

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

ТРАНСФОРМАТОРЫ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ЭЛЕКТРОПРИВОД

**Учебно-методическое пособие по курсу
«Электротехника» для студентов заочной
формы обучения всех специальностей**

Минск 2006

ТРАНСФОРМАТОРЫ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ЭЛЕКТРОПРИВОД

**Учебно-методическое пособие по курсу
«Электротехника» для студентов заочной
формы обучения всех специальностей**

Минск БГТУ 2006

УДК 621.3(075.8)

ББК 31.2 я7

Т 65

Рассмотрено и рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом университета

Составители:

В. И. Горошко, В. К. Мороз

Рецензенты:

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электроника» БНТУ *Ю. В. Бладыко*;

кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные системы и технологии» БГТУ *Н. Н. Пустовалова*

Трансформаторы, электрические машины и электропри-
Т 65 вод : учеб.-метод. пособие по курсу «Электротехника» для студентов заочной формы обучения всех специальностей /сост. В. И. Горошко, В. К. Мороз. – Мн. : БГТУ, 2006. – 60 с.

ISBN 985-434-634-X

Пособие содержит программу раздела, методические указания и контрольные задания. Будет полезным студентам всех специальностей заочной формы обучения.

УДК 621.3(075.8)

ББК 31.2 я7

ISBN 985-434-634-X

© УО «Белорусский государственный технологический университет», 2006

ПРЕДИСЛОВИЕ

В данном учебно-методическом пособии приводится материал по курсу «Электротехника» для студентов всех специальностей. Пособие предназначено обеспечить такую подготовку инженеров, которая позволит им квалифицированно применять современные средства автоматизации технологических процессов с использованием электротехнических устройств.

Цель дисциплин курса – теоретическая и практическая подготовка инженеров неэлектротехнических специальностей в области электротехники в такой степени, чтобы они могли выбирать необходимые средства, уметь правильно их эксплуатировать, составлять технические задания по разработке установок для управления производственными процессами.

В результате изучения курса студент должен:

1) знать принципы действия, конструктивные особенности, эксплуатационные характеристики электрических машин и их применение в отраслевом электрооборудовании;

2) уметь рассчитывать основные характеристики трансформаторов, двигателей по паспортным данным;

3) уметь рассчитывать необходимую мощность и выбирать тип двигателя для привода станков и механизмов в зависимости от режима и условий работы;

4) знать аппаратуру управления, блокировки и сигнализации, уметь читать и чертить схемы;

5) понимать электротехнические законы, методы анализа электротехнических цепей и установок;

6) освоить электротехническую терминологию и символику;

7) экспериментальным путем определять параметры и характеристики электротехнических машин и устройств;

8) включать приборы, машины и аппараты, управлять ими и контролировать их эффективную работу.

ПРОГРАММА РАЗДЕЛА «ТРАНСФОРМАТОРЫ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ЭЛЕКТРОПРИВОД»

Раздел 1. Трансформаторы

Назначение и применение трансформаторов. Устройство однофазных трансформаторов. Параметры трансформаторов. Номинальное напряжение, ток, мощность, коэффициент трансформации. Принцип действия трансформатора, уравнение электрического состояния, векторная диаграмма, режим холостого хода (х. х.), короткое замыкание (к. з.). Опыты х. х. и к. з. и параметры, определяемые по результатам этих опытов.

Работа трансформатора под нагрузкой. Расчет трансформатора с использованием схемы замещения магнитной цепи электрической.

Внешняя характеристика трансформатора. Потеря энергии в трансформаторе и коэффициент полезного действия. Трехфазные трансформаторы. Назначение. Устройство. Способы включения первичных и вторичных обмоток трехфазных трансформаторов. Группа соединений. Коэффициент трансформации при различных схемах включения обмоток.

Измерительные трансформаторы тока и напряжения. Назначения. Режимы работы. Автотрансформаторы. Принцип действия. Применение.

Раздел 2. Асинхронные машины

Устройство и принцип действия трехфазного асинхронного двигателя. Вращающееся магнитное поле. Скольжение. Управление ЭДС и токами в обмотках двигателя. Электромагнитный момент. Механическая характеристика. Энергетическая диаграмма. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым и фазным ротором. Пуск двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором. Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя. Торможение асинхронных двигателей. Однофазные и двухфазные асинхронные двигатели. Асинхронные тахогенераторы.

Раздел 3. Машины постоянного тока (МПТ)

Устройство и принцип действия генератора и двигателя постоянного тока. Режим работы и основные уравнения двигателя и генератора. Способы получения (возбуждения) магнитного поля в

МПТ. Мощность, вращающий момент, частота вращения двигателя. Пуск двигателей. Механическая характеристика. Способы регулирования частоты вращения МПТ. Характеристики двигателей при различных способах возбуждения.

Раздел 4. Синхронные машины

Устройство трехфазной синхронной машины. Роторы синхронных машин. Синхронные генераторы и двигатели. Уравнение электрического состояния, векторные диаграммы, схемы замещения статорной обмотки. Формула электромагнитного момента и угловая характеристика. Работа синхронного двигателя под нагрузкой. Пуск двигателей. Механические и рабочие характеристики двигателя. Саморегулирование вращающего момента. Устойчивость работы. Регулирование коэффициента мощности. Работа синхронной машины в режиме синхронного компенсатора. V-образные характеристики. Синхронные двигатели малой мощности: реактивные, с постоянными магнитами и шаговые.

Раздел 5. Выбор электродвигателей. Аппаратура управления и защиты

Определения понятия электропривода. Значение электропривода в автоматизации производственных процессов. Понятие об установившихся и переходных процессах электропривода. Типовые режимы работы электропривода. Технико-экономическое значение правильного выбора мощности электродвигателя. Нагревание и охлаждение. Классы изоляции. Понятие о нагрузочных диаграммах и принципы их построения. Продолжительность включения. Приближенные методы выбора мощности при продолжительном и повторно-кратковременном режимах работы электродвигателя. Особенность выбора мощности электродвигателя при нагревании и перегрузочной способности при его работе с постоянной и переменной нагрузками. Выбор электродвигателя по каталогу.

Понятие об управлении электроприводами. Аппаратура управления и защиты электротехнических приборов. Контактторы, концевые выключатели, реле. Условные графические обозначения аппаратуры на схемах. Типовые схемы управления.

Понятие о схемах электроснабжения, выбор сечения провода и тепловой защиты электроустановки.

1. ТРАНСФОРМАТОРЫ

1.1. Назначение, устройство и принцип работы 1-фазного трансформатора

Экономичная передача электроэнергии на большие расстояния и распределение ее между потребителями осуществляется с помощью повышающих и понижающих трансформаторов.

Трансформатор – статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования электрической энергии переменного тока с параметрами U_1, I_1 в энергию переменного тока с параметрами U_2, I_2 .

Условные обозначения приведены на рис. 1.1 (*a* – 1-фазного трансформатора; *б* – автотрансформатора; *в* – трансформатора на схемах электроснабжения).

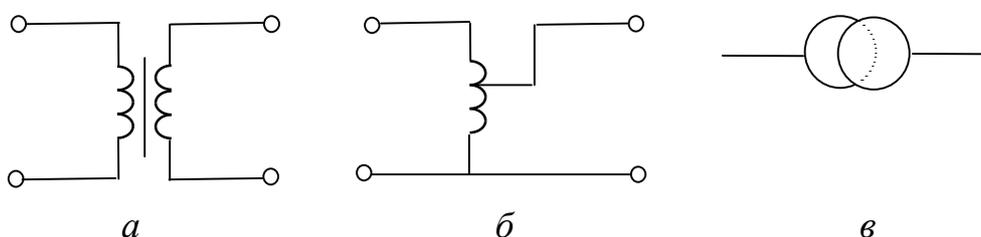


Рис. 1.1

Трансформатор (рис. 1.2) состоит из магнитопровода, набранного из листов электротехнической стали толщиной 0,35...0,5 мм, на котором расположены две обмотки с числом витков W_1, W_2 , выполненные из медного или алюминиевого провода. Обмотку, подключенную к источнику питания, называют первичной, а обмотку, к которой подключаются приемники, – вторичной. Все величины, относящиеся к первичной и вторичной обмоткам, обозначают индексами 1 и 2 соответственно.

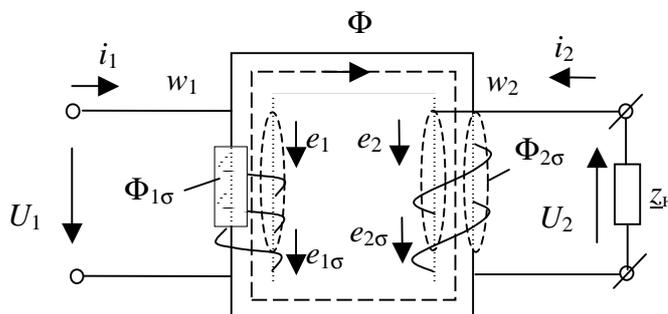


Рис. 1.2

В основе принципа работы трансформатора лежат закон электромагнитной индукции, явления самоиндукции и взаимоиндукции.

При подаче на первичную обмотку трансформатора синусоидального напряжения $U_{1\text{ном}}$ в обмотке W_1 возникает ток I_1 и создается магнито-движущая сила (МДС) – I_1W_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 соответственно ЭДС E_1 и E_2 . Если вторичная обмотка замкнута на нагрузку, то по ней протекает ток I_2 , создается МДС I_2W_2 . МДС I_1W_1 и I_2W_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 f .

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

$$e_1 = -W_1 d\Phi/dt; \quad (1.1)$$

$$e_2 = -W_2 d\Phi/dt, \quad (1.2)$$

их действующие значения (при синусоидальном изменении) соответственно равны

$$E_1 = 4,44W_1f\Phi_1; \quad (1.3)$$

$$E_2 = 4,44W_2f\Phi_1. \quad (1.4)$$

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

$$n = E_1 / E_2 = W_1 / W_2. \quad (1.5)$$

Величина n называется коэффициентом трансформации трансформатора.

1.2. Режим и опыт холостого хода трансформатора

Режим холостого хода (х. х.) трансформатора (рис. 1.3) имеет место, когда разомкнута вторичная обмотка трансформатора ($I_2 = 0$), а первичная обмотка находится под номинальным напряжением ($U_{10} = U_{1\text{ном}}$). Тогда, согласно рис. 1.2, уравнения электрического состояния первичной и вторичной цепей трансформатора при х. х. будут

$$U_1 = -E_1 + R_1 I_{10} + jX_1 I_{10}; \quad (1.6)$$

$$U_2 = E_2. \quad (1.7)$$

Для определения величины тока х. х. трансформатора I_{10} и других паспортных данных проводят опыт х. х. (рис. 1.3).

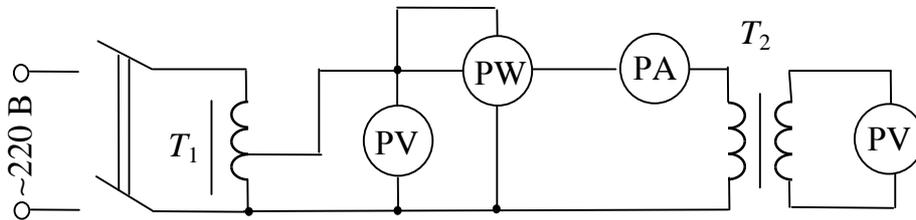


Рис. 1.3

Амперметр показывает ток х. х.:

$$I_{10} = (3-10)\% I_{1\text{ном}}, \quad (1.8)$$

где $I_{1\text{ном}}$ – ток первичной обмотки трансформатора при номинальной нагрузке.

Тогда относительный ток х. х. трансформатора

$$I_{10}\% = (I_{10} / I_{1\text{нн}}) 100. \quad (1.9)$$

Так как мощность во вторичную обмотку трансформатора не передается (нагрузка отсутствует), то мощность, регистрируемая ваттметром, – мощность потерь в стали на перемагничивание, пропорциональна U_1^2 .

С учетом того, что $U_{1\text{ном}} = E_1$ и $U_{20} = E_2$, из режима х. х. определяют коэффициент трансформации n :

$$n = E_1 / E_2 = W_1 / W_2 = U_{1\text{нн}} / U_{20}, \quad (1.10)$$

где U_{20} – напряжение вторичной обмотки трансформатора в режиме х. х.

По показаниям ваттметра, амперметра и вольтметра определяют коэффициент мощности х. х.:

$$\cos \varphi_{10} = \Delta P_{\text{сб}} / U_{1\text{нн}} I_{10}. \quad (1.11)$$

Угол φ_{10} близок к 90° , поэтому ток х. х. I_{10} практически реактивный, т. е. идущий на образование магнитного потока.

Угол магнитных потерь

$$\delta = 90^\circ - \varphi_{10} \quad (1.12)$$

составляет несколько градусов.

Из формул (1.6), (1.8) следует

$$\Phi_1 = U_{\text{нн}} / (4,44 f W_1). \quad (1.13)$$

При неизменном напряжении $U_{\text{нн}}$ магнитный поток Φ остается также неизменным. Это одно из свойств электрических машин – работать при неизменном магнитном потоке.

Из опыта х. х. определяют параметры цепи намагничивания схемы замещения трансформатора (Ом):

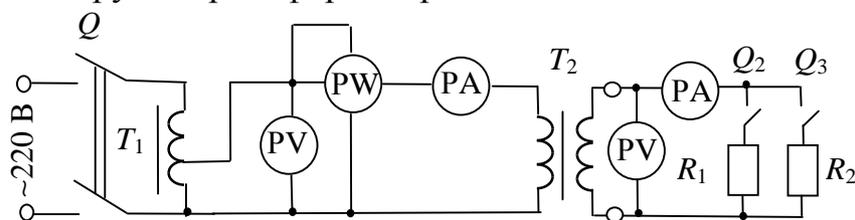
$$Z_0 = U_{\text{нн}} / I_{10}; \quad (1.14)$$

$$R_0 = \Delta P_{\text{ст}} / I_{10}^2; \quad (1.15)$$

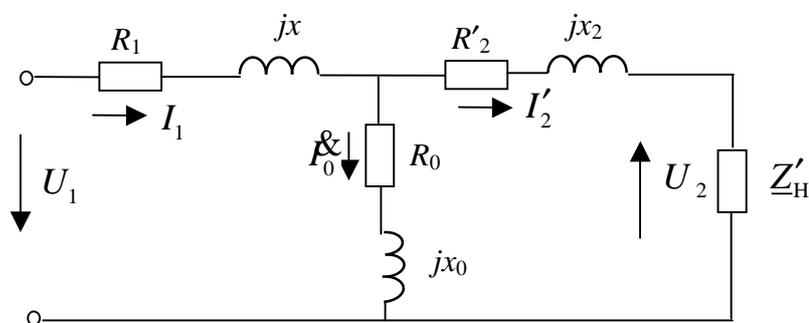
$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}. \quad (1.16)$$

1.3. Нагрузочный режим трансформатора

В нагрузочном режиме к вторичной обмотке трансформатора подключены приемники электрической энергии (рис. 1.4). Ток I_2 зависит от нагрузки трансформатора.



а



б

Рис. 1.4

Для анализа работы трансформатора с нагрузкой пользуются уравнениями электрического состояния первичной и вторичной цепей:

$$U_1 = -E_1 + I_1 R_1 + jX_1 I_1; \quad (1.17)$$

$$U_2 = E_2 - I_2 R_2 - jX_2 I_2. \quad (1.18)$$

Так как в нагрузочном режиме на первичной обмотке трансформатора напряжение номинальное, то, очевидно, что в нагрузочном режиме и в режиме х. х. сумма МДС обмоток одинакова:

$$I_{10} W_1 = I_1 W_1 + I_2 W_2. \quad (1.19)$$

Разделив правую и левую части уравнения на W_1 , получим уравнение токов:

$$I_1 = I_{10} + I_2 / n. \quad (1.20)$$

Из уравнения следует, что ток в первичной обмотке трансформатора имеет две составляющие – ток х. х. I_{10} и ток I_2 , обусловленный нагрузкой.

Для анализа и расчета трансформатора используется эквивалентная схема, в которой магнитная связь между первичной и вторичной обмотками заменяется электрической (см. рис. 1.4).

