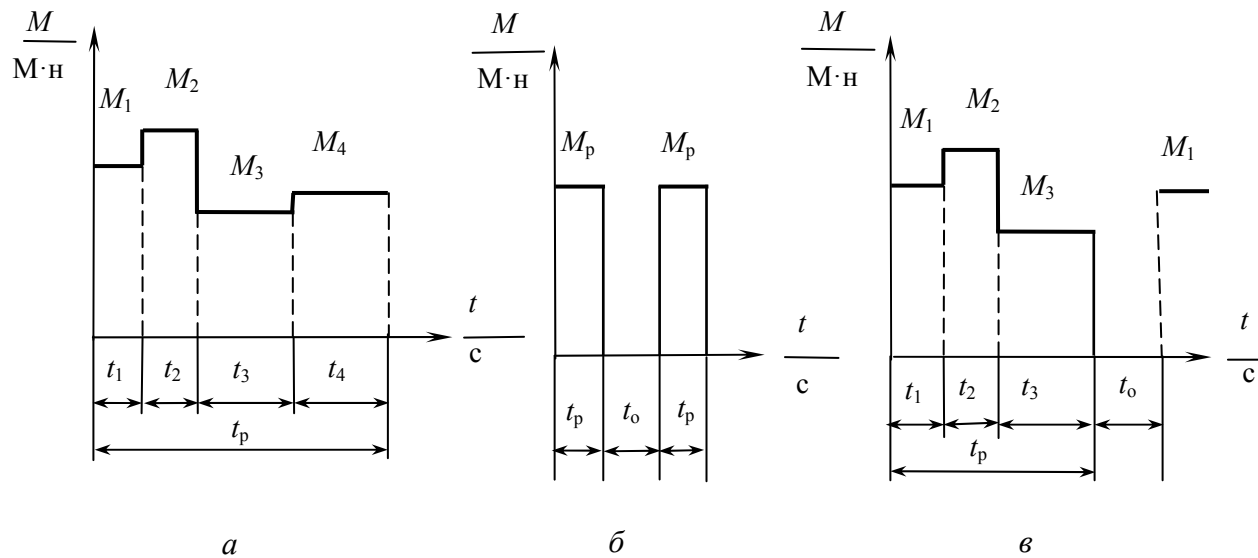


Рис. 10.1. Нагрузочная диаграмма режимов рабочего механизма:
а) продолжительный; *б*) кратковременный; *в*) повторно-кратковременный

Кратковременный режим работы (см. рис. 10.1, б) – это режим, когда рабочие периоды t_p нагрузки, за которые температура двигателя не достигает установившегося значения, чередуются с периодами отключения t_o , за которые двигатель полностью остывает. В таком режиме работают двигатели разводных мостов, шлюзов и т. п.

Повторно-кратковременный режим работы (см. рис. 10.1, в) – это режим, когда ни в одном из периодов работы температура двигателя не достигает установившегося значения, а в период времени отключения t_o двигатель не успевает охладиться до температуры окружающей среды. В таком режиме работают двигатели подъемных механизмов, лифтов, транспортных устройств, некоторых металлорежущих станков и т. п. Время цикла $t_{ц}$ повторно-кратковременного режима определяется суммой времени периода работы двигателя t_p и периода отключения t_o . Время цикла не должно быть больше 10 минут. Если $t_{ц} > 10$ мин, то режим считается продолжительным. Условия работы двигателя в повторно-кратковременном режиме зависят от соотношения времени работы двигателя и времени отключения. Для нагрузочной диаграммы этого режима используется понятие *продолжительности включения* (ПВ, %), под которой понимают отношение времени работы двигателя к времени цикла, выраженное в процентах:

$$\text{ПВ} = \frac{t_p}{t_p + t_o} \cdot 100 \% .$$

Для повторно-кратковременного режима работы предназначены специальные электродвигатели, номинальная мощность которых определена в паспорте для стандартных значений ПВ (15, 25, 40 или 60 %). Если по нагрузочной диаграмме получается нестандартное значение ПВ, то мощность двигателя пересчитывается по формуле

$$P_{\text{расч. ст}} = P_{\text{эkv}} \sqrt{\frac{\text{ПВ}}{\text{ПВ}_{\text{ст}}}} ,$$

где $P_{\text{расч. ст}}$ – расчетная мощность электродвигателя для стандартного значения продолжительности включения;

$P_{\text{экр}}$ – мощность по нагрузочной диаграмме;

ПВ – продолжительность включения по нагрузочной диаграмме, %;

ПВ_{ст} – стандартное значение продолжительности включения, %.

