

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Н. П. Коровкина, Н. М. Олиферович, М. А. Анкуда

ТРАНСФОРМАТОРЫ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ, ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано
учебно-методическим объединением
по химико-технологическому образованию
в качестве учебно-методического пособия
для студентов учреждений высшего образования
по химико-технологическим специальностям*

Минск 2019

УДК 621.316.731+621.313(075.8)

ББК 31/261.8я73

К68

Р е ц е н з е н т ы :

кафедра электротехники и электроники

Белорусского национального технического университета
(кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой

Ю. В. Бладыко);

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
электрооборудования сельскохозяйственных предприятий

Белорусского государственного аграрного технического
университета *Е. П. Забелло*

Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или ее части не может быть осуществлено без разрешения учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».

Коровкина, Н. П.

К68 Трансформаторы, электрические машины, электрооборудование. Лабораторный практикум : учеб.-метод. пособие для студентов химико-технологических специальностей / Н. П. Коровкина, Н. М. Олиферович, М. А. Анкуда. – Минск : БГТУ, 2019. – 90 с.

ISBN 978-985-530-765-6.

В учебно-методическое пособие включено восемь лабораторных работ по исследованию трансформатора, асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором, двигателя и генератора постоянного тока, синхронной машины, аппаратуры управления и защиты, компенсации реактивной мощности асинхронных двигателей. В каждой работе содержится теоретический материал, домашнее задание по подготовке к лабораторному занятию, порядок проведения исследования, а также контрольные вопросы.

Пособие является основой для изучения электротехнических дисциплин.

УДК 621.316.731+621.313(075.8)

ББК 31/261.8я73

ISBN 978-985-530-765-6

© УО «Белорусский государственный технологический университет», 2019

© Коровкина Н. П., Олиферович Н. М.,
Анкуда М. А., 2019

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов химико-технологических специальностей и соответствует требованиям новых учебных программ.

Приведенные теоретические сведения в пособии не дают ответа на все вопросы, поэтому в каждой работе студент адресуется к основным учебным пособиям по курсам с указанием параграфов, которые необходимо проработать. Перечень литературы приведен в конце издания.

Лабораторные занятия по трансформаторам, электрическим машинам и электрооборудованию направлены на решение следующих учебных задач:

- закрепление теоретического материала;
- подробное ознакомление с устройством трансформаторов, электрических машин, аппаратуры управления и защиты, характеристиками этих электротехнических устройств, составляющих предмет лабораторной практики;
- овладение практическими способами настройки электротехнических устройств на заданный режим и управление ими;
- освоение техники проведения экспериментального исследования физических моделей;
- выработка умения выносить суждения о рабочих свойствах и степени пригодности исследованных и исследуемых электротехнических устройств, необходимых для решения тех или иных практических задач.

Экспериментальные задачи, предлагаемые на лабораторных занятиях, могут быть успешно решены в отведенное время только при условии тщательной предварительной подготовки к каждой лабораторной работе.

Подготовка заключается в ознакомлении с содержанием работы, выяснении цели и задач работы, изучении приборов и аппаратов, необходимых для выполнения работы, схемы их соединения и последовательности выполнения всех операций, подготовкой бланка к выполняемой работе.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Цель работы: изучить режимы работы трансформатора; исследовать влияние нагрузки на напряжение вторичной обмотки трансформатора; определить коэффициент полезного действия трансформатора.

1. Общие сведения

Трансформатор – статический электромагнитный аппарат, имеющий две или более индуктивно связанных обмоток и предназначенный для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения при той же частоте.

Трансформатор состоит из стального сердечника (магнитопровода), собранного из тонких пластин или лент электротехнической стали, изолированных друг от друга с целью снижения потерь на вихревые токи. Сердечник обладает хорошей магнитной проницаемостью и служит для усиления магнитной связи между обмотками. На сердечнике однофазного трансформатора (рис. 1.1) в простейшем случае расположены две обмотки, выполненные из изолированного медного или алюминиевого провода.

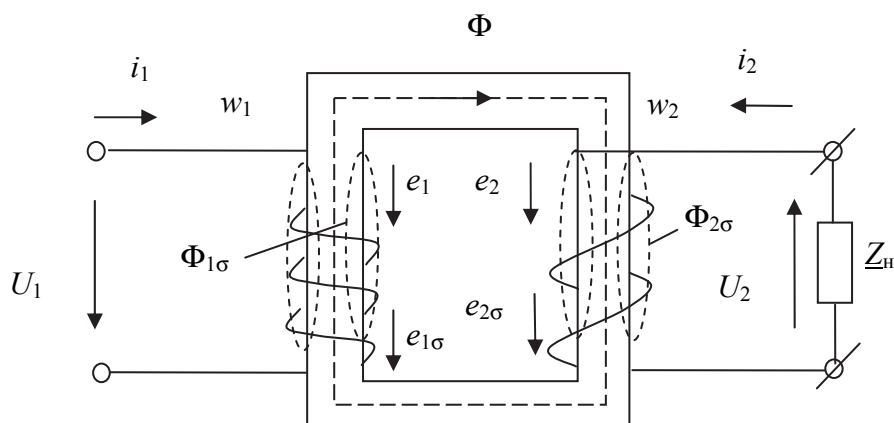


Рис. 1.1. Упрощенная схема однофазного трансформатора

Изображение однофазного трансформатора на рис. 1.1 показано упрощенно, схематически. В реальных трансформаторах обе обмотки расположены на одних и тех же стержнях магнитопровода.

В основе принципа работы трансформатора лежит закон электромагнитной индукции, а также явления самоиндукции и взаимной индукции.

При подаче на первичную обмотку трансформатора синусоидального напряжения $U_{1\text{ном}}$ в обмотке W_1 возникает ток I_1 и создается магнитодвижущая сила (МДС) – $I_1 W_1$.

МДС первичной обмотки вызывает поток Φ , который замыкается по магнитопроводу и называется основным. Поток Φ , в соответствии с законом электромагнитной индукции (ЭМИ), наводит в первичной и вторичной обмотках трансформатора ЭДС E_1 и E_2 соответственно. Если вторичная обмотка замкнута на нагрузку, то по ней протекает ток I_2 , создается МДС $I_2 W_2$. МДС $I_1 W_1$ и $I_2 W_2$ создают потоки рассеивания $\Phi_{1\sigma}$ и $\Phi_{2\sigma}$, а те, в свою очередь, ЭДС рассеивания – $E_{1\sigma}$ и $E_{2\sigma}$.

Таким образом, электрическая энергия с параметрами U_1 , I_1 и частотой f преобразовывается в энергию переменного тока с параметрами U_2 , I_2 и той же частотой f .

Мгновенные значения ЭДС первичной и вторичной обмоток, как следует из закона электромагнитной индукции, имеют выражения

$$e_1 = -\frac{W_1 d\Phi}{dt};$$

$$e_2 = -\frac{W_2 d\Phi}{dt},$$

их действующие значения (при синусоидальном изменении) соответственно равны:

$$E_1 = 4,44 W_1 f \Phi_{\text{max}};$$

$$E_2 = 4,44 W_2 f \Phi_{\text{max}}.$$

Разделив значение ЭДС первичной обмотки E_1 на соответствующее значение ЭДС E_2 вторичной обмотки, получим

$$n = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2}.$$

Величина n называется коэффициентом трансформации трансформатора.

Опыт холостого хода трансформатора. Режим холостого хода (ХХ) трансформатора (рис. 1.2) имеет место, когда разомкнута вторичная обмотка трансформатора ($I_2 = 0$), а первичная обмотка находится под номинальным напряжением ($U_{10} = U_{1\text{ном}}$). Режим ХХ служит для определения коэффициента трансформации n , магнитного потока Φ_{max} , а также мощности потерь в магнитопроводе $\Delta P_{\text{ст}}$. В этом режиме по первичной обмотке трансформатора протекает небольшой ток $I_{1\text{x}}$, который составляет 4–10% от номинального тока $I_{1\text{ном}}$. Относительное выражение тока холостого хода (%) $i_{\text{x}} = (I_{1\text{x}}/I_{1\text{ном}})100\%$.

Согласно рис. 1.1, уравнения электрического состояния первичной и вторичной обмоток трансформатора при ХХ:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + R_1 \dot{I}_{10} + jX_1 \dot{I}_{10};$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2, \text{ т. к. } I_2 = 0.$$

Пренебрегая падением напряжения в первичной обмотке $z_1 I_{1\text{x}}$ по сравнению с E_1 , коэффициент трансформации можно определить по измеренным напряжениям

$$n = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_{1\text{ном}}}{U_{2\text{x}}}.$$

Активная мощность, потребляемая в режиме ХХ (P_{x}) $\Delta P_{\text{ст}}$, почти целиком расходуется на перемагничивание. Мощностью потерь на нагрев первичной обмотки $R_1 I_{1\text{x}}^2$ можно пренебречь. Магнитные потери P_{x} зависят от частоты тока f , от массы и сорта стали, они пропорциональны квадрату напряжения:

$$P_{\text{x}} = \Delta P_{\text{ст}} = k \Phi_{2\text{max}}^2 = U_1^2.$$

При постоянном U_1 , $P_{\text{x}} = \text{const}$ и является паспортным параметром трансформатора. Это так называемые постоянные потери.

Опыт лабораторного короткого замыкания (КЗ). В опыте КЗ на первичную обмотку трансформатора при накоротко замкнутой вторичной подается пониженное напряжение такой величины, при которой по первичной обмотке протекает номинальный ток $I_{1\text{ном}}$. Напряжение при этом составляет не более 5–11% $U_{1\text{ном}}$. Это напряжение называют напряжением короткого замыкания $U_{1\text{к}}$.

При этом токи в первичной и вторичной обмотках равны номинальным $I_{1к} = I_{1ном}$ и $I_{2к} = I_{2ном}$. Для характеристики $U_{1к}$ обычно пользуются его относительным выражением, называемым напряжением короткого замыкания: $u_k = 100 U_{1к} / U_{1ном}$. Необходимость понижения напряжения вызвана неоднократным возрастанием тока при $Z_n = 0$. Режим короткого замыкания трансформатора в условиях эксплуатации, когда $U_1 = U_{1ном}$, является аварийным.

Понижение первичного напряжения вызывает понижение магнитной индукции B_m в сердечнике трансформатора. При незначительном понижении напряжения U_1 можно пренебречь магнитными потерями и считать, что мощность, потребляемая в этом режиме, расходуется на покрытие электрических потерь в обмотках:

$$\Delta P_k = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 = I_{1ном}^2 R_1 + I_{2ном}^2 R_2.$$

Электрические потери изменяются пропорционально квадрату тока в обмотках и поэтому являются переменными.

С учетом коэффициента загрузки $k_{нг} = I_1 / I_{1ном} = I_2 / I_{2ном}$, электрические потери $\Delta P_k = k_{нг}^2 P_k$.

Из опыта КЗ определяют сопротивления обмоток трансформатора. Для этого вводят понятие сопротивлений короткого замыкания Z_k, R_k, X_k :

$$Z_k = \frac{U_{1к}}{I_{1к}} = \frac{U_{1к}}{I_{1ном}},$$

$$R_k = \frac{\Delta P_k}{I_{1ном}^2};$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}.$$

Сопротивления R_1, X_1 первичной обмотки и сопротивления R_2, X_2 вторичной обмотки определяются следующими соотношениями:

$$R_1 = R_2' = n^2 R_2 = \frac{R_k}{2}; \quad X_1 = X_2' = n^2 X_2 = \frac{X_k}{2},$$

где R_2' и X_2' – приведенные сопротивления вторичной обмотки к первичной.

Нагрузочный режим. В нагрузочном режиме вторичная обмотка трансформатора замкнута на нагрузку Z_n . В этом случае

под действием ЭДС $\dot{E}_2$ во вторичной цепи, содержащей обмотку с сопротивлением $\underline{Z}_2$ и нагрузку $\underline{Z}_н$, проходит ток $\dot{I}_2$. Если принять $\underline{Z}_н \dot{I}_2 = \dot{U}_н = \dot{U}_2$, то, как было показано выше, $\dot{E}_2 = \underline{Z}_2 \dot{I}_2 + \dot{U}_2$ или $\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \underline{Z}_2 \dot{I}_2$.

При работе трансформатора под нагрузкой напряжение U_2 меняется при изменении тока нагрузки I_2 . Имеет место потеря напряжения, которая определяется арифметической разностью между первичным и приведенным вторичным напряжением $\Delta U'_2 = U_1 - U'_2$.

Зависимость $U_2 = f(I_2)$ при $U_1 = \text{const}$ называют внешней характеристикой трансформатора (рис. 1.2, а).

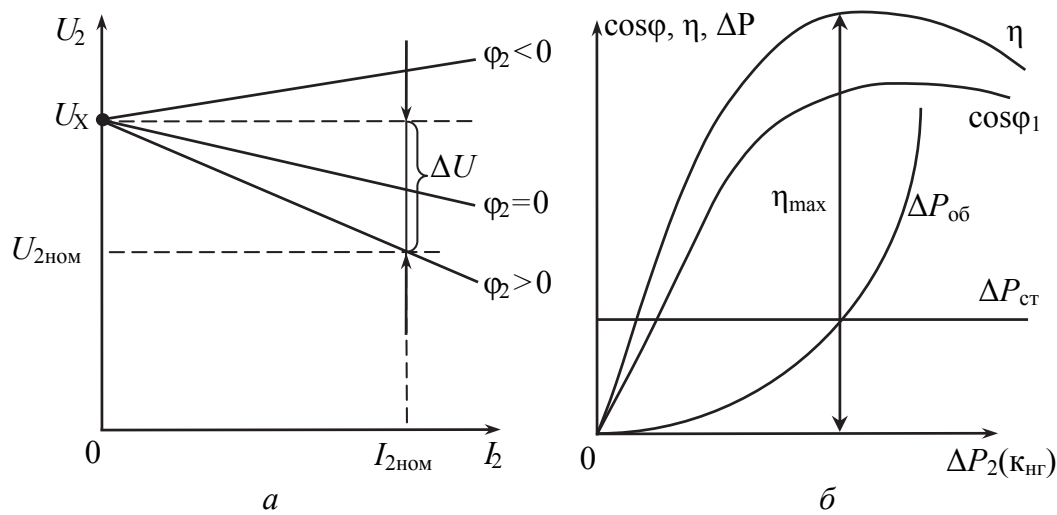


Рис. 1.2. Внешние (а) и рабочие (б) характеристики трансформатора

На рис. 1.2, а показаны внешние характеристики трансформатора при активной ($\varphi = 0$), активно-индуктивной ($\varphi > 0$) и активно-емкостной ($\varphi < 0$) нагрузках.

Изменение вторичного напряжения выражают в процентах от номинального напряжения:

$$\Delta u_2 = \frac{(U_{2x} - U_2)}{U_{2x}} \cdot 100\%.$$

Разный наклон внешних характеристик, а значит и разное падение напряжения Δu_2 при одном и том же токе нагрузки, можно объяснить аналитической зависимостью:

$$\Delta u_2 = \kappa_{\text{нг}} \left[\left(\frac{R_{\text{к}} I_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \right) \cos \varphi_2 + \left(\frac{X_{\text{к}} I_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \right) \sin \varphi_2 \right]$$

или

$$\Delta u_2 = \kappa_{\text{нг}} [U_{\text{к.а}} \cos \varphi_2 + U_{\text{к.р}} \sin \varphi_2],$$

где $U_{\text{к.а}} = U_{\text{лк}} \cos \varphi_2 = U_{\text{лк}} R_{\text{к}} / Z_{\text{к}}$ и $U_{\text{к.р}} = U_{\text{лк}} \sin \varphi_2 = U_{\text{лк}} X_{\text{к}} / Z_{\text{к}}$ – активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания.

Зная Δu_2 , можно для заданного коэффициента загрузки $\kappa_{\text{нг}}$ рассчитать U_2 :

$$U_2 = U_{2\text{х}} \left(1 - \frac{\Delta u_2}{100\%} \right).$$

Важными эксплуатационными характеристиками нагрузочного режима являются зависимости $\cos \varphi_1 = f(P_2)$ и $\eta = f(P_2)$ (рис. 1.2, б), которые могут быть построены в функции коэффициента загрузки $\kappa_{\text{нг}}$.

Изменение $\cos \varphi_1$ с ростом нагрузки зависит от характера нагрузки, ее величины и может быть объяснено с помощью треугольника мощностей трансформатора (рис. 1.3).

В режиме холостого хода трансформатор представляет собой реактивный электроприемник с низким значением $\cos \varphi$. В режиме короткого замыкания $\cos \varphi = 1$. Зависимость КПД от нагрузки $\eta = f(\kappa_{\text{нг}})$ выражается формулой

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% = \frac{P_2 \cdot 100\%}{P_2 + \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{об}}} = \frac{\kappa_{\text{нг}} S_{\text{ном}} \cos \varphi_2}{\kappa_{\text{нг}} S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_{\text{ст}} + \kappa_{\text{нг}}^2 P_{\text{об}}}.$$

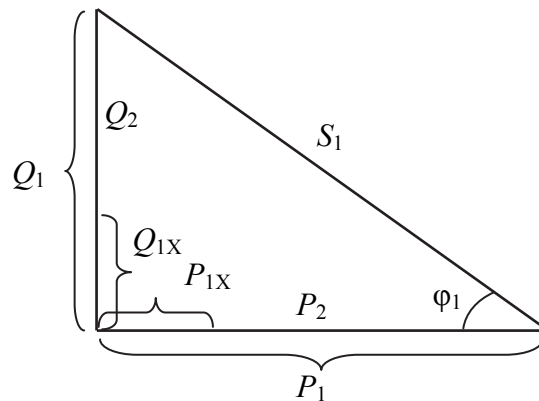


Рис. 1.3. Треугольник мощностей трансформатора

Максимальный КПД трансформатора будет при равенстве электрических потерь и потерь в стали:

$$\kappa_{\text{нг}} = \sqrt{\frac{P_{\text{ст}}}{P_{\text{об}}}}.$$

2. Домашнее задание для подготовки к лабораторному занятию

- Изучить литературу по теме занятия: § 8.1, 8.2, 8.4, 8.5 [1]; § 17.4, 17.5, 18.1 [2].
- Выполнить домашнее задание.

Домашнее задание

Используя паспортные данные трансформатора (табл. 1.1), определить коэффициент трансформации n , номинальные токи $I_{1\text{ном}}$, $I_{2\text{ном}}$, активные R_1 , R_2 и реактивные X_1 , X_2 сопротивления обмоток, значение коэффициента нагрузки $\kappa_{\text{нг.опт}}$, при котором КПД трансформатора максимален. По данным значениям $\kappa_{\text{нг}}$ (в соответствии с номером варианта в табл. 1.3) определить U_2 и η при активной нагрузке трансформатора. Результаты расчетов внести в табл. 1.2.

Таблица 1.1

Данные	S , ВА	U_1 , В	U_2 , В	$P_{1\text{х}}$, Вт	$P_{\text{к}}$, Вт	$U_{\text{к}}$, %	$i_{\text{х}}$, %
Паспортные	250	220	24	10	30	13	10
Экспериментальные							

Таблица 1.2

Результаты расчета	n	$I_{1\text{ном}}$, А	$I_{2\text{ном}}$, А	R_1 , Ом	X_1 , Ом	R_2 , Ом	X_2 , Ом	$\kappa_{\text{нг.опт}}$	U_2 , В	η
Паспортные										
Экспериментальные										

Таблица 1.3

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

3. Порядок выполнения работы

Ознакомиться с устройством трансформатора, электроизмерительными приборами, электрическими схемами (рис. 1.4–1.5).

Исследование режима холостого хода однофазного трансформатора

1. Подать напряжение на первичную обмотку трансформатора, включив автоматический выключатель $Q1$ и выключатель $Q4$ (рис. 1.4).

2. Снять показания приборов и записать в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Измерено				Вычислено			
$U_{1\text{ном}}$, В	$I_{1\text{x}}$, А	P_{x} , Вт	$U_{2\text{x}}$, В	n	$\cos\varphi$	i_{x} , %	η

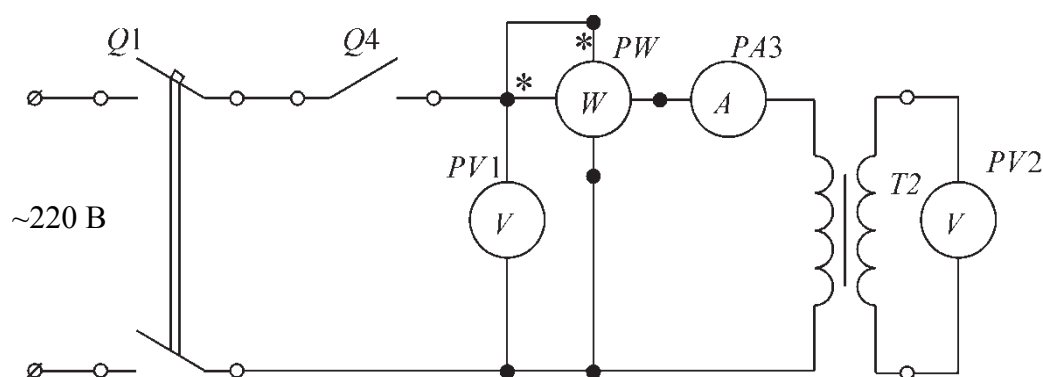


Рис. 1.4. Электрическая схема опыта режима холостого хода трансформатора

Вычислить следующие величины:

$$n = \frac{U_{1\text{ном}}}{U_{2\text{x}}}; \cos\varphi = \frac{P_{\text{x}}}{U_{1\text{ном}} I_{1\text{x}}}; i_{\text{x}} = \frac{I_{1\text{x}}}{I_{1\text{ном}}} 100\%; \eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

3. Отключить схему режима холостого хода выключателем $Q4$, $Q1$ оставить включенным.

Исследование нагрузочного режима трансформатора

4. Подать напряжение на первичную обмотку трансформатора, включив выключатель $Q3$ (рис. 1.5).