Приведенные значения параметров вторичной цепи определяются из закона сохранения энергии. В приведенном трансформаторе

$$\begin{aligned} E_1 &= E'_2; E'_2 = E_2 n; U'_2 = U_2 n; \\ I'_2 &= I_2 / n; R'_2 = R_2 n^2; X'_2 = X_2 n^2. \end{aligned} \quad (1.21)$$

Значения R_1 , R'_2 , X_1 , X'_2 определяют из опыта короткого замыкания трансформатора.

1.4. Опыт короткого замыкания

Схема опыта короткого замыкания (к. з.) приведена на рис. 1.5.

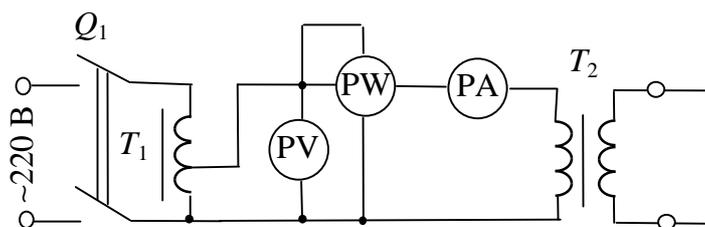


Рис. 1.5

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

замыкания U_{1k} . Мощность, измеряемая ваттметром – это мощность потерь в обмотках при номинальной нагрузке:

$$\Delta P_k = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 = I_{1\hat{i}\hat{i}}^2 R_1 + I_{2\hat{i}\hat{i}}^2 R_2, \text{ а т. к. } I_{2\hat{i}\hat{i}} = I_{1\hat{i}\hat{i}} \text{ и } R_2 = R_2 n^2, \\ \text{то } \Delta P_k = I_{1\hat{i}\hat{i}}^2 (R_1 + R_2') = I_{1\hat{i}\hat{i}}^2 R_k,$$

откуда

$$R_k = \Delta P_k / I_{1\hat{i}\hat{i}}^2. \quad (1.22)$$

По показаниям амперметра и вольтметра

$$Z_k = U_{1k} / I_{1k} = U_{1k} / I_{1\text{ном}}. \quad (1.23)$$

Тогда

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}. \quad (1.24)$$

Согласно (1.21)

$$R_1 = R_2' = P_k / 2; \quad (1.25)$$

$$X_1 = X_2' = X_k / 2. \quad (1.26)$$

Коэффициент мощности в опыте к. з.

$$\cos \varphi_k = \Delta P_k / (U_{1k} I_{1\text{ном}}). \quad (1.27)$$

1.5. Изменение вторичного напряжения и внешняя характеристика трансформатора

При работе трансформатора с нагрузкой согласно (1.18) напряжение U_2 меняется с изменением нагрузки тока I_2 . Имеет место потеря напряжения, которая определяется арифметической разностью между первичным и приведенным вторичным напряжением:

$$\Delta U_2' = U_1 - U_2'. \quad (1.28)$$

Потеря напряжения определяется по формуле

$$\Delta U_2 = k_H (U_{ka} \cos \varphi_2 + U_{kp} \sin \varphi_2) = k_H U_k \cos (\varphi_2 - \varphi_k); \quad (1.29)$$

$$k_H = I_1 / I_{1\text{ном}} = I_2 / I_{2\text{ном}}, \quad (1.30)$$

где k_H – коэффициент нагрузки; φ_2 – угол сдвига фаз между напряжением и током нагрузки; φ_k – угол сдвига фаз между напряжением и током в опыте к. з.

$$U_{ka} = U_k \cos \varphi_k, \quad U_{kp} = U_k \sin \varphi_k.$$

Как видно из (1.29), потеря напряжения в трансформаторе зависит от значения коэффициента нагрузки (k_H), характера нагрузки (φ_2) и напряжения к. з. U_k .

Внешняя характеристика трансформатора $U_2 = f(I_2)$ приведена на рис. 1.6.

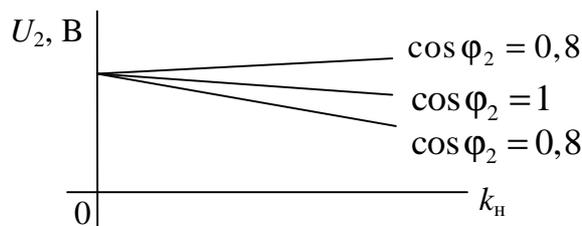


Рис. 1.6

1.6. Потери мощности и КПД трансформатора

Как было показано в 1.2, 1.4, потери в трансформаторе различают электрические ΔP_k – потери в обмотках трансформатора, вызванные нагреванием проводников обмоток, и потери в стали $\Delta P_{ст}$, вызванные гистерезисом и вихревыми токами в магнитопроводе трансформатора.

Потери мощности в стали определяются величиной и частотой изменения магнитного потока и от нагрузки не зависят, поэтому их называют постоянными. Потери в обмотках зависят от нагрузки – переменные.

КПД трансформатора определяют

$$\eta = P_2 / P_1, \quad (1.31)$$

где P_2 – полезная мощность; P_1 – потребляемая.

Отсюда

$$\begin{aligned} \eta &= P_2 / (P_2 + \Delta P_{\text{н0}} + \Delta P_{\text{вк}}) = \\ &= k_1 S_{\text{н}} \cos \varphi_2 / (k_1 S_{\text{н}} \cos \varphi_2 + \Delta P_{\text{н0}} + k_1^2 \Delta P_k). \end{aligned} \quad (1.32)$$

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

$$k_{1.\text{max}} = \sqrt{\Delta P_{\text{н0}} / \Delta P_k}, \quad (1.34)$$

Зависимость $\eta = f(k_n)$ приведена на рис. 1.7.

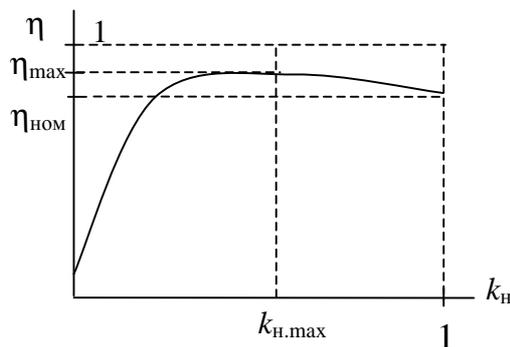


Рис. 1.7

1.7. 3-фазный трансформатор

На рис. 1.8 показано условное обозначение 3-фазных трансформаторов на электрической схеме.

Основными схемами и группами соединения данных трансформаторов являются: $Y/Y-12$ (звезда – звезда, группа – 12) или $Y/\Delta-11$ (звезда – треугольник, группа – 11).

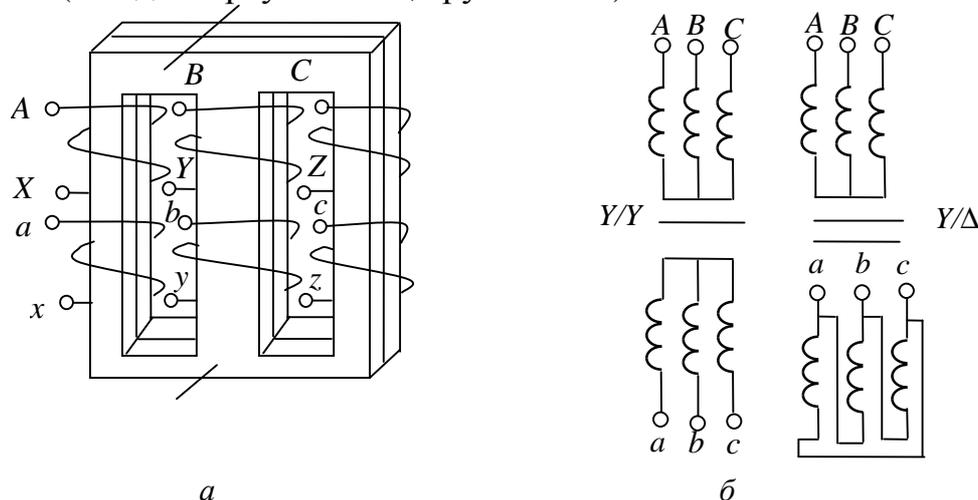


Рис. 1.8

Коэффициент трансформации 3-фазного трансформатора n для соединения обмоток Y/Y и Δ/Δ равен отношению одноименных фазных напряжений первичной и вторичной обмоток

$$n = U_{1\hat{0}} / U_{2\hat{0}} = U_{AB} / U_{ab} = W_1 / W_2 = U_{\text{л\hat{i}i}} / U_{20},$$

при соединении Y/Δ $n = U_A / U_{ab} = U_{1\hat{0}} / U_{2\hat{0}} = U_{\text{л\hat{i}i}} / \sqrt{3}U_{20} = W_1 / \sqrt{3}W_2$.

Конструктивно трансформаторы делятся на масляные и сухие. Трансформаторы масляные 3-фазные (ТМ) выпускаются мощностью от 10 до 630 000 кВА, сухие 3-фазные (ТЗС) – мощностью от 10 до 1600 кВА.

В каталогах и паспорте трансформатора сообщаются технические данные, необходимые для его нормальной эксплуатации:

$S_{\text{ном}} = \sqrt{3} U_{1\text{ном}} I_{1\text{ном}}$, ВА – номинальная мощность трансформатора (мощность 3-х фаз);

$U_{1\text{ном}}$ – номинальное линейное напряжение первичной обмотки, кВ;

$U_{2\text{ном}}$ – номинальное линейное напряжение вторичной обмотки, кВ;

$\Delta P_{\text{ст}}$, $\Delta P_{\text{эл}}$ – мощность потерь трех фаз х. х. и к. з., Вт;

$\eta_{\text{ном}}$ – номинальный КПД, который задается при активной нагрузке ($\cos \varphi_2 = 1$) и при коэффициенте нагрузки $k_H = 1$ или 0,5;

U_k – напряжение короткого замыкания, % номинального;

i_0 – кратность тока х. х., %.

Под номинальными напряжениями понимаются линейные первичное и вторичное напряжения на зажимах трансформатора в режиме холостого хода.

Контрольное задание 1

Для 3-фазного трансформатора, параметры которого приведены в таблице, определить ток х. х., коэффициент мощности х. х., сопротивления первичной и вторичной обмоток, сопротивления цепи намагничивания, угол магнитных потерь.

Таблица

№ в-та	$S_{\text{ном}}$, кВА	$U_{1\text{ном}}$, кВ	$U_{2\text{ном}}$, кВ	U_k , %	$\Delta P_{\text{ст}}$, кВт	$\Delta P_{\text{эл}}$, кВт	i_0 , %	Схема соединения
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	25	6	0,69	4,5	0,135	0,6	3,2	Y/Δ – 11
1	40	6	0,69	4,5	0,19	0,88	3	Y/Δ – 11
2	63	6	0,69	4,5	0,265	1,28	2,8	Y/Δ – 11
3	100	6	0,69	4,5	0,365	1,97	2,6	Y/Δ – 11
4	160	6	0,69	4,5	0,565	2,65	2,4	Y/Δ – 11
5	250	6	0,69	4,5	0,82	3,7	2,3	Y/Δ – 11
6	400	6	0,69	4,5	1,05	5,5	2,1	Y/Δ – 11
7	630	6	0,69	5,5	1,56	7,6	2	Y/Δ – 11
8	1000	10	0,4	5,5	2,145	12,2	1,4	Y/Y ₀ – 12
9	1600	10	0,4	5,5	3,3	18	1,3	Y/Y ₀ – 12
10	5	10	0,4	4,7	0,69	0,125	3,0	Y/Δ – 11
11	10	6	0,4	4,7	1,0	0,18	3,0	Y/Δ – 11
12	63	6	0,23	4,5	1,28	0,26	2,8	Y/Δ – 11
13	160	10	0,4	5,5	0,7	2,7	4	Y/Y – 12
14	250	10	0,4	5,5	1,0	3,8	3,5	Y/Y – 12
15	400	10	0,4	5,5	1,3	5,4	3	Y/Y ₀ – 12
16	630	10	0,4	5,5	2,0	1,3	1,5	Y/Δ – 11
17	1000	10	0,4	5,5	3,0	11,2	1,5	Y/Δ – 11
18	1600	10	0,4	5,5	4,2	16,0	1,5	Y/Y ₀ – 12
19	100	35	10	6,5	0,465	1,97	2,6	Y/Y ₀ – 12
20	160	35	10	6,5	0,700	2,65	2,4	Y/Δ – 11
21	250	35	10	6,5	1,000	3,7	2,3	Y/Δ – 11
22	400	35	10	6,5	1,35	5,5	2,1	Y/Δ – 11
23	630	35	10	6,5	1,9	7,6	2,0	Y/Δ – 11

24	1000	35	10	6,5	2,75	12,2	1,5	Y/Y – 12
25	1600	35	10	6,5	3,65	18,0	1,4	Y/Y – 12
26	10	0,66	0,4	4,5	0,09	0,28	7,0	Y/Y – 12
27	16	0,66	0,4	4,5	0,125	0,40	5,8	Y/Y – 12
28	25	10	0,4	4,7	0,125	0,69	4,8	Y/Δ – 11
29	40	6	0,23	4,5	0,18	0,88	4,0	Y/Y ₀ – 12
30	63	6	0,23	4,5	0,26	1,28	3,3	Y/Δ – 11
31	100	35	0,4	4,7	0,465	2,27	2,6	Y/Y ₀ – 12

Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9
32	160	6	0,23	4,5	0,54	2,65	2,4	Y/Δ – 11
33	160	6,0	0,4	4,5	0,54	2,65	2,4	Y/Δ – 11
34	160	10	0,23	4,5	0,54	3,1	2,4	Y/Y ₀ – 12
35	160	10	0,69	4,5	0,54	2,65	2,4	Y/Y ₀ – 12
36	160	6	0,23	4,5	0,54	2,65	2,4	Y/Δ – 11
37	250	6	0,23	4,5	0,78	3,7	2,3	Y/Δ – 11
38	250	6	0,4	4,5	0,78	3,7	2,3	Y/Δ – 11
39	250	10	0,23	4,7	0,78	3,7	2,3	Y/Y ₀ – 12
40	250	10	0,69	4,7	0,78	4,2	2,3	Y/Y ₀ – 12
41	400	3	0,4	4,5	0,78	4,2	3,2	Y/Y ₀ – 12
42	400	6	0,4	4,5	1,08	5,5	3,2	Y/Y ₀ – 12
43	400	6	0,66	4,5	1,08	5,5	3,2	Y/Y ₀ – 12
44	400	6	0,4	4,5	1,08	5,5	3,2	Y/Y ₀ – 12
45	400	10	0,23	4,5	1,08	5,5	3,2	Y/Y ₀ – 12
46	400	10	0,4	4,5	1,08	5,5	3,2	Y/Y ₀ – 12
47	630	10	0,69	4,5	1,08	5,5	3,2	Y/Y ₀ – 12
48	630	6	0,4	0,66	1,68	7,6	3,2	Y/Y ₀ – 12
49	1000	10	0,69	5	2,5	10,5	3,0	Y/Y ₀ – 12

Построить внешнюю характеристику трансформатора и зависимость КПД от нагрузки при $\cos \varphi_2 = 0,75$. Начертить T-образную схему замещения трансформатора.

2. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

3-фазные асинхронные двигатели являются самыми распространенными машинами переменного тока. Они работают по принципу использования вращающегося магнитного поля.

2.1. Принцип действия и конструкция 3-фазного асинхронного двигателя

На рис. 2.1 схематично показано устройство 3-фазного двигателя. Он состоит из двух основных частей: неподвижной части статора и вращающейся – ротора. Статор представляет собой цилиндр, собранный из штампованных листов электротехнической стали. На внутренней стороне цилиндра имеются пазы, в которых расположены три фазные сдвинутые одна относительно другой на угол 120° обмотки, питаемые от сети 3-фазного тока. Буквами *A, B, C* обозначены начала фазных обмоток, а буквами *X, Y, Z* – концы их. Такое расположение 3-фазных обмоток со сдвигом в пространстве на $1/3$ окружности и питание их 3-фазным током, фазы которого также сдвинуты в пространстве на 120° , приводит к возникновению в зазоре вращающегося магнитного поля.