По каталогу выбирают двигатель из условия $P_{\text{ном}} \geq P_{\text{расч. ст.}}$

Если ПВ > 60 %, то режим считается продолжительным. При ПВ < 10 % режим работы можно считать кратковременным.

Методика расчета мощности электродвигателя для каждого из трех указанных режимов работы имеет свои особенности из-за различий нагревания в каждом режиме. Рассмотрим расчет мощности электродвигателя при продолжительном режиме работы с переменной нагрузкой рабочего механизма (см. рис. 10.1, а). Для продолжительного режима работы обычно применяют асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором.

Наиболее удобными и простыми являются методы расчета среднеквадратичных или эквивалентных величин. При использовании нагрузочной диаграммы рабочего механизма в виде зависимости момента на валу двигателя от времени можно получить формулу для эквивалентного момента

$$M_{\text{экр}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n}}, \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где $M_1, M_2, \dots, M_n$ – моменты на валу двигателя от рабочего механизма на интервалах времени $t_1, t_2, \dots, t_n$.

Формулой эквивалентного момента можно пользоваться и для повторно-кратковременного режима работы с учетом того, что время периода отключения t_0 двигателя в формулу не включается, так как период отключения учитывается величиной продолжительности включения ПВ.

Пренебрегая изменением частоты вращения вала электродвигателя при изменении нагрузки рабочего механизма, можно определить его мощность, соответствующую эквивалентному моменту

$$P_{\text{экр}} = \frac{M_{\text{экр}} n_{\text{ном}}}{9550}, \text{ кВт},$$

где $n_{\text{ном}}$ – номинальная частота вращения вала рабочего механизма (мин^{-1}).

Для повторно-кратковременного режима работы, когда $\text{ПВ} > 60 \%$, можно использовать асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором, расчетная мощность двигателя пересчитывается по формуле

$$P_{\text{расч}} = P_{\text{экв}} \sqrt{\frac{\text{ПВ}}{100 \%}}.$$

По каталогу выбирают асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором серии 4А из условия $P_{\text{ном}} \geq P_{\text{экв}}$ или $P_{\text{ном}} \geq P_{\text{расч}}$ для повторно-кратковременного режима работы и определяют его паспортные данные: $P_{\text{ном}}$, $U_{\text{ном}}$, $n_{\text{ном}}$, $k_{\text{м}} = M_{\text{мах}} / M_{\text{ном}}$, $k_{\text{п}} = M_{\text{пуск}} / M_{\text{ном}}$.

Выбранный двигатель проверяют по перегрузочной способности. Проверку проводят при номинальном напряжении электропитания и при снижении напряжения питающей сети на 10 % от номинального.

При номинальном напряжении питания проверку выполняют исходя из условия

$$M_{\text{макс}} \leq M_{\text{макс. доп}},$$

где $M_{\text{макс}}$ – максимальный момент на валу рабочего механизма по нагрузочной диаграмме (см. рис. 10.1, а $M_{\text{макс}} = M_2$);

$M_{\text{макс. доп}}$ – максимально допустимый момент двигателя, равный

$$M_{\text{макс. доп}} = 0,9 M_{\text{макс}}.$$

Максимальный момент двигателя может быть определен с использованием паспортных данных:

$$M_{\text{макс}} = k_{\text{м}} M_{\text{ном}},$$

где $M_{\text{ном}} = 9\,550 P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}}$.

При снижении напряжения питающей сети на 10 % от номинального ($0,9U_{\text{ном}}$) максимальный момент на валу двигателя определяют с учетом того, что $M \sim U_{\text{ф}}^2$, соответственно развиваемый двигателем максимальный момент уменьшается до значения

$$M'_{\text{макс. доп}} = (0,9)^2 \cdot 0,9M_{\text{макс}}.$$

В случае если условие $M_{\text{макс}} \leq M'_{\text{макс. доп}}$ не выполняется для пониженного напряжения питания, то необходимо по каталогу выбрать двигатель с большей на ступень номинальной мощностью и повторить проверку по перегрузочной способности.