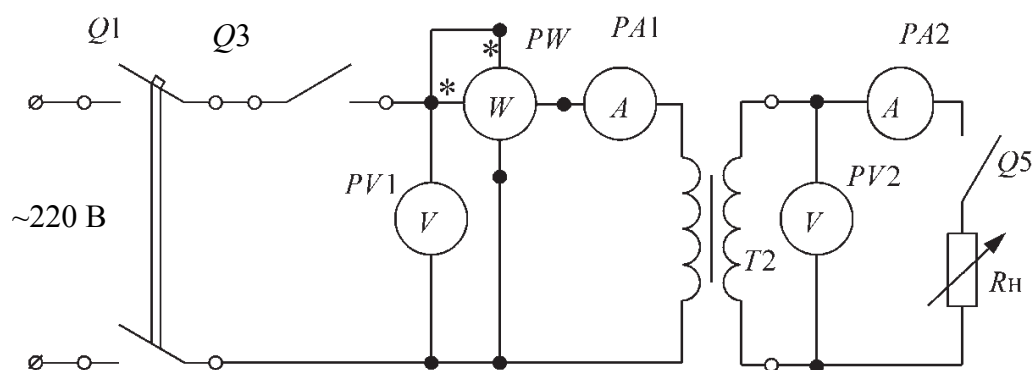


Рис. 1.5. Электрическая схема нагрузочного режима трансформатора

5. Снять показания приборов и записать их в табл. 1.5.

Таблица 1.5

Измерено					Вычислено				
$U_1, \text{В}$	$I_1, \text{А}$	$P_1, \text{Вт}$	$U_2, \text{В}$	$I_2, \text{А}$	$P_2, \text{Вт}$	$\kappa_{\text{нг}}$	$\eta, \%$	$\cos \varphi$	$\Delta u_2, \%$

6. Вычислить следующие величины:

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2; (\cos \varphi_2 = 1); \eta = \left(\frac{P_2}{P_1} \right) 100\%; \cos \varphi_1 = \frac{P_1}{U_1 I_1};$$

$$\kappa_{\text{нг}} = \frac{I_1}{I_{1\text{ном}}}; \Delta u_2 = \frac{(U_{2\text{x}} - U_2)}{U_{2\text{x}}} 100\%,$$

где $I_{1\text{ном}}$ определяется по паспортным данным трансформатора

$$I_{1\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}}.$$

7. Отключить схему режима работы трансформатора под нагрузкой выключателем Q3, Q1 оставить включенным.

Исследование режима лабораторного короткого замыкания однофазного трансформатора

8. Установить регулятор лабораторного автотрансформатора (ЛАТР) в нулевое положение. Подать напряжение на первичную

обмотку трансформатора, включив выключатель $Q2$ (рис. 1.6). Постепенно увеличивать напряжение на первичной обмотке трансформатора до тех пор, пока на $I_{1к} = I_{1ном}$ ($PA1$). Записать показания приборов в табл. 1.6.

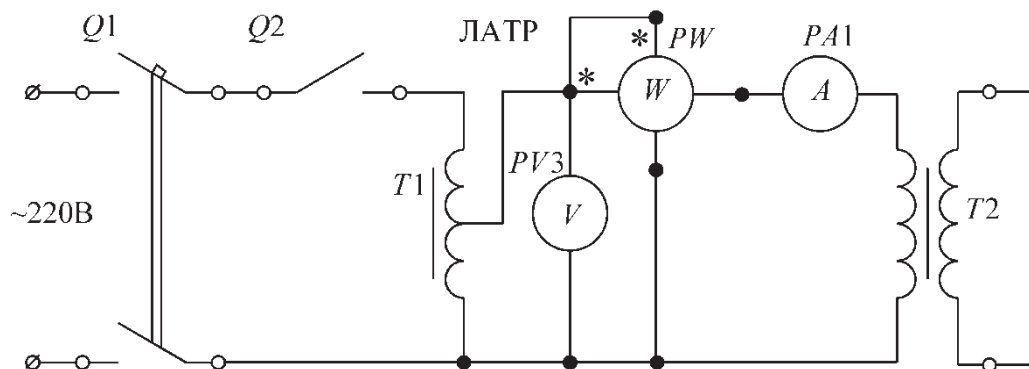


Рис. 1.6. Электрическая схема опыта лабораторного короткого замыкания трансформатора

Таблица 1.6

Измерено			Вычислено	
$U_{1к}, В$	$I_{1к}, А$	$P_k, Вт$	$\cos\varphi_k$	$u_k, \%$

9. Вычислить следующие величины:

$$\cos\varphi_k = \left(\frac{P_k}{U_{1к} I_{1ном}} \right); u_k = \frac{U_{1к}}{U_{1ном}} 100\%.$$

10. Построить в общей системе координат рабочие характеристики однофазного трансформатора $(U_2, \cos\varphi_1, \eta) = f(P_2)$.

11. Сравнить результаты опыта с номинальными данными табл. 1.1 и 1.2.

12. Показать снятые данные преподавателю. Если замечаний нет, отключить стенд от сети автоматическим выключателем $Q1$.

4. Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Выполненное домашнее задание.
3. Электрические схемы исследуемых режимов трансформатора.

4. Таблицы измерений и вычислений.
5. Рабочие характеристики трансформатора.
6. Выводы о проделанной работе.

5. Контрольные вопросы

1. Каково устройство и принцип действия трансформатора?
2. Почему коэффициент трансформации трансформатора определяется из опыта холостого хода?
3. Для чего и как проводятся опыты холостого хода и лабораторного короткого замыкания?
4. При каких условиях коэффициент полезного действия трансформатора достигает максимального значения?
5. Почему с возрастанием тока нагрузки повышается $\cos\varphi$ трансформатора?
6. Какое влияние оказывает характер нагрузки на внешнюю характеристику трансформатора?
7. Почему напряжение вторичной обмотки трансформатора под нагрузкой отличается от ЭДС вторичной обмотки?
8. При каких условиях напряжение вторичной обмотки трансформатора U_2 может превысить напряжение холостого хода U_{2x} ?
9. Почему трансформаторы не работают от сети постоянного тока?
10. Почему с возрастанием тока нагрузки трансформатора увеличивается ток в его первичной обмотке?
11. На что расходуется активная мощность, потребляемая трансформатором при опытах в режимах холостого хода и короткого замыкания?
12. Как опытным путем определить напряжение короткого замыкания трансформатора?
13. Изменится ли основной магнитный поток и ток холостого хода, если трансформатор включить в сеть с частотой выше или ниже номинальной?
14. Изменится ли основной магнитный поток и ток холостого хода, если трансформатор включить в сеть с частотой выше или ниже номинальной?
15. Как опытным путем определяют напряжение короткого замыкания трансформатора?

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

Цель работы: изучить устройство, принцип действия асинхронного двигателя с фазным ротором, исследовать его пусковые, регулировочные и рабочие характеристики.

1. Общие сведения

Асинхронный трехфазный двигатель (АД) с фазным ротором состоит из неподвижной части – статора и вращающейся части – ротора. Статор включает в себя корпус, магнитопровод, обмотку; ротор – вал, магнитопровод, обмотку и кольца. Магнитопровод изготавливается из отдельных тонких пластин электротехнической стали и имеет пазы, в которые уложены три обмотки, смещенные между собой на 120° . Обмотки статора и ротора соединены, как правило, в звезду. Обмотка статора подключается к трехфазной сети через клеммную коробку, а обмотка ротора через кольца и щетки – к реостату (также с помощью клеммной коробки).

При подключении статора к сети с напряжением U_1 по его обмоткам протекают синусоидальные токи I_1 , сдвинутые по фазе между собой на 120° , благодаря чему создается вращающееся с частотой n_1 магнитное поле:

$$n_1 = \frac{60f}{p},$$

где f – частота тока сети; p – число пар магнитных полюсов.

В результате пересечения этим полем обмоток ротора в них создается ЭДС E_2 и ток I_2 . Взаимодействие активной составляющей тока ротора с магнитным полем образует вращающий момент двигателя M , под действием которого ротор вращается с частотой $n = n_1(1 - s)$, где s – скольжение ротора относительно магнитного поля статора:

$$s = \frac{(n_1 - n)}{n_1}.$$

Асинхронный двигатель с фазным ротором имеет лучшие пусковые свойства (большой пусковой момент при малом пусковом токе), чем асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, уступая последнему в экономичности, надежности и стоимости. Вторым достоинством рассматриваемого двигателя является более широкая возможность изменения частоты вращения (параметрическое регулирование).

Пуск асинхронного двигателя с фазным ротором

Подключение реостата к ротору во время пуска приводит к увеличению активного сопротивления роторной цепи, что уменьшает пусковой ток. Однако с этим в гораздо большей степени возрастает

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2'}{\sqrt{R_2'^2 + X_2^2}} = \frac{(R_2 + R_g)}{\sqrt{(R_2 + R_g)^2 + X_2^2}},$$

где R_2 , X_2 – соответственно активное и реактивное сопротивления роторной цепи; R_g – сопротивление добавочного реостата в цепи ротора; φ_2 – угол сдвига между ЭДС и током ротора. Это приводит к увеличению пускового момента двигателя

$$M = k_m \Phi_{\max} I_2 \cos \varphi_2,$$

где k_m – коэффициент, зависящий от конструктивных особенностей двигателя; $\Phi_{\max}$ – амплитуда магнитного потока; $I_2 \cos \varphi_2$ – активная составляющая тока ротора.

Таким образом, введение реостата в цепь ротора значительно улучшает его пусковые качества. Изменяя сопротивление реостата R_g , можно получить различные механические характеристики $n = f(M)$ или $s = f(M)$ (рис. 2.1). При этом напряжение сети U_1 и частота f_1 принимаются постоянными. Здесь M – момент, обусловленный нагрузкой на валу ротора.

Построение механической характеристики асинхронного двигателя может быть выполнено по упрощенной формуле Клосса:

$$M = \frac{2M_{\max}}{\left(\frac{S}{S_{\text{кр}}}\right) + \left(\frac{S_{\text{кр}}}{S}\right)},$$

где $S_{кр} = R'_2 / X_k$ – критическое скольжение, при котором двигатель развивает максимальный момент M_{max} ; $X_k = X_1 + X'_2$ – полное индуктивное сопротивление двигателя, при этом $R'_2 = n^2 R_2$; $X'_2 = n^2 X_2$ – сопротивления ротора, приведенные к статору; n – коэффициент трансформации ЭДС от статора к ротору.

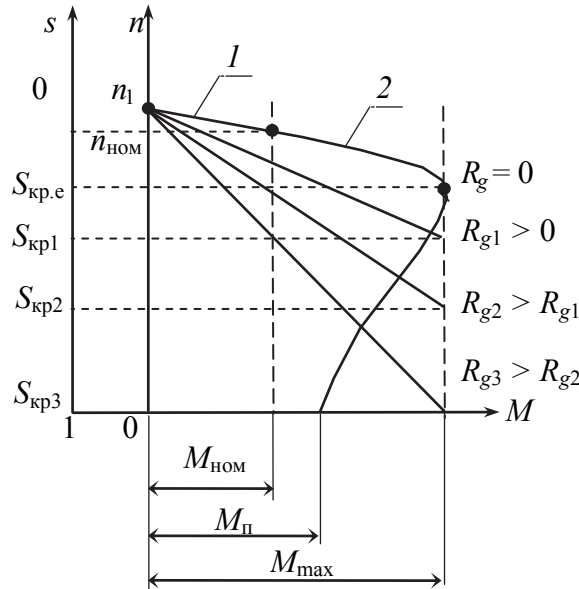


Рис. 2.1. Механические характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором при различных значениях R_g в цепи ротора:
1 – область нормальной работы; 2 – область перегрузки

Механическая характеристика, построенная при $R_g = 0$, называется естественной и имеет критическое скольжение

$$S_{кр.е} = \frac{R'_2}{X_k},$$

а при $R_g \neq 0$ – искусственная со скольжением

$$S_{кр.и} = \frac{(R'_2 + R'_g)}{X_k}.$$

Количество искусственных механических характеристик определяется числом ступеней реостата (рис. 2.1).

Если подобрать R_g так, чтобы $(R'_2 + R'_g) = X_k$, тогда $S_{кр.и} = 1$, и максимальный момент двигателя достигается во время пуска, т. е.

$M_{\Pi} = M_{\max}$ (R_{g1} на рис. 2.1). В этом случае двигатель легче преодолевает момент сопротивления механизма и быстрее приводит его во вращение.

Значение максимального момента асинхронного двигателя не зависит от сопротивления ротора и поэтому при реостатном регулировании остается постоянным:

$$M_M \approx \frac{kU_1^2}{X_K}.$$

Механическую характеристику асинхронного двигателя в рабочей зоне можно считать прямой, проходящей через точки холостого хода ($M = 0, s = 0$) и номинальной работы ($M_{\text{ном}}, S_{\text{ном}}$). Искусственные механические характеристики (рис. 2.1) получают путем пропорционального пересчета:

$$\frac{S_{\text{кр.и}}}{S_{\text{кр.е}}} = \frac{S_{\text{ном.и}}}{S_{\text{ном.е}}} = \frac{R_2 + R_g}{R_2},$$

где $S_{\text{кр.и}}, S_{\text{кр.е}}, S_{\text{ном.и}}, S_{\text{ном.е}}$ – критические и номинальные скольжения искусственных и естественных механических характеристик соответственно.

$S_{\text{кр.е}}$ можно определить по формуле Клосса, подставив $M_{\text{ном}}$ и $S_{\text{ном}}$ из паспортных данных двигателя:

$$S_{\text{кр.е}} = \left(K_M + \sqrt{K_M^2 - 1} \right),$$

где $K_M = M_{\max}/M_{\text{ном}}$ – коэффициент, характеризующий перегрузочную способность двигателя (берется из справочника);

$$M_{\text{ном}} = 9500 \frac{P_{\text{ном}} [\text{кВт}]}{n_{\text{ном}}}; \quad S_{\text{ном}} = \frac{n_1 - n_{\text{ном}}}{n_1}.$$

Пусть асинхронный двигатель включается в сеть ($s = 1$) при сопротивлении в цепи ротора R_g , соответствующем принятому наибольшему моменту $M_{\Pi 1}$. Под действием $M_{\Pi 1}$ ротор трогается с места, преодолевает инерциальные силы и постепенно разгоняется (участок П–1 на рис. 2.2). При этом момент двигателя падает, т. к. с уменьшением скольжения уменьшается и ток:

$$I_2 = \frac{E_{2H} S}{\sqrt{R_2^2 + (X_{2H} S)^2}},$$

где E_{2H} и X_{2H} – ЭДС и реактивное сопротивление неподвижного ротора.

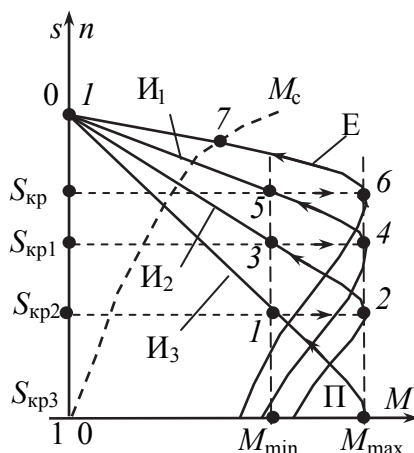


Рис. 2.2. Схема пуска асинхронного двигателя с фазным ротором с помощью реостата в роторной цепи

Для оптимального пускового процесса (в отношении времени пуска, изменения тока и скорости) пуск производится с поддержанием достаточно большого момента, изменяющегося в пределах от M_{max} до M_{min} путем соответствующего переключения ступеней роторного реостата.

В момент пуска реостат полностью введен в цепь ротора (точка П на рис. 2.2). Двигатель развивает M_{max} , что соответствует скольжению $S_{кр3} = 1$. По мере увеличения частоты вращения ротора n (участок П–1 характеристики I_3) скольжение уменьшается, а, следовательно, уменьшается ток ротора I_2 и вращающий момент M до величины M_{min} (точка 1). В этой точке выводится 3-я ступень реостата (механическая характеристика I_3). Так как уменьшается сопротивление ротора, увеличивается ток ротора I_2 и вращающий момент M до величины M_{max} (точка 2). В силу инерционности ротор вращается с частотой вращения, соответствующей скольжению $S_{кр2}$ (участок 1–2). В точке 2 двигатель переходит на вторую ступень реостата и снова развивает M_{max} и переходит на механическую характеристику I_2 . При достижении M_{min} происходит очередное переключение реостата с уменьшением его сопротивления. Двигатель переходит на механическую характеристику I_1 . Наконец, в точке 5 реостат полностью выводится из цепи ротора, двигатель переходит на естественную характеристику Е. Пуск заканчивается в точке пересечения характеристики двигателя с харак-

теристикой рабочей машины в точке 7, соответствующей моменту нагрузки M_c .

Для соблюдения требуемого закона регулирования момента в процессе пуска переключение реостата производится автоматически в функции тока, частоты вращения либо времени.

Регулирование частоты вращения

Если считать характеристику $M(s)$ в пределах рабочей части линейной, то, как было показано выше, изменения s пропорциональны изменениям R_2 . Поэтому, вводя в ротор R_g , можно получить различную частоту вращения.

Так, если при нагрузке на валу M_c двигатель работал на естественной механической характеристике в точке a с частотой n_1 (см. рис. 2.3), то при вводе в ротор добавочного сопротивления R_{g1} двигатель переходит на 2-ю характеристику по отрезку ab , сохраняя частоту вращения, т. к. при этом в точке b момент двигателя меньше M_c , то начинается затормаживание ротора до частоты вращения n_2 (точка c механической характеристики). При этом с увеличением скольжения растут I_2 и M , пока не наступит равновесие $M = M_c$. Аналогично сопротивлению R_{g2} соответствует n_3 (точка d), а $R_{g3} - n_4$ (точка e).

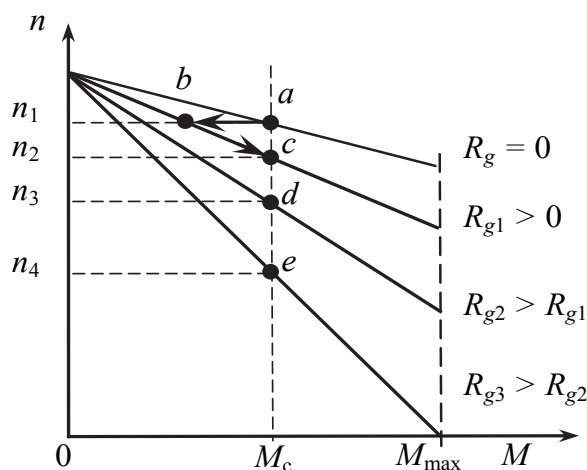


Рис. 2.3. Регулирование частоты вращения двигателя с фазным ротором изменением скольжения

Такое регулирование имеет ряд недостатков. Так, при работе двигателя с реостатом его КПД снижается из-за дополнительных

потерь энергии в реостате, связанных с его нагревом. Приблизительно изменение КПД двигателя при постоянной нагрузке пропорционально изменению скольжения, что ограничивает диапазон регулирования

Диапазон изменения частоты вращения $\Delta n = n_{\max}/n_{\min}$ и составляет $(1,5-2) : 1$.

Как видно из рис. 2.3, увеличение сопротивления в роторной цепи снижает жесткость механических характеристик (увеличивается изменение скорости при изменении нагрузки M_c). Регулирование только вниз от минимальной скорости, как правило, ступенчатое, не автоматизируемое. Достоинством этого способа регулирования является его простота.

Следует иметь в виду, что пусковой реостат рассчитан по нагреву на кратковременный режим работы и для регулирования частоты вращения не годится. Для продолжительного режима работы изготавливаются пуско-регулирующие реостаты, рассчитанные на длительный режим работы.

При отключении двигателя с фазным ротором вначале разрывают цепь питания статора при замкнутой накоротко обмотке ротора, а затем вводят реостат, подготавливая установку к повторному пуску. Отключение статорного питания при включенном в роторную цепь сопротивлении или (еще хуже) при разомкнутой цепи роторных обмоток вызывает опасные перенапряжения.

2. Домашнее задание для подготовки к лабораторному занятию

- Изучить литературу по теме занятия: § 12.1–12.8 [1]; § 21.1–21.3, 21.5, 22.1, 22.2 [2].
- Выполнить домашнее задание.

Домашнее задание

По данным табл. 2.1 определить номинальный ток, максимальный момент асинхронного двигателя, номинальное и критическое скольжение, величину сопротивления фазы пускового реостата ($R_{2пр}$) для получения пускового момента, равного максимальному. Данные внести в табл. 2.2.

Таблица 2.1

Вариант	Тип двигателя	$U_{\text{ном}}, \text{В}$	$P_{\text{ном}}, \text{кВт}$	$n_{\text{ном}}, \text{мин}^{-1}$	$\eta_{\text{ном}}, \%$	$\cos\varphi_{\text{ном}}$	$M_{\text{max}} / M_{\text{ном}}$	$R_{2\phi}, \text{Ом}$
1	АКН-2-15-57-6У4	875	1000	985	95,1	0,87	2,6	0,064
2	АКН-2-15-69-6У4	1050	1250	985	95,3	0,87	2,6	0,0708
3	АКН-2-15-57-6У4	1360	1600	985	95,5	0,89	2,6	0,0089
4	АКН-2-15-69-6У4	1700	2000	990	95,8	0,89	2,8	0,0097

Таблица 2.2

$I_{\text{ном}}, \text{А}$	$M_{\text{max}}, \text{Н}\cdot\text{м}$	$S_{\text{ном}}$	$S_{\text{кр}}$	$R_{2\text{пр}}, \text{Ом}$

3. Порядок выполнения лабораторной работы

Объектом исследования является асинхронный трехфазный двигатель с фазным ротором (тип АК-51-6). Нагрузкой двигателя служит машина постоянного тока, работающая в режиме генератора.

Номинальная мощность генератора $P_{\text{ном}} = 2,2 \text{ кВт}$.

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой и ее принципиальной электрической схемой (рис. 2.4).

2. Подготовить установку к пуску: установить шунтирующие выключатели ($Q17-Q21$) в разомкнутое положение, подключив этим полное сопротивление реостата $R1$ к ротору асинхронного двигателя; регулятор напряжения $T2$ в цепи возбуждения генератора постоянного тока установить на 0.

3. Осуществить пуск асинхронного двигателя, включив $Q1$. Записать максимальное значение пускового тока двигателя в табл. 2.3.

4. Постепенно уменьшая сопротивление реостата включением $Q17-Q21$, вывести двигатель на естественную характеристику.