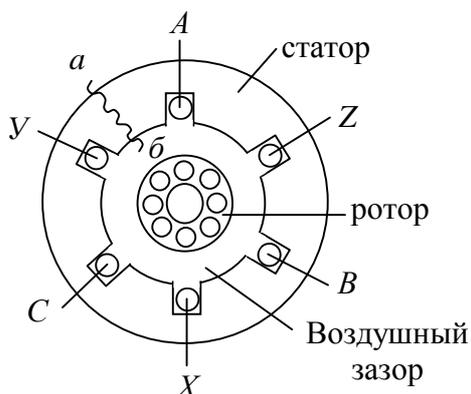


Рис. 2.1

Внутри расточки статора помещен ротор. Он представляет собой цилиндр, собранный из листов электротехнической стали. На поверхности ротора имеются пазы, в которых помещается его обмотка. В зависимости от типа обмотки ротора асинхронные двигатели делятся на двигатели с короткозамкнутым ротором и двигатели с фазным ротором. Обмотка короткозамкнутого ротора (рис. 2.2) выполняется в виде «белчьей клетки», в пазы ротора уложены стержни из меди или алюминия. Концы этих стержней по

торцам соединены медными (или латунными) кольцами, т. е. они закорочены. Между ротором и статором имеется воздушный зазор (менее 1 мм).

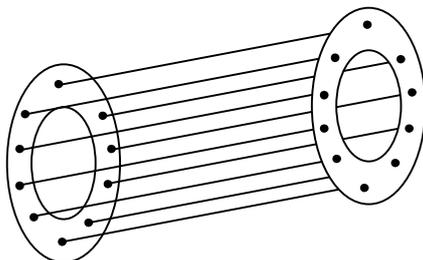


Рис. 2.2

Если к фазным обмоткам статора подвести переменное 3-фазное напряжение

$$u_A = u_m \sin \omega t,$$

$$u_B = u_m \sin(\omega t - 120^\circ),$$

$$u_C = u_m \sin(\omega t - 240^\circ),$$

то фазные токи в обмотках возбудят в зазоре магнитное поле, вращающееся с частотой

$$n_1 = \frac{60f}{p}, \quad (2.1)$$

где p – число пар полюсов вращающегося магнитного поля.

Частота вращения магнитного поля прямо пропорциональна частоте тока и обратно пропорциональна числу пар полюсов. Число пар полюсов определяется конструкцией фазной обмотки. На рис. 2.3 показан разрез статора по линии ab с его диаметральной обмоткой, поскольку обмотка каждой фазы лежит в диаметральной плоскости (начало и конец обмотки расположены на концах диаметра).

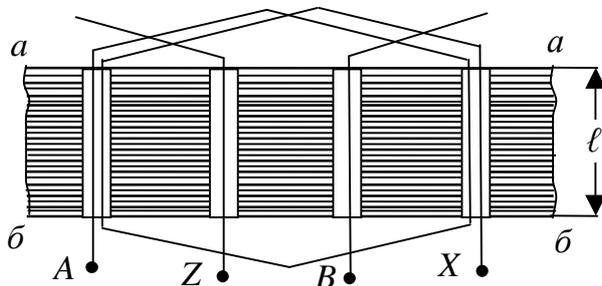


Рис. 2.3

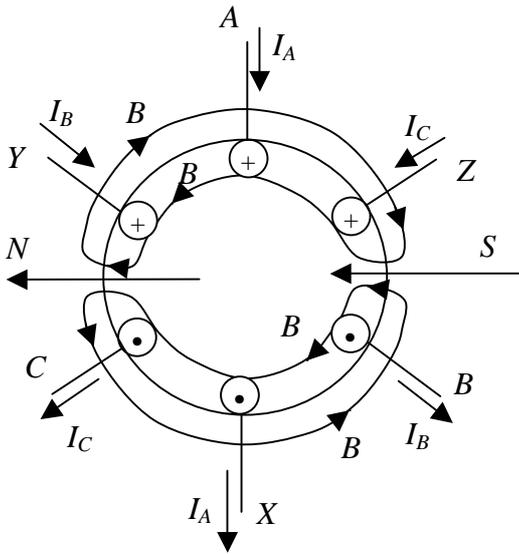


Рис. 2.4

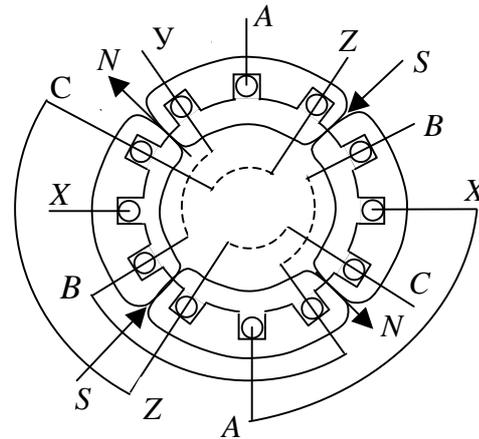


Рис. 2.5

На рис. 2.4 показаны полярность токов и картина магнитного поля для момента времени, соответствующего равенству $\omega t = \pi/2$, когда мгновенное значение тока i_A в фазе A максимально и ток направлен от начала фазы к ее концу. Мгновенные токи в остальных двух фазах в этот момент времени будут отрицательны (токи направлены от концов фаз к их началам) (рис. 2.4).

Как видно из рис. 2.4, магнитное поле такой обмотки имеет два полюса N и S , а число пар полюсов $p = 1$. Если фазные обмотки статора выполнять таким образом, чтобы начала и концы их располагались не на концах диаметра, а на четверти окружности (рис. 2.5), тогда каждая фаза будет иметь по две симметричные обмотки. На рис. 2.5 показаны полярность фазных токов в тот же момент времени $\omega t = \pi/2$ и магнитное поле этих токов. Как видно из рис. 2.5, магнитное поле стало четырёхполюсным и число пар полюсов $p = 2$. Меняя конфигурацию статорной обмотки, можно сделать $p = 3; 4; 5; 6$.

При стандартной частоте тока $f = 50$ Гц частота вращения магнитного поля машины в зависимости от числа пар полюсов следующая:

p	1	2	3	4	5	6
об/мин	3000	1500	1000	750	600	500

Частота вращения ротора асинхронного двигателя определяется частотой вращения магнитного поля.

Вращающееся магнитное поле пересекает обмотку ротора и наводит в проводниках его по закону электромагнитной индукции ЭДС, направление которой можно определить по правилу «правой руки».

ЭДС, индуктированная в короткозамкнутых проводниках ротора, вызывает в них ток, создающий электромагнитное поле ротора. В результате взаимодействия этого поля ротора с магнитным полем статора возникают электромагнитные силы, действующие на ротор, создавая вращающий момент, под действием которого ротор начинает вращаться в направлении вращения магнитного поля статора.

2.2. Скольжение

Частота вращения ротора асинхронного двигателя n_2 , обладающего значительной массой, всегда меньше частоты вращения магнитного поля n_1 .

Разность частоты вращения магнитного поля статора и частоты вращения ротора называется частотой скольжения

$$n_s = n_1 - n_2,$$

а отношение частоты скольжения n_s к частоте вращения магнитного поля n_1 называется скольжением

$$s = (n_1 - n_2) / n_1. \quad (2.2)$$

Скольжение выражается в относительных единицах или в процентах. При пуске асинхронного двигателя, когда частота вращения ротора $n_2 = 0$, скольжение $s = 1$.

Скольжение асинхронного двигателя в зависимости от нагрузки меняется незначительно (3–6%): чем больше мощность двигателя, тем меньше его скольжение.

2.3. Вращающий момент асинхронного двигателя

Вращающий момент двигателя M находится в определенной зависимости от скольжения s . График зависимости $M(s)$ показан на рис. 2.6. Он построен при неизменных напряжении и частоте сети.

Наибольшему вращающему моменту M_{\max} соответствует критическое скольжение $s_{\text{êð}}$, которое делит график $M(s)$ на два участка: устойчивой работы ($0 < s < s_{\text{êð}}$) и неустойчивой ($s_{\text{êð}} < s \leq 1$).

На устойчивом участке двигатель автоматически развивает вращающий момент машины M , равный моменту сопротивления M_c нагрузки. При изменении, например возрастании, M_c скольжение s и вращающий момент двигателя M будут увеличиваться до тех пор, пока не наступит новое равновесие $M = M_c$.

При уменьшении M_c скольжение s и вращающий момент M соответственно уменьшаются. Это свойство АД называют саморегулированием вращающего момента.

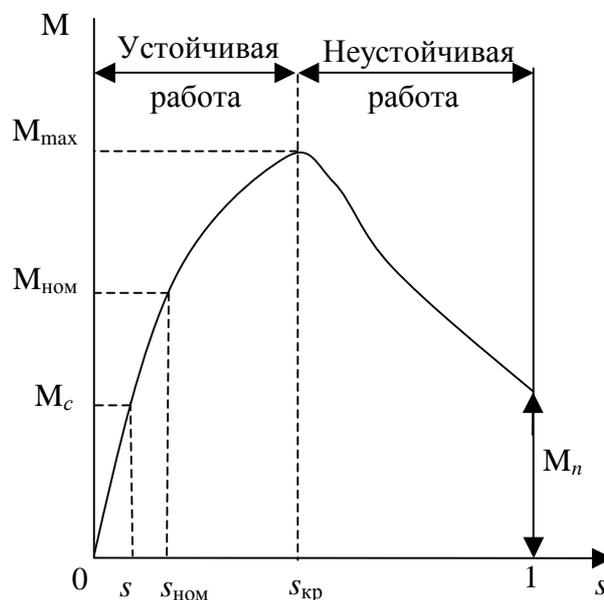


Рис. 2.6

На неустойчивом участке $M(s)$ двигатель, не обладая свойством саморегулирования, работает кратковременно и, как правило, в условиях неравенства моментов M и M_c . Если $M < M_c$, частота вращения АД уменьшается до полной остановки.

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

$$M = 9,55P/n = \omega \cdot P. \quad (2.3)$$

Момент и мощность на валу, которые двигатель может длительно развивать, на перегреваясь сверх допустимой температуры, называют номинальными ($M_{\text{ном}}$, $P_{\text{ном}}$). Номинальный режим характеризуют также частота вращения $n_{\text{ном}}$, КПД $\eta_{\text{ном}} = P_{2\text{ном}}/P_{1\text{ном}}$, номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_{\text{нн}}$, номинальное линейное напряжение сети $U_{1\text{ном}}$, номинальный линейный ток:

$$I_{\text{нн}} = \frac{P_{\text{нн}}}{\sqrt{3}U_{\text{нн}} \eta_{\text{нн}} \cos \varphi_{\text{нн}}}. \quad (2.4)$$

При кратковременных перегрузках ($M_c > M_{\text{нн}}$) АД работает устойчиво при условии, что наибольший момент сопротивления нагрузки $M_{c.\text{max}}$ не превышает M_{max} АД. Отношение $k_1 = M_{\text{max}}/M_{\text{нн}}$ называют перегрузочной способностью АД. k_1 приводится в каталогах ($k_1 = 1,8-2,5$) и используется для вычисления $M_{\text{max}} = k_1 \cdot M_{\text{нн}}$:

$$M_{\text{max}} = k_1 M_{\text{нн}}. \quad (2.5)$$

Пусковые свойства АД характеризуют пусковой момент M_n и пусковой ток I_n в начальный момент пуска (при $n = 0$, $s = 1$). Для короткозамкнутых АД $M_n = (1-1,8)M_{\text{нн}}$, $I_n = (5-7)I_{\text{нн}}$. Пусковой момент должен быть достаточным, чтобы преодолеть M_c нагрузки и обеспечить быстрый (в течение нескольких секунд) разгон до рабочей скорости. Начальный пусковой ток по мере разгона АД быстро уменьшается и поэтому не опасен для двигателя.

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

Фазный ротор существенно отличается от короткозамкнутого: он имеет подобно статору 3-фазную обмотку, выполненную изолированным проводом и размещённую в пазах ротора с пространственным смещением фаз на 120° . Фазы ротора соединены звездой, три свободных конца присоединены к контактным кольцам, закрепленным на валу изолированно от него. К кольцам прилегают медно-графитовые щетки, образующие при вращении скользящие контакты, через которые в обмотку ротора может включаться 3-фазный реостат (рис. 2.7, а).

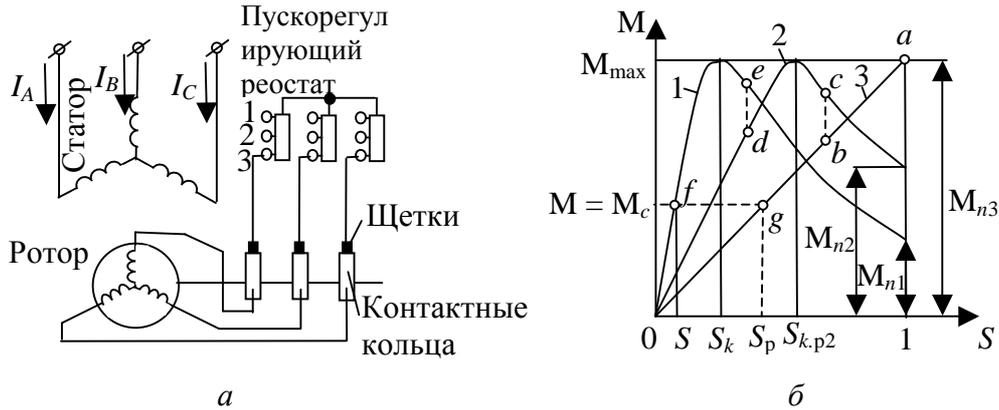


Рис. 2.7

Введение реостата в цепь ротора изменяет зависимость вращающего момента M от скольжения s , не влияя на величину наибольшего момента M_{\max} , который двигатель способен развивать. На рис. 2.7, б показаны три характеристики $M(s)$: естественная (безреостатная) характеристика 1 соответствует замкнутой накоротко обмотке ротора (сопротивление реостата $R_p = 0$), реостатные (искусственные) характеристики 2 и 3 – введенным одной и двум ступеням реостата. Как естественная, так и искусственная характеристики $M(s)$ описываются упрощенной формулой Клосса:

$$M = \frac{2M_{\max}}{s/s_{\epsilon\delta} + s_{\epsilon\delta}/s}, \quad M' = \frac{2M_{\max}}{s/s'_{\epsilon\delta} + s'_{\epsilon\delta}/s}, \quad (2.6)$$

где

$$s_{\epsilon p} = s_{\hat{i}\hat{i}} \left(k_1 + \sqrt{k_1^2 - 1} \right), \quad s'_{\epsilon\delta} = s_{\epsilon\delta} \left[1 + (R_p + R'_2)/R'_2 \right]; \quad (2.8)$$

$s'_{\text{ед}}$ – критическое скольжение при данном R_p ; $s_{\text{ед}}$ – критическое скольжение при $R_p = 0$; R'_2 – сопротивление фазы обмотки ротора приведенное к первичной стороне; $k_1 = M_{\text{max}} / M_{\text{fii}}$ – перегрузочная способность двигателя.

Введение реостата в цепь ротора положительно влияет на пусковой ток, снижая его примерно в 2 раза по сравнению с короткозамкнутым АД.

Рассмотрим процесс пуска двигателя с фазным ротором, в цепь которого введен двухступенчатый реостат (рис. 2.7, а). При подаче на статор напряжения сети ротор под действием пускового момента M_{n3} трогается с места и начинает разгон (точка а). Момент M и скольжение s изменяются по характеристике 3 (участок а – б). По мере увеличения частоты вращения n (уменьшения s) выводят сначала первую, а затем вторую ступени реостата, чему соответствует последовательный переход на характеристики 2 (скачок б – в) и 1 (скачок в – г). Процесс пуска заканчивается на естественной характеристике в точке f , где момент двигателя M уравнивается моментом сопротивления M_c .

С помощью реостата в цепи ротора можно регулировать частоту вращения двигателя (регулируемый реостат в отличие от пускового должен быть рассчитан на длительное протекание тока ротора).

В регулируемом реостате имеются потери энергии, поэтому КПД двигателя снижается.

2.4. Механические характеристики асинхронного двигателя

Механические характеристики $M = f(s)$ и $n_2 = f(M)$ могут быть построены по расчетной формуле вращающего момента:

$$M = \frac{m_1 p U_{16}^2 \frac{r'_2}{s}}{2\pi f_1 \left[\left(r_1 + \frac{r'_2}{s} \right)^2 + (x_1 + x'_2)^2 \right]}, \quad (2.10)$$

где M – вращающий момент двигателя в Н · м; r_1, x_1, r'_2, x'_2 – сопротивления статорной и приведенные сопротивления роторной обмоток; m_1 – число фаз статора; p – число пар полюсов; U_{16} – фазное напряжение статорной обмотки; s – скольжение.