Работа выполняется на ПЭВМ с использованием расчетной программы ADMX.EXE. Программа позволяет строить нагрузочную диаграмму $M(t)$ рабочего механизма для заданных интервалов времени t_k и моментов M_k , (рис. 10.5), определить для построенной диаграммы максимальный и эквивалентный моменты ($M_{\text{макс}}$ и $M_{\text{экв}}$), режим работы механизма и продолжительность включения ПВ %, эквивалентную и расчетную мощности электродвигателя ($P_{\text{экв}}$ и $P_{\text{расч}}$) для заданной частоты вращения вала рабочего механизма. Программа содержит каталог асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором серии 4А. Для выбранного в каталоге двигателя может быть построена механическая характеристика $M = f(S)$ в виде графика зависимости момента M от скольжения S для номинального напряжения электропитания и для пониженного напряжения на 10 % от номинального.

Предварительное задание

Построить нагрузочную диаграмму рабочего механизма по данным табл. 10.1. Определить режим работы производственного механизма. Рассчитать мощность асинхронного электродвигателя. Изменением частоты вращения ротора двигателя при изменениях нагрузки на валу рабочего механизма пренебречь.

Таблица 10.1

Вариант	Интервалы времени, с					Моменты на валу АД, Н·м					Частота вращения n , мин ⁻¹
	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	
1	100	180	80	100	120	10	20	0	10	15	720
2	50	150	100	200	50	30	40	20	10	20	700
3	120	100	180	10	60	60	70	50	10	40	1460
4	60	100	90	50	150	0	70	80	60	40	700
5	100	120	150	80	100	150	10	120	80	100	730
6	120	50	180	250	150	200	160	20	120	180	990
7	80	220	40	110	150	250	80	0	170	220	1480
8	100	140	260	100	200	180	210	140	250	10	2970

Порядок выполнения работы

1. Запустить на выполнение программу АДМН.EXE. На экране монитора после загрузки программы появится титульная экранная заставка (рис. 10.2) с основным рабочим меню программы, содержащим четыре раздела. Вызов нужного раздела осуществляется вводом номера соответствующего раздела без нажатия клавиши «Enter».

ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ Программа предназначена для расчета эквивалентной мощности асинхронного двигателя по нагрузочной диаграмме, выбора по каталогу соответствующего типа двигателя и построения по его паспортным данным механических характеристик в координатах $M(s)$ для номинального и пониженного ($0.9U_{ном}$) напряжения питания	ВЫБЕРИТЕ РАЗДЕЛ: 1. Нагрузочная диаграмма 2. Механическая характеристика 3. Каталог асинхронных двигателей 4. Завершение работы с программой ВВЕДИТЕ НОМЕР НУЖНОГО РАЗДЕЛА
БГПА, ВНТУ, 1998 - 2006, т.292-71-93 Кафедра 'ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА' программу разработал доцент НОВАШ И.В.	

Рис. 10.2. Титульная экранная заставка

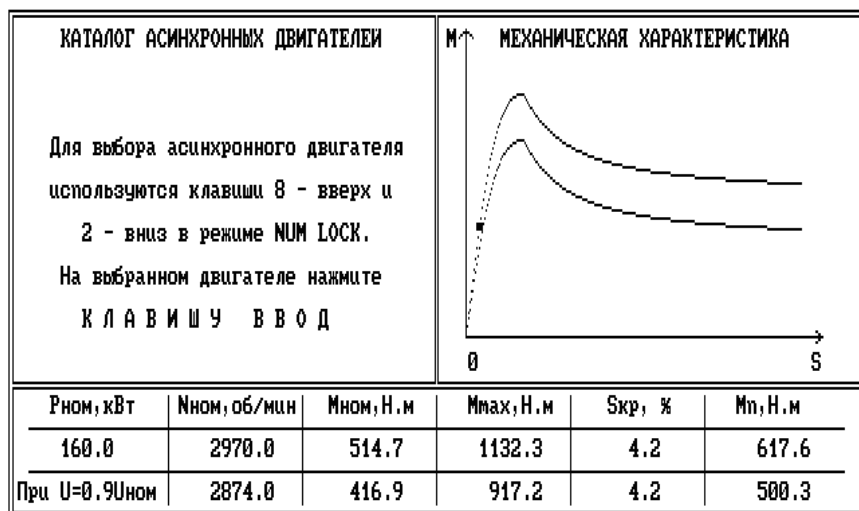
2. Вызвать *раздел «3» – «Каталог асинхронных двигателей»*.