Таблица 2.3

Положение реостата	$I_{\text{п. max}}$
Реостат введен	
Реостат выведен	

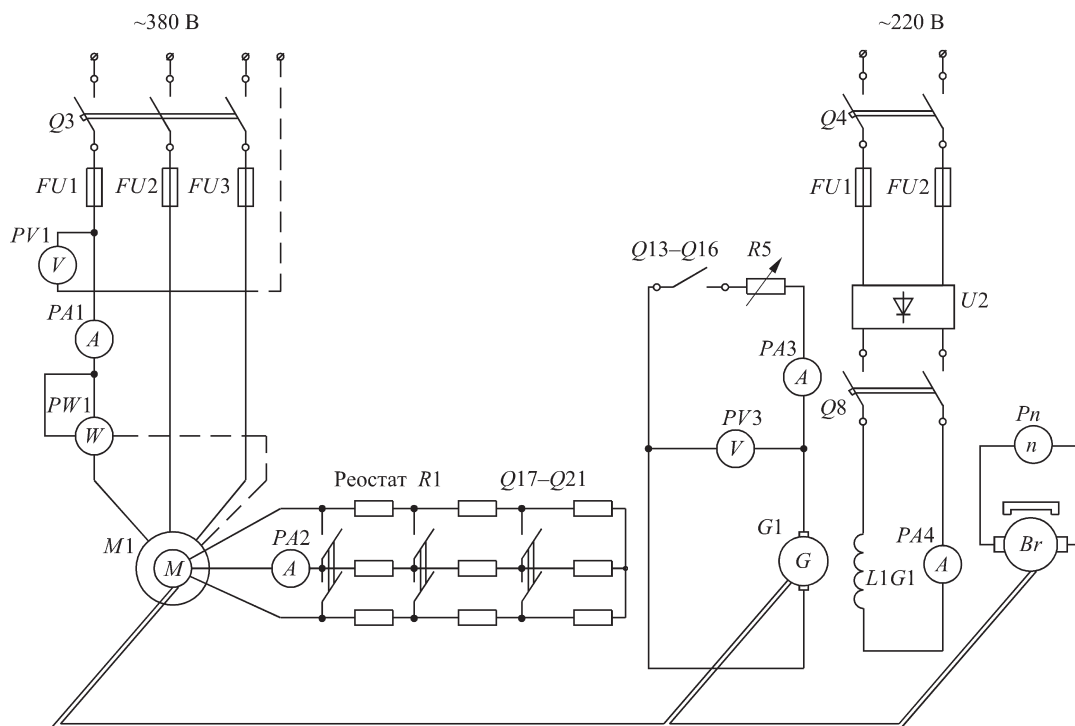


Рис. 2.4. Электрическая схема исследования асинхронного двигателя с фазным ротором

5. Повторить пуск при закороченном роторе ($Q17$ в замкнутом положении). Записать максимальное значение пускового тока двигателя в табл. 2.3.

6. Не отключая двигатель, приступить к снятию рабочих характеристик. Первая точка соответствует режиму холостого хода, последующие точки снять, постепенно увеличивая нагрузку двигателя с помощью генератора постоянного тока, включив $Q4$, возбудить генератор и, увеличивая ток в обмотке возбуждения с помощью $U2$, установить напряжение генератора ($PV3$) равным номинальному. Последовательно включая сопротивления нагрузки $R5$ выключателями $Q13-Q16$, снять показания приборов. Результаты измерений записать в табл. 2.4.

7. Снять механические характеристики при постоянной нагрузке на валу двигателя (по заданию преподавателя):

а) установив выключатели $Q17-Q21$ в положение «включено» (ротор закорочен), снять естественную механическую характеристику двигателя; записать показания приборов в табл. 2.5;

б) поочередно увеличивая сопротивление реостата $R1$ (размыкая выключатели $Q17-Q21$, снять искусственные механические характеристики двигателя;

в) записать показания приборов в табл. 2.5.

Таблица 2.4

Измерено						Вычислено						
Двигатель				Генератор		P_{Γ} , кВт	η_{Γ} , д. ед.	P_2 , кВт	M , Нм	s , д. ед.	$\eta_{\text{дв}}$, д. ед.	$\cos\varphi$
U_1 , В	I_1 , А	P_1 , В	n , об/мин	U_3 , В	I_3 , А							

Таблица 2.5

Измерено				Вычислено				
Двигатель		Генератор		P_{Γ} , кВт	η_{Γ} , д. ед.	P_2 , кВт	M , Нм	$\eta_{\text{дв}}$, д. ед.
P_1 , кВт	n , об/мин	U_3 , В	I_3 , А					

8. Показать снятые данные преподавателю. Если замечаний нет, закоротив сопротивление пускового реостата (включив Q_{17}), отключить обмотку статора двигателя автоматом Q_1 и обмотку возбуждения генератора постоянного тока выключателем Q_4 от источников питания.

Вычислить значения величин, приведенных в табл. 2.4, 2.5, по следующим формулам:

$$P_{\Gamma} = U_3 \cdot I_3 \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}; \quad P_2 = \frac{P_{\Gamma}}{\eta_{\Gamma}}, \text{ кВт}; \quad M = 9550 \frac{P_2}{n}, \text{ Нм};$$

$$s = \frac{(n_1 - n)}{n_1}; \quad \eta_{\text{дв}} = \frac{P_2}{P_1}; \quad \cos\varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3}UI_1} = \frac{P_1}{3U_{\Phi}I_1},$$

где КПД генератора η_{Γ} определяется по кривой $\eta_{\Gamma} = f(P_{\Gamma}/P_{\Gamma.\text{ном}})$, изображенной на рис. 2.5 ($P_{\Gamma.\text{ном}} = 2,2 \text{ кВт}$).

Построить рабочие характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором $P_1, I_1, s, \cos\varphi_1, \eta_{\text{дв}} = f(P_2)$ при закороченном роторе по данным табл. 2.4.

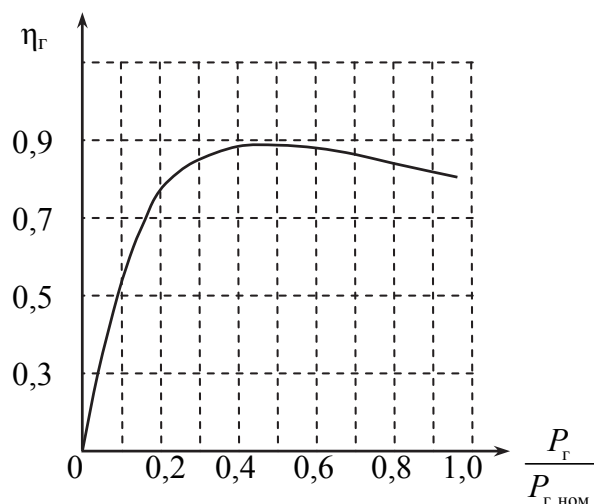


Рис. 2.5. Зависимость $\eta_{\Gamma} = f(P_{\Gamma}/P_{\Gamma.\text{ном}})$

Построить семейство механических характеристик $n = f(M)$ (табл. 2.5). Для каждой ступени реостата механическая характеристика строится по двум точкам: 1-я – $n_1 = 60f/p$; 2-я по измеренным значениям n и M ; также строится и естественная характеристика.

4. Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Выполненное домашнее задание.
3. Электрическая схема экспериментальной установки.
4. Таблицы измерений и вычислений.
5. Рабочие и механические характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором.
6. Выводы по материалу работы.

5. Контрольные вопросы

1. В чем состоит отличие в устройстве и принципе действия двигателя с фазным ротором от двигателя с короткозамкнутым ротором?
2. Перечислите преимущества и недостатки асинхронного двигателя с фазным ротором перед асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором.
3. Какова последовательность пуска асинхронного двигателя с фазным ротором?

4. Для каких целей применяют реостат в цепи ротора и как он подключается к вращающемуся ротору?
5. Назначение пуско-регулирующего реостата в цепи ротора двигателя.
6. Почему изменяются пусковой ток и пусковой момент при изменении сопротивления роторной цепи?
7. Как осуществляется регулирование частоты вращения двигателя с фазным ротором?
8. Каково влияние добавочного сопротивления на механические характеристики двигателя?
9. Дать оценку регулировочным свойствам двигателя и активного сопротивления в цепи ротора.
10. Что такое скольжение асинхронной машины?
11. Как зависят $S_{кр.и}$, M_{max} от R_2 и X_n ?
12. Почему при нагрузках двигателя меньше номинальной его $\cos\varphi_1$ имеет низкое значение?
13. Почему график $I_1 = f(P_2)$ не выходит из начала координат?
14. Какие виды потерь имеют место в асинхронном двигателе?
15. С какой целью обмотку статора асинхронного двигателя подключают к сети трехфазного тока?

СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Цель работы: изучить способы и особенности регулирования частоты вращения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, построить механические характеристики двигателя при различных способах регулирования.

1. Общие сведения

Из формулы, определяющей частоту вращения ротора асинхронного двигателя

$$n = n_1(1 - s) = \frac{60f_1}{p}(1 - s),$$

следует, что ее можно регулировать путем изменения частоты сети f , скольжением s или числом пар полюсов p .

Регулирование частоты вращения изменением числа пар полюсов

Получение двух различных частот вращения магнитного поля достигается либо размещением на статоре двух независимых обмоток, каждая из которых обеспечивает определенную частоту вращения, либо специальным исполнением трехфазной обмотки статора, которое предусматривает изменение частоты вращения в два раза путем переключения катушечных групп обмотки с последовательного соединения на параллельное. На практике получили распространение две схемы переключения обмотки статора: с одинарной звезды (рис. 3.1, а) на двойную (рис. 3.1, в) и с треугольника (рис. 3.1, б) на двойную звезду (рис. 3.1, в).

Первая схема применяется для регулирования частоты вращения при постоянном моменте, вторая – при постоянной мощности. Если при последовательном соединении катушечных групп (рис. 3.1, а) получается две пары полюсов, то переключение их на параллельное соединение (рис. 3.1, в) уменьшает число пар полюсов в два раза (до p

пар полюсов), что соответствует увеличению частоты вращения так же в два раза. Это происходит за счет изменения направления тока в одной из двух одинаковых частей обмотки каждой фазы статора.

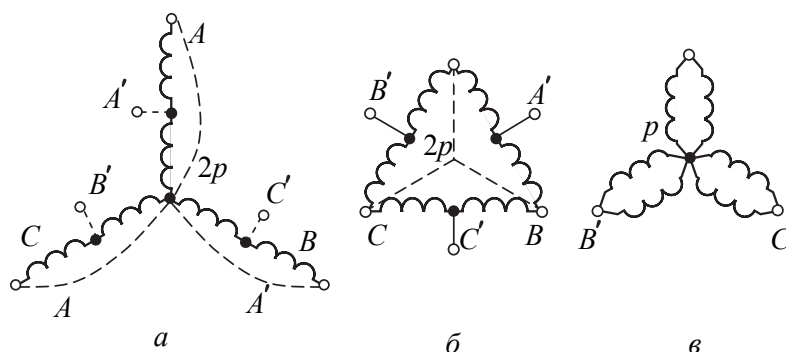


Рис. 3.1. Схемы переключения обмотки статора: с одинарной звезды (*а*) на двойную (*в*) и с треугольника (*б*) на двойную звезду (*в*)

Регулирование частоты вращения ротора изменением числа пар полюсов обеспечивает не плавное, а ступенчатое изменение скорости с ограниченным числом ступеней (от двух до четырех). Кроме того, многоскоростные двигатели стоят несколько дороже, и их размеры на одну габаритную ступень больше по сравнению с односкоростными двигателями.

Переключение числа пар полюсов применяется только для двигателя с короткозамкнутым ротором, у которого число полюсов ротора автоматически устанавливается равным числу полюсов статора.

Достоинством этого способа регулирования является его простота, экономичность, отсутствие дополнительных потерь, связанных с регулированием частоты вращения, сохранение жесткости механических характеристик двигателя (рис. 3.2).

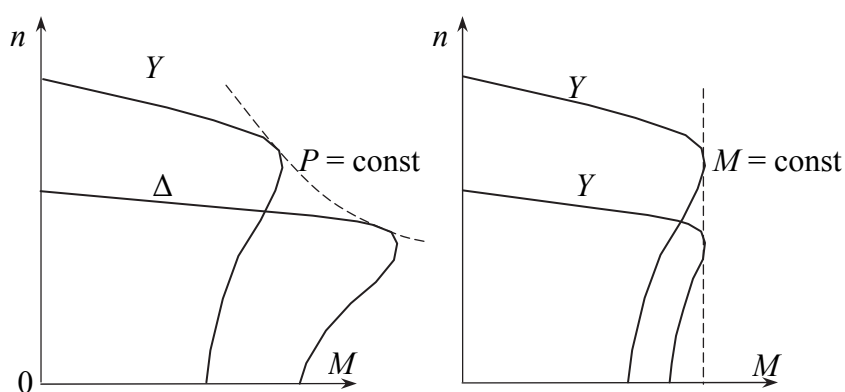


Рис. 3.2. Механические характеристики асинхронного двигателя при регулировании частоты вращения ротора изменением числа пар полюсов

Таким способом регулируется частота вращения центрифуг, сверлильных станков, некоторых механизмов в деревообработке.

Регулирование частоты вращения изменением частоты питающей сети

Изменяя частоту напряжения источника питания f_1 , можно регулировать частоту вращения магнитного поля n_1 и, следовательно, изменять частоту вращения ротора.

Для изменения частоты питающего напряжения требуется наличие источника электрического тока переменной частоты. В качестве последнего могут быть использованы либо синхронные генераторы с переменной частотой вращения, либо преобразователи частоты. Последние на сегодняшний день являются наиболее распространенными.

Для получения требуемой характеристики двигателя, которая зависит от вида нагрузки на валу двигателя, следует изменять не только частоту питающей сети f , но и значение напряжения U . Они должны иметь определенную зависимость, при которой обеспечивается устойчивая работа двигателя, не происходит чрезмерной нагрузки его по току и магнитному потоку и т. п.

Для того чтобы двигатель работал при различных частотах с практически постоянными значениями КПД, коэффициента мощности и перегрузочной способности ($M_{\max}$) (рис. 3.3, а), одновременно с изменением частоты необходимо регулировать и напряжение по следующему закону:

$$\frac{U'_1}{U_1} = \frac{f'_1}{f_1} \sqrt{\frac{M'}{M}},$$

где U'_1 и M' – напряжение и момент, соответствующие измененной частоте f'_1 , а U_1 и M – частоте f_1 .

Чаще всего реализуют упрощенный закон регулирования

$$\frac{U}{f} = \text{const},$$

т. е. питающее напряжение следует изменять прямо пропорционально его частоте.

Для того чтобы обеспечить режим постоянной мощности двигателя ($P_2 = \text{const}$) (рис. 3.3, б) при различных частотах, необходимо регулировать напряжения по закону

$$M' f_1' = M f_1 = \text{const} \quad \text{или} \quad \frac{U_1'}{U_1} = \sqrt{\frac{f_1'}{f_1}}.$$

Упрощенная форма закона регулирования

$$\frac{U}{\sqrt{f}} = \text{const}.$$

Для нагрузок вентиляторного типа, когда момент нагрузки изменяется по нелинейному закону при изменении частоты (рис. 3.3, в), регулирование производят по закону:

$$\frac{U}{f^2} = \text{const}.$$

Частотное регулирование, независимо от выбранного закона управления, обеспечивает плавное и экономичное регулирование скорости вращения в широких пределах (1 : 10) при неизменной жесткости механических характеристик (рис. 3.3).

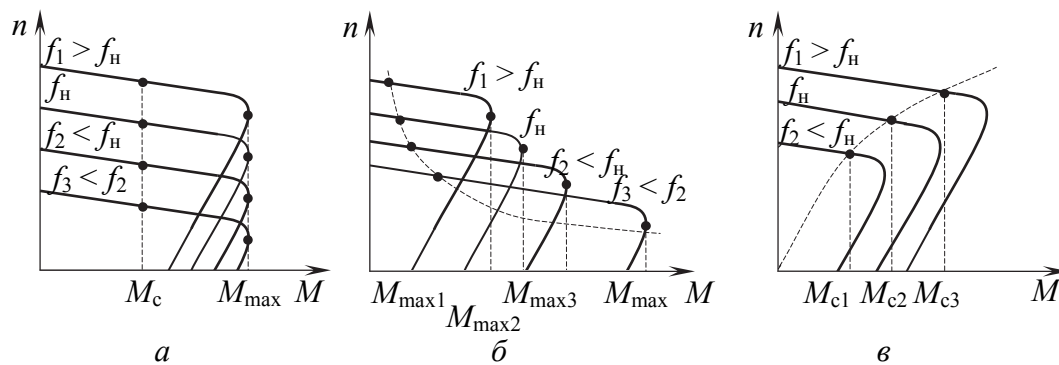


Рис. 3.3. Механические характеристики АД при регулировании частоты вращения ротора изменением f при различных законах регулирования:

а – регулирование по закону $U/f = \text{const}$;

б – регулирование по закону $U/\sqrt{f} = \text{const}$;

в – регулирование по закону $U/f^2 = \text{const}$

Упрощенная структурная схема частотного преобразователя изображена на рис. 3.4. Напряжение питающей сети с постоянной частотой и амплитудой ($U_{\text{вх. max}} = \text{const}$; $f_{\text{вх}} = \text{const}$) поступает на блок выпрямителя и фильтра. Выпрямитель и фильтр предназначены для получения на выходе постоянного

напряжения с малыми пульсациями. Далее, с помощью инвертора, полученное напряжение преобразует постоянное напряжение в трехфазное напряжение с переменной частотой и изменяемой амплитудой. Схема управления формирует сигналы для коммутации обмоток электродвигателя в нужные моменты времени. Импульсы коммутации каждой обмотки в пределах периода модулируются по синусоидальному закону. Максимальную ширину импульсы имеют в середине полупериода. К началу и к концу полупериода ширина импульсов уменьшается. Схема управления формирует широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) напряжения, которое подается на обмотки электродвигателя. На выходе инвертора формируется трехфазное напряжение переменной частоты и амплитуды ($f_{\text{вых}} = \text{var}$; $U_{\text{вых}} = \text{var}$), которое и задает нужную частоту вращения и требуемый момент на валу двигателя.

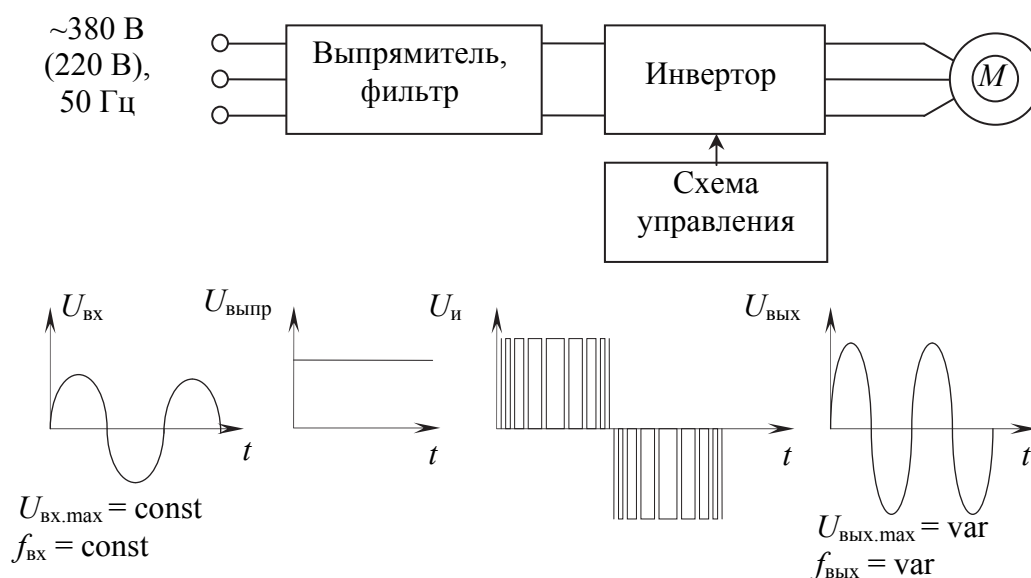


Рис. 3.4. Блочная-структурная схема преобразователя частоты и диаграммы напряжений

Регулирование частоты вращения изменением скольжения

Регулирование частоты вращения двигателя с короткозамкнутым ротором в сравнительно небольшом диапазоне возможно также изменением скольжения. Изменения скольжения, в свою очередь, можно достичь при неизменной нагрузке. Скольжение

$$S = \frac{3R_2 I_2^2}{P_{\text{эм}}}$$

при уменьшении напряжения резко снижается. Здесь $P_{\text{эм}}$ – электромагнитная мощность, пропорциональная квадрату подводимого из сети напряжения. При уменьшении напряжения резко снижается вращающий момент, перегрузочная способность и устойчивость работы двигателя. Поэтому такой способ находит применение в приводах механизмов с вентиляторным моментом нагрузки, у которых, с уменьшением частоты вращения, в квадратичной зависимости снижается нагрузочный момент (вентиляторы, насосы, центрифуги, гребные винты (рис. 3.5)).

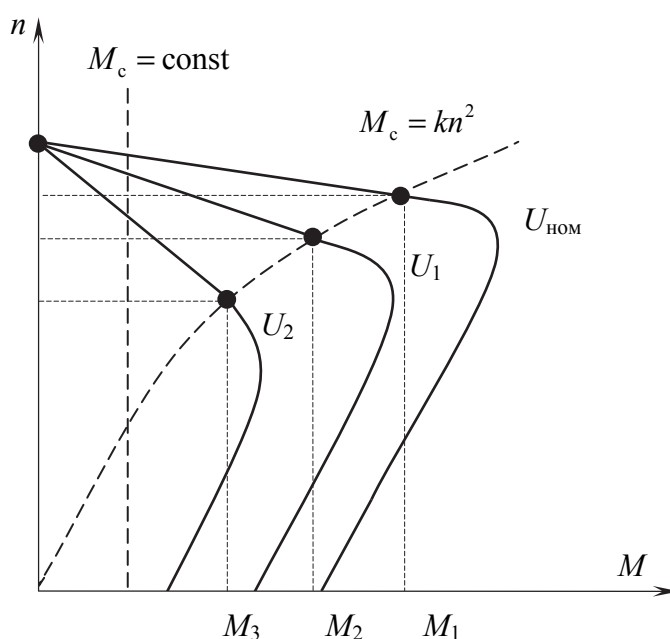


Рис. 3.5. Механические характеристики асинхронного двигателя при регулировании частоты вращения ротора изменением скольжения

Так, на схеме (рис. 3.6) L_1 – рабочие обмотки дросселя, L_2 – его обмотка подмагничивания, питаемая постоянным током от выпрямителя U через реостат $R5$. При увеличении тока управления увеличиваются общие ампервитки дросселя, магнитная проницаемость уменьшается, значит снижается индуктивность и индуктивное сопротивление рабочих обмоток ωl .