По зависимости $M = f(s)$ легко построить характеристику $n = f(M)$.

Механические характеристики могут быть построены и по данным каталога. Известно (2.6), что

$$M = \frac{2M_{\max}}{\frac{s_{\epsilon\delta}}{s} + \frac{s}{s_{\epsilon\delta}}},$$

где M_{\max} – критический (максимальный) вращающий момент двигателя; $s_{\text{кр}}$ – скольжение, при котором двигатель развивает критический момент.

Зная отношение критического момента к номинальному $M_{\epsilon}/M_{\text{н}} = \lambda$ и определив номинальный момент как $M_{\text{н}} = 9550 P_{\text{н}} / n_{\text{н}}$, где $P_{\text{н}}$ – номинальная мощность двигателя; $n_{\text{н}}$ – номинальная частота вращения ротора, легко получить выражение для $s_{\epsilon\delta}$. Рассматривая уравнение (2.6) для номинального режима и учитывая, что $M_{\text{н}}/M_{\epsilon} = 1/\lambda$, получим

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{2}{\frac{s_{\epsilon\delta}}{s_{\text{н}}} + \frac{s}{s_{\epsilon\delta}}}. \quad (2.11)$$

Решая уравнение (2.11) относительно критического скольжения, получаем

$$s_{\epsilon\delta} = s_{\text{н}} (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}). \quad (2.12)$$

Зная M_{ϵ} и $s_{\epsilon\delta}$ и задаваясь значениями s в пределах от 0 до 1, легко построить механическую характеристику $M = f(s)$, данные для построения которой получают из уравнения (2.6).

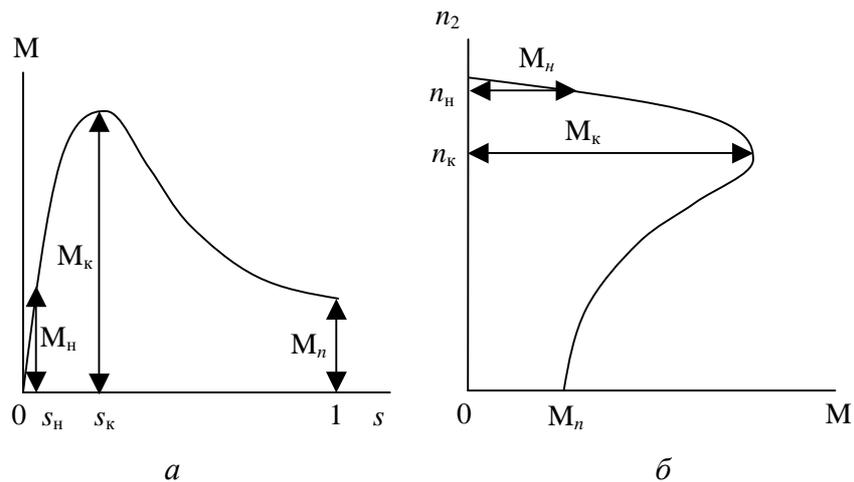


Рис. 2.8

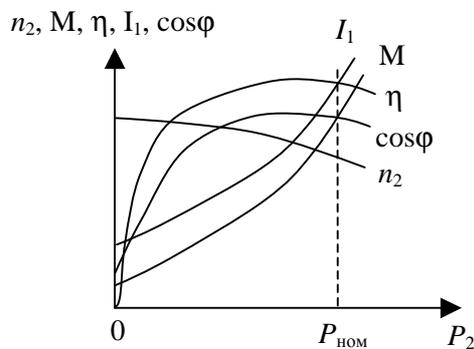


Рис. 2.9

Характеристика $n_2 = f(M)$ получается из характеристики $M = f(s)$, учитывая при этом, что

$$n_2 = n_1(1 - s), \quad (2.13)$$

где n_1 об/мин – частота вращения магнитного поля статора.

Механические характеристики асинхронного двигателя, изображенные на рис. 2.8, а и 2.8, б, показывают свойства двигателя в системе электропривода. Для более полного выявления свойств двигателя служат рабочие характеристики, которые показывают зависимость частоты вращения ротора n_2 , вращающего момента M , КПД η , тока статора I_1 и коэффициента мощности $\cos \varphi$ от мощности на валу двигателя P_2 . Рабочие характеристики асинхронного двигателя изображены на рис. 2.9.

Контрольное задание 2

3-фазный асинхронный двигатель с фазным ротором включен в сеть с линейным напряжением $U_{\text{ном}}$ и частотой $f = 50$ Гц. Количество пар полюсов двигателя p , сопротивление фазы ротора R_2 , напряжение ротора U_{20} , таблице. Рассчитать полезную мощность и потери в двигателе при номинальной нагрузке; 2) номинальный ток $I_{\text{ном}}$, номинальный $M_{\text{ном}}$ и максимальный M_{max} вращающие моменты; 3) номинальное и критическое скольжение; 4) сопротивление $R_{\text{пуск}}$ фазы пускового реостата, которое обеспечивает пуск двигателя с максимальным пусковым моментом; 5) пусковые токи ротора и статора при пуске без реостата и с пусковым реостатом; 6) кратность пусковых токов статора при пуске без реостата и с пусковым реостатом; 7) пониженное напряжение сети, при котором уже невозможен пуск двигателя ($M_i < M_{i\text{ii}}$); 8) дополнительное сопротивление $R_{\text{доп}}$, при включении которого в цепь ротора механическая характеристика пройдет через точку с координатами $n' = 0,6 n_{\text{ном}}$ и $M_{\text{дв}} = M_{\text{ном}}$; 9) естественную и искусственную (с $R_{\text{доп}}$) механические характеристики.

Таблица

№ в-та	$U_{\text{ном}}$, В	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, отн. ед.	$\cos\varphi_{\text{ном}}$, отн. ед.	$\frac{M_{\text{max}}}{M_{i\text{ii}}}$	R_2 , Ом	U_{20} , В	p
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	220	11	1425	0,865	0,86	3	0,06	175	2
1	380	14	1450	0,885	0,87	3,5	0,05	300	2
2	220	18	1440	0,89	0,88	4	0,04	170	2

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	380	22	1440	0,9	0,87	4	0,03	340	2
4	220	30	1460	0,95	0,87	4	0,02	200	2
5	380	37	1440	0,9	0,87	3	0,015	160	2
6	220	45	1455	0,91	0,88	3	0,01	130	2
7	380	55	1455	0,915	0,90	3	0,009	200	2
8	220	71	1460	0,915	0,86	3	0,008	200	2
9	380	7,5	950	0,825	0,77	3,5	0,076	300	3
10	220	10	955	0,845	0,76	3,8	0,065	180	3
11	380	13	955	0,855	0,8	4	0,055	325	3
12	220	18,5	965	0,88	0,81	3,5	0,04	210	3
13	380	22	965	0,88	0,8	3,5	0,03	330	3
14	220	30	965	0,89	0,85	2,5	0,02	80	3
15	380	37	965	0,89	0,84	2,5	0,015	150	3
16	220	45	970	0,905	0,87	2,5	0,01	105	3

17	380	5,5	700	0,8	0,7	2,5	0,095	300	4
18	220	7,5	705	0,82	0,7	3	0,076	170	4
19	380	11	720	0,855	0,72	3,5	0,06	270	4
20	220	15	725	0,86	0,7	3	0,045	210	4
21	380	18,5	725	0,86	0,73	3	0,04	300	4
22	220	22	715	0,87	0,82	2,2	0,03	60	4
23	380	30	720	0,885	0,81	2,2	0,02	125	4
24	220	37	725	0,89	0,8	2,2	0,015	85	4
25	380	14	1425	0,865	0,85	3	0,05	330	2
26	220	17	1425	0,88	0,87	3,5	0,042	182	2
27	380	22	1420	0,87	0,86	3,2	0,03	300	2
28	220	30	1430	0,88	0,81	3,3	0,02	170	2
29	380	37	1455	0,9	0,88	3	0,015	360	2
30	220	45	1460	0,9	0,88	3	0,01	215	2
31	380	55	1465	0,895	0,87	2,5	0,09	170	2
32	220	75	1430	0,9	0,88	2,3	0,008	105	2
33	380	90	1465	0,915	0,87	2,5	0,07	220	2
34	220	13	930	0,835	0,81	3	0,055	120	3
35	380	17	940	0,85	0,82	3	0,042	335	3
36	220	22	965	0,88	0,81	3	0,03	220	3
37	380	30	960	0,885	0,82	3	0,02	375	3
38	220	37	960	0,89	0,86	1,9	0,015	80	3
39	380	45	960	0,895	0,86	2,3	0,01	155	3
40	220	55	965	0,91	0,88	2,5	0,009	110	3
41	380	75	970	0,915	0,85	2,5	0,008	250	3
42	220	90	965	0,9	0,88	1,9	0,007	115	3
43	380	11	715	0,85	0,72	3,2	0,06	315	4

Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
44	220	14	710	0,865	0,69	3,5	0,05	180	4
45	380	18,5	710	0,86	0,78	2,5	0,04	380	4
46	220	22	710	0,87	0,79	2,5	0,03	190	4
47	380	30	715	0,865	0,8	1,8	0,02	120	4
48	220	37	710	0,875	0,8	2,2	0,015	110	4
49	380	45	705	0,89	0,82	2,2	0,01	140	4

Результаты расчетов занести в таблицу. Начертить схему двигателя с пусковым реостатом.

3. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

3.1. Общие сведения

Несмотря на преимущественное распространение электроэнергии переменного тока, электрические машины постоянного тока находят широкое применение в различных областях техники в качестве генераторов и двигателей.

Двигатели постоянного тока используют в тех случаях, когда механизм, приводимый во вращение двигателем, должен иметь широкий и плавный диапазон регулирования скорости: на электрическом транспорте, в различном технологическом оборудовании.

Машина постоянного тока обратима, т. е. с одинаковым успехом может работать в режиме генератора, преобразуя механическую энергию в электрическую, и в режиме двигателя, преобразуя электрическую энергию постоянного тока в механическую.

Электротехнической промышленностью выпускаются машины постоянного тока различной мощности (от долей ватта до 10 000 кВт) и напряжения (от 6 В до 30 кВ).

3.2. Устройство машины постоянного тока

Машина постоянного тока состоит из двух основных частей: неподвижной – статора и вращающейся – ротора. Статор в машине постоянного тока называется индуктором и служит для получения неподвижного магнитного поля, а ротор – якорем, в обмотке которого механическая энергия преобразуется в электрическую (генератор) или электрическая – в механическую (двигатель).

Статор состоит из стальной станины в виде цилиндра *1* (рис. 3.1), главных полюсов *2*, дополнительных полюсов *3*, подшипниковых щитов *4* и щеточной траверсы со щетками *5*.

Станина выполняет функцию магнитопровода.

Главные полюсы состоят из стальных магнитопроводов и обмоток возбуждения и служат для создания постоянного во времени и неподвижного в пространстве магнитного поля. По обмотке полюсов пропускается постоянный ток, называемый током возбуждения.

Дополнительные полюсы устанавливаются между главными и служат для улучшения коммутации. По обмоткам дополнительных полюсов протекает ток якоря.

Якорь состоит из магнитопровода 6, обмотки 7 и коллектора 8.

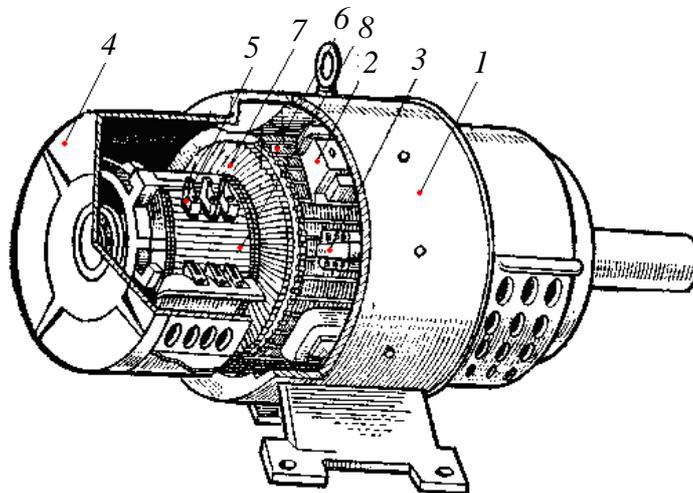


Рис. 3.1

С помощью коллектора и щеток подводимое постоянное напряжение (в режиме двигателя) преобразуется в переменное в обмотках якоря, но при этом сохраняется знак вращающего момента.

3.3. Способы возбуждения машин постоянного тока

Различают следующие способы возбуждения магнитного поля в машинах постоянного тока: независимое возбуждение (рис. 3.2, а, б) (от независимого источника постоянного тока или постоянными магнитами) и самовозбуждение (рис. 3.2, в, г, д).

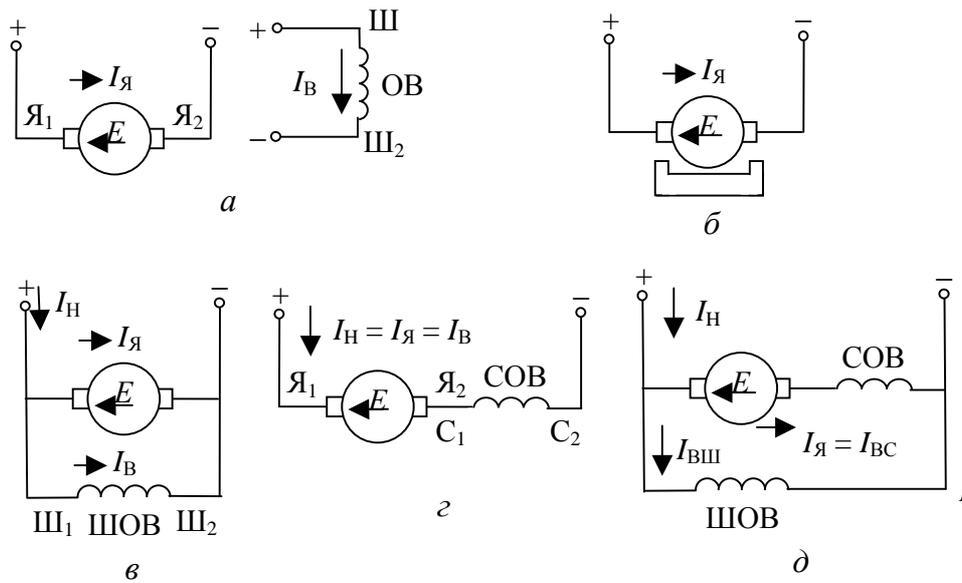


Рис. 3.2

Машины с самовозбуждением в зависимости от способа соединения обмотки возбуждения и обмотки якоря делятся на машины с параллельным (шунтовым), последовательным (серийным) и смешанным (компаундным) возбуждением.

3.4. Принцип действия двигателя постоянного тока. Электромагнитный вращающий момент. ПротивоЭДС обмотки якоря

В двигателях происходит преобразование электрической энергии постоянного тока в механическую энергию, отдаваемую рабочему механизму. В основе принципа действия двигателя лежит взаимодействие магнитного поля, создаваемого обмоткой возбуждения, и тока, протекающего в проводниках обмотки якоря.

Благодаря коллектору подводимый постоянный ток меняет направление в проводниках обмотки якоря, когда при вращении якоря они попадают в пространство под другим полюсом. Таким образом, направление тока в проводниках обмотки якоря, находящихся под данным полюсом, остается все время неизменным. При этом электромагнитная сила (закон Ампера $F = B \cdot I \cdot l$), действующая на каждый проводник с током, находящийся в магнитном поле, сохраняет свой знак при переходе проводников к полюсу другой полярности и создает электромагнитный вращающий момент:

$$M = C_1 \cdot I_{\text{я}} \Phi, \quad (3.1)$$

где $C_m = pN/2\pi a$ – конструктивная постоянная или коэффициент момента; p – число пар полюсов индуктора; N – число проводников обмотки якоря; a – число пар параллельных ветвей обмотки якоря; $I_{\text{я}}$ – ток обмотки якоря; Φ – магнитный поток пары полюсов, $\Phi \equiv I_{\text{в}}$.