На экране монитора после загрузки раздела «3» появится экранная заставка «Каталог асинхронных двигателей» (см. рис. 10.3). Ввести синхронную частоту электродвигателя $N_{\text{син}}$, которая подходит для частоты вращения вала рабочего механизма заданного варианта предварительного задания, и нажмите клавишу «Enter». В нижнем окне экрана появятся паспортные данные электродвигателей: активная номинальная мощность ($P_{\text{ном}}$, кВт), номинальное напряжение электропитания ($U_{\text{ном}}$, В), номинальная частота вращения вала двигателя ($N_{\text{ном}}$, мин⁻¹), синхронная частота электродвигателя ($N_{\text{син}}$, мин⁻¹), кратность максимального момента ($K_{\text{м}}$), кратность пускового момента ($K_{\text{п}}$). В верхнем правом окне отображается тип асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, паспортные данные которого находятся в первой строке нижнего окна, помеченной символами «>», «<» по краям. Первую строку нижнего окна будем называть *«активной строкой каталога»*. Просмотр каталога осуществляется нажатием клавиш «8» (вверх) или «2» (вниз) цифровой клавиатуры в режиме «Num Lock». Для двигателя, паспортные данные которого находятся в *активной строке каталога*, можно построить механическую характеристику, нажав клавишу «Enter». Механическая характеристика выводится в верхнем правом окне (см. рис. 10.4), а в нижнем окне выводятся значения активной номинальной мощности двигателя ($P_{\text{ном}}$, кВт), номинальной частоты вращения вала двигателя ($N_{\text{ном}}$, мин⁻¹), номинального момента ($M_{\text{ном}}$, Н·м), максимального момента ($M_{\text{мах}}$, Н·м), критического скольжения ($S_{\text{кр}}$), пускового момента ($M_{\text{п}}$, Н·м) для номинального и пониженного напряжения электропитания. На механической характеристике квадратиком отмечена точка режима номинальной нагрузки. После нажатия клавиши «Enter», программа переходит в режим основного рабочего меню (см. рис. 10.2).

В режиме работы с каталогом асинхронных двигателей построить механические характеристики для двух двигателей с одинаковой синхронной частотой $N_{\text{син}} = 3000$ мин⁻¹ и разными номинальными мощностями (минимальной и максимальной по каталогу). Зарисовать характеристики в отчет и отметить их различие.

КАТАЛОГ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ Для выбора асинхронного двигателя используются клавиши 8 - вверх и 2 - вниз в режиме NUM LOCK. На выбранном двигателе нажмите К Л А В И Ш У В В О Д	Выбор двигателя по каталогу разработали студенты группы 103196-К : ШАВЕЛЬ А.В. РЕВЯКО В.С. Руководитель :доц.НОВАШ И.В. БГПА, МИНСК, 1998
Введите синхронную частоту вращения $N_{sin}=?$ ■	

Рис. 10.3. Каталог асинхронных двигателей



Для продолжения работы нажмите <ВВОД>? ■

Рис. 10.4. Механическая характеристика двигателя

3. Вызвать *раздел «1» – «Нагрузочная диаграмма»*. Ввести значения моментов (M), интервалов времени (t) и номинальную частоту вращения вала рабочего механизма ($N_{\text{ном}}$, мин^{-1}) для заданного варианта. На экране монитора после ввода данных появится экранная заставка с окнами «Нагрузочная диаграмма» и «Рекомендации по выбору АД» (см. рис. 10.5). Проверить результаты расчетов предварительного задания. Для выхода в исходное рабочее меню нажать клавишу «Enter».