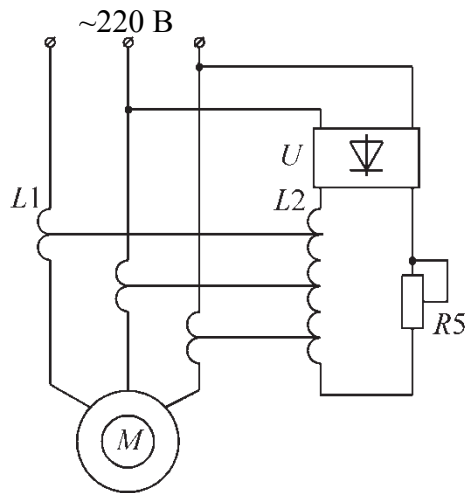


Рис. 3.6. Схема установки регулирования частоты вращения изменением скольжения

Уменьшается и падение напряжения $\Delta \dot{U} = j\omega L_1 \dot{I}_1$, напряжение на зажимах двигателя растет:

$$\Delta \dot{U}_1 = \dot{U}_c - \Delta \dot{U} = \dot{U}_c - j\omega L_1 \dot{I}_1,$$

где $\dot{U}_1$ – напряжение на статоре асинхронного двигателя; $\dot{U}_c$ – напряжение сети.

Изменение скольжения асинхронного двигателя с фазным ротором происходит при изменении сопротивления вторичной (роторной) цепи или при введении во вторичную цепь добавочной ЭДС (каскадные схемы регулирования). При дроссельном регулировании частота вращения изменяется плавно и достаточно экономично, однако в ходе регулирования снижается $\cos\phi$ установки, уменьшается жесткость механических характеристик (рис. 3.5).

Диапазон регулирования зависит от характера нагрузочного момента, существенно увеличиваясь для перечисленных выше механизмов с вентиляторным моментом нагрузки (до 1:4), в сравнении с механизмами, у которых $M_c = \text{const}$ и диапазон регулирования скорости не более 1 : 2.

2. Домашнее задание для подготовки к лабораторному занятию

- Изучить литературу по теме занятия: § 12.1–12.4, 12.7 [1]; § 27.1, 27.2, 28.1–28.4 [2].
- Выполнить домашнее задание.

Домашнее задание

Вычислить согласно варианту по данным табл. 3.1: синхронную частоту вращения магнитного поля статора; номинальное скольжение, номинальный момент на валу двигателя; пусковой, критический моменты; критическое скольжение.

Таблица 3.1

Вариант	Дано					Вычислить					
	Тип двигателя	$P_{\text{ном}},$ кВт	$n_{\text{ном}},$ мин^{-1}	$K_{\text{п}}$	$K_{\text{м}}$	$n_0,$ мин^{-1}	$S_{\text{ном}}$	$M_{\text{ном}},$ Н·м	$M_{\text{п}},$ Н·м	$M_{\text{max}},$ Н·м	$S_{\text{кр}}$
1	4A80A2Y2	1,5	2850	2.1	2,6						
2	4A100L4Y3	3,0	1435	2,0	2,4						
3	4A132S6Y3	5,5	965	2,0	2,0						
4	4A200L8Y3	22.0	735	1.2	2.0						

3. Порядок выполнения лабораторной работы

Объектом исследования является асинхронный трехфазный двигатель с короткозамкнутым ротором. Нагрузкой двигателя служит машина постоянного тока, работающая в режиме генератора.

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой и ее принципиальной электрической схемой (рис. 3.7).

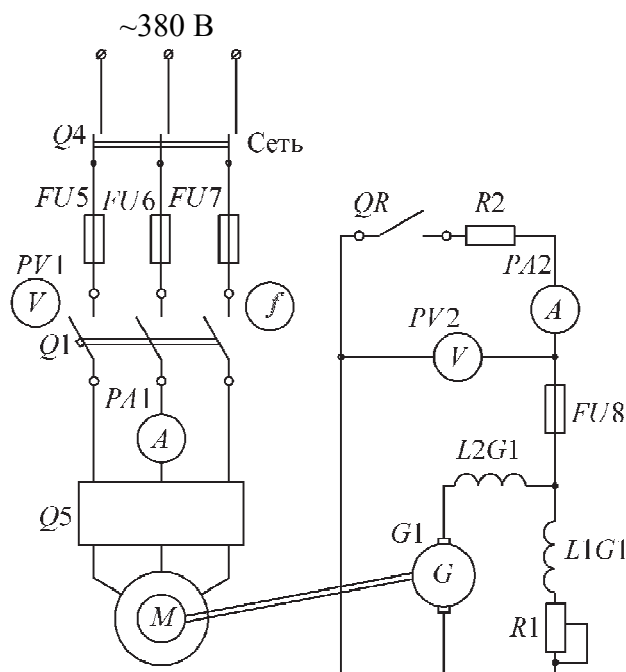


Рис. 3.7. Электрическая схема лабораторной установки

2. Снять механические характеристики асинхронного двигателя ($M1$) при изменении числа пар полюсов обмотки статора:

- а) установить в положение «сеть» переключатель $Q4$;
- б) подать напряжение на обмотку статора, включив выключатель $Q1$;
- в) переключателем $Q5$ установить число пар полюсов обмотки статора равное 2;
- г) регулируя ток обмотки возбуждения генератора $G1$ реостатом $R1$, нагрузить асинхронный двигатель до номинального значения тока статора $I_{ном}$ ($PA1$);
- д) снять показания приборов. Данные внести в табл. 3.2.
- е) опыт повторить при трех парах полюсов обмотки статора, повторив подпункты б–д.

Таблица 3.2

Число пар полюсов p	Измерено				Вычислено			
	$n, \text{мин}^{-1}$	$I_1, \text{А}$	$U_2, \text{В}$	$I_2, \text{А}$	$P_{г}, \text{Вт}$	$\eta_{г}, \text{д. ед.}$	$P_2, \text{кВт}$	$M, \text{Нм}$
2								
3								

3. Снять механические характеристики асинхронного двигателя $M3$ при изменении подводимого напряжения:

- а) установить реостат $R5$ в цепи управления дросселя насыщения (рис. 3.8) в положение «пуск»;
- б) подать напряжение на статор асинхронного двигателя $M3$ выключателем $Q7$;
- в) регулируя ток управления реостатом $R5$, изменять напряжение на обмотке статора двигателя;
- г) результаты измерений записать в табл. 3.3;
- д) выключить $Q4$ и $Q7$.

Таблица 3.3

Напряжение $U_1, \text{В}$	Измерено		Вычислено	
	$n, \text{мин}^{-1}$	$I_1, \text{А}$	$P_2, \text{кВт}$	$M, \text{Нм}$

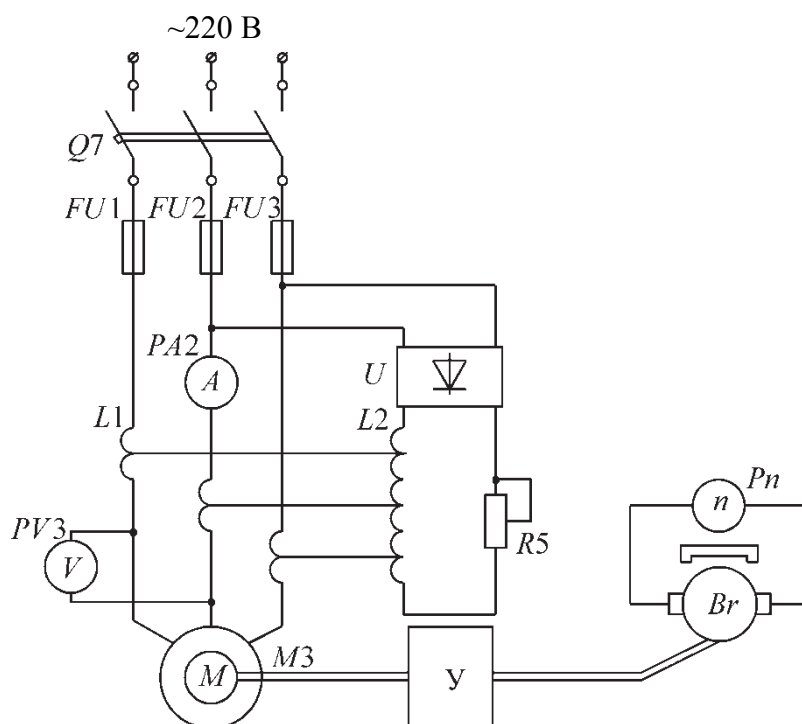


Рис. 3.8. Электрическая схема лабораторной установки

Вычислить значения величин, приведенных в табл. 3.3, 3.4, по следующим формулам:

$$P_{\Gamma} = U_2 I_2 \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}; \quad P_2 = \frac{P}{\eta_{\Gamma}}, \text{ кВт}; \quad M = 9550 \frac{P_2}{n}, \text{ Нм}.$$

КПД генератора η_{Γ} определяется по кривой $\eta_{\Gamma} = f(P_{\Gamma}/P_{\Gamma.\text{ном}})$, изображенной на рис. 3.9, где $P_{\Gamma.\text{ном}} = 2 \text{ кВт}$.

P_2 определяется по кривой $P_2 = f(n)$ вентилятора (рис. 3.10).

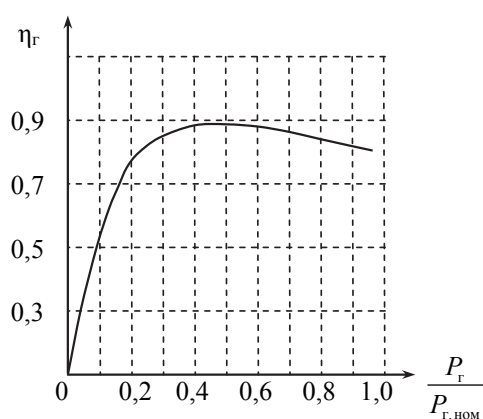


Рис. 3.9. Зависимость $\eta_{\Gamma} = f(P_{\Gamma}/P_{\Gamma.\text{ном}})$

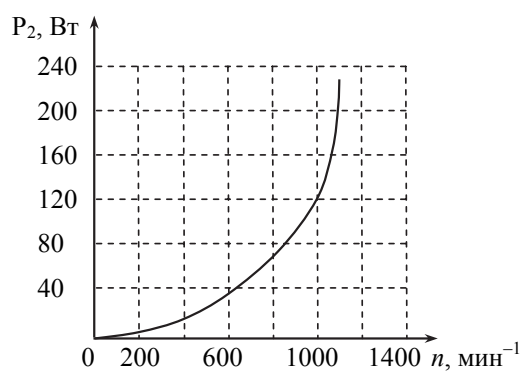


Рис. 3.10. Зависимость $P_2 = f(n)$

По экспериментальным данным построить в масштабе механические характеристики асинхронного двигателя $n = f(M)$ при различных способах регулирования.

Учитывая то, что механические характеристики асинхронного двигателя в рабочей части с известным приближением могут быть приняты линейными, для их построения достаточно получить две точки: идеального холостого хода $n_1 = 60f/p$ и точку, соответствующую измеренным во время опыта значениям n и M .

4. Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Выполненное домашнее задание.
3. Электрическая схема экспериментальной установки.
4. Таблицы измерений и вычислений.
5. Механические характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при различных способах регулирования.
6. Выводы по материалу работы.

5. Контрольные вопросы

1. Каково устройство многоскоростного асинхронного двигателя?
2. Что такое скольжение асинхронного двигателя?
3. Каков диапазон изменения скольжения асинхронного двигателя в различных режимах его работы?
4. Как изменяется скольжение при увеличении нагрузки на валу двигателя?
5. Перечислите достоинства и недостатки регулирования частоты вращения ротора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
6. Как регулируется частота вращения ротора асинхронного двигателя изменением частоты питающего напряжения?
7. Почему при частотном регулировании частоты вращения одновременно с частотой тока необходимо изменять напряжение?
8. Какие Вам известны преобразователи частоты?
9. Как регулируется частота вращения ротора асинхронного двигателя изменением напряжения питающей сети?
10. Как влияет напряжение сети на перегрузочную способность двигателя?

11. Как регулируется частота вращения ротора асинхронного двигателя изменением числа пар полюсов?

12. Как влияет изменение напряжения сети на вращающий момент двигателя и на жесткость механической характеристики?

13. Сопоставьте достоинства и недостатки различных способов регулирования частоты вращения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

14. При каком способе регулирования частоты вращения ротора асинхронного двигателя обеспечивается плавность регулирования?

КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Цель работы: изучить способы компенсации реактивной мощности асинхронного двигателя.

1. Общие сведения

Асинхронные электродвигатели являются основными источниками реактивной энергии на промышленных предприятиях. Реактивная энергия необходима для создания вращающегося магнитного поля.

Показателем, который косвенно определяет реактивную мощность двигателя Q , является коэффициент мощности ($\cos \varphi$):

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}.$$

Активную мощность P , которая подводится к двигателю, определяют из выражения

$$P = \sqrt{3}UI \cos \varphi.$$

Когда для двигателя задаются его напряжение U и активная мощность P , то с понижением $\cos \varphi$ ток двигателя возрастает:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}U \cos \varphi}.$$

Низкий коэффициент влечет за собой определенное количество последствий: недоиспользование указанных мощностей источников электроэнергии (трансформаторов, генераторов и первичных двигателей на электростанциях); увеличение сечения и массы кабелей и проводов, а следовательно увеличенный расход цветного металла; увеличение затрат электроэнергии на нагрев проводов, кабелей, трансформаторов реактивными токами; увеличение падения напряжения в линиях электропередач и силовых трансформаторах.

Увеличение коэффициента мощности достигается естественными и искусственными путями. К методам компенсации реактивной мощности относятся: оптимальная нагрузка электродвигателей и силовых трансформаторов на 80–85% номинальной мощности; исключение работы в «холостую» электродвигателей и сварочных трансформаторов; при увеличении мощности электродвигателей в условиях тяжелого пуска – переключение обмоток электродвигателей с соединения «треугольник» при пуске на «звезда» в рабочем режиме.

Искусственная компенсация реактивной мощности осуществляется с помощью специальных косинусных конденсаторов, которые включаются параллельно обмоткам статора асинхронных двигателей. В этом случае источником реактивной мощности является не только генератор на электростанции, но и батарея конденсаторов на предприятии. При правильных соотношениях величин L и C ($B_L = B_C$) наступает резонанс токов, тогда обмен реактивной энергией между электродвигателями и конденсаторами осуществляется непосредственно в электроустановке, не загружая трансформаторы и линии электропередачи.

Кроме конденсаторов, источниками емкостной реактивной энергии могут быть синхронные компенсаторы, синхронные двигатели, которые работают в режиме перевозбуждения, синхронизированные асинхронные двигатели (двигатели с фазным ротором, в цепи ротора которых после пуска подается постоянный ток).

Как правило, на предприятиях осуществляют групповую компенсацию реактивной мощности, устанавливая косинусные конденсаторы на понижающей трансформаторной подстанции или рядом с цеховыми распределительными электроцитами. Индивидуальная компенсация осуществляется реже. В границах номинального (допускаемого) напряжения конденсаторы необходимо включать в «треугольник», потому что соединение их в «звезду» уменьшает мощность батареи в три раза.

На рис. 4.1, *a* показана векторная диаграмма токов для одной фазы двигателя при естественной компенсации реактивной мощности и с БКК.

При увеличении нагрузки возрастает активная составляющая тока I_a от значения I_{a0} на холостом ходу до I_{a2} . При неизменном значении намагниченной (реактивной) составляющей тока I_p , которое зависит от нагрузки, это приводит к уменьшению угла φ и увеличению $\cos\varphi$.

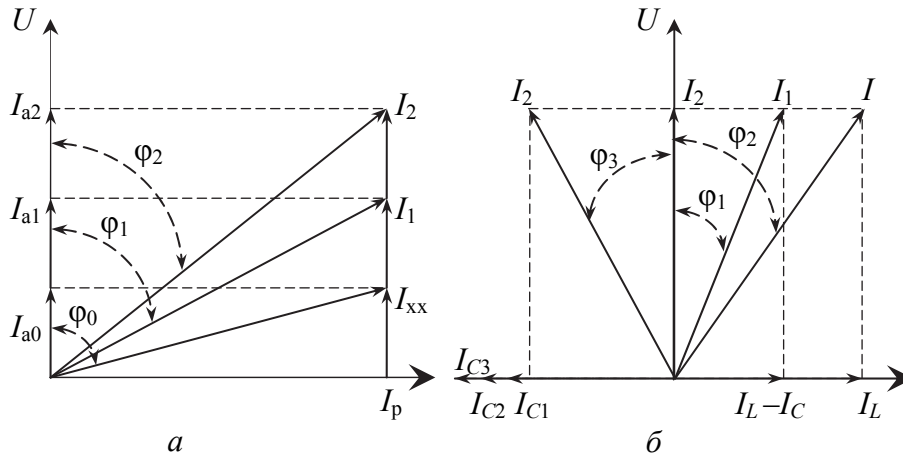


Рис. 4.1. Векторная диаграмма токов для одной фазы двигателя при естественной компенсации реактивной мощности (а) и с БКК (б)

На рис. 4.1, б показано уменьшение тока двигателя при компенсации реактивной мощности с помощью конденсаторов и при неизменной нагрузке на валу. По мере увеличения подключенной емкости конденсаторов реактивная составляющая тока $I_L - I_C$ уменьшается, уменьшая этим угол φ . При $I_{C2} = I_L$ ($B_C = B_L$, $Q_C = Q_L$) наступает резонанс токов, при котором реактивная составляющая токов равна 0, вектор тока I_2 совпадает по направлению с вектором напряжения U , реактивная мощность целиком скомпенсирована. Следующее увеличение емкости конденсаторов приводит к перекомпенсации реактивной мощности ($I_{C3} > I_L$, $Q_C > Q_L$), угол φ становится опережающим. Перекомпенсация так же не приемлема, как и неполная компенсация, потому что полный ток в цепи при этом возрастает.

Мощность батареи конденсаторов для полной компенсации реактивной мощности двигателя (при $\sin \varphi = 1$) определяется выражением

$$Q_k = 3X_C I_\Phi^2 = \frac{3U_\Phi^2}{X_C} = 3\omega C U_\Phi^2.$$

Тогда емкость трехфазной батареи конденсаторов составляет

$$C_k = \frac{Q \cdot 10^6}{3\omega C U_\Phi^2}, \text{ мкФ.}$$

При выборе конденсаторов необходимо учитывать, что их напряжение пробоя должно быть выше амплитуды подведенного напряжения на 30–40%.

В общем случае, когда необходимо повысить коэффициент мощности или средневзвешенный коэффициент мощности группы двигателей $\cos\varphi_1$ до некоторого значения $\cos\varphi_2$ и тем самым уменьшить угол сдвига по фазе от φ_1 до φ_2 , для определения мощности батареи пользуются следующей формулой (рис. 4.2):

$$Q_k = P(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2) = \omega CU^2, \text{ кВАр.}$$

Тогда

$$C_k = \frac{P(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2)}{\omega U^2}, \text{ мкФ.}$$

2. Домашнее задание для подготовки к лабораторному занятию

- Изучить литературу по теме занятия: § 13.1 [1]; § 6.4 [2].
- Выполнить домашнее задание.

Домашнее задание

По данным табл. 4.1 для трехфазного приемника с симметричной резистивно-индуктивной нагрузкой, подключенной по схеме «звезда» без нейтрального провода или «треугольник», определить следующие параметры компенсатора, который обеспечит заданный $\cos\varphi_2$: реактивную мощность трехфазного компенсатора Q_k , суммарную реактивную мощность приемника и компенсатора $Q_{\text{пк}}$; емкость конденсаторов C_k (подключены по схеме «треугольник»). Результаты расчетов внести в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Вариант	Исходные данные					Результаты расчета		
	Соединение приемника	$U_{\text{ф}}$, В	$I_{\text{ф}}$, А	$\cos\varphi_1$	$\cos\varphi_2$	Q_k , кВАр	$Q_{\text{пк}}$, кВАр	C_k , мкФ
1	Δ	220	9,8	0,5	0,98			
2	Y	380	6,2	0,4	0,95			
3	Δ	127	13,1	0,6	0,99			
4	Y	380	5,3	0,4	0,97			

3. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой и ее принципиальной электрической схемой (рис. 4.2).



4. Исследовать влияние нагрузки асинхронного двигателя на его коэффициент мощности. Нагрузка регулируется включением в цепь якоря генератора нагрузочных резисторов $R5$ выключателями $Q13$, а также реостатом $R3$ в цепи возбуждения генератора постоянного тока. При этом конденсаторы должны быть отключены выключателями $Q6-Q7$. Результаты измерений занести в табл. 4.2.

$\cos\varphi$							
$P_{\downarrow}$, kBT							

Ввести $R3$, выключить $Q13$. Построить зависимость $\cos\varphi = f(P_1)$, $P_1 = 3P_\phi$ – потребляемая двигателем мощность.

5. Исследовать влияние мощности (емкости) конденсаторов на коэффициент мощности, ток двигателя и ток сети при неизменной нагрузке на валу двигателя $P_1 = (0,25-0,3)P_{1\text{ном}}$.

Подключить батарею конденсаторов с помощью выключателей $Q7$ и $Q20$.

Произвести компенсацию реактивной мощности двигателя с помощью конденсаторов, соединенных в «треугольник». Запустить двигатель с помощью выключателя $Q5$. Последовательно изменяя величину емкости подключенной конденсаторной батареи, осуществить полную компенсацию и перекомпенсацию реактивной мощности двигателя на холостом ходу (при выключенной нагрузке R_0).

Мощность конденсаторов Q_C меняется с помощью выключателей $Q9-Q12$, результаты измерений заносятся в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Измерено						Вычислено			
U_1 , В	U_2 , В	I_1 , А	I_2 , А	$\cos\varphi$	P_ϕ , кВт	P_1 , Вт	Q_1 , ВАр	S , ВА	Q_C , ВАр

Выполнить расчеты по формулам:

$$P_1 = 3P_\phi; S = \sqrt{3}U_1I_1; Q_1 = \sqrt{S^2 - P_1^2}; Q_C = \sqrt{3}U_2I_2.$$

По данным табл. 4.2 построить на одном графике зависимости Q_1 , I_1 , $\cos\varphi = f(Q_C)$.

Провести сравнение компенсации реактивной мощности двигателя с помощью батареи конденсаторов при разных схемах включения конденсаторов.

4. Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Выполненное домашнее задание.
3. Электрическая схема экспериментальной установки.
4. Таблицы измерений и вычислений.
5. Графики зависимостей: Q_1 , I_1 , $\cos\varphi = f(Q_C)$.
6. Выводы по материалу работы.

5. Вопросы для самоконтроля

1. На что затрачивается реактивная энергия в двигателях?
2. Перечислить способы естественной и искусственной компенсации реактивной мощности.
3. В чем суть физического процесса при компенсации реактивной мощности статическими конденсаторами?
4. Объяснить векторную диаграмму токов двигателя при естественной и искусственной компенсации реактивной мощности.
5. Какова цель мероприятий по повышению коэффициента мощности?
6. Как определить величину емкости, необходимой для увеличения $\cos\varphi$ установки?

ИССЛЕДОВАНИЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Цель работы: ознакомиться с особенностями устройства, пуска и работы синхронного двигателя (СД) и снять его механическую и U -образную характеристики.

1. Общие сведения

Синхронная машина содержит статор (якорь) и ротор (индуктор), обмотки которого питаются постоянным током, создающим основное магнитное поле. Статор (якорь) состоит из магнитопровода и обмотки, которая через клеммную коробку подключается к трехфазной сети. Ротор (индуктор) бывает явнополюсный (применяется при малых частотах вращения) и неявнополюсный (применяется при больших частотах вращения). Он состоит из магнитных полюсов и обмотки возбуждения, которая подключается к источнику постоянного напряжения. Особенностью синхронного двигателя является отсутствие пускового момента в обычных условиях и возможность регулирования реактивной мощности ($\cos\phi$).

Условие возможности пуска синхронного двигателя

На модели (рис. 5.1) представлены две разделенные зазором магнитные системы. Внешняя система имитирует вращающееся магнитное поле статора. Считаем, что эта система может вращаться относительно своего центра. Внутренняя система модели имитирует ротор и его магнитное поле.

Предположим, что внешняя система полюсов (магнитное поле статора) неподвижна. Благодаря силам магнитного притяжения ротор расположится так, что его полюсы будут находиться под противоположными полюсами внешней системы (рис. 5.1, а).

При таком расположении силы магнитного притяжения $\vec{F}_m$ направлены по оси полюсов и не создают электромагнитного момента.

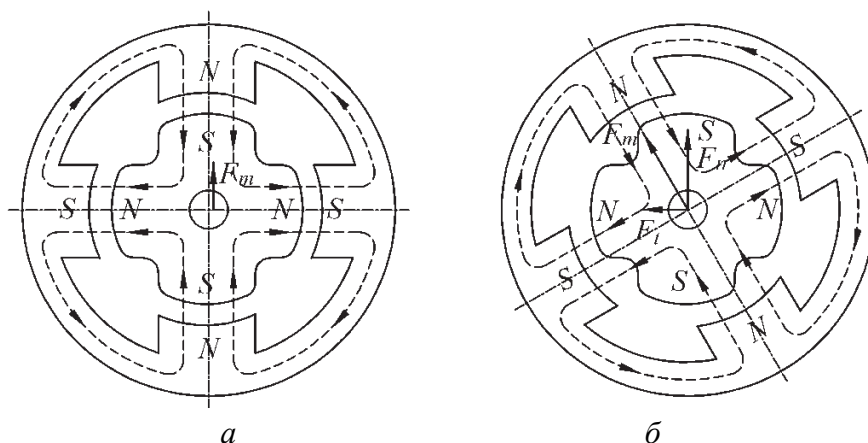


Рис. 5.1. Модель синхронного двигателя

Если внешняя система полюсов начала вращаться с частотой n_0 (подключение обмотки статора к сети), то в начальный момент эта система сместится относительно ротора на некоторый угол θ (рис. 5.1, б). Тогда вектор силы магнитного притяжения $\dot{F}_m$ также повернется относительно оси полюса ротора. Теперь $\dot{F}_m = \dot{F}_n + \dot{F}_t$. Сила $\dot{F}_n$ – сила притяжения индуктора. Сила $\dot{F}_t$ называется тангенциальной. Она направлена перпендикулярно оси полюса. Совокупность составляющих $\dot{F}_t$, действующих на все полюсы ротора, создает вращающий момент M :

$$M = 3 \frac{UE_{\text{я}}}{2\pi f x} \sin \theta,$$

где x – синхронное реактивное сопротивление; θ – угол между осями магнитных полей статора и ротора, иначе – между векторами якоря U и $E_{\text{я}}$.

Обязательным условием возникновения вращающего момента в синхронном двигателе является отставание магнитного поля ротора от вращающегося поля статора на угол θ . Зависимость $M = f(\theta)$ при $U = \text{const}$ называют угловой характеристикой машины (рис. 5.2, а). Угловая характеристика устойчива только в диапазоне $-90^\circ < \theta < 90^\circ$, причем область положительных значений θ соответствует двигательному режиму, а область отрицательных значений θ – генераторному.

Если нагрузить двигатель так, что момент сопротивления $M_c > M_{c \text{ max}}$, то угол нагрузки θ превысит 90° и рабочая точка ока-

жется на неустойчивом участке угловой характеристики, на котором у двигателя отсутствует свойство саморегулирования момента. В результате двигатель выйдет из синхронизма, что может привести к тяжелой аварии в распределительной сети. Из этих соображений устанавливают в номинальном режиме $\theta_{\text{ном}} = 25\text{--}30^\circ$, что обеспечивает запас по моменту $k_M = M_{\text{max}}/M_{\text{ном}} = (2\text{--}2,4)$.

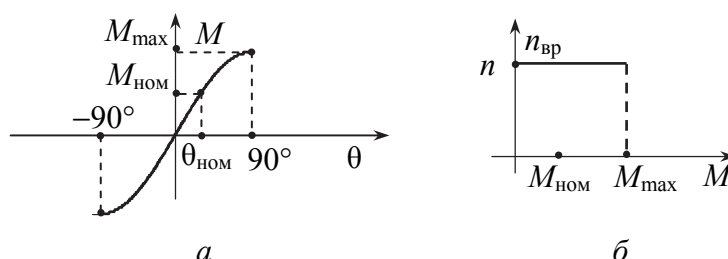


Рис. 5.2. Угловая (а) и механическая (б) характеристики синхронного двигателя

Под действием момента M ротор синхронного двигателя приходит в движение и в дальнейшем вращается с синхронной частотой $n = n_1 = 60f/p$, зависящей только от частоты тока f и числа пар полюсов p . Механическая характеристика $M = f(n)$ синхронного двигателя (рис. 5.2, б) в режиме синхронизации, т. е. при $M_c < M_{c \text{ max}}$, абсолютно жесткая, т. к. частота вращения ротора не зависит от M_c .

Способы пуска синхронного двигателя

Если одновременно подается питание в обмотки якоря и обмотку возбуждения, то по причине отсутствия у поля якоря момента инерции оно мгновенно набирает синхронную частоту вращения. Из-за высокой линейной скорости поля якоря и значительного момента инерции ротора поле ротора не успевает сцепиться с полем якоря и прямой пуск двигателя не происходит. Для осуществления пуска применяют специальные способы, указанные ниже.

Асинхронный пуск. В полюсные наконечники ротора синхронного двигателя (рис. 5.3) закладывается специальная пусковая обмотка, представляющая собой систему короткозамкнутых медных стержней. В первый момент при пуске отключенная от источника постоянного тока обмотка возбуждения замыкается на добавочное сопротивление, это делается, чтобы предотвратить появление в роторной обмотке значительных ЭДС, индуцированных под действием резкого изменения тока в ядре. После этого в статор синхронного двигателя подается трехфазный ток.

Статорный ток создает вращающееся магнитное поле, индуцирующее в стержнях пусковой обмотки ток, взаимодействие которого с полем статора создает начальный («входной») момент, разгоняющий ротор до околосинхронной (асинхронной) частоты вращения, т. е. появляется угол θ .

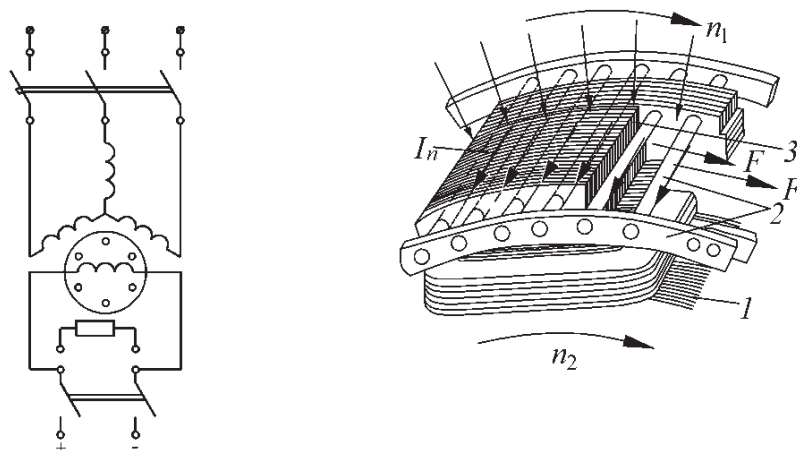


Рис. 5.3. Асинхронный способ пуска синхронного двигателя

После этого в обмотку возбуждения подается постоянный ток, создается магнитный поток ротора. Взаимодействие магнитных потоков статора втягивает ротор в синхронизм. Пусковая обмотка перестает работать, т. к. вращаясь синхронно с магнитным полем, она не пересекается силовыми линиями поля, в ней ЭДС не индуцируется.

Пуск разгонным двигателем. В простейшем случае ротор отключенного от сети синхронного двигателя приводится во вращение вспомогательным (разгонным) двигателем. По достижении околосинхронной частоты вращения (наличие угла θ) в ротор и в статор синхронного двигателя одновременно подается питание. Возникает устойчивое взаимодействие полей ротора и статора. Ротор двигателя втягивается в синхронное вращение, разгонный электродвигатель отключается.

Однако при таком пуске для обеспечения устойчивого взаимодействия полей ротора и статора в момент их подключения к сети нужно выполнить три условия синхронизации.

1. Уравнять величины трехфазной ЭДС якоря и ЭДС сети с помощью регулирования тока возбуждения (на практике подгоня-

ется напряжение якоря к напряжению сети, ориентируются на показания двух вольтметров).

2. Частота ЭДС статора должна быть равна частоте ЭДС сети. Выравнивание частот ЭДС возможно изменением частоты вращения разгонного двигателя с контролем по двум частотомерам.

3. Чередование фаз синхронной машины и сети должно быть одинаковым (например, А, В, С сети и А, В, С якоря). Для успешной синхронизации применяют синхроскопы.

Если не будет выполнено хотя бы одно из условий, при включении возникнет разность ЭДС, под действием которой в обмотке статора начнет протекать уравнительный ток, превышающий в несколько раз номинальное значение. Уравнительный ток вызывает электродинамический удар, способный разрушить ротор СД.

Частотный способ пуска. Пуск синхронного двигателя также можно осуществить с помощью частотного преобразователя, подключенного в цепь статора, который изменяет f питающего напряжения от 0 до $f_{\text{ном}}$. В этом случае магнитное поле статора синхронного двигателя входит в синхронизм при малых частотах. Частотный пуск удобно использовать, если преобразователь частоты можно подключить к нескольким двигателям.

Асинхронный пуск проще и экономичнее, однако, связан с толчками тока и момента. Поэтому при больших мощностях синхронного двигателя пуск его осуществляется комбинированно: асинхронный пуск одновременно с использованием разгонного двигателя. Иногда также для уменьшения пускового тока на время пуска снижают напряжение, подводимое к статору синхронного двигателя. Частотный способ пуска на сегодняшний день применяется редко.

Регулирование реактивной мощности синхронного двигателя

Если у включенного в сеть синхронного двигателя регулировать ток возбуждения, пропорционально ему будет меняться ЭДС при неизменном напряжении сети (рис. 5.4). Это вызывает появление уравнительного тока между статором синхронного двигателя и сетью. При уменьшении тока возбуждения по отношению к номинальному ($I_B < I_{B,\text{ном}}$) и $E < U$, уравнительный ток направлен из сети в статор синхронного двигателя; при ($I_B > I_{B,\text{ном}}$) и $E > U$ ток направлен противоположно. По своей природе это ток реактивный, причем в первом случае он имеет индуктивный характер, а во втором – емкостный.

Синхронный двигатель позволяет регулировать реактивную мощность, отдаваемую в сеть, что является очень ценным качеством.

Пусть двигатель работает с неизменной механической нагрузкой на валу, т. е. $M_c = \text{const}$ при $U = \text{const}$ (рис. 5.4).

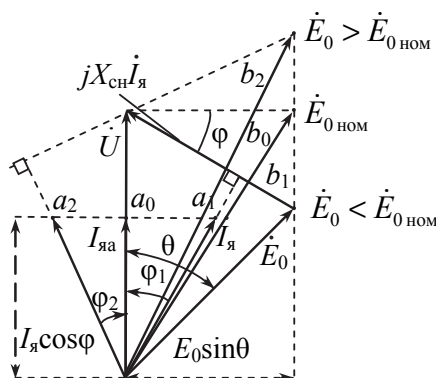


Рис. 5.4. Угловая характеристика СД

При изменении тока возбуждения I_b будут изменяться противоЭДС $\dot{E}_0$ и ток якоря $\dot{I}_a$, однако вращающий момент M и активная мощность двигателя в установившемся режиме останутся неизменными. Это означает, что изменение тока I_b не изменяет для $\dot{E}_0$ его горизонтальной проекции $E_0 \sin \theta$ на рис. 5.4, т. е. приводит к перемещению вершины $\dot{E}_0$ по вертикальной прямой b_1-b_2 . Аналогично изменение тока I_b не изменяет для тока якоря вертикальной проекции $I_a \cos \phi$, т. е. приводит к перемещению вершины вектора $\dot{I}_a$ по горизонтальной прямой a_1-a_2 . На рис. 5.4 $\dot{E}_0$ находится в точке b_1 . При этом $\dot{I}_a$, ортогональный вектору $jX_{сн} \dot{I}_a$, отстает от $\dot{U}$ на угол ϕ_1 ($\phi_1 > 0$). Такой режим называют режимом недовозбуждения, в этом режиме двигатель для сети представляет активно-индуктивную нагрузку и отдает в сеть положительную реактивную мощность $Q = UI_a \sin \phi_1 > 0$.

Увеличив I_b до значения, при котором вершина $\dot{E}_0$ станет на одной горизонтали с вершиной $\dot{U}$, т. е. в точке b_0 , получим номинальный режим ($I_b = I_{b, \text{ном}}$). В этом режиме $\dot{I}_a$ находится в точке a_0 и совпадает по фазе с напряжением $\dot{U}$ ($\phi_0 = 0$), двигатель является чисто активной нагрузкой с $\cos \phi_0 = 1$. Продолжим увеличение тока I_b . Пусть $I_b > I_{b, \text{ном}}$, чему соответствует положение вершины вектора $\dot{E}_0$ в точке b_2 . Такой режим называют режимом перевозбуждения. Точке

b_2 соответствует положение вершины $\dot{I}_я$ в точке a_2 . Тогда в режиме перевозбуждения $\dot{I}_я$ опережает по фазе напряжение $\dot{U}$ на угол $\varphi_2 < 0$. Двигатель в перевозбужденном режиме представляет для сети активно-емкостную нагрузку и отдает в сеть отрицательную реактивную мощность $Q = UI \sin \varphi_2 < 0$. Эта мощность может использоваться для компенсации положительной реактивной мощности других потребителей (например, АД). В итоге можно значительно повысить суммарный коэффициент мощности всех потребителей.

Уравнительный реактивный ток накладывается на активный ток якоря, определяемый нагрузкой на валу синхронного двигателя.

Таким образом, кроме выполнения механической работы по приводу в действие какого-то механизма, синхронный двигатель может служить генератором реактивной энергии, пропорциональной реактивному (уравнительному) току, и иметь индуктивный либо емкостный характер в зависимости от соотношения между $I_в$ и $I_{в.ном}$.

На предприятиях чаще всего синхронный двигатель используется в режиме перевозбуждения ($I_в > I_{в.ном}$), когда в сеть генерируется емкостная реактивная мощность (по аналогии с батареей конденсаторов), которая компенсирует реактивную мощность, потребляемую асинхронными двигателями. Общий коэффициент мощности цеха, завода при этом повышается:

$$\cos \varphi = \frac{P_{\pi}}{\sqrt{P_{\pi}^2 + (Q_{\pi} - Q_{\kappa})^2}},$$

где P_{π} , Q_{π} – активная и реактивная мощность приемников; Q_{κ} – компенсируемая реактивная мощность. Это уменьшает общий ток I в электрических сетях, сокращает создаваемые им потери энергии. Так, мощность потерь в линии $\Delta P_{\text{л}} = R(I)^2$, где

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}U \cos \varphi}.$$

Зависимость тока якоря от тока возбуждения показана на рис. 5.5 (U -образные характеристики синхронного двигателя). Минимум кривых $I_я = f(I_в)$ соответствует режиму номинального возбуждения и чисто активному характеру тока ($\cos \varphi_1 = 1$, $Q = 0$). Чем больше механическая нагрузка на валу двигателя, тем меньше его возможность генерирования мощности Q_c .

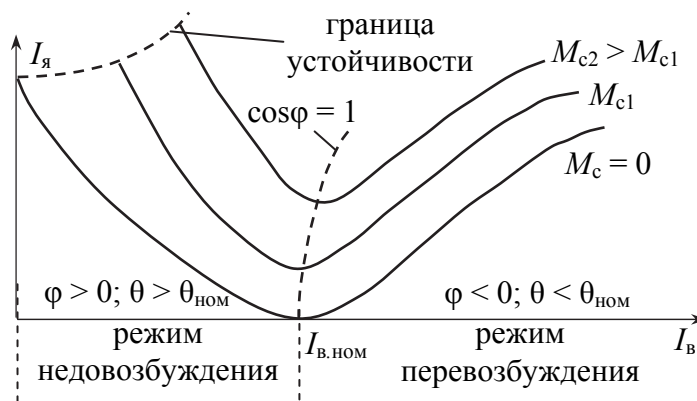


Рис. 5.5. U-образные характеристики синхронного двигателя

2. Домашнее задание для подготовки к лабораторному занятию

- Изучить литературу по теме занятия: § 30.2 [1]; § 31.1–31.5 [2].
- Выполнить домашнее задание.

Домашнее задание

Определить по паспортным данным синхронного двигателя (табл. 5.1) номинальный ток, активную и реактивную мощность, максимальный момент. Данные расчета внести в табл. 5.2

Таблица 5.1

Вариант	$P_{\text{ном}}, \text{кВт}$	$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	$\eta_{\text{ном}}, \%$	K_{max}	P
1	1000	6	0,8	92	2	3
2	1250	6	0,8	95	2	3
3	1600	6	0,8	95	2	3
4	2000	6	0,8	96	2	3

Таблица 5.2

Вариант	$P_{\text{I ном}}, \text{кВт}$	$Q_{\text{I ном}}, \text{кВАр}$	$I_{\text{I ном}}, \text{А}$	$M_{\text{max}} \text{ Н} \cdot \text{м}$

3. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Ознакомиться с лабораторной испытательной установкой (рис. 5.6).
2. Запустить синхронный двигатель (СД) с помощью разгонного двигателя:

- подать напряжение на обмотку якоря машины постоянного тока (используется в двигательном режиме), включив выключатель $Q3$.

– после включения $Q6$ регулятором $T1$ установить такой ток возбуждения $I_{\text{в}}$, при котором напряжение на зажимах якоря $U_{\text{я}}$ ($PV2$) будет примерно равно напряжению сети $U_{\text{с}}$ ($PV1$); при этом регулировочным реостатом $R3$ МПТ изменять частоту вращения якоря, а значит, и частоту тока якоря СД до примерного равенства частоты тока сети (определяется по приборам $PF1$ и $PF2$);

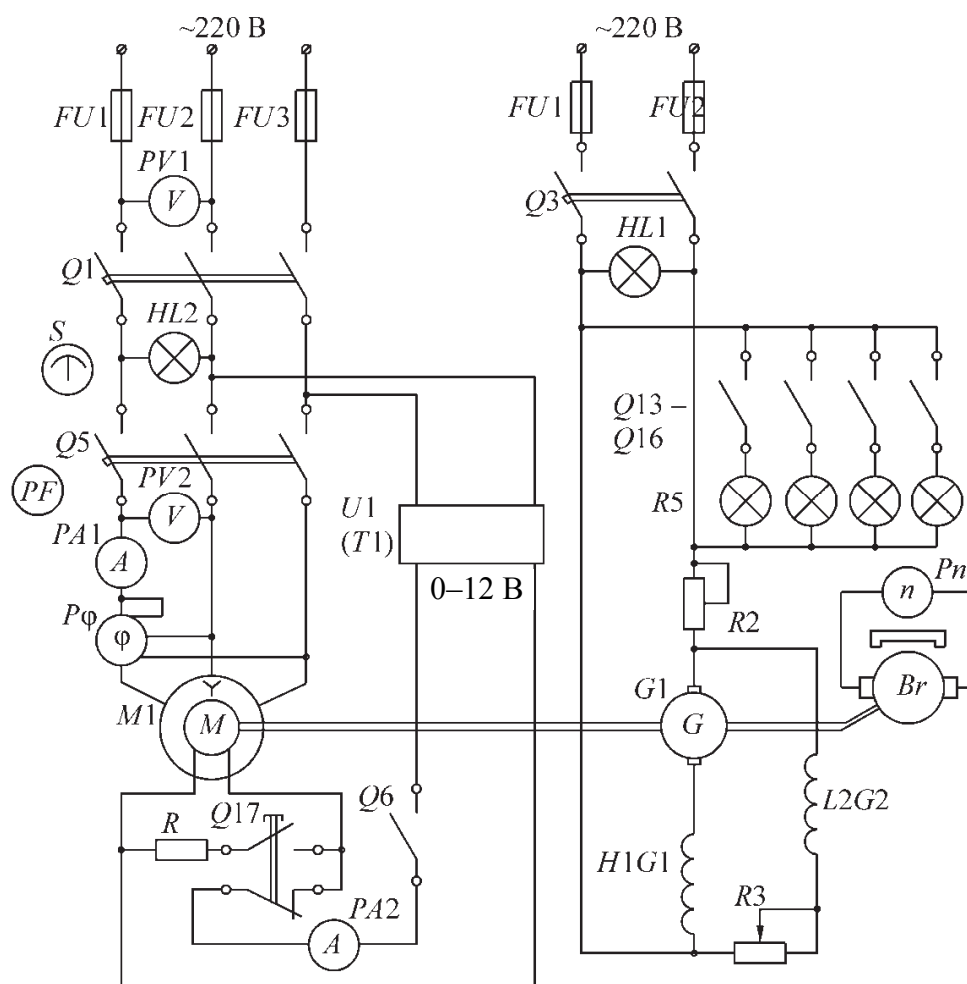


Рис. 5.6. Электрическая схема лабораторной установки

– завершение синхронизации определяется по положению стрелочного синхроскопа S , когда в момент синхронизации ($U_c = U_a$) стрелка синхроскопа медленно пересекает красную черту на шкале прибора; **в этот момент нажатием кнопки выключателя Q5 подключить якорь СД к сети.**

4. Разгонный двигатель отключить от сети выключателем Q3. При этом СД втягивается в синхронный режим и работает самостоятельно.