При вращении якоря в магнитном поле индуктора в проводниках якоря по закону электромагнитной индукции (закон Фарадея $e = B \cdot I \cdot v$) наводится ЭДС:

$$E = C_e n \Phi, \quad (3.2)$$

где $C_e = pN/60a$ – конструктивная постоянная; n – частота вращения якоря.

Коэффициенты C_m и C_e связаны между собой соотношением

$$C_m = C_e / 0,105.$$

Согласно принципу Ленца, ЭДС обмотки якоря в режиме двигателя имеет направление, противоположное току, и называется противоЭДС.

Уравнение баланса напряжений в цепи якоря по второму закону Кирхгофа имеет вид

$$U = E + R_{\text{я}} I_{\text{я}} = C_e n \Phi + R_{\text{я}} I_{\text{я}}, \quad (3.3)$$

где $R_{\text{я}}$ – сопротивление обмотки якоря.

В режиме генератора это уравнение имеет вид $U = E - R_{\text{я}} I_{\text{я}}$ и представляет собой уравнение внешней характеристики генератора.

Из уравнения баланса напряжений двигателя ток якоря равен

$$I_{\text{я}} = (U - E) / R_{\text{я}} = (U - C_e n \Phi) / R_{\text{я}}, \quad (3.4)$$

а частота вращения

$$n = (U - R_{\text{я}} I_{\text{я}}) / C_e \Phi = U / C_e \Phi - R_{\text{я}} I_{\text{я}} / C_e \Phi = n_0 - R_{\text{я}} I_{\text{я}} / C_e \Phi, \quad (3.5)$$

где $n_0 = U / C_e \Phi$ – частота вращения при «идеальном» х. х.

n_0 можно определить по паспортным данным двигателя (в номинальном режиме):

$$n_0 = U_{\text{ном}} / C_e \Phi_{\text{ном}}.$$

$$E_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} - R_{\text{я}} I_{\text{я ном}} = C_e n_{\text{ном}} \Phi_{\text{ном}}.$$

Отсюда

$$C_e \Phi_{\text{ном}} = E_{\text{ном}} / n_{\text{ном}}.$$

Тогда

$$n_0 = U_{\text{ном}} / (E_{\text{ном}} / n_{\text{ном}}) = (U_{\text{ном}} / E_{\text{ном}}) n_{\text{ном}}.$$

Ток якоря $I_{\text{я}}$ определяется для двигателя с параллельным возбуждением по первому закону Кирхгофа (см. рис. 3.2, в):

$$I_{\text{я ном}} = I_{\text{ном}} - I_{\text{в ном}}, \quad (3.6)$$

где $I_{\text{в ном}} = U_{\text{ном}} / R_{\text{в}}$ ($R_{\text{в}}$ – сопротивление обмотки возбуждения).

3.5. Механические характеристики двигателя постоянного тока при различных способах возбуждения

Механической характеристикой называется зависимость между вращающим моментом и частотой вращения $M = f(n)$ или $n = f(M)$. Поскольку $M \equiv I_{\text{я}}$, иногда удобно пользоваться электромеханической характеристикой $n = f(I_{\text{я}})$.

В двигателях с независимым и параллельным возбуждением механическая характеристика представляет собой прямую линию и может быть построена по двум точкам (рис. 3.3). Такая характеристика, при которой частота вращения меняется незначительно (менее 0% от $n_{\text{НОМ}}$)

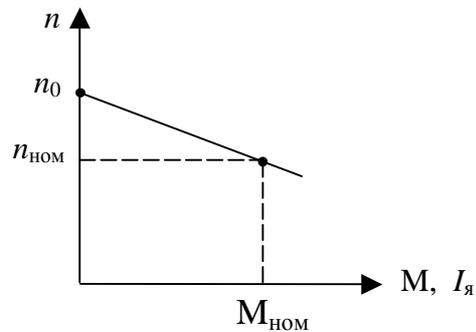


Рис. 3.3

момента сопротивления нагрузки на валу $0 < M_c < M_{c \text{ НОМ}}$, называется жесткой:

$$n = n_0 - R_{\text{я}} I_{\text{я}} / C_e \Phi = n_0 - R_{\text{я}} M / C_e C_M \Phi^2, \quad (3.7)$$

где $M = C_M \Phi I_{\text{я}}$.

Откуда

$$I_{\text{я}} = M / C_M \Phi, \quad M \equiv I_{\text{я}}.$$

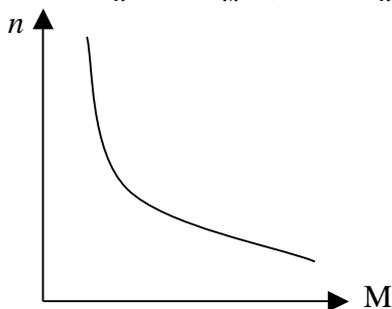


Рис. 3.4

В двигателях с последовательным возбуждением обмотка возбуждения соединяется последовательно с обмоткой якоря и по ней протекает ток возбуждения, равный току якоря $I_{\text{в}} = I_{\text{я}}$.

Магнитный поток $\Phi \equiv I_{\text{я}}$. Заменим Φ через $k I_{\text{я}}$, где k – коэффициент пропорциональности.

Тогда получим

$$M = C_1 \Phi I_{\text{я}} = C_1 k I_{\text{я}}^2; \quad M \equiv I_{\text{я}}^2; \quad I_{\text{я}} = \sqrt{M / C_1 k}. \quad (3.8)$$

Тогда уравнение механической характеристики примет вид

$$\begin{aligned} n &= (U - (R_{\text{я}} + R_{\text{б}}) I_{\text{я}}) / C_e k I_{\text{я}} = U / C_e k I_{\text{я}} - (R_{\text{я}} + R_{\text{б}}) / C_e k = \\ &= U / (C_e k \sqrt{M / C_1 k}) - (R_{\text{я}} + R_{\text{б}}) / C_e k. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Характеристика мягкая и не имеет пересечения с осью n (рис. 3.4). Это значит, что двигатель с последовательным возбуждением боится х. х. (двигатель идет в «разнос»).

Мягкой характеристикой называется механическая характеристика, при которой частота вращения двигателя сильно изменяется в зависимости от изменения величины нагрузки на валу.

Двигатели с последовательным возбуждением широко применяются на электротранспорте и в крановых установках.

В двигателях смешанного возбуждения на каждом полюсе имеются по две катушки: одна принадлежит параллельной, другая – последовательной обмотке возбуждения. Создаваемые ими магнитные потоки складываются из трех потоков:

$$\Phi_{\Sigma} = \Phi_{\text{ш}} + \Phi_{\text{с}}, \quad \Phi_{\text{ш}} = \text{const}, \quad \Phi_{\text{с}} \equiv I_{\text{я}}.$$

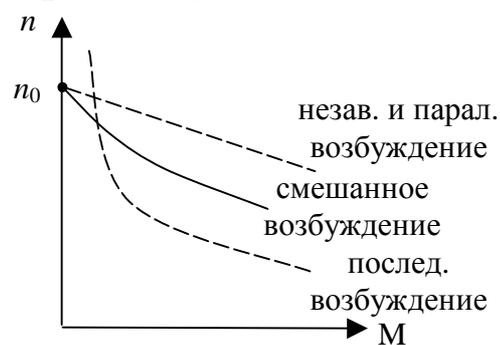


Рис. 3.5

Механическая характеристика имеет вид (рис. 3.5). Такие машины применяются там, где требуется большой пусковой момент и возможны кратковременные перегрузки и большие ускорения: компрессоры, прокатные станы, шагающие экскаваторы, строгальные станки.

3.6. Потери энергии и КПД машин постоянного тока

Работа любой электрической машины сопровождается различного рода потерями энергии в ней, вызывающими нагрев машины. В машине постоянного тока при номинальной нагрузке электрические потери $\Delta P_{\text{э}}$ составляют примерно 50% всех потерь, $\Delta P_{\text{э}} = f(I_{\text{я}}^2)$ и называются переменными.

Другими потерями являются так называемые постоянные потери $\Delta P_{\text{пост}}$, в которые входят потери в стали $\Delta P_{\text{ст}}$ (1–3% от $P_{\text{ном}}$), потери механические на трение в подшипниках и вентиляционные $\Delta P_{\text{мех}}$ (1–2% от $P_{\text{ном}}$) и потери в обмотке возбуждения $\Delta P_{\text{в}}$ (0,5–0,7% от $P_{\text{ном}}$). Все эти потери практически не зависят от нагрузки двигателя.

Коэффициент полезного действия

$$\eta = P_2/P_1 = P_2/(P_2 + \sum \Delta P) = P_2/(P_2 + \Delta P_{\text{э}} + \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{мех}}). \quad (3.10)$$

В паспорте двигателя указывается полезная мощность, отдаваемая рабочему механизму $P_{\text{ном}} = P_{2\text{ном}}$.

Потребляемая номинальная мощность

$$P_{1\text{ном}} = P_{\text{ном}}/\eta_{\text{ном}}. \quad (3.11)$$

Тогда

$$\sum \Delta P_{\text{ном}} = P_{1\text{ном}} - P_{\text{ном}}.$$

Зная $P_{1\text{ном}}$, легко определить номинальный ток двигателя

$$I_{\text{ном}} = P_{1\text{ном}}/U_{\text{ном}}, \quad (3.12)$$

а зная $P_{2\text{ном}}$ легко определить номинальный вращающий момент:

$$M_{\text{ном}} = 9550 (P_{\text{ном}} \text{ (кВт)} / n_{\text{ном}}) \text{ [Нм]}. \quad (3.13)$$

3.7. Пуск двигателя постоянного тока

При подключении двигателя постоянного тока к сети с напряжением U , когда якорь неподвижен и $E = 0$, пусковой ток якоря $I_{\text{яп}} = U_{\text{ном}}/R_{\text{я}} = (10-30) I_{\text{ном}}$.

Такой большой пусковой ток может разрушить коллектор, щетки и обмотку якоря. Он также опасен и для питающей сети.

Для ограничения пускового тока последовательно с обмоткой якоря включают пусковой реостат $R_{\text{п}}$ (рис. 3.6).

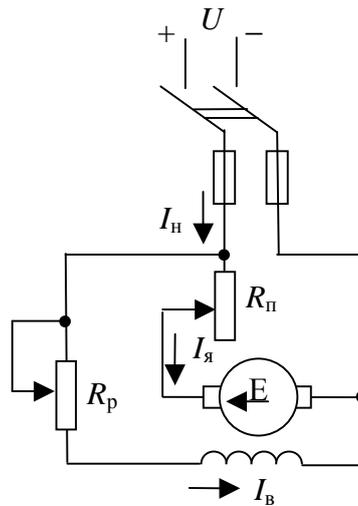


Рис. 3.6

Тогда

$$I_{\text{яп}} = U_{\text{ном}}/(R_{\text{я}} + R_{\text{п}}).$$

Сопротивление пускового реостата выбирают таким, чтобы

$$I_{\text{яп}} \leq (2 - 2,5) I_{\text{я ном}}. \quad R_{\text{п}} = (U_{\text{ном}}/(2 - 2,5) I_{\text{я}}) - R_{\text{я}}.$$

Когда якорь начинает вращаться, ЭДС якоря растет и ток якоря уменьшается:

$$I_{\text{я}} = (U - E)/(R_{\text{я}} + R_{\text{п}}) = (U - C_{\text{е}}n\Phi)/(R_{\text{я}} + R_{\text{п}}).$$

Поэтому сопротивление пускового реостата постепенно уменьшают до нуля.

Сопротивление реостата возбуждения $R_{\text{в}}$ при пуске следует делать минимальным, чтобы ток возбуждения и магнитный поток были максимальными. При этом пусковой момент $M_{\text{п}} = C_{\text{м}}I_{\text{яп}}\Phi_{\text{п}}$ достигнет максимального значения, в результате чего сокращаются продолжительность пуска и время протекания большого пускового тока.

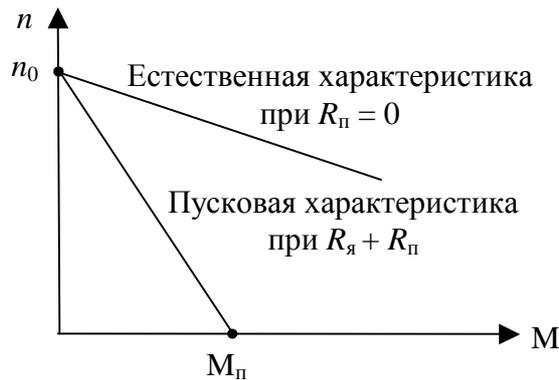


Рис. 3.7

В начальный момент пуска (при $n = 0$) механическая характеристика будет иметь вид (рис. 3.7). По окончании разгона двигателя пусковой реостат должен быть полностью выведен, а с помощью реостата $R_{\text{в}}$ устанавливается нужная частота вращения в соответствии с $n = (U - R_{\text{я}}I_{\text{я}})/C_{\text{е}}\Phi$, где $\Phi \equiv I_{\text{в}}$.

Величина тока двигателя $I_{\text{н}}$ в рабочем режиме зависит от нагрузки на валу

$$I_{\text{н}} = (M_{\text{с}}/M_{\text{ном}})I_{\text{я ном}} + I_{\text{в ном}}.$$

3.8. Изменение направления вращения двигателя постоянного тока (реверс)

В соответствии с уравнением вращающего момента $M = C_{\text{м}}I_{\text{я}}\Phi$ знак момента зависит от знаков тока якоря $I_{\text{я}}$ и магнитного потока Φ (тока возбуждения). Поэтому для осуществления реверса достаточно изменить направление тока в одной из обмоток двигателя, либо якоря, либо обмотки возбуждения.

3.9 Способы регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока

В соответствии с уравнением частоты вращения двигателя постоянного тока $n = (U - R_{я}I_{я})/C_e\Phi$ регулирование его частоты вращения можно производить тремя способами: изменением сопротивления цепи якоря $R_{я}$, напряжения на якоре U и магнитного потока Φ .

При регулировании частоты вращения изменением сопротивления цепи якоря последовательно с обмоткой якоря включается регулировочный реостат $R_{ря}$ (пусковым реостатом для этой цепи пользоваться нельзя, т. к. он рассчитан только на кратковременное включение). При этом ток якоря уменьшается, уменьшается вращающий момент и скорость снижается. Это вызывает уменьшение ЭДС обмотки якоря, ток якоря и вращающий момент двигателя восстанавливаются, пока не наступит равенство $M_{дв} = M_c$, но уже при меньшей скорости. Это наглядно иллюстрируется на искусственных механических характеристиках (рис. 3.8), жесткость которых снижается.

Таким образом, реостатное регулирование позволяет изменить скорость двигателя только в сторону уменьшения. При этом уменьшается коэффициент полезного действия двигателя $\eta \equiv n$ за счет потери энергии на нагрев регулировочного реостата $\Delta P_{ря} = R_{ря} I_{я}^2$. Поэтому в машинах

большой мощности этот способ не применяется.



Рис. 3.8

При регулировании изменением напряжения на обмотке якоря скорость двигателя также будет уменьшаться, т. к. при уменьшении напряжения уменьшается ток якоря, снижается вращающий момент,

скорость, а значит и ЭДС уменьшается. Ток якоря и вращающий момент восстанавливаются, пока не наступит равенство $M_{дв} = M_c$, но уже при меньшей скорости (рис. 3.9).

Жесткость механических характеристик остается прежней.

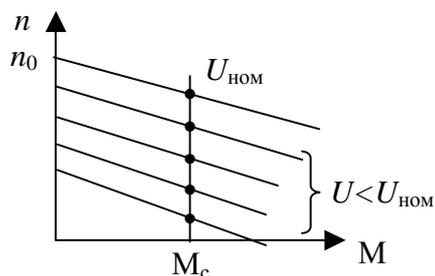


Рис. 3.9

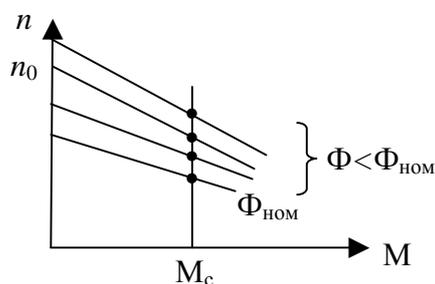


Рис. 3.10

При регулировании изменением магнитного потока скорость двигателя можно изменить в сторону увеличения, т. к. уменьшение магнитного потока сопровождается увеличением тока якоря гораздо в большей мере, чем уменьшение магнитного потока, в результате вращающий момент двигателя возрастает, растет скорость и ЭДС, ток якоря начинает снижаться, пока не наступит равенство $M_{дв} = M_c$, но уже при большей скорости (рис. 3.10).