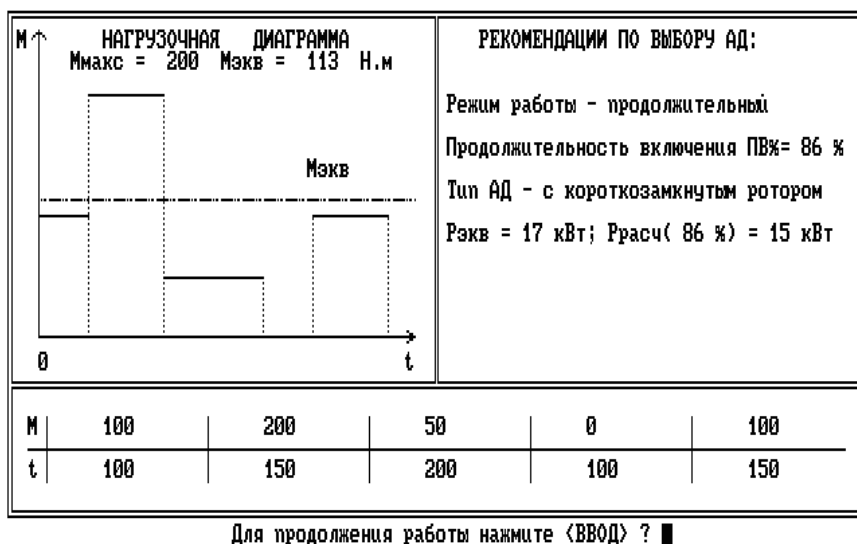
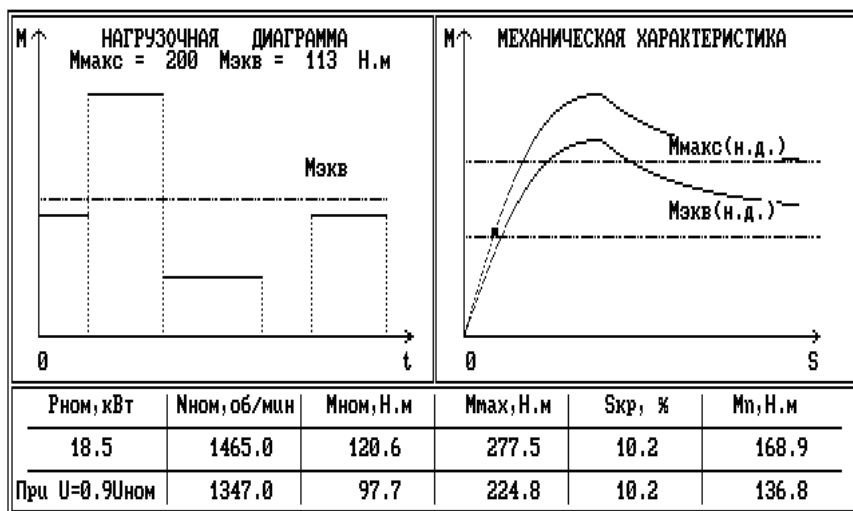


Рис. 10.5. Заставка с окнами «Нагрузочная диаграмма» и «Рекомендации по выбору АД»

4. Вызвать раздел «3» – «*Каталог асинхронных двигателей*». Ввести синхронную частоту электродвигателя $N_{\text{син}}$, которая подходит для частоты вращения вала рабочего механизма заданного варианта предварительного задания, и нажать клавишу «Enter». Нажимая клавиши «8» (вверх) или «2» (вниз) цифровой клавиатуры в режиме «Num Lock», выбрать для рабочего механизма заданного варианта асинхронный двигатель таким образом, чтобы номинальная мощность $P_{\text{ном}}$ в активной строке каталога была не меньше, чем мощность $P_{\text{экр}}$ или $P_{\text{расч}}$, определенная по нагрузочной диа-