5. Снять механическую характеристику СД $n = f(M)$: изменяя нагрузку СД (противодействующий момент $M_{пр}$ генератора постоянного тока) включением разного количества нагрузочных резисторов R5 в цепь якоря генератора, сделать три измерения, меняя нагрузку от 0 до максимального значения. Данные записать в табл. 5.3.

Таблица 5.3

M (произвольные точки)	n , об/мин
1	
2	
3	

6. Снять U -образную характеристику СД в режиме холостого хода:

– при выключенной нагрузке ГПТ R5 (Q3 выключен) и работающем двигателе отметить величину тока возбуждения $I_{в0}$, при котором ток якоря I_a (PA1) минимален, $\cos\varphi = 1$;

– увеличивая регулятором U1 ток возбуждения I_b (PA2), снять зависимости тока якоря I_a , $\cos\varphi = f(I_b)$, отмечая характер $\cos\varphi$ (индуктивный или емкостный). Результаты внести в табл. 5.4;

– установив $I_b = I_{в0}$ регулятором U1, повторить опыт, уменьшая I_b и отмечая характер $\cos\varphi$ (индуктивный или емкостный). Результаты внести в табл. 5.4.

При возникновении резких колебаний тока якоря I_a с возрастающей амплитудой снизить ток возбуждения I_b , не доводя СД до выпадения из синхронизма.

7. Снять U -образную характеристику СД в нагрузочном режиме:

– установив $I_b = I_{в0}$, включить нагрузку по указанию преподавателя (реостат R2 полностью выведен);

– увеличивая регулятором U1 ток возбуждения I_b (PA2), снять зависимости тока якоря I_a , $\cos\varphi = f(I_b)$, отмечая характер $\cos\varphi$ (индуктивный или емкостный); результаты внести в табл. 5.4;

– снизив $I_{\text{в}}$ до $I_{\text{в0}}$, повторить опыт, уменьшая $I_{\text{в}}$ и отмечая характер $\cos\varphi$ (индуктивный или емкостный). Результаты внести в табл. 5.4.

При возникновении резких колебаний тока якоря $I_{\text{я}}$ с возрастающей амплитудой снизить ток возбуждения $I_{\text{в}}$, не доводя СД до выпадения из синхронизма.

Таблица 5.4

№ п/п	$I_{\text{я}}, \text{А}$	$I_{\text{в}}, \text{А}$	$\cos\varphi$
	Режим холостого хода		
1			
2			
3			
4			
5			
	Нагрузочный режим		
1			
2			
3			
4			
5			

8. Отключить нагрузку, выключив $Q1-Q17$, установить $I_{\text{в}} = I_{\text{в0}}$, отключить обмотку якоря от сети ($Q5$ в положении «отключено»), выключатель $Q3$ – разомкнут.

9. Выполнить асинхронный пуск СД:

- включить (проверить состояние) $Q6$;
- отключить обмотку возбуждения (ОВ) переключателем $Q17$ от источника постоянного напряжения ($T1$), при этом ОВ замыкается на резистор $R1$;
- нажать кнопку $Q17$ (пусковая обмотка якоря включена на $R1$) и держать нажатой на протяжении всего времени разгона СД;
- включить $Q5$; записать в табл. 4.5 значения частоты вращения ротора n и тока якоря $I_{\text{я}}$ в асинхронном режиме СД;
- по достижении якорем СД околосинхронной частоты вращения (определить по тахометру) разомкнуть кнопку $Q17$ – в обмотку возбуждения подается постоянный ток.

Таблица 5.5

Наблюдаемая величина	Асинхронный режим	Синхронный режим
$n, \text{об/мин}$		
$I_{\text{я}}, \text{А}$		

После непродолжительных колебаний тока СД втягивается в синхронизм. Записать в табл. 5.5 значения частоты вращения ротора n и тока якоря I_a в синхронном режиме двигателя.

Показать снятые данные преподавателю. Если замечаний нет, отключить стенд от сети тумблером $Q1$.

По результатам измерений табл. 5.4 построить U -образные характеристики СД и зависимость $\cos\varphi = f(I_B)$ в одних координатных осях.

4. Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Выполненное домашнее задание.
3. Электрическая схема экспериментальной установки.
4. Таблицы измерений и вычислений.
5. U -образные характеристики СД и зависимость $\cos\varphi = f(I_B)$.
6. Выводы по материалу работы.

5. Контрольные вопросы

1. Как устроена синхронная машина и каковы ее конструктивные разновидности?
2. В каких синхронных машинах используется явнополюсный ротор, а в каких неявнополюсный?
3. Объясните устройство явнополюсного и неявнополюсного роторов синхронных машин.
4. Какие существуют способы возбуждения синхронных машин?
5. Какие виды потерь имеют место в синхронной машине?
6. Что применяют в качестве источника энергии для обмотки возбуждения синхронной машины?
7. Каков принцип действия синхронного двигателя и синхронного генератора?
8. Что такое синхронизирующий момент синхронного двигателя?
9. Почему синхронный двигатель невозможно запустить без специальных пусковых устройств?
10. Как производится асинхронный пуск синхронного двигателя?

11. Какие еще возможны способы пуска синхронного двигателя?

12. Как влияет на работу синхронного двигателя изменение его тока возбуждения?

13. Как изменяется ток якоря синхронного двигателя при увеличении тока возбуждения? Какой по характеру $\cos\varphi$ при этом?

14. Чем ограничивается область устойчивой работы синхронного двигателя?

15. Как регулируется коэффициент мощности синхронного двигателя?

16. Каковы достоинства синхронного двигателя перед асинхронным?

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: изучить устройство и принцип действия двигателя постоянного тока, способы пуска двигателя и регулирования частоты вращения якоря, исследовать характеристики двигателя постоянного тока.

1. Общие сведения

Устройство и принцип действия двигателя постоянного тока

Двигатель постоянного тока состоит из неподвижной части статора и вращающейся части якоря, разделенных воздушным зазором. К внутренней поверхности статора крепятся главные и добавочные полюсы. Главные полюсы с обмотками возбуждения служат для создания в машине основного магнитного потока Φ , а добавочные – для уменьшения искрения. Обе обмотки через клеммную коробку подключаются к источнику питания постоянного тока.

Якорь состоит из вала, сердечника, обмотки и коллектора. Коллектор содержит изолированные друг от друга медные пластинки, которые соединяются с секциями обмотки якоря. На коллектор накладываются неподвижные щетки, соединяющие обмотку якоря с внешней электрической цепью. В результате взаимодействия тока якоря $I_{\text{я}}$ и магнитного потока Φ создается вращающий момент

$$M = C_M \Phi I_{\text{я}},$$

где C_M – постоянная момента, зависящая от конструктивных данных машины.

Вращающий момент M двигателя уравнивается моментом сопротивления M_c рабочей машины. При вращении якоря с частотой n его обмотка пересекает магнитный поток Φ , и в ней, согласно закону электромагнитной индукции, наводится противо-ЭДС $E = C_e \Phi n$, где C_e – конструктивная постоянная.

Напряжение на зажимах якоря U равно сумме ЭДС и падения напряжения на сопротивлении якорной цепи

$$U = E + R_{\text{я}} I_{\text{я}} = C_{\text{е}} \Phi n + I_{\text{я}} R_{\text{я}},$$

откуда ток якоря

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

а частота вращения

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

Способы пуска двигателя постоянного тока

В момент пуска $n = 0$ и $E = 0$, а ток якоря принимает значение $I_{\text{я}} = U / R_{\text{я}}$.

Так как $R_{\text{я}}$ мало (см. данные в табл. 6.1 на с. 63), $I_{\text{я}}$ во много раз превышает номинальный ток, что недопустимо. Поэтому пуск двигателя осуществляется либо с помощью пускового реостата $R_{\text{п}}$, либо при пониженном напряжении U , так, чтобы $I_{\text{яп}} \leq (2-2,5)I_{\text{я.ном}}$. Для сохранения достаточной величины $M_{\text{п}}$ запускают ДПТ при максимальном потоке Φ , для чего регулировочный реостат в цепи обмотки возбуждения полностью выводят. По мере увеличения частоты вращения якоря увеличивается ЭДС E , уменьшая $I_{\text{я}}$. Необходимость в пусковом реостате отпадает, он постепенно выводится, и ток якоря достигает значения, определяемого нагрузкой двигателя. Изменение момента и частоты вращения двигателя постоянного тока при пуске происходит так же, как у асинхронного двигателя.

Реостатный пуск применяется в большинстве случаев в связи с использованием простого и недорогого пускового устройства. Пуск изменением напряжения на якоре очень удобен, т. к. осуществляется плавно и экономично, но не требует регулируемого источника постоянного напряжения. Применение такого способа пуска целесообразно в том случае, если регулируемый источник постоянного напряжения необходим также и для изменения частоты вращения двигателя.

Пуск при пониженном напряжении возможен при наличии источника регулируемого напряжения – генератора постоянного тока (система Леонарда или система генератор-двигатель, сокра-

щенно Г-Д) или управляемого выпрямителя. В последнем случае габариты установки резко уменьшаются, растет КПД, облегчается управление двигателем.

Регулирование частоты вращения

Выше было показано, что частоту вращения двигателя постоянного тока можно регулировать тремя способами: изменением $R_{\text{я}}$ в цепи якоря, изменением магнитного потока Φ , изменением питающего напряжения U .

Регулирование частоты вращения якоря изменением $R_{\text{я}}$ в цепи якоря позволяет регулировать частоту вращения вниз от номинальной. Плавность регулирования зависит от числа ступеней реостата. Из-за больших потерь энергии на нагрев реостата этот способ регулирования не экономичен, уменьшение КПД почти пропорционально уменьшению частоты вращения. Увеличение $R_{\text{я}}$ сопровождается смягчением электромеханических характеристик двигателя (рис. 6.1), что ограничивает практический диапазон регулирования величиной 1 : 1,5. Диапазон регулирования зависит от нагрузки на валу, уменьшаясь при уменьшении тока в якоря. При $I_{\text{я}} = 0$ изменения $R_{\text{я}}$ на частоту вращения не влияют. Этот способ применяют для регулирования скорости механизмов с вентиляторным характером нагрузки.

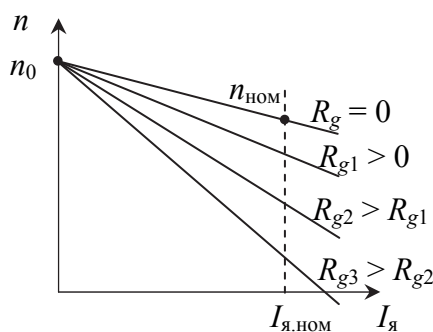


Рис. 6.1. Электромеханические характеристики двигателя постоянного тока при регулировании частоты вращения якоря изменением $R_{\text{я}}$

Регулирование частоты вращения якоря изменением Φ в цепи возбуждения. При вводе реостата в цепь возбуждения двигателя или уменьшении напряжения на зажимах цепи возбуждения (при независимом ее питании) уменьшается магнитный поток Φ

и увеличивается частота вращения, т. е. регулирование происходит вверх от номинальной частоты вращения в диапазоне 1 : 2, а для двигателя специального исполнения – до 1 : 6.

Регулирование частоты вращения просто и экономично, достаточно плавно. При неизменной нагрузке на валу ослабление магнитного потока вызывает увеличение тока в якоре и потребляемой мощности P_1 .

Пропорционально росту частоты вращения n увеличивается и P_2 , КПД остается практически неизменным. Для изменения I_B применяется небольшой по габаритам и тепловыделениям регулировочный реостат либо управляемый источник питания.

Электромеханические характеристики, показанные на рис. 6.2, с изменением частоты вращения смягчаются незначительно. Перечисленные достоинства обусловили широкое применение данного способа регулирования частоты вращения. Недостатками его являются уменьшение вращающего момента при ослаблении потока и относительно небольшой диапазон регулирования.

Эффективно применяется этот способ для регулирования скорости механизмов с постоянной мощностью: токарных и пермоточных станков, лущильных станков в деревообработке, сновальных машин в ткачестве и т. д.

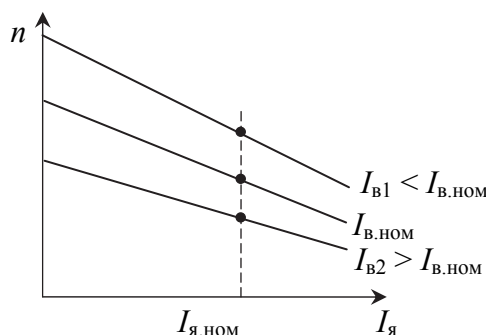


Рис. 6.2. Электромеханические характеристики двигателя постоянного тока при регулировании частоты вращения якоря изменением Φ

Регулирование частоты вращения напряжением U , подводимым к якору двигателя. Частота вращения якоря изменяется вниз от номинального значения, вызывая этим изменения частоты вращения в диапазоне 1 : 10, а при наличии стабилизирующих обратных связей – до 1 : 1000. Такое регулирование практически не

меняет КПД двигателя, т. к. уменьшение U уменьшает P_1 , и в такой же степени уменьшение n уменьшает P_2 .

Жесткость характеристик, как показано на рис. 6.3, сохраняет- ся, что обеспечивает устойчивость работы во всем диапазоне ре- гулирования. Область применения данного способа регулирования частоты вращения – механизмы с постоянным моментом нагруз- ки. Это подъемные и транспортируемые механизмы, большинство текстильных машин, механизмы подачи и т. д.

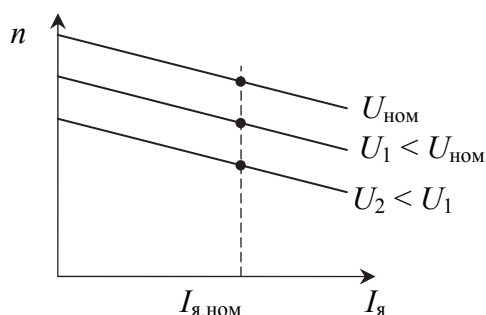


Рис. 6.3. Электромеханические характеристики двигателя постоянного тока при регулировании частоты вращения якоря изменением U

2. Домашнее задание для подготовки к лабораторному занятию

- Изучить литературу по теме занятия: § 14.1, 14.2, 14.6–14.8 [1]; § 26.1–26.5 [2].
- Выполнить домашнее задание.

Домашнее задание

По паспортным данным двигателя постоянного тока (табл. 6.1) определить: величину сопротивления пускового реостата, обеспечивающего кратность пускового тока, равную 2 ($K_p = 2$), ток якоря $I_я$, номинальный момент двигателя $M_{ном}$.

Таблица 6.1

Вариант	Тип двигателя	$P_{ном},$ кВт	$U_{ном},$ кВт	$n_{ном},$ мин ⁻¹	$I_{ном},$ А	$\eta_{ном},$ %	$R_я,$ Ом	$R_в,$ Ом
1	ПН-68	4,8	220	1500	20,9	95	0,564	180
2	ПЛ-072	0,18	220	1400	1,3	63	23,6	520
3	ПБСТ - 42	2,1	220	1500	11,0	98,5	0,242	358
4	П-91У4	19	220	600	100	81,5	0,16	42,45

Данные расчета внести в табл. 6.2.

Таблица 6.2

$R_{пр}, \text{Ом}$	$I_{я}, \text{А}$	$M_{ном}, \text{Н} \cdot \text{м}$

3. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Ознакомиться с лабораторной испытательной установкой (рис. 6.4).

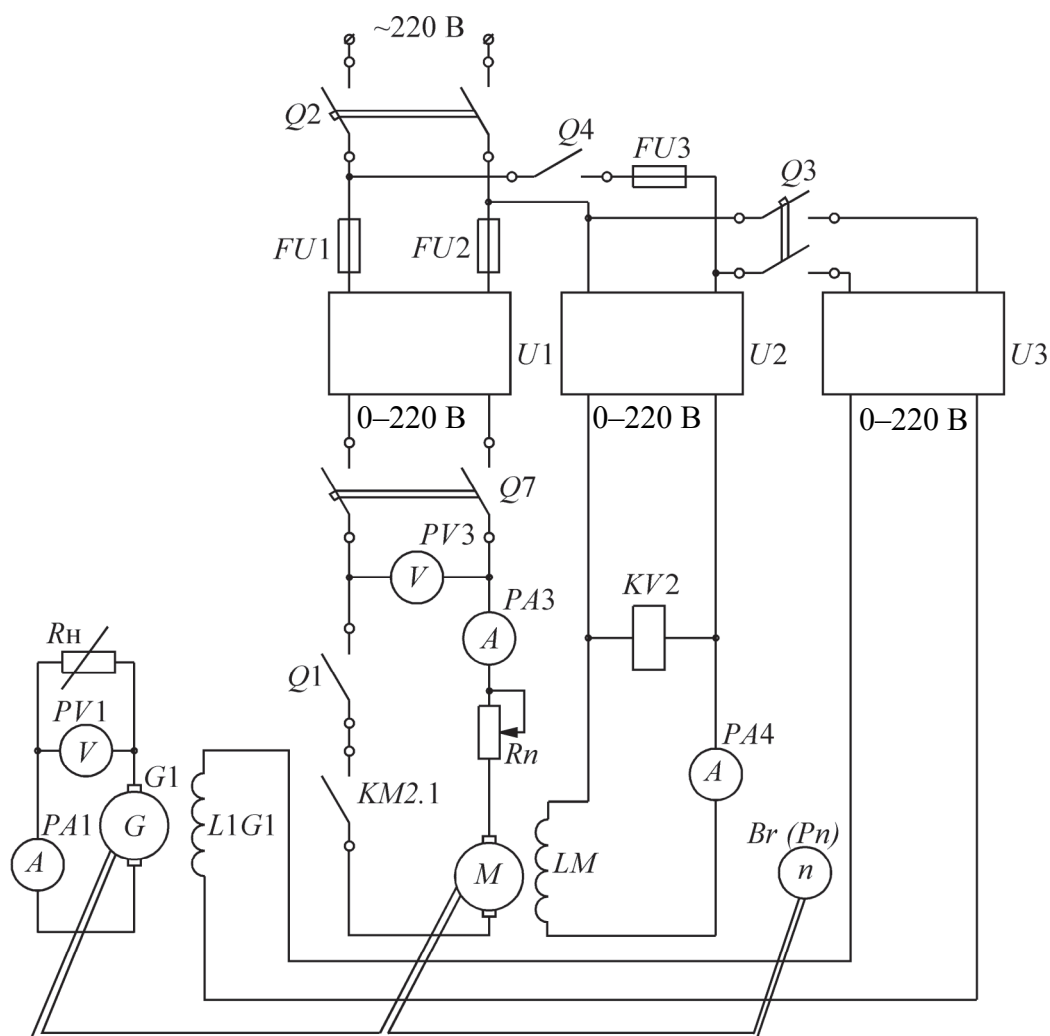


Рис. 6.4. Электрическая схема лабораторной установки

2. Подготовить установку к реостатному пуску двигателя:
 а) убедиться в выключенном положении всех выключателей и установке регуляторов ($U1$, $U2$, $U3$) в нулевое положение;

б) полностью ввести пусковой реостат $R2$ двигателя постоянного тока в положение «пуск».

3. Подключить установку к сети выключателем $Q2$.

4. Выключателем $Q4$ подать питание в цепь возбуждения и регулятором $U2$ установить ток возбуждения двигателя на заданном уровне ($\approx 0,72$ А на $PA4$).

5. Включить $Q7$, регулятором $U1$ увеличить напряжение до $U_{ном}$.

6. Замкнуть цепь питания двигателя выключателем $Q1$ и, постепенно выводя пусковой реостат $R2$ в положение «работа», проследить за скачком тока ($PA3$) в цепи якоря двигателя постоянного тока в процессе пуска.

7. Снять электромеханические характеристики двигателя постоянного тока $n = f(I_{я})$ при $I_{в} = \text{const}$ при регулировании частоты вращения якоря сопротивлением в цепи якоря $R_{я}$: установить реостатом $R2$ различные значения $R_{я}$ (три положения регулятора) при максимальной нагрузке и в режиме холостого хода (при снятой нагрузке). Нагрузка двигателя постоянного тока регулируется с помощью генератора постоянного тока $G1$ (включается с помощью $Q3$). Величину тока якоря генератора постоянного тока регулировать изменением тока в обмотке возбуждения LG регулятором напряжения $U3$.

8. Снятые данные записать в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Положение реостата	Холостой ход		Нагрузка	
	$I_{я}, \text{А}$	$n, \text{об/мин}$	$I_{я}, \text{А}$	$n, \text{об/мин}$
1				
2				
3				

9. Установить в положение «работа» реостат $R2$.

10. Снять электромеханические характеристики двигателя постоянного тока $n = f(I_{я})$ при регулировании частоты вращения якоря напряжением в цепи якоря двигателя постоянного тока $U_{я}$: изменяя напряжение цепи якоря регулятором $U1$, измерить ток якоря и частоту вращения якоря при максимальной нагрузке и в режиме холостого хода (при снятой нагрузке).

11. Снятые данные записать в табл. 6.4.

Таблица 6.4

$U, \text{В}$	Холостой ход		Нагрузка	
	$I_{\text{я}}, \text{А}$	$n, \text{об/мин}$	$I_{\text{я}}, \text{А}$	$n, \text{об/мин}$

12. Снять электромеханические характеристики двигателя постоянного тока $n = f(I_{\text{я}})$ при регулировании частоты вращения якоря изменением магнитного потока обмотки возбуждения $\Phi_{\text{в}}$, изменяя регулятором $U2$ ток в обмотке возбуждения двигателя, измерить ток якоря и частоту вращения якоря при максимальной нагрузке и в режиме холостого хода (при снятой нагрузке).

13. Снятые данные записать в табл. 6.5.

Таблица 6.5

$I_{\text{в}}, \text{А}$	Холостой ход		Нагрузка	
	$I_{\text{я}}, \text{А}$	$n, \text{об/мин}$	$I_{\text{я}}, \text{А}$	$n, \text{об/мин}$

14. Отключить двигатель выключателем $Q1$ от источника питания, регулятор напряжения $U1$ установить в нулевое положение. Проверить наличие тока в обмотке возбуждения ($PA4$).

15. Включить $Q1$ и, плавно увеличивая напряжение $U1$, выполнить безреостатный пуск двигателя постоянного тока, наблюдая за изменениями частоты вращения якоря двигателя.

16. Отключить установку:

а) снизить напряжение $U1$ до нуля;

б) выключить $Q7, Q1, Q2, Q4$;

в) вывести на нулевое положение регуляторы напряжения $U2, U3$.