Жесткость механических характеристик при уменьшении магнитного потока несколько снижается.

Например, необходимо построить искусственную механическую характеристику при снижении магнитного потока для увеличения частоты вращения в k раз ($k > 1$), не снижая нагрузки на валу ДПТ параллельного возбуждения, т. е.

$$n' = kn_{ном}, M_c = M_{ном}.$$

Уравнение механической характеристики с коэффициентом k_Φ ослабления магнитного потока, имеет вид

$$kn_{\text{НОМ}} = U_{\text{НОМ}}/C_e k_{\phi} \Phi - M_{\text{НОМ}} R_{\text{я}}/C_M C_e k_{\phi}^2 \Phi^2.$$

где $C_M = C_e/0,105$; $C_e \Phi = E/n_{\text{НОМ}}$.

Решив это квадратичное уравнение относительно k_{ϕ} , можно определить частоту вращения ДПТ на х. х. при ослабленном потоке возбуждения $n'_0 = n_0/k_{\phi}$ и построить характеристику $n' = f(M')$ по двум точкам: n'_0 и $M = 0$; $kn_{\text{НОМ}}$ и $M_{\text{НОМ}}$.

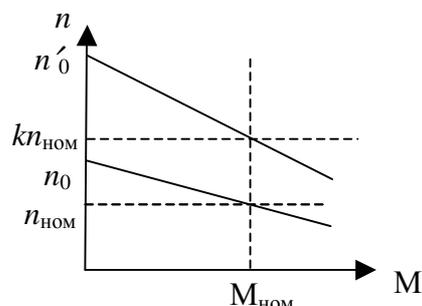


Рис. 3.11

Жесткость механической характеристики при этом несколько снижается.

Регулировать частоту вращения ДПТ можно введением последовательно включенного в цепь обмотки якоря добавочного сопротивления R_g . Для ДПТ с параллельным возбуждением величину R_g можно определить, решая уравнение

$$kn_{\text{ii}} = \frac{U_{\text{ii}}}{C_e \hat{\Omega}} - \dot{I} \frac{10,5(R_{\text{я}} + R_g)}{C_e^2 \hat{\Omega}^2},$$

$$kn_{\text{ii}} = U_{\text{ii}} / C_e \hat{\Omega} - 10,5 \cdot \dot{I} \cdot (R_{\text{я}} + R_g) / (C_e^2 \hat{\Omega}^2),$$

где $k < 1$ – коэффициент снижения частоты вращения ДПТ при неизменном моменте $M = M_{\text{НОМ}}$.

Контрольное задание 3

По паспортным данным двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением и напряжением питания $U_{\text{НОМ}}$ (таблица): 1) определить потребляемую мощность и полные потери в двигателе при номинальной нагрузке; 2) определить номинальный ток двигателя $I_{\text{НОМ}}$ и номинальный момент вращения $M_{\text{НОМ}}$; 3) рассчитать и построить естественную механическую характеристику $n = f(M)$ и зависимость $I_{\text{H}} = f(M)$ в пределах изменения нагрузки двигателя от

идеального холостого хода до $2 M_{\text{ном}}$; 4) рассчитать сопротивление пускового реостата $R_{\text{п}}$, который ограничивает ток якоря до значения $I_{\text{яп}} = 2 I_{\text{я ном}}$, и построить искусственную (реостатную) механическую характеристику при пуске с реостатом; 5) рассчитать и построить искусственную механическую характеристику при ослабленном магнитном потоке возбуждения, когда при номинальном моменте нагрузки двигатель должен развивать частоту вращения $n_{\text{и}} = 1,4n_{\text{ном}}$; 6) рассчитать величину добавочного сопротивления, необходимого для снижения частоты вращения до $0,6 n_{\text{ном}}$; 7) рассчитать и сравнить жесткость (т. е. изменение частоты вращения при изменении момента нагрузки) естественной $\lambda_{\text{е}}$ и искусственной $\lambda_{\text{и}}$ механических характеристик.

Таблица

№ в-та	$U_{\text{ном}}$, кВт	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, %	$R_{\text{я}}$, Ом	$R_{\text{в}}$, Ом
1	2	3	4	5	6	7
0	220	3	1600	75,5	0,365	117
1	110	4	1500	77,5	0,14	134
2	220	4	1500	79	0,564	111
3	440	4	1500	79	2,28	111
4	110	7	2200	81	0,067	111
5	220	7	2240	83	0,226	111
6	440	7	2240	83	0,906	111
7	220	10,5	3000	84	0,14	111
8	440	10,5	3000	85	0,564	111
9	110	7,5	1600	83	0,037	82
10	220	7,5	1500	83	0,183	82
11	440	7,5	1500	84	0,732	82
12	220	13	2120	85,5	0,081	61,5

Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6	7
13	440	13	2360	86,5	0,279	61,5
14	220	18	3150	87	0,037	53,1
15	440	18	3150	87,5	0,145	53,1
16	110	8	1000	81,5	0,058	98
17	20	8	1060	83	0,181	98
18	440	8	1000	82	0,902	74,8
19	220	15	1500	85,5	0,084	55,5
20	440	15	1500	86	0,338	55,5
21	220	15	2240	88	0,038	49,2
22	440	26	2240	89	0,15	49,2
23	220	26	3000	89,5	0,022	55,5

24	440	37	3150	79,5	0,084	64
25	110	8,5	800	81	0,047	61,6
26	220	8,5	800	82	0,188	61,6
27	440	8,5	800	82	0,796	61,6
28	110	13	1120	84	0,026	61,6
29	220	13	1120	85	0,106	61,6
30	440	13	1000	84,5	0,485	61,6
31	220	22	1500	87,5	0,047	53
32	440	22	1500	87,5	0,246	61
33	220	36	2200	89,5	0,026	46
34	440	60	3150	90,5	0,047	35
35	220	7,5	1500	77	0,35	82,4
36	220	11	600	79,5	0,202	82,4
37	220	15	750	80,5	0,146	62,2
38	220	22	1000	82	0,086	62,2
39	220	37	1500	86,5	0,036	62,2
40	440	37	1500	86,5	0,168	62,2
41	220	15	530	80	0,142	37,9
42	220	18	630	80,5	0,11	37,9
43	440	18	600	80,5	0,57	37,9
44	220	22	750	81,0	0,074	37,9
45	440	22	850	81	0,235	28,7
46	220	37	1060	85	0,035	28,7
47	440	37	1060	85	0,152	28,7
48	440	50	1500	87	0,11	29,8
49	220	55	1500	87	0,018	26,8

Все механические характеристики построить в одной системе координат. Начертить схему включения двигателя с пусковым реостатом.

4. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

4.1. Устройство и типы синхронных машин

Синхронные машины состоят из двух основных частей: неподвижного статора (якоря) и вращающегося ротора (индуктора). Статор 3-фазной синхронной машины идентичен статору 3-фазного асинхронного двигателя (рис. 4.1).

Он состоит из корпуса 1, магнитопровода 2 и 3-фазной обмотки 3. Магнитопровод имеет форму пустотелого цилиндра и собран из отдельных покрытых лаком пластин из электротехнической стали. На внутренней цилиндрической поверхности имеются продольные пазы, в которые уложена 3-фазная обмотка. Секции *A*, *B*, *C* обмотки смещены друг относительно друга на электрический угол 120° . Ротор синхронной машины состоит из магнитопровода 4 и обмотки возбуждения 5 (рис. 4.1 *a*, *б*), в которую подается постоянный ток.

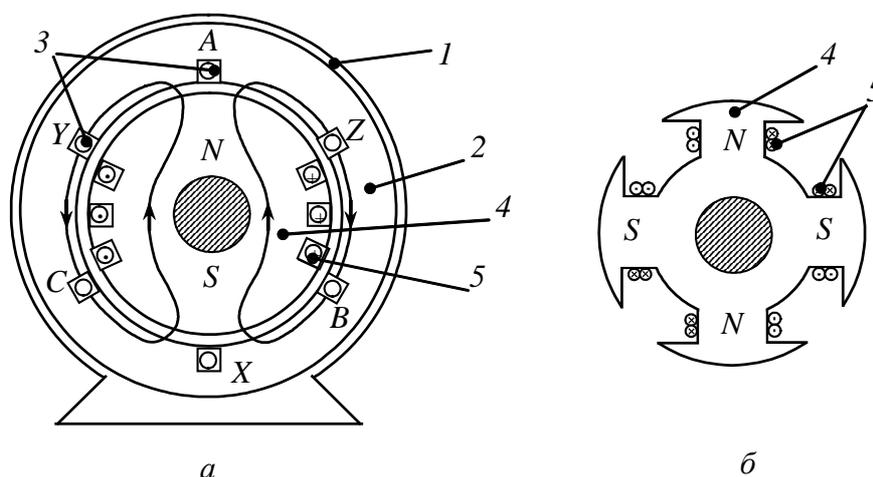


Рис. 4.1

По конструкции ротор бывает неявнополюсным (рис. 4.1, *a*) и явнополюсным (рис. 4.1, *б*).

Неявнополюсная конструкция обладает большей механической прочностью и по этой причине используется в быстроходных машинах, работающих на частоте вращения 3000, 1500 и 1000 об/мин. При меньших частотах вращения применяются явнополюсные роторы, число полюсов которых тем больше, чем ниже частота вращения.

Обмотка ротора, которую называют обмоткой возбуждения, подключена к двум смонтированным на валу и изолированным от вала

контактным кольцам. К кольцам примыкают подпружиненные щетки, через которые от генератора постоянного напряжения (возбудителя) в обмотку возбуждения подается постоянный ток возбуждения I_B .

Электрическая схема синхронной машины показана на рис. 4.2.

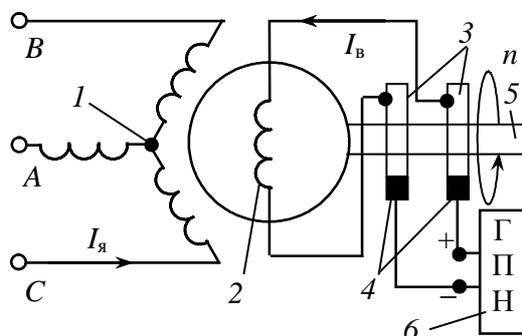


Рис. 4.2

Она состоит из: 1 – трехфазная обмотка якоря (статора); 2 – обмотка возбуждения; 3 – контактные кольца; 4 – щетки; 5 – вал ротора; 6 – генератор постоянного напряжения.

4.2. Синхронный генератор

Ротор генератора приводится во вращение с постоянной частотой n от приводного двигателя, в качестве которого может выступать паровая или газовая турбина, двигатель внутреннего сгорания или электрический двигатель. Если в обмотку ротора подается ток возбуждения, то вместе с ротором вращается магнитное поле возбуждения, которое согласно закону электромагнитной индукции наводит в неподвижной обмотке якоря (статора) 3-фазную синусоидальную ЭДС с действующим значением E_0 :

$$E_0 = 4,44 k_{об} f W \phi_{мв},$$

где $k_{об}$ – обмоточный коэффициент якоря; $f = pn/60$ – частота синусоидальных ЭДС (якоря); p – число пар полюсов; W – число витков одной фазы обмотки якоря; $\phi_{мв}$ – амплитуда потока возбуждения.

При небольших токах возбуждения магнитная система машины не насыщена и характеристика $x. х. E_0 = f(I_B)$ близка к линейной, а в номинальном режиме рабочая точка соответствует «колену» характеристики намагничивания. Если генератор нагружен, т. е. к зажимам A, B, C якоря подключена симметричная электрическая

нагрузка, то протекающие по обмотке якоря токи $I_{я}$ создают собственное вращающееся с частотой n ротора магнитное поле якоря.

В результате взаимодействия полей ротора и якоря создается результирующий вращающийся поток машины Φ (на рис. 4.3, *а* показано условное изображение южного полюса S этого потока). Влияние поля якоря на результирующее поле машины называют реакцией якоря.

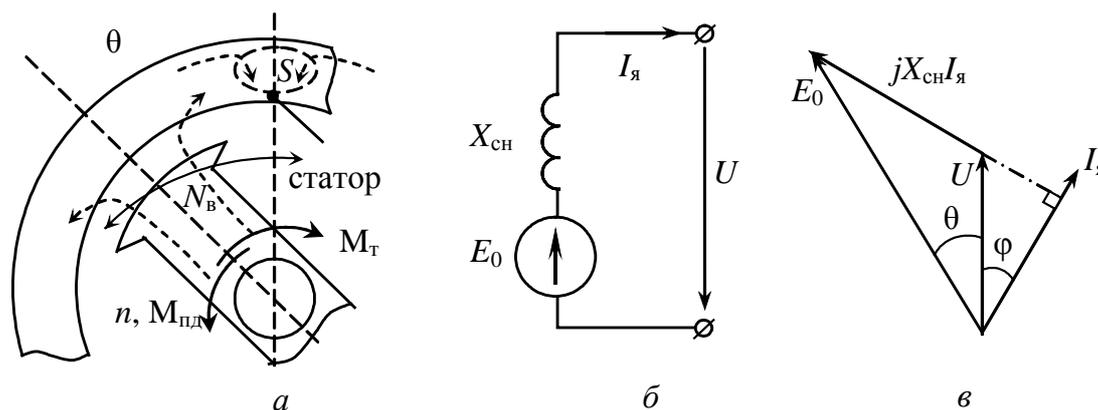


Рис. 4.3

Оси потока возбуждения смещены на некоторый угол θ (зависящий от мощности генератора), причем в режиме генератора ось результирующего потока отстает от оси потока возбуждения. Поле ротора как бы тянет за собой поле якоря, при этом на валу ротора создается тормозной момент M_T , направленный против вращающего момента $M_{пд}$ приводного двигателя.

Если пренебречь активным сопротивлением обмоток якоря и потоком рассеяния якоря, то схема замещения одной фазы якоря примет вид, показанный на рис. 4.3, б, где $X_{сн}$ – синхронное индуктивное сопротивление фазовой обмотки якоря, учитывающее ЭДС самоиндукции, наводимую в обмотке вращающимся полем якоря. Для фазной обмотки якоря на рис. 4.3, б уравнение баланса напряжений имеет вид

$$E_0 = U + jX_{сн} \cdot I_{я},$$

где U – фазное напряжение якоря.

Если к напряжению U подключается активно-индуктивная нагрузка, например асинхронный двигатель, то ток $I_{я}$ якоря отстает на

угол φ от напряжения U и векторная диаграмма принимает вид, показанный на рис. 4.3, в. Индуктивное напряжение $jX_{\text{ин}} \cdot I_{\text{я}}$ опережает ток $I_{\text{я}}$ на угол 90° . Угол θ между векторами E_0 и U равен углу между осями потоков $\Phi_{\text{в}}$ и Φ (рис. 4.3, в) и называется углом рассогласования нагрузки.

Зависимость $U = f(I_{\text{я}})$ называют внешней характеристикой генератора. Она снимается при $n, I_{\text{в}}, \cos \varphi = \text{const}$ и значительно зависит от величины нагрузки и ее характера. При активной и активно-индуктивной нагрузке с ростом тока нагрузки $I_{\text{я}}$ напряжение U существенно снижается. На практике в этих случаях напряжение U поддерживают путем увеличения тока возбуждения.

4.3. Принцип работы и способы пуска синхронного двигателя

В режиме двигателя статор машины подключается к 3-фазной сети, а в обмотку возбуждения через щетки и кольца подается постоянный ток возбуждения. Как и в асинхронном двигателе, токи обмоток якоря создают вращающееся магнитное поле якоря, а ток возбуждения – неподвижный относительно ротора поток возбуждения.

Рассмотрим работу синхронного двигателя (СД), начиная с момента пуска. Пусть одновременно подается питание в обмотки якоря и обмотку возбуждения. Так как у поля якоря момент инерции отсутствует, то 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 два способа. Ротор СД приводят во вращение дополнительным разгонным двигателем и подают постоянный ток в обмотку возбуждения обмотка якоря остается при этом отключенной от сети. Созданный ротором постоянный магнитный поток, вращающийся вместе с ротором, пересекает витки обмотки якоря и создает в ней 3-фазную ЭДС. Для включения обмотки статора в сеть нужно выполнить три условия синхронизации.