грамме. Для построения механической характеристики выбранного электродвигателя нажать клавишу «Enter». На экране монитора появится экранная заставка с окнами «Нагрузочная диаграмма» и «Механическая характеристика» (см. рис. 10.6). На механической характеристике отмечаются линии уровней максимального $M_{\text{макс (н. д.)}}$ и эквивалентного $M_{\text{экр (н. д.)}}$ моментов нагрузочной диаграммы для их визуального сравнения с максимальными величинами моментов механических характеристик, построенных для номинального и пониженного напряжения электропитания. Выбранный двигатель удовлетворяет проверке по перегрузочной способности, если линия уровня максимального момента нагрузочной диаграммы $M_{\text{макс (н. д.)}}$ проходит ниже максимумов механических характеристик, и линия эквивалентного момента нагрузочной диаграммы $M_{\text{экр (н. д.)}}$ проходит ниже «точки» режима номинальной нагрузки, отмеченной квадратиком. По данным рис. 10.6 выбранный двигатель удовлетворяет проверке по перегрузочной способности. В противном случае двигатель не удовлетворяет проверке и необходимо выбрать новый двигатель с большей на ступень активной номинальной мощностью.



Для продолжения работы нажмите <ВВОД>? ■

Рис. 10.6. Заставка с окнами «Нагрузочная диаграмма» и «Механическая характеристика»

Построить механическую характеристику для нескольких двигателей с номинальными мощностями меньше и больше на одну ступень, чем мощность двигателя, определенная по нагрузочной диаграмме, и выбрать наиболее подходящий двигатель для механизма.

В данной работе проверка электродвигателя по условиям пуска не предусматривается.

5. Режим «2» – «*Механическая характеристика*». Этот режим может быть использован для построения механической характеристики по паспортным данным асинхронного двигателя, которые вводятся «вручную» с помощью клавиатуры ПЭВМ.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Результаты выполнения предварительного задания.
3. Нагрузочная диаграмма механизма.
4. Механические характеристики выбранного двигателя с линиями максимального и эквивалентного моментов нагрузочной диаграммы (для трех сравнительных вариантов).
5. Паспортные данные выбранного двигателя.
6. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Во сколько раз изменится максимальное значение момента $M_{\max}$, если напряжение сети снизится на 10 %?
2. Какой вид имеют рабочие характеристики АД?
3. В чем заключается проверка двигателя по перегрузочной способности?
4. Какие параметры указываются в паспорте двигателя?
5. На что влияет неправильный выбор двигателя?

ЛИТЕРАТУРА

1. Электротехника и электроника : учебник для неэлектротехнических специальностей вузов : в 3 кн. / под ред. В. Г. Герасимова. – 1997. – Кн. 2 : Электромагнитные устройства и электрические машины / В. М. Киселев [и др.]. – М. : Энергоатомиздат.
2. Касаткин, А. С. Электротехника / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – М. : Высшая школа, 2002. – 542 с.
3. Сборник задач по электротехнике и основам электроники / под ред. проф. Л. А. Бессонова. – М. : Высшая школа, 2000. – 528 с.
4. Борисов, Ю. М. Электротехника / Ю. М. Борисов, Д. Н. Липатов, Ю.Н. Зорин. – М. : Высшая школа, 1985. – 537 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРАВИЛА РАБОТЫ В ЛАБОРАТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ.....	3
Лабораторная работа № 1 ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА..	4
Лабораторная работа № 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ.....	13
Лабораторная работа № 3 ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ.....	23
Лабораторная работа № 4 ИССЛЕДОВАНИЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ.....	31
Лабораторная работа № 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО И СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ.....	43
Лабораторная работа № 6 ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА СМЕШАННОГО И ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ.....	53
Лабораторная работа № 7 ИССЛЕДОВАНИЕ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА.....	63
Лабораторная работа № 8 АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ.....	73
Лабораторная работа № 9 ЗАЩИТА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ОТ ПЕРЕГРУЗКИ И ОБРЫВА ФАЗЫ.....	82
Лабораторная работа № 10 ВЫБОР АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ ПО НАГРУЗОЧНОЙ ДИАГРАММЕ РАБОЧЕГО МЕХАНИЗМА.....	89
ЛИТЕРАТУРА.....	101

Учебное издание

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Лабораторный практикум
для студентов неэлектротехнических специальностей

В 3 частях

Часть 2

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ

Составители:

СЧАСТНАЯ Елена Сигизмундовна
ДОМНИКОВ Сергей Васильевич
РОЗУМ Таисия Терентьевна и др.

Редактор *О. В. Ткачук*
Компьютерная верстка *А. Г. Занкевич*

Подписано в печать 26.06.2015. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 5,99. Уч.-изд. л. 4,68. Тираж 300. Заказ 339.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.