По данным табл. 6.3–6.5 построить электромеханические характеристики двигателя постоянного тока $n = f(I_{\text{я}})$ для каждого способа регулирования частоты вращения, проводя в каждом режиме прямую линию через характеризующие ее две точки (холостой ток и нагрузка, определяемые каждая координатами n и $I_{\text{я}}$).

3. Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Выполненное домашнее задание.
3. Электрическая схема экспериментальной установки.
4. Таблицы измерений и вычислений.
5. Электромеханические характеристики двигателя постоянного тока.
6. Выводы по материалу работы.

Контрольные вопросы

1. Изобразите по памяти принципиальную электрическую схему двигателя постоянного тока и расскажите его устройство.
2. Расскажите устройство и принцип работы двигателя постоянного тока.
3. Назначение коллектора в двигателе постоянного тока.
4. Почему нежелательно осуществлять прямой способ пуска двигателя постоянного тока?
5. Для двигателей какой мощности применяется прямой пуск?
6. Какое различие между реостатным и безреостатным пуском?
7. В каком из положений должен быть при пуске реостат возбуждения двигателя и почему?
8. Почему при безреостатном пуске на пониженном напряжении возбуждение двигателя должно быть независимым?
9. От чего зависит частота вращения двигателя и чем ее можно регулировать?
10. Как осуществляется реверс двигателя?
11. Как объяснить, что с увеличением нагрузки частота вращения двигателя уменьшается?
12. Как влияет на частоту вращения двигателя сопротивление якорной цепи?
13. Как влияет на частоту вращения двигателя напряжение на якоре?
14. Назовите источники регулируемого напряжения, применяемые для изменения частоты вращения двигателя.
15. Сопоставьте достоинства и недостатки различных способов регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА СО СМЕШАННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Цель работы: ознакомиться с устройством, назначением и принципом действия генератора постоянного тока со смешанным возбуждением при различных схемах включения обмоток возбуждения; снять характеристики холостого хода, регулировочную и внешнюю.

1. Общие сведения

ЭДС обмотки якоря генератора пропорциональны магнитному потоку и частоте вращения якоря. $E = C_e \Phi n$. Здесь C_e – постоянный конструктивный коэффициент машины, либо коэффициент ЭДС. Магнитный поток образуется обмоткой возбуждения, включенной в цепь якоря (схема самовозбуждения) либо к дополнительному источнику постоянного тока (схема независимого возбуждения). Изменение величины магнитного потока (изменение тока возбуждения) является основным методом регулирования ЭДС генератора постоянного тока.

Большинство современных машин постоянного тока имеют смешанную схему возбуждения, при которой основная часть магнитного потока (до 80%) образуется параллельной обмоткой, а оставшаяся часть – последовательной обмоткой, поток которой зависит от тока нагрузки якоря. Обе обмотки размещаются на главных полюсах машины. Добавочные полюса предназначены для уменьшения искрения на коллекторе.

Самовозбуждение генератора возможно при сохранении следующих условий: а) наличие остаточного магнитного потока; б) такое направление вращения ротора, при котором ЭДС и ток, индуцируемые остаточным магнитным потоком, исключают его увеличение; в) определенная величина сопротивления цепи возбуждения, при которой $r_v < r_{кр}$. Тут $r_{кр}$ – граничное (критическое) значение сопротивления r_v .

Ток нагрузки, протекая по цепи якоря, возбуждает магнитное поле якоря, которое действует встречно основному потоку, в результате чего снижается ЭДС и напряжение на зажимах генератора. Это явление называется реакцией якоря. Для компенсации размагничивающего действия реакции якоря применяется последовательная обмотка возбуждения и дополнительные полюса, МДС которых действует с основной (параллельной либо независимой) обмоткой возбуждения. Необходимость увеличения магнитного потока для поддержания неизменяемого напряжения генератора при увеличении тока $I_{\text{я}}$ вытекает из рассмотрения уравнения ЭДС:

$$U = E - R_{\text{я}} I_{\text{я}} = C_{\Phi} \Phi_{\text{п}} - R_{\text{я}} I_{\text{я}},$$

где $R_{\text{я}}$ и $I_{\text{я}}$ – сопротивление и ток цепи якоря.

Свойства генератора постоянного тока оцениваются по его характеристикам.

Характеристика холостого хода либо кривая намагничивания представляет собой зависимость ЭДС от тока возбуждения ($E = f(I_{\text{возб}})$) при отсутствии тока нагрузки ($I_{\text{н}} = 0$) и постоянной частоте вращения якоря ($n = n_{\text{н}}$).

Регулировочная характеристика – зависимость тока возбуждения от тока нагрузки ($I_{\text{возб}} = f(I_{\text{н}})$) при постоянном значении напряжения на зажимах якоря ($U = U_{\text{н}}$) и постоянной частоте вращения якоря ($n = n_{\text{н}}$); она показывает, какая величина тока возбуждения необходима для поддержания постоянной величины напряжения при различных нагрузках.

Внешняя характеристика – зависимость напряжения на зажимах якоря U от тока нагрузки $I_{\text{н}}$ при неизменном возбуждении машины, $U = f(I_{\text{н}})$ при $r_{\text{в}} = \text{const}$ и $n = n_{\text{н}}$; она определяет падение напряжения ΔU с ростом нагрузки.

2. Домашнее задание для подготовки к лабораторному занятию

- Изучить литературу по теме занятия: § 14.1, 14.4, 14.5 [1]; § 24.2–24.6, 25.1, 25.2 [2].
- Выполнить домашнее задание.

Домашнее задание

Вычертить схему генератора постоянного тока в соответствии с вариантом: вариант № 1 – с независимым возбуждением; вари-

ант № 2 – с параллельным возбуждением; вариант № 3 – с последовательным возбуждением; № 4 – со смешанным возбуждением.

3. Порядок выполнения работы

1. После изучения устройства машины постоянного тока ознакомиться с лабораторной установкой и ее принципиальной электрической схемой (рисунок).

2. Подготовить установку к пуску. Установить переключатель $Q8$ в положение «Независимое возбуждение», подключив этим обмотку возбуждения генератора постоянного тока к источнику регулируемого постоянного напряжения. Отключить нагрузочные резисторы $R5$ в цепи якоря генератора постоянного тока выключателями $Q13$ – $Q16$. Реостат $R3$ в цепи возбуждения полностью вывести.

3. Произвести пуск асинхронного двигателя выключателем $Q1$.

4. Снять вольт-амперную характеристику генератора постоянного тока на холостом ходу $U_0 = E = f(I_B)$ при $I_n, n = \text{const}$. Изменения тока возбуждения (реостатом $R3$) производить с таким расчетом, чтобы напряжение генератора (вольтметр $PV3$) повышалось степенями – 20% от номинального, дойдя до 120% $U_{\text{ном}}$.

Чтобы исключить влияние гистерезиса, движок реостата $R3$ перемещать только в одном направлении. Затем, уменьшая ток возбуждения, произвести измерения ЭДС для тех же значений тока возбуждения.

Повторить опыт при самовозбуждении. Для этого установить переключатель $Q8$ в положение «самовозбуждение». Ток возбуждения генератора регулировать реостатом $R3$.

Результаты измерений внести в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Независимое воз- буждение	I_B, A						
	$E_{\uparrow}, B$						При увеличении
	$E_{\downarrow}, B$						При уменьшении
Самовозбуждение	I_B, A						
	E, B						

5. Снять внешние характеристики генератора постоянного тока при независимом возбуждении генератора. Установить номинальное напряжение генератора постоянного тока 115 В (вольтметр $PV3$) на

холостом ходу, регулируя с помощью $R3$ ток возбуждения (амперметр $PA4$). Затем, поочередно подключая нагрузочные резисторы в цепь якоря выключателями $Q13$ – $Q16$, произвести измерение напряжения и тока нагрузки (амперметр $PA3$) при $I_b = \text{const}$. Повторить опыт при самовозбуждении генератора. Условие $I_b = \text{const}$ заменяется условием $R_b = \text{const}$, т. е. реостат $R3$ в цепи возбуждения должен быть в одном и том же положении, при котором $U_0 = U_{\text{ном}}$. Обратить внимание, как с изменением нагрузки генератора будет изменяться и ток возбуждения. Результаты измерений внести в табл. 7.2.

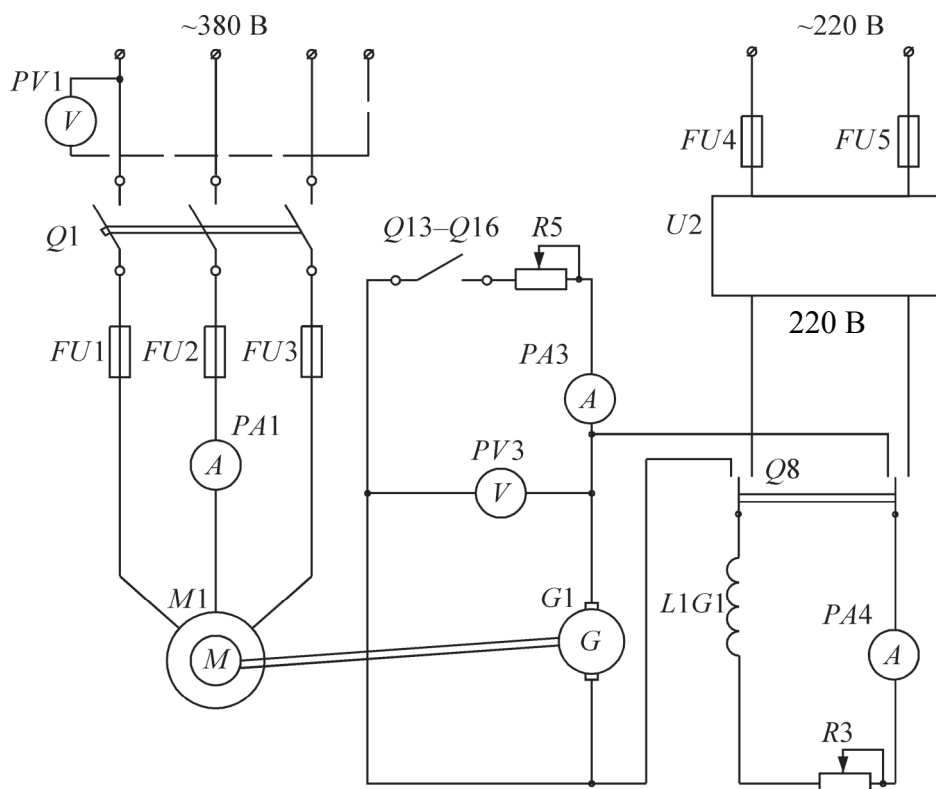


Схема лабораторной установки

6. Снять регулировочные характеристики $I_b = f(I_n)$ при $U = \text{const}$, $n = \text{const}$. При независимом возбуждении установить номинальное напряжение 115 В на холостом ходу с помощью $R3$. Затем, подключая поочередно нагрузку выключателями $Q13$ – $Q16$ и меняя с помощью $R3$ ток возбуждения так, чтобы напряжение оставалось неизменным, произвести измерение тока якоря ($PA3$) и тока возбуждения $PA4$.

При самовозбуждении опыт повторяется. Результаты измерений внести в табл. 7.3.

Таблица 7.2

Независимое воз- буждение	I_H, A	0					
	U, B	220					
Самовозбуждение	I_H, A	0					
	U, B	220					

Таблица 7.3

Независимое воз- буждение	I_H, A						
	I_B, A						
Самовозбуждение	I_H, A						
	I_B, A						

По полученным данным построить: ВАХ на холостом ходу $U_0 = E = f(I_B)$ при $I_H, n = \text{const}$ (табл. 7.1); внешние характеристики генератора постоянного тока при различных способах возбуждения $U = f(I_H)$ (табл. 7.2) и регулировочные характеристики $I_B = f(I_H)$ (табл. 7.3).

4. Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Выполненное домашнее задание.
3. Электрическая схема экспериментальной установки.
4. Таблицы измерений и вычислений.
5. Графики зависимостей: $U_0 = E = f(I_B)$, $U = f(I_H)$ и $I_B = f(I_H)$.
6. Выводы по материалу работы.

5. Контрольные вопросы

1. Объяснить устройство и принцип действия генератора постоянного тока. Каково назначение обмоток главных и добавочных полюсов?
2. Начертить и объяснить различные схемы возбуждения генератора постоянного тока. Для чего применяют последовательную обмотку при смешанном возбуждении?
3. Что такое реакция якоря?
4. Каковы условия самовозбуждения?
5. Как снимается характеристика холостого хода?
6. Что представляют собой регулировочная и внешняя характеристики? Пояснить их смысл и назначение, используя полученные экспериментальные данные.

АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ

Цель работы: изучить устройство, принцип работы и схемы включения магнитных пускателей.

1. Общие сведения

Магнитный пускатель представляет собой комплектный аппарат, предназначенный для дистанционного управления и автоматической защиты электродвигателей. При помощи магнитного пускателя можно осуществить пуск, остановку и реверсирование двигателей, защиту двигателей и сети от перегрузок, от работы при понижении напряжения, от самопроизвольных включений (так называемую нулевую защиту), сигнализацию включенного или выключенного состояния цепей, а также автоматическое управление электродвигателем. Магнитный пускатель состоит из трехполюсного контактора и тепловых реле.

Контактор представляет собой электромагнитный одноступенчатый аппарат, предназначенный для включения и отключения силовых цепей с помощью электромагнитов. Контакторы допускают от 500 до 1500 включений в час и рассчитаны на ток до 600 А при напряжении до 600 В. Контактор состоит из электромагнита и контактной системы (рис. 8.1).

Электромагнит *11*, *12* служит для приведения в действие контактной системы. Он состоит из разъемного магнитопровода *11* и катушки *12*. Катушка крепится на неподвижной части магнитопровода и при включении в сеть создает магнитный поток, под действием которого к неподвижному магнитопроводу притягивается

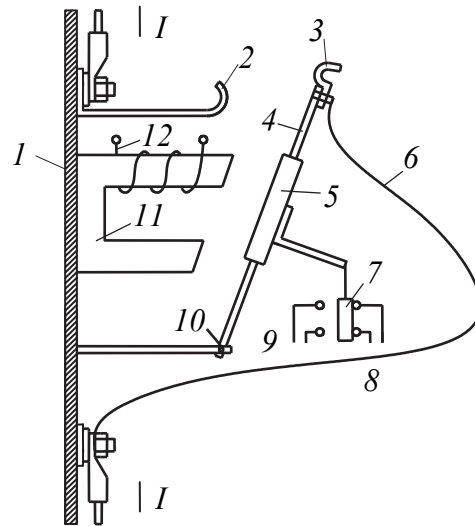


Рис. 8.1. Устройство контактора

подвижная его часть (якорь) 5, скрепленная с контактным мостиком (траверсой) 4, в результате чего происходит замыкание силовых контактов 2, 3, а также замыкание или размыкание блокировочных контактов 9, 8. Силовые контакты обычно снабжаются дугогасящими устройствами для быстрого гашения электрической дуги, возникающей при разрыве силовой цепи. Блокировочные контакты предназначены для замыкания и размыкания слаботочных цепей управления, защиты и сигнализации.

Защита электродвигателя от перегрузок осуществляется тепловым реле (рис. 8.2).

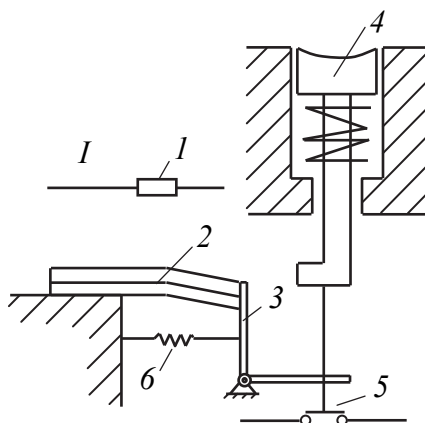


Рис. 8.2. Тепловое реле

Тепловое реле состоит из нагревательного элемента 1, включенного в силовую цепь, биметаллической пластинки 2 и размыкающих контактов 5, кнопки возврата 4. При перегрузке двигателя и, следовательно, увеличении тока, протекающего по нагревательному элементу, биметаллическая пластинка изгибается в результате неодинакового расширения слоев и через систему тяг и рычагов 3 размыкает контакт реле 5, включенный в цепь катушки пускателя, в результате чего двигатель отключается. Реле настраивается таким образом, чтобы при перегрузке электродвигателя на 20% оно срабатывало через 20 мин. При большей перегрузке отключение электродвигателей происходит быстрее. Для возврата контактов реле в исходное состояние при остывании нагревательного элемента и биметаллической пластины реле снабжается специальной кнопкой 4 – кнопкой возврата.

В зависимости от мощности электродвигателя различают пускатели типа ПМЕ нулевого, первого и второго габаритов (соответ-

ственно 1,1; 4,0; 10 кВт) и типа ПМА – третьего, четвертого, пятого и шестого габаритов (13; 20; 25; 55; 75 кВт). В типе пускателя указывается его габарит (1-я цифра), исполнение (2-я цифра): 1 – открытый, 2 – защищенный, 3 – закрытый; наличие тепловой защиты (3-я цифра: 1 и 3 – без тепловой защиты соответственно для нереверсивного и реверсивного пускателя и 2, 4 – с тепловой защитой).

Автоматическое управление электродвигателями и другими электроприемниками осуществляется путем применения в электрических цепях различных аппаратов. Автоматически осуществляется пуск двигателя, регулирование частоты его вращения, торможение, остановка, а также защита от коротких замыканий и перегрузок, выполнение заданной последовательности операций электропривода и другие операции.

Автоматическое управление осуществляется с помощью электрических аппаратов. Соединение элементов и требуемая последовательность коммутационных операций отражены на электрических схемах. При изучении и чтении схем необходимо учитывать их особенности:

- каждая схема имеет две электрические цепи: силовую, которая обычно выделяется жирными линиями, и цепь управления, изображаемую более тонкими линиями;

- все элементы электрических аппаратов обозначаются в соответствии с ГОСТ;

- аппараты в соответствии с их функциями обозначаются буквами согласно СТ, например: *КМ* – главный контактор, *КТ* – реле времени, *КА* – токовое реле, *КК* – реле тепловое, *КВ* – реле напряжения, *SB* – кнопка и т. д.;

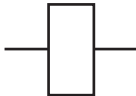
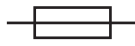
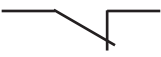
- разные элементы одного устройства включаются в различные электрические цепи в соответствии с их функциональным назначением, например: обмотка контактора включена в цепь управления, главные контакты контактора – в силовую цепь, а вспомогательные контакты – в цепь управления;

- принадлежность элементов к одному аппарату устанавливается по единому для всех элементов буквенному и цифровому обозначению;

- на схеме все элементы (контакты, кнопки и т. п.) показаны при отсутствии токов в обмотках и ненажатых кнопках.

Некоторые условные обозначения элементов аппаратуры управления показаны в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Условное обозначение	Наименование	Условное обозначение	Наименование
	Обмотка контактора, реле, пускателя		Предохранитель
	Контакты контактора, реле, пускателя:		Размыкающий контакт теплового реле
	Силовые блок-контакты		Нагревательный элемент теплового реле
	Замыкающие		Контакты с выдержкой времени при срабатывании:
	Размыкающие		Замыкающие
	Кнопки самовозврата:		Размыкающие
	С замыкающим контактом		
	С размыкающим контактом		

Управлять асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором можно с помощью магнитного пускателя. Магнитным пускателем называют аппарат, состоящий из контакторов, тепловых реле и кнопочной станции, закрытых общим кожухом. Магнитный пускатель размещают в удобном для оператора месте и на любом расстоянии от двигателя.

Согласно схеме управления (рис. 8.3) можно осуществить автоматический пуск асинхронного двигателя в двух направлениях вращения, условно названных «Вперед» и «Назад», и его остановку. Для этого магнитный пускатель имеет два контактора (*KM1* и *KM2*) и кнопочную станцию, состоящую из трех кнопок (*SBT*, *SBC1* и *SBC2*). Для защиты двигателя от перегрузок имеется два тепловых реле (*KK1* и *KK2*).

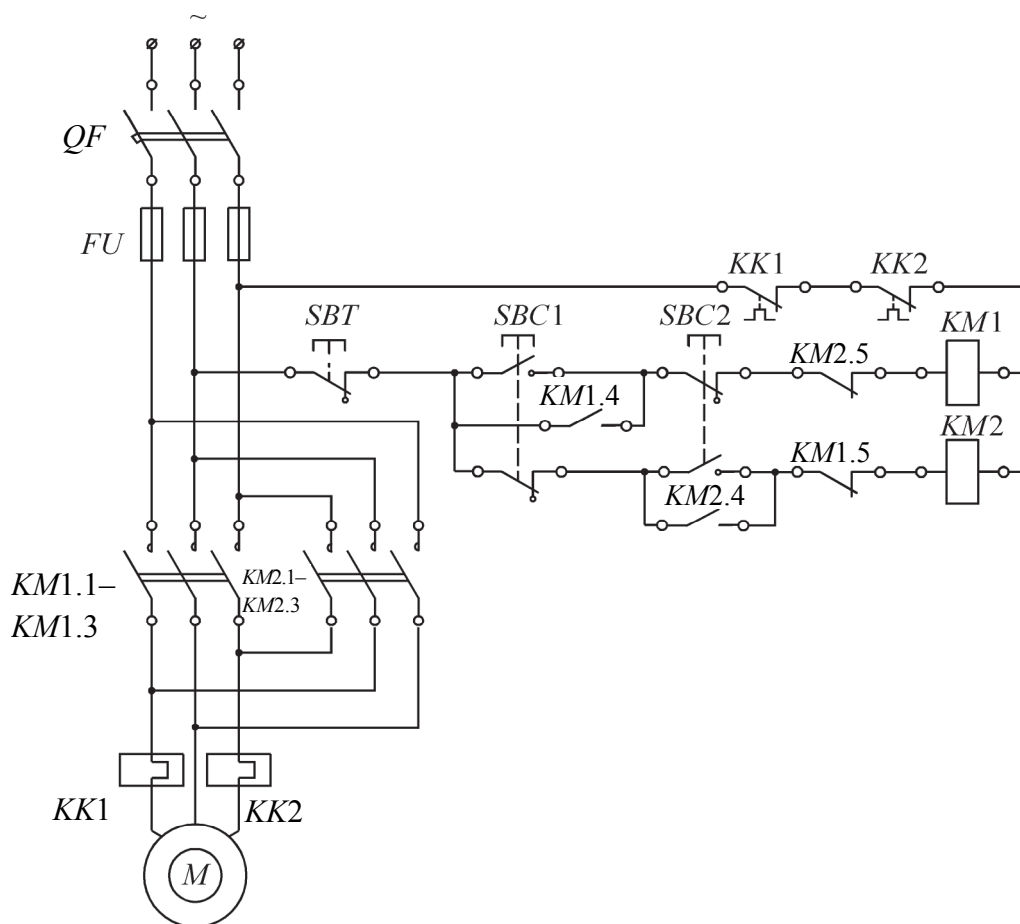


Рис. 8.3. Схема автоматического управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором с помощью магнитного пускателя

При включении выключателя двигатель не трогается с места, так как контакты $KM1$ и $KM2$ в главной цепи (цепи статора двигателя) разомкнуты и напряжение на обмотку статора не подается. При нажатии на кнопку $SBC1$ замыкается цепь, состоящая из последовательно включенных кнопок SBT , $SBC1$ и $SBC2$, замкнутого контактора $KM2$, катушки контактора $KM1$ и замкнутых контактов тепловых реле $KK1$ и $KK2$. Таким образом, замыкается цепь контактора $KM1$, а в цепи катушки контактора $KM2$ той же кнопкой $SBC1$ (на схеме пунктиром показана механическая связь) делается еще один разрыв.