1. Уравнять величины 3-фазной ЭДС якоря и ЭДС сети с помощью регулирования тока возбуждения. На практике подгоняется

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, A, B, C сети и A, B, C якоря). Для успешной синхронизации применяют синхроскопы.

При выполнении этих трех условий синхронизации якорь СД может быть включен в сеть.

Если не будет выполнено хотя бы одно из условий, возникнет при включении разность ЭДС, под действием которой в обмотке статора начнет протекать уравнивающий ток, превышающий в несколько раз номинальное значение. Уравнивающий ток вызывает электродинамический удар, способный разрушить ротор СД. При способе асинхронного пуска ротор содержит короткозамкнутую дополнительную пусковую обмотку из медных или латунных стержней. Асинхронный пуск состоит из следующих действий. Вначале обесточенная обмотка возбуждения замыкается на реостат $R_{\text{п}} \approx 10 R_{\text{в}}$, где $R_{\text{в}}$ – сопротивление обмотки возбуждения. Цель подключения $R_{\text{п}}$ – избежать при пуске наведения в обмотке возбуждения значительной ЭДС, опасной для изоляции обмотки. Затем обмотка якоря подключается к 3-фазной сети, в результате чего за счет короткозамкнутой обмотки ротора двигатель разгоняется как асинхронный. При достижении частоты вращения ротора не менее 95% от синхронной частоты вращения поля обмотку возбуждения отключают от $R_{\text{п}}$ и подключают к источнику с напряжением $U_{\text{в}}$ (возбудителю). Так как частота вращения поля ротора близка к частоте поля якоря, то наблюдается электромагнитное сцепление полей ротора и якоря (двигатель втягивается в синхронизм и начиная с этого момента работает как синхронный). В машинах большой мощности возможен электродинамический удар, поэтому применяют два способа одновременно.

4.4. Электромагнитный момент синхронного двигателя. Угловая и механическая характеристики

Анализ работы синхронного двигателя проведем, пренебрегая потерями в обмотках якоря и в стали, а также считая, что магнитная цепь машины не насыщена.

В двигательном режиме ток якоря $I_{\text{я}}$ потребляется из сети и ЭДС E_0 направлены навстречу току $I_{\text{я}}$ (противоЭДС E_0). Схема замещения фазной обмотки якоря показана на рис. 4.4, а и для нее справедливо уравнение

$$U = E_0 + jX_{\text{сн}} I_{\text{я}},$$

где все величины имеют тот же смысл, что и ранее при анализе генератора.

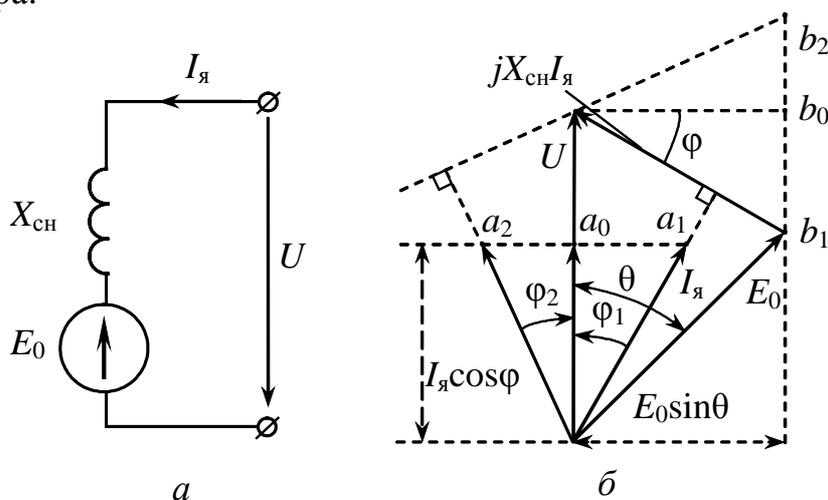


Рис. 4.4

В двигательном режиме ось поля ротора отстает на угол нагрузки θ от оси поля якоря (рис. 4.4, б). Аналогично противоЭДС E_0 отстает по фазе на угол θ от напряжения якоря U (рис. 4.4, б). Если пренебречь потерями, то можно приближенно считать, что механическая мощность $P_{\text{мех}}$ на валу двигателя равна активной мощности P , потребляемой двигателем из сети, т. е.

$$M\omega = 3UI_{\text{я}} \cos \varphi,$$

где M – вращающий электромагнитный момент двигателя; $\omega = \pi n / 30$ – угловая частота; U – фазное напряжение.

Поскольку проекции вектора E_0 и вектора $jx_{\text{сн}} I_{\text{я}}$ на горизонтальную ось одинаковы, т. е. $x_{\text{сн}} I_{\text{я}} \cos \varphi = E_0 \sin \theta$, то для момента M получим выражение

$$M = \frac{3UE_0}{\omega \cdot x_{\text{ин}}} \sin \theta.$$

Зависимость $M = f(\theta)$ при $U = \text{const}$ называют угловой характеристикой машины.

Угловая характеристика (рис. 4.5, а) устойчива только в диапазоне $-90^\circ < \theta < 90^\circ$, причем, как ранее отмечалось, 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 окажется 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 $\theta_{\text{ном}} = 25^\circ\text{--}30^\circ$, что обеспечивает запас по моменту $K_M = M_{\text{max}}/M_{\text{ном}} = (2\text{--}2,4)$.

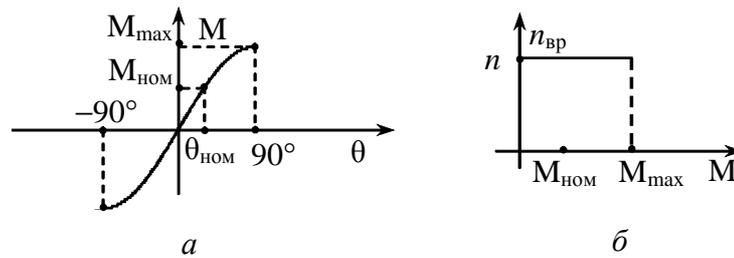


Рис. 4.5

Механическая характеристика $M = f(n)$ синхронного двигателя (рис. 4.5, 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 .

4.5. Регулирование коэффициента мощности синхронного двигателя

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

Пусть двигатель работает с неизменной механической нагрузкой на валу, т. е. $M_c = \text{const}$ при $U = \text{const}$. Если изменять ток возбуждения I_B , то будет изменяться противоЭДС E_0 и ток якоря $I_я$, однако вращающий момент M и активная мощность двигателя в

установившемся режиме останутся неизменными. Пусть $I_B > I_{B \text{ ном}}$. Такой режим называют режимом перевозбуждения. В режиме перевозбуждения ток якоря опережает по фазе напряжение U на угол φ_2 , $\varphi_2 < 0$. Это означает, что двигатель в перевозбужденном режиме представляет для сети активно-емкостную нагрузку и отдает в сеть отрицательную реактивную мощность $Q = UI_y \sin \varphi_2 < 0$. Эта отрицательная мощность может использоваться для компенсации индуктивной мощности других потребителей в сети (например, асинхронных двигателей).

В итоге можно значительно повысить суммарный коэффициент мощности всех потребителей. Изменяя ток I_B , можно получить зависимости $I_y = f(I_B)$ для разных значений M_c . Эти зависимости называют V-образными характеристиками (рис. 4.6).

Сделаем некоторые выводы по V-образным характеристикам. При значительных токах $I_B > I_{B \text{ ном}}$ рост тока якоря замедляется в связи с насыщением магнитной цепи. Пунктирная линия $\cos \varphi = 1$ показывает, что с ростом момента сопротивления M_c для сохранения номинального режима нужно увеличивать ток возбуждения.

Чем меньше ток I_B в режиме недовозбуждения, тем ближе двигатель к границе устойчивости (выпадение из синхронизма).

Отметим, что режим перевозбуждения выгоден и тем, что увеличивает запас k_M по моменту, так как уменьшается угол нагрузки θ .

Поскольку в режиме перевозбуждения рост I_B ведет к росту I_y , то при номинальной нагрузке двигателя ($M_c = M_{\text{ном}}$) возможность введения перевозбуждения ограничена, т. к. приводит к перегреву обмоток двигателя. Чтобы увеличить резерв перевозбуждения, нужно снижать M_c . В наибольшей мере эта возможность реализована в синхронных компенсаторах.

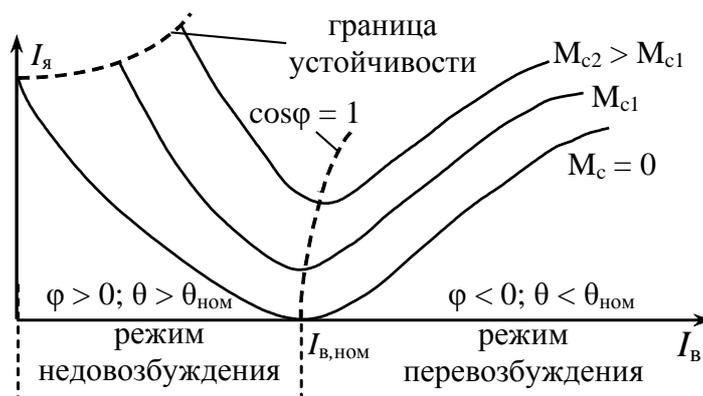


Рис. 4.6

Синхронный компенсатор – синхронная машина облегченной конструкции, работающая без нагрузки на валу в перевозбужденном режиме. По отношению к сети он практически эквивалентен конденсатору и используется для повышения коэффициента мощности за счет компенсации индуктивной мощности асинхронных двигателей.

4.6. Достоинства и недостатки синхронных двигателей

Если сравнивать синхронные двигатели с асинхронными, то можно отметить следующие особенности.

Достоинства:

- 1) синхронные двигатели могут работать с высоким, близким к единице, коэффициентом мощности;
- 2) в режиме перевозбуждения имеется возможность увеличить $\cos \varphi$ сети;
- 3) КПД выше примерно на 1,5%, (96–98%);
- 4) за счет изменения I_b можно регулировать перегрузочную способность двигателя;
- 5) абсолютно жесткая механическая характеристика;
- б) меньшая зависимость вращающего момента от колебаний напряжения сети (в первой степени, а у асинхронных двигателей – во второй).

Недостатки:

- 1) сложнее по конструкции и, следовательно, дороже;
- 2) необходимо наличие источника постоянного тока (возбудитель или выпрямитель);
- 3) пуск сложнее и требуется специальная аппаратура синхронизации;
- 4) возможно только частотное регулирование частоты вращения.

В промышленности синхронные двигатели обычно применяют при $P \geq 100$ кВт. Широко используются синхронные микродвигатели различной конструкции (гистерезисные, индукторные, шаговые).

5. ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ. АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ

Наибольшее применение в промышленности получили асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором системы «преобразователь частоты – АД». Определение мощности и выбор электродвигателя является наиболее ответственным этапом проектирования электропривода. Применение двигателей повышенной мощности приводит к увеличению затрат, снижению КПД и коэффициента мощности. Если выбран двигатель недостаточной мощности, то возникают перегрузки, ускоренное старение изоляции, понижение надежности и возможность аварии.

Длительное воздействие нагрузки на двигатель ограничивается допустимым нагревом, а кратковременное – перегрузочной способностью, которая определяется как

$$\lambda_m = M_{\max} / M_{\text{ном}},$$

где M_{\max} – максимальный (критический) момент, который способен развивать двигатель хотя бы кратковременно; λ_m – коэффициент перегрузки. В АД M_{\max} зависит от снижения напряжения в квадрате, поэтому допустимый момент равен

$$M_{\max \text{ доп}} = (0,9)^2 M_{\max} = 0,81 M_{\max}. \quad (5.1)$$

Перегрузочная способность АД составляет $\lambda_m = 1,7 \div 2,5$.

Откуда

$$M_{\max \text{ доп}} = (1,38 \div 2,03) M_{\text{ном}}.$$

Электродвигатели выбирают по мощности, частоте вращения, напряжению, току, условиям эксплуатации и монтажа.

Скорость АД ограничивается производственным механизмом, напряжение и ток определяются источником питания и мощностью АД. По условиям эксплуатации АД выпускаются в следующих климатических факторах: (У) – для умеренного климата с максимальной температурой $+40^\circ$, минимальной -45° , средней $+10^\circ$, (УХЛ) – для умеренно-холодного климата: $+40^\circ$, -60° , $+10^\circ$ и т. д.

В зависимости от места размещения АД делятся: 1 – на открытом воздухе; 2 – под навесом; 3 – в закрытом помещении и т. д.

Для обозначения степени защиты от воздействия окружающей среды применяются латинские буквы IP и следующие за ними две цифры, первая цифра – степень защиты от пыли (5), вторая цифра – защита от влаги (3 – защита от дождя).

Исполнение АД по способу монтажа обозначают буквами ИМ и следующие за ними четыре цифры показывают: с лапами, с фланцами, способы монтажа, исполнение конца вала.

В процессе работы потери электроэнергии в двигателе превращаются в теплоту, которая идет на нагрев двигателя. При работе в номинальном режиме температура двигателя не должна превосходить допустимых значений для данного класса изоляции.

Выбор мощности двигателя в продолжительном режиме работы производится по нагрузочным диаграммам рабочего механизма, представляющим зависимости момента сопротивления механизма M_c или мощности P_m от времени t . Почти всегда можно выделить цикл времени $t_{ц}$, через который диаграмма повторяется. Когда известен график переменной нагрузки продолжительного режима для двигателя с мало меняющейся частотой вращения, то при расчете применяют метод эквивалентной мощности, являющейся средней мощностью на валу АД. Расчет ведут по следующей формуле:

$$P_{эк} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n P_i^2 \cdot t_i \right) / t_{\text{ц}}}, \quad (5.2)$$

где P_i – мощность механизма на каждом интервале времени t_i , кВт; t_i – временной интервал i -го участка, с; $t_{ц}$ – время цикла работы, $t_{ц} = t_1 + t_2 + \dots + t_n$, с; n – число интервалов времени в цикле.

Когда нагрузочные диаграммы заданы моментами нагрузки $M = f(t)$, то мощность определяют по эквивалентному моменту:

$$M_{эк} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n M_i^2 \cdot t_i \right) / t_{\text{ц}}}, \quad (5.3)$$

где M_i – момент нагрузки на каждом интервале времени t_i , Н·м.

$$P_{эк} = M_{эк} \cdot n / 9550, \text{ кВт.}$$

Если задан график или таблица тока $I = f(t)$, то определяют эквивалентный ток по формуле

$$I_{эк} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n I_i^2 \cdot t_i \right) / t_{\text{ц}}}, \quad (5.4)$$

где I_i – значение тока на каждом интервале времени t_i , А.

На основании полученной расчетной мощности по данным каталога выбираем короткозамкнутый приводной асинхронный двигатель по выражению

$$P_{\text{эк}} \geq P_{\text{ном}}$$

Если рассчитан эквивалентный ток, то его сравнивают с $I_{\text{ном}}$:

$$I_{\text{эк}} \geq I_{\text{ном}}$$

При таком выборе мощности АД его эквивалентный момент будет всегда выше $M_{\text{ном}}$.

Но в ряде случаев момент нагрузки на отдельных участках может оказаться больше максимально допустимого момента двигателя, который может остановиться. Поэтому после выбора мощности АД необходимо проверить на перегрузочную способность исходя из условия

$$M_{\text{max нагр}} \leq M_{\text{max доп}},$$

где $M_{\text{max доп}}$ – максимально допустимый момент АД с учетом пониженного напряжения сети.

Проверка мощности двигателя по нагреву проводится по методу средних потерь. Для этого определяются номинальные потери $\Delta P_{\text{н}}$ выбранного двигателя, кВт:

$$\Delta P_{\text{н}} = P_{\text{н}}(1 - \eta_{\text{н}})/\eta_{\text{н}}, \quad (5.5)$$

где $\eta_{\text{н}}$ – номинальный КПД двигателя.

Затем определяются потери в двигателе ΔP_i при нагрузках, заданных на интервалах времени P_i :

$$\Delta P_i = P_i(1 - \eta_i)/\eta_i, \quad (5.6)$$

где η_i – КПД двигателя, соответствующий мощности P_i и зависящий от коэффициента загрузки АД, т. е. $k_3 = P_i/P_{\text{н}}$.

Упрощенно η_i можно определить из выражения

$$\eta_i = k_3 \cdot \eta_{\text{н}}. \quad (5.7)$$

Тогда средние потери равны

$$\Delta P_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^n \Delta P_i \cdot t_i/t_{\text{ц}}, \quad (5.8)$$

Проверяется условие равенства средних и номинальных потерь. При их расхождении более чем на 10% выбирают АД другой мощности и повторяют расчет, т. е.

$$0,9 \Delta P_{\text{ср}} \leq \Delta P_{\text{н}} \leq 1,1 \Delta P_{\text{ср}}$$

Выбранный двигатель может использоваться для работы в кратковременном режиме (после кратковременной работы двигатель отключается и остывает до температуры окружающей среды). За счет непродолжительного времени включения через двигатель можно пропустить больший ток по условиям допустимого нагрева за счет довольно значительной постоянной времени нагрева АД $T_{\text{н}}$. Это

значит, что при кратковременном включении двигатель может развить мощность $P_{кр}$ большую, чем в продолжительном режиме на величину коэффициента механической перегрузки:

$$k_M = P_{кр}/P_{ном},$$

$$k_M = \sqrt{1/(1 - e^{-t_{кр}/T_{i.н0}})}, \quad (5.9)$$

где $t_{кр}$ – время кратковременного включения АД, установленное для этого режима по стандарту $t_{кр} = 10; 30; 60; 90$ мин.

Принимая приближенно для учебных расчетов $T_{н.ср} = 100$ мин для АД средней мощности, можно рассчитать кратковременную мощность, развиваемую АД, для одного из выбранных значений времени $t_{кр}$, причем нужно определить такое $t_{кр}$, при котором

$$P_{ном} = P_{кр}/\lambda_m. \quad (5.10)$$

Повторно-кратковременный режим характеризуется частыми включениями и отключениями АД с особой периодичностью. Выбор двигателя для этого режима производится по средней мощности, определенной из нагрузочной диаграммы:

$$P_{ср} = \sum_{i=1}^n P_i \cdot t_i/t_{ц}, \text{ кВт.} \quad (5.11)$$

Предварительно подбирается из каталога двигатель с $P_{ном}$ по выражению

$$P_n = (1,2 \div 1,3)P_{ср}.$$

Определяют эквивалентную мощность $P_{эк} (M_{эк}, I_{эк})$.

Эквивалентную мощность (момент, ток) пересчитывают для большего стандартного ближайшего значения $ПВ_{ном}$:

$$P = P_{эк} \cdot \sqrt{\hat{I} \hat{A}/\hat{I} \hat{A}_{\hat{I}\hat{I}}}; \quad (5.12)$$

$$M = M_{эк} \cdot \sqrt{\hat{I} \hat{A}/\hat{I} \hat{A}_{\hat{I}\hat{I}}}; \quad (5.13)$$

$$I = I_{эк} \cdot \sqrt{\hat{I} \hat{A}/\hat{I} \hat{A}_{\hat{I}\hat{I}}}, \quad (5.14)$$

где $ПВ_{ном}$ – номинальное значение продолжительности включения, по стандарту принято 15, 25, 40, 60 и 100%, указывается в паспорте двигателя; $ПВ$ – продолжительность включения, рассчитанная для каждого варианта задачи по формуле

$$ПВ = t_p/t_{ц} \cdot 100\%,$$

где t_p – время работы АД, с.

По каталогу выбирают двигатель с $P_{ном}$ при $ПВ_{ном}$ так, чтобы

$P_{\text{ном}} \geq P$, и проверяют по перегрузочной способности.

Выбранный двигатель следует проверить по пусковому моменту, т. е. пусковой момент двигателя $M_{\text{пуск}}$ должен быть больше максимального статического момента сопротивления нагрузки:

$$\begin{aligned} M_{\text{пуск}} &\geq M_{\text{с max}} = 9550 \cdot P_{\text{max}}/n_{\text{ном}}, \\ M_{\text{пуск}} &= M_{\text{ном}} \cdot \lambda_n, \end{aligned} \quad (5.15)$$

где n_n – номинальная частота вращения двигателя, об/мин; λ_n – кратность пускового момента двигателя (выбирается по каталогу).

Если $M_{\text{пуск}}$ двигателя окажется меньше $M_{\text{с.max}}$, то двигатель не начнет вращаться, значит надо выбрать более мощный АД.

Обозначение типа двигателя расширявается следующим образом:

- 4, 5, 6, *R* – порядковый номер серии (*R* – российский);
- A* – род двигателя (асинхронный с короткозамкнутым ротором);
- АН, АНК – асинхронный с фазным ротором;
- АИР – асинхронный двигатель интерэлектро;
- 250 – три цифры – высота оси вращения, мм;
- L* – длина корпуса, м;
- 1, 2, 3, 4 – число пар полюсов, *p*;
- У – климатическое исполнение;
- 3 – категория размещения.

Наиболее распространенными являются АД серии 4А, 5А, 6А, РА, АИР и др.

Для защиты двигателя от токов перегрузки и короткого замыкания применяются предохранители и автоматические выключатели. Плавкая вставка предохранителя должна выдерживать пусковой ток двигателя, поэтому ток плавления вставки выбирается из условия

$$I_{\text{пл.вст}} \geq \alpha \cdot I_{\text{пуск}}; \quad I_{\text{пуск}} = i_{\text{п}} \cdot I_{\text{ном}},$$

где $i_{\text{п}}$ – кратность пускового тока по каталогу; α – коэффициент, зависящий от длительности пуска, если время пуска $t_{\text{пуск}} \leq 1,5-2$ с, то $\alpha = 2,5$.

Полагая напряжение сети известным, можно определить номинальный ток двигателя:

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ííí}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ííí}} \cdot \eta_{\text{ííí}} \cdot \cos \varphi_{\text{ííí}}}, \text{ A}, \quad (5.16)$$

где $P_{\text{ном}}$, $\eta_{\text{ном}}$, $\cos \varphi_{\text{ном}}$ выбираются из каталога.

Наиболее распространенными являются предохранители типов ПР-2, ПН-2, НПН.

Сечение провода или кабеля для питания АД выбирается по условию допустимого нагрева:

$$I_{\text{доп}} \geq I_p,$$

где $I_{\text{доп}}$ – ток, допустимый для данного сечения провода по условию нагрева, каталожная величина; I_p – расчетный ток линии, для двигателя можно принять равным номинальному току.

Выбранное сечение должно быть проверено на соответствие току защиты аппаратов от коротких замыканий:

$$I_{\text{доп}} \geq k_3 \cdot I_{\text{пл.вст}},$$

где k_3 – коэффициент защиты, дается в справочниках, для расчетов можно принять $k_3 = 0,33$.

Марка и тип провода или кабеля принимаются в соответствии с условиями среды и прокладки.

Контрольное задание 4

Таблица

№ в-та	Нагрузка $M_c, H \cdot m$	Продолжительность интервала, С	Вид пуска	Количество пар полюсов
1	2	3	4	5
0	68, 50, 12, 0, 100, 60	40, 20, 10, 60, 20, 10	1	2
1	80, 50, 75, 100, 200	10, 20, 40, 60, 10	1	1
2	68, 30, 12, 0, 40, 60	40, 10, 20, 10, 20, 40	2	2
3	120, 80, 60, 40, 80, 100	10, 20, 15, 25, 40, 40	1	2
4	20, 40, 100, 50, 10, 40	10, 10, 20, 10, 25	2	3
5	100, 80, 60, 40, 20, 100, 10	20, 20, 20, 10, 10, 10, 20	1	1
6	140, 160, 200, 240, 100, 120	10, 10, 40, 10, 10, 10, 10	2	2
7	100, 250, 180, 220, 150, 180, 200	40, 40, 10, 10, 30, 30, 40	1	1
8	180, 200, 240, 140, 100, 200	30, 30, 30, 30, 30, 30, 30	2	2
9	120, 40, 80, 50, 100, 110	20, 10, 20, 15, 20, 15	1	1
10	80, 60, 40, 0, 60	10, 40, 15, 25, 10	2	2
11	30, 70, 0, 45, 10, 40, 80	20, 10, 5, 20, 20, 10, 10	2	1
12	40, 0, 35, 80, 100	10, 15, 30, 10, 40	1	2
13	65, 40, 30, 50, 80, 100	30, 100, 100, 40, 40, 10,	2	1
14	30, 40, 10, 15, 25, 10, 35	30, 20, 75, 75, 12, 60, 45	2	2
15	150, 130, 0, 60, 200, 30, 180	4, 2, 40, 7, 3, 15, 5	2	1
16	50, 25, 35, 120, 60, 35, 50	3, 1.5, 2.5, 1, 4, 2.5, 3.5	1	2
17	50, 0, 35, 120, 60, 35, 55	10, 15, 20, 20, 10, 50, 10	1	1
18	60, 150, 90, 50, 25, 90, 40	45, 30, 5, 10, 100, 10	2	2
19	150, 230, 40, 60, 20, 30, 180	60, 10, 20, 30, 15, 60, 30	2	1

20	100,80,250,150,40,130,220	50, 10, 30, 70, 10,75,60	1	2
21	30, 75, 45, 25, 0, 45, 35	3, 1.5, 2.5, 1.4, 2.5, 2	2	1
22	100, 80, 250, 150, 40, 100, 80	36, 40, 10, 12, 16,36,40	1	4
23	100, 250, 150, 0, 80, 150	5, 5, 3, 8, 10, 12, 2	2	4

Окончание таблицы

1	2	3	4	5
24	16, 15, 0, 25, 16, 14, 10	30, 25, 25, 20, 15,15,10	1	1
25	50, 25, 40, 120, 60, 35, 50	10, 12, 12, 15, 15,20,10	1	1
26	100,250,250,130,0,250,100	15, 15, 20, 20, 35,35,10	2	2
27	32, 44, 0, 44, 58, 40, 44	20, 10, 6, 8, 12, 20, 10	1	3
28	140,120,100,150,200,100,140	25, 15, 12, 18, 10,20,15	2	1
29	150,200,180,140,200,160,100	15, 10, 20, 25, 18, 10	2	1
30	100,150,200,150,180,140,120	10, 15, 20, 12, 15,10,10	1	3
31	200,250,180,220,150,180,200	12, 15, 20, 15, 10,18,27	2	4
32	160,200,240,260,150,200,140	15, 20, 25, 15, 10,20,15	1	4
33	100, 80, 60, 40, 20, 10	10, 15, 25, 10, 30, 40	2	1
34	110, 90, 40, 50, 70, 80	20, 10, 15, 25, 10, 10	1	2
35	150, 0, 50, 250, 100, 80	30, 10, 20, 30, 45, 15	2	1
36	75, 10, 60, 40, 0, 15, 20	20, 25, 40, 80, 40,10,20	1	4
37	10, 20, 40, 80, 120, 140, 160	10, 20, 10, 20, 10,20,10	1	2
38	250, 150, 100, 50, 0, 100, 80	20, 10, 15, 10, 20,40,80	2	1
39	95, 120, 30, 80, 70, 40, 100	10, 30, 10, 20, 40,10,20	1	2
40	250, 40, 80, 60, 100, 120, 140	20, 20, 20, 20, 20,20,20	2	1
41	125, 15, 100, 0, 135, 160	10, 40, 20, 30, 40, 60	1	2
42	180, 80, 100, 80, 100, 120	20, 15, 25, 40, 60, 10	2	1
43	25, 0, 20, 80, 30, 160, 180	30, 40, 10, 10, 15,20,10	1	2
44	110, 90, 250, 150, 40, 100	25, 10, 15, 20, 40, 80	2	1
45	40, 80, 100, 120, 140,180,200	10, 40, 20, 10, 20,40,20	1	2
46	250, 100, 200, 160, 40, 100	20, 10, 45, 15,80,100	2	2
47	240, 60, 0, 160, 200, 100	40, 10, 20, 40, 60, 20	1	1
48	100, 80, 60, 40, 20, 10, 40	20, 20, 20, 20, 20,20,20	2	2
49	40, 140, 20, 80, 100, 140	30, 20, 10, 10, 20, 301	1	1

Для заданного в таблице режима нагрузки исполнительного механизма построить нагрузочную диаграмму $M_c = f(t)$, определить режим работы, рассчитать мощность и выбрать тип асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с количеством пар полюсов p , для длительного, повторно-кратковременного и кратковременного режимов работы провести проверку двигателя на перегрузочную способность, расшифровать обозначение типа двигателя, рассчитать и выбрать плавкую вставку предохранителя или тепловой расцепитель автомата, начертить схему магнитного пускателя: 1 –

нереверсивного, 2 – реверсивного и объяснить принцип работы реверсивного МП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электротехника / Под ред. В. Г. Герасимова. – М.: Высш. шк., 1985. – 480 с.
2. Касаткин А. С., Немцов М. В. Электротехника. – М.: Высш. шк., 2000. – 542 с.
3. Иванов И. И., Равдоник В. С. Электротехника. – М.: Высш. шк., 1984. – 375 с.
4. Сборник задач по электротехнике и основам электроники / Под ред. В. Г. Герасимова. – М.: Высш. шк., 1987. – 288 с.
5. Рекус Г. Г., Белоусов А. И. Сборник задач и упражнений по электротехнике и основам электроники. – М.: Высш. шк., 2001. – 416 с.
6. Алиев И. И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию. – Ростов -на-Дону: Феникс, 2003. – 469 с.
7. Рекус Г. Г. Электрооборудование производств: Учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 2005.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Программа раздела «Трансформаторы, электрические машины и электропривод».	4
1. Трансформаторы	6
1.1. Назначение, устройство и принцип работы 1-фазного трансформатора.	6
1.2. Режим и опыт холостого хода трансформатора	7
1.3. Нагрузочный режим трансформатора	9
1.4. Опыт короткого замыкания.	10
1.5. Изменение вторичного напряжения и внешняя характеристика трансформатора.	11
.	
1.6. Потери мощности и КПД трансформатора.	12
1.7. 3-фазный трансформатор.	12
Контрольное задание 1	14
2. Асинхронные двигатели.	16
2.1. Принцип действия и конструкция 3-фазного асинхронного двигателя	16
.	
2.2. Скольжение.	19
2.3. Вращающий момент асинхронного двигателя.	19
2.4. Механические характеристики асинхронного двигателя.	23
Контрольное задание 2	25
3. Машины постоянного тока.	28
3.1. Общие сведения	28
3.2. Устройство машины постоянного тока	28
3.3. Способы возбуждения машин постоянного тока	29
3.4. Принцип действия двигателя постоянного тока. Электромагнитный вращающий момент. ПротивоЭДС обмотки якоря.	30
.	
3.5. Механические характеристики двигателя постоянного тока при различных способах возбуждения.	31
3.6. Потери энергии и КПД машин постоянного тока.	33
3.7. Пуск двигателя постоянного тока.	33
3.8. Изменение направления вращения двигателя	

постоянного тока (реверс)	35
.	
3.9. Способы регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока	35
Контрольное задание 3.	38
4. Синхронные машины	40
4.1. Устройство и типы синхронных машин	40
4.2. Синхронный генератор	41
4.3. Принцип работы и способы пуска синхронного двигателя	43
.	
4.4. Электромагнитный момент синхронного двигателя. Угловая и механическая характеристика	44
4.5. Регулирование коэффициента мощности синхронного двигателя	46
4.6. Достоинства и недостатки синхронных двигателей.	47
5. Выбор Электродвигателей. Аппаратура управления и защиты.	49
Контрольное задание 4.	54
Литература.	56

Учебное издание

**ТРАНСФОРМАТОРЫ, ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ
МАШИНЫ И ЭЛЕКТРОПРИВОД**

Учебно-методическое пособие

Составители: **Горошко** Владимир Иванович
Мороз Валентин Куприянович

Редактор Е. И. Гоман

Подписано в печать 2.06.2006. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 3,4. Уч.-изд. л. 3,5.
Тираж 400 экз. Заказ .

Учреждение образования
«Белорусский государственный технологический университет».
220050. Минск, Свердлова 13а.
ЛИ № 02330/0133255 от 30.04.2004.

Отпечатано в лаборатории полиграфии учреждения образования
«Белорусский государственный технологический университет».
220050. Минск, Свердлова 13.
ЛИ № 02330/0056739 от 22.01.2004.