По катушке контактора $KM1$ протекает ток, и якорь контактора $KM1$ притягивается к сердечнику (контактор срабатывает). При этом изменяют свое положение все контакты, обозначенные $KM1$: контакты $KM1$ в главной цепи замыкаются, в результате чего подается напряжение на обмотку статора и двигатель начинает вра-

щаться; замыкается блок-контакт *КМ1.4*, включенный параллельно кнопке *SBC1*, размыкается блок-контакт *КМ1.5* в цепи катушки контактора *КМ2*, производя новый разрыв в цепи катушки *КМ2* вместо ликвидированного разрыва при отпускании кнопки *SBC1*. Разрыв цепи катушки *КМ2* необходим для того, чтобы при ошибочном одновременном нажатии кнопок *SBC1* и *SBC2* не сработали сразу оба контактора, что привело бы к короткому замыканию цепи главными контактами *КМ1* и *КМ2*.

Для остановки двигателя необходимо нажать на кнопку *SBT* (Стоп), при этом размыкается цепь контактора *КМ1*, исчезает усилие, притягивающее якорь к сердечнику, все замыкающие контакты *КМ1* также размыкаются, а размыкающие – замыкаются. Обмотка статора двигателя отключается от сети, и двигатель останавливается.

При нажатии на кнопку *SBC2* двигатель будет вращаться в другую сторону, так как главные контакты *КМ2* обеспечивают изменение чередования фаз.

От коротких замыканий двигатель защищен предохранителями. При возникновении перегрузки нагревательные элементы тепловых реле *КК1* и *КК2Т*, включенные последовательно в главную цепь, нагреваются настолько, что одно из них (или оба сразу) срабатывает и размыкает контакты *КК1* и *КК2*, включенные последовательно с катушками контакторов. Обычно ставят два тепловых реле, так как при одном реле, когда перегорает предохранитель в одной фазе, в которую оно включено, двигатель продолжает работать в однофазном режиме с перегрузкой и остается незащищенным.

Цепь управления размыкается точно так же, как это осуществляется кнопкой *SBT*, и двигатель отключается.

2. Домашнее задание для подготовки к лабораторному занятию

- Изучить литературу по теме занятия: § 15.5 [1]; § 34.1–34.6 [2].
- Выполнить домашнее задание.

Домашнее задание

Вычертить схему управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором с помощью нереверсивного магнитного пускателя для вариантов 1, 3 и для вариантов 2, 4 – схему пуска двигателя с фазным ротором.

3. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой (рис. 8.4).

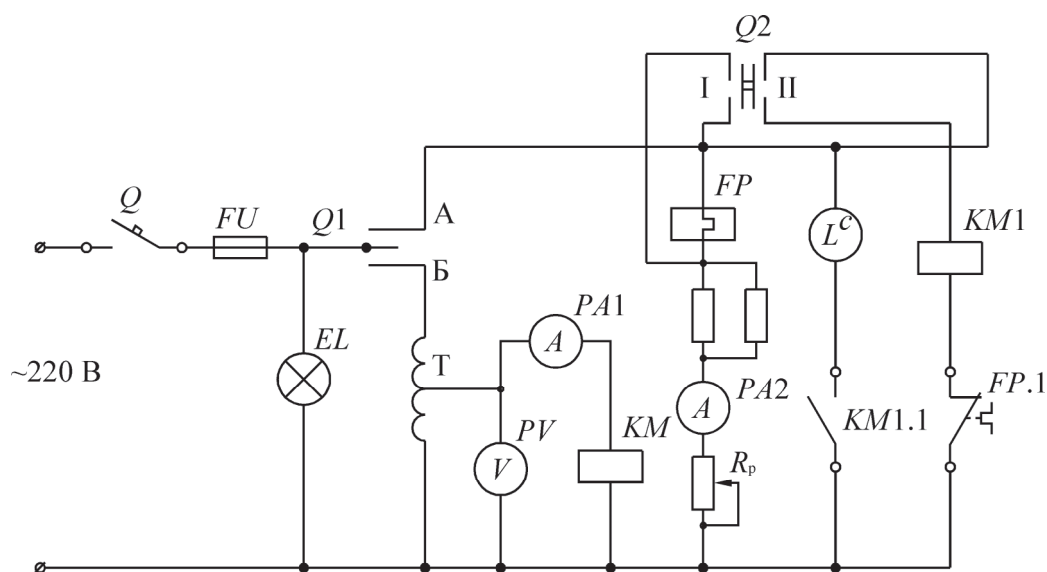


Рис. 8.4. Электрическая схема лабораторной установки

2. Подключить электрическую цепь к сети: установить переключатель $Q1$ в положение «Б», отключить $Q2$.

3. Изменяя напряжение автотрансформатором T , измерить напряжение срабатывания пускателя $U_{ср}$, ток срабатывания $I_{ср}$, рабочий ток при номинальном напряжении $I_{раб}$, напряжение отпущения $U_{отп}$, при котором происходит выключение пускателя. Каждый опыт повторить 3–4 раза. Результаты измерений записать в табл. 8.2.

Таблица 8.2

№ п/п	Измерено				Вычислено	
	$U_{ср}$, В	$U_{отп}$, В	$I_{ср}$, А	$I_{раб}$, А	K_v	K_I
1						
2						
3						
4						
Среднее значение						

4. Установить переключатель $Q1$ в положение «А» и снять зависимость времени срабатывания теплового реле от величины то-

ка нагрузки. Величина тока регулируется реостатом R_p , когда переключатель $Q2$ установлен в положение I . При этом нагревательный элемент FP окажется закороченным, и ток по нему проходить не будет. При переводе переключателя $Q2$ в положение II ток установленной величины будет проходить через нагревательный элемент теплового реле, а секундомер начнет отсчитывать время. При достижении нагревательным элементом предельной температуры контакты реле разомкнутся и секундомер остановится.

5. Сразу после отключения цепи установить Q в положение «выключено» и начать отсчет времени охлаждения нагревательного элемента, время от времени нажимая кнопку возврата теплового реле. Момент, когда кнопка окажется утопленной, следует считать окончанием времени охлаждения. Повторить аналогичные действия при токе нагрузки $I_{ном} = 1,5$ и $I_{ном} = 2,0$. Результаты измерений записать в табл. 8.3.

Таблица 8.3

Ток нагрузки, А	1,2	1,5	2,0
Время срабатывания $t_{ср}$, с			
Время охлаждения $t_{охл}$, с			

Показать снятые данные преподавателю.

Если замечаний нет, отключить стенд от сети тумблером $Q1$.

Рассчитать K_v , K_i по данным табл. 8.2, используя формулы: $K_v = U_{отп}/U_{ср}$; $K_i = I_{ср}/I_{раб}$, построить зависимости: $t_{ср} = f(I)$ и $t_{охл} = f(I)$ по результатам табл. 8.3.

4. Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Выполненное домашнее задание.
3. Электрическая схема экспериментальной установки.
4. Таблицы измерений и вычислений.
5. Графики зависимостей: $t_{ср} = f(I)$ и $t_{охл} = f(I)$.
6. Выводы по материалу работы.

5. Контрольные вопросы

1. Как устроен магнитный пускатель?
2. Назначение магнитного пускателя.

3. Какое значение имеет гашение электрической дуги и как это осуществляется в контакторах?
4. Назначение замыкающих блокировочных контактов.
5. Как устроено тепловое реле?
6. Как зависит время срабатывания теплового реле от степени перегрузки двигателя?
7. Почему ток срабатывания катушки пускателя выше тока отпускания?
8. Как осуществляется защита двигателя от перегрузки?
9. Как осуществляется защита двигателя от токов короткого замыкания?
10. Что такое нулевая защита?
11. Почему ставят два тепловых реле?
12. Как обозначаются все детали, принадлежащие одному аппарату на электрической схеме?
13. Что входит в состав магнитного пускателя?
14. Назначение нормально закрытых контактов в цепях катушек магнитных пускателей.
15. Как осуществляется реверс асинхронных двигателей?

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Общие положения

Электробезопасность – это система организационно-технических мероприятий и средств, защищающих человека от поражающего действия электрического тока.

В любом учебном заведении с широким применением электроприборов опасность электротравматизма всегда вероятна.

Знание основных правил пользования электроустановками является первоочередной обязанностью преподавателей, администрации и студентов.

Тело человека является хорошим проводником электрического тока, поэтому последний может оказать на него термическое, электролитическое и биологическое воздействие. Опасность воздействия электричества на человека зависит от величины, длительности и других параметров тока, а также от индивидуальных свойств и состояний организма.

При рассмотрении случаев поражения электрическим током можно выделить два характерных вида. Первый относится к электрическому удару, а второй – к местным электрическим травмам.

Второй вид включает в себя поражение током тканей и органов, включая ожоги, металлизацию кожи, механические повреждения, ослепление и др.

Величина тока, проходящего по человеку, зависит от напряжения сети и сопротивления его тела. Сопротивление тела есть величина, изменяющаяся от 8000 до 100 000 Ом, а во влажном состоянии оно менее 1000 Ом.

Считается безопасным для человека напряжение менее 36 В, а в помещениях особо опасных – 12 В.

Основными причинами поражения электрическим током являются:

- случайное прикосновение к токоведущим частям, находящимся под напряжением (оголенным проводам, контактам электроаппаратуры, шинам и т. д.);

- неожиданное возникновение напряжения там, где в нормальных условиях его быть не должно;
- появление напряжения на отключенных частях электрооборудования (по причине ошибочного включения, наведения напряжения соседними установками и т. д.);
- возникновение напряжения на поверхности земли в результате замыкания провода с землей, неисправности заземляющих устройств и т. д.

Для предупреждения поражений электрическим током следует строго выполнять правила устройств электроустановок (ПУЭ), правила технической эксплуатации (ПТЭ), правила по технике безопасности (ПТБ). К выполнению работ на электроустановках допускаются лица, прошедшие обучение и имеющие соответствующее удостоверение.

Требования к помещениям кабинетов, мастерских

Для безопасных и здоровых условий учебы и работы студентов необходимо иметь помещение нормальных размеров, отвечающее санитарно-гигиеническим нормам.

Площади помещений должны удовлетворять требованиям ВСН-50-86, номенклатуре типов зданий. Помещения должны быть светлыми, сухими и теплыми, с ровными, нескользкими полами без выбоин и щелей; поверхности стен, потолков и дверей – гладкими и матовыми; радиаторы и трубопроводы отопительной и водопроводной систем оборудованы диэлектрическим (деревянным) ограждением.

Площадь кабинетов (лабораторий) должна быть в пределах 54–72 м², высота помещений – 3,3 м. Площади учебно-производственных мастерских зависят от их назначения и оборудования.

Площадь, приходящаяся на одного обучаемого, должна быть не менее 4 м², объем – не менее 15 м³.

Температура в кабинетах и лабораториях должна быть не ниже 16–18°C.

Во всех лабораториях должны быть аптечки с комплектом медикаментов для оказания первой медицинской помощи.

Наименьшая освещенность в лабораториях должна быть при люминесцентных лампах – 300 лк, при лампах накаливания – 150 лк.

Электрическая сеть

К кабинетам и мастерским обычно подходит четырехпроводная сеть напряжением 380/220 В с глухозаземленной нейтралью, и подключается она к распределительному щитку (РЩ). Корпус щита должен быть обязательно заземлен. На щите смонтированы предохранители, служащие для защиты сети от перегрузок и коротких замыканий. Включение и отключение щита производится рубильником или главным автоматом.

Далее следуют групповые коммутирующие устройства. Ими могут быть отходящие рубильники с предохранителями, просто предохранители или автоматы.

Электропроводка к рабочим столам или электрооборудованию должна быть выполнена таким образом, чтобы полностью исключалась возможность нарушения изоляции, обрыва проводов, коротких замыканий и т. д. Для защиты от механических повреждений проводка должна быть надежно защищена. С этой целью ее делают скрытой или закрывают уголками, швеллером, металлорукавом и т. д. Обычно прокладку силовой электропроводки делают отдельно от осветительной.

При выборе марки проводов учитывают характер помещения, способ прокладки, параметры электрического тока. Поперечное сечение токопроводящих должно соответствовать токовой нагрузке.

Присоединение проводов и кабелей к электрооборудованию может быть постоянным и временным. В первом случае подводящие провода присоединяются к клеммам прибора или местного коммутационного устройства (например, стенда), во втором – используются штепсельные розетки. Здесь подключение самих электроприборов осуществляется гибкими проводами.

Правила по технике безопасности при проведении лабораторных работ, демонстрационных опытов

Проводя лабораторные работы, преподаватель обязан обучить студентов правильному и безопасному обращению с оборудованием лаборатории, постоянно следить за выполнением ими мер электробезопасности. Началу каждой самостоятельной лабораторной

работы должен предшествовать инструктаж по технике безопасности и оформление его в специальном журнале.

Студент должен знать, как подготовиться к лабораторной работе, как ее провести и чем завершить.

Обычно подготовка к работе сводится к ознакомлению с оборудованием, приборами, схемами, характером работы. Здесь должен быть проведен беглый опрос студентов с целью выяснения у них качества подготовки.

Далее следует лабораторное занятие. Студенты собирают схему, комплектуют контрольно-измерительные приборы, производят своеобразное моделирование будущей установки. Напомним, что все эти операции они производят без подключения к электрической сети.

После проверки преподавателем установки или схемы дается команда на включение сети. Если при этом обнаруживаются какие-то неполадки (зашкаливание приборов, потрескивание контактов и т. п.), установку следует немедленно отключить от сети, найти причины неполадки и устранить их.

Во время лабораторных исследований не следует касаться монтажных проводов, клемм, измерительных приборов.

По окончании эксперимента или демонстрационного опыта лабораторную установку вначале отключают от сети, а затем лишь разбирают.

Завершается лабораторная работа составлением отчета, уборкой приборов и всего рабочего места.

Если в процессе занятий произошло поражение студента электрическим током, то необходимо немедленно отключить напряжение. Пункт включения и отключения сети должен быть известен всем студентам.

Первая помощь при поражении электрическим током

Если пострадавший не в состоянии сам освободиться от действия электрического тока, ему необходима немедленная помощь. Освобождая пострадавшего, необходимо принять меры безопасности, чтобы самому не попасть под напряжение. Если это возможно, надо отключить электроустановку ближайшим выключателем. При отсутствии такой возможности – разорвать или пере-

резать провода, пользуясь при этом инструментами с изолированными ручками.

При невозможности отключения электроустановки необходимо освободить пострадавшего от токоведущих частей. Это можно сделать, оттащив пострадавшего за его одежду, при этом нельзя касаться тела пострадавшего. Можно воспользоваться также и другими изолирующими предметами.

После освобождения пострадавшего от действия тока необходимо немедленно оказать ему доврачебную помощь в соответствии с его состоянием. Если пострадавший не потерял сознание, его нужно отвести в удобное для отдыха помещение, успокоить, дать выпить воды, предложить полежать. Если при этом у пострадавшего обнаружены травмы, – оказать на месте соответствующую помощь и вызвать врача. При необходимости надо направить пострадавшего в медицинский пункт.

Если пострадавший находится в бессознательном состоянии, но дышит нормально и у него прослушивается пульс, надо немедленно вызвать врача, до его прибытия оказать помощь на месте – привести пострадавшего в сознание: давать нюхать нашатырный спирт, слегка смочить лицо водой, обеспечить доступ свежего воздуха.

Если пострадавший находится в тяжелом состоянии, т. е. не дышит или дышит тяжело, прерывисто, необходимо, не теряя времени, приступить к искусственному дыханию. Одновременно нужно вызвать врача.

Подготовка к искусственному дыханию. Освободить пострадавшего от стесняющей одежды – расстегнуть ворот, развязать шарф, освободить пояс и т. д. Положить пострадавшего на спину, под лопатки – валик из свернутой одежды. Положить одну руку под шею пострадавшему и, нажав другой рукой на лоб, максимально запрокинуть голову назад, при этом рот раскроется, язык освободит гортань. Освободить рот пострадавшего от посторонних предметов, вынуть зубные протезы.

Выполнение искусственного дыхания способом «изо рта в рот». Оказывающий помощь подкладывает одну руку под шею пострадавшего, другой рукой нажимает на лоб, запрокидывая голову максимально назад, и одновременно зажимает нос пострадавшего. Сделав два-три глубоких вдоха и выдоха, затем глубокий вдох, прикладывают рот ко рту пострадавшего и производят вдыхание воздуха в легкие пострадавшего. Таким образом, следует

сделать 10–12 вдуваний в минуту: через каждые 5–6 с – одно вдувание. После каждого вдувания обязательно освобождать рот и нос пострадавшего для выпуска воздуха из его легких.

При вдувании видно, как расширяется грудная клетка пострадавшего, при выпуске грудная клетка сокращается. При появлении первых слабых вдохов следует приурочить начало искусственного вдоха к моменту начала самостоятельного вдоха пострадавшего. Искусственное дыхание проводится до восстановления собственного глубокого и ритмичного дыхания.

В случае остановки или фибрилляции сердца у пострадавшего для поддержания кровообращения одновременно с искусственным дыханием необходимо проводить наружный (непрямой) массаж сердца. Для этого оказывающий помощь должен расположиться на коленях сбоку пострадавшего. Определив путем прощупывания место надавливания – нижнюю треть грудины, оказывающий помощь должен положить на него руку ладонью вниз. Ладонь другой руки накладывается на первую под прямым углом. Надавливать следует, помогая себе наклоном всего корпуса, локтевые суставы должны быть разогнуты до отказа, руки прямые. Пальцы обеих рук должны быть сведены вместе и не должны касаться грудной клетки пострадавшего. Повторять надавливание следует не реже 1 раза в секунду. Нельзя надавливать на верхнюю часть грудины, на окончания нижних ребер, так как это может привести к перелому. Нельзя также надавливать ниже грудной клетки на мягкие ткани, чтобы не повредить расположенные здесь органы, в первую очередь печень, и не вызвать рвоту.

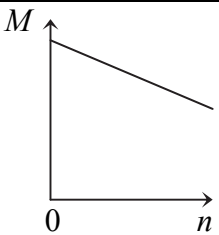
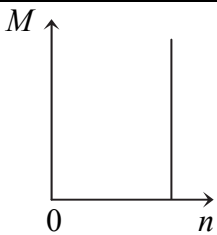
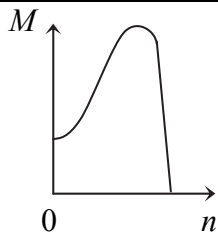
Если первую помощь оказывает один человек, он должен после двух глубоких вдуваний в рот или нос пострадавшего произвести 15 надавливаний на грудную клетку, затем снова два вдувания и опять 15 надавливаний. При чередовании искусственного дыхания и массажа сердца пауза должна быть минимальной. Обе манипуляции проводятся с одной стороны.

Если первую помощь оказывают двое, один из них должен проводить массаж сердца, другой – искусственное дыхание, при этом производится одно вдувание, затем пять нажатий на грудную клетку.

Искусственное дыхание нужно проводить до восстановления устойчивого дыхания и деятельности сердца или до первой передачи пострадавшего медицинскому персоналу.

СРАВНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Основные характеристики электрических машин постоянного и переменного тока

Характеристики	Машины постоянного тока	Машины переменного тока	
		Синхронные	Асинхронные
Вид машинного поля	Неподвижное	Вращающееся	
Механические характеристики			
Достоинства	Широкий диапазон регулирования, плавное регулирование частоты вращения, большой пусковой момент	Возможность компенсации реактивной мощности, постоянство скорости	Простота конструкции, высокая надежность, низкая стоимость
Недостатки	Наличие щеточно-коллекторного устройства, необходимость источника постоянного тока	Наличие дополнительного источника постоянного тока, сложность пуска	Зависимость частоты вращения от нагрузки

ЛИТЕРАТУРА

1. Горошко, В. И. Электротехника, основы электроники и электрооборудование химических производств: учеб. пособие для студентов химико-технологических специальностей / В. И. Горошко, И. О. Оробей, Л. М. Давидович. – Минск: БГТУ, 2006. – 246 с.

2. Коровкина, Н. П. Электротехника и основы электроники: тексты лекций для студентов специальности 1-36 07 01 [Электронный ресурс]. – Минск: БГТУ, 2016. – 307 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	3
Лабораторная работа № 1. Исследование однофазного трансформатора	4
Лабораторная работа № 2. Исследование двигателя с фазным ротором.....	15
Лабораторная работа № 3. Способы регулирования частоты вращения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором	27
Лабораторная работа № 4. Компенсация реактивной мощности асинхронного двигателя	39
Лабораторная работа № 5. Исследование синхронного двигателя	46
Лабораторная работа № 6. Исследование двигателя постоянного тока	59
Лабораторная работа № 7. Исследование генератора постоянного тока со смешанным возбуждением.....	68
Лабораторная работа № 8. Аппаратура управления и защиты	73
Приложение 1	82
Приложение 2	88
Литература	89

Учебное издание

Коровкина Наталья Павловна
Олиферович Надежда Михайловна
Анкуда Максим Анатольевич

**ТРАНСФОРМАТОРЫ.
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ,
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

Учебно-методическое пособие

Редактор *Ю. Д. Нежикова*
Компьютерная верстка *О. А. Солодкевич*
Дизайн обложки *П. П. Падалец*
Корректор *Ю. Д. Нежикова*

Подписано в печать 29.05.2019. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать ризографическая.
Усл. печ. л. 5,3. Уч.-изд. л. 5,4.
Тираж 500 экз. Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение:
УО «Белорусский государственный технологический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/227 от 20.03.2014.
Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.