

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР
МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

193

Кафедра общей электротехники

621.3
3-86

А. Е. ЗОРОХОВИЧ, Ю. И. ЧУВЕРИН, Ю. А. АНДРЕЕВ

Утверждено
редакционно-издательским
советом института

АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Методические указания к лабораторной работе

по дисциплине

«ЭЛЕКТРОТЕХНИКА»

для студентов неэлектротехнических специальностей

Под редакцией д-ра техн. наук, проф. НАГОРСКОГО В. Д.

М.У. Зорохович А.Е. чз.4
№ 193 Асинхронные двигатели
01-50129 185



УЧЕБНАЯ
БЛИОТЕКА
ИИИТ

Москва — 1985

ВВЕДЕНИЕ

Данные указания помогут студентам в проведении лабораторной работы по разделу «Асинхронные электродвигатели» дисциплины «Электротехника». Указания включают в себя лабораторную работу по исследованию асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором. В них приведены также основные теоретические сведения по асинхронным электродвигателям.

1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Принцип действия и устройство

На рис. 1 изображена схема асинхронного двигателя. На статоре машины 1 расположена трехфазная обмотка 2, катушки которой размещены в пазах равномерно по окружности статора. Фазы $A-X$, $B-Y$ и $C-Z$ обмотки статора соединяются в звезду или треугольник и подключаются к сети трехфазного тока. На роторе 3 также имеется обмотка 4, которая при работе электродвигателя замкнута накоротко. Сердечники ротора и статора выполняются из листов электротехнической стали, изолированных друг от друга с целью уменьшения потерь от вихревых токов. В наиболее распространенных электродвигателях с короткозамкнутым ротором (рис. 2, а и б) на роторе расположена короткозамкнутая об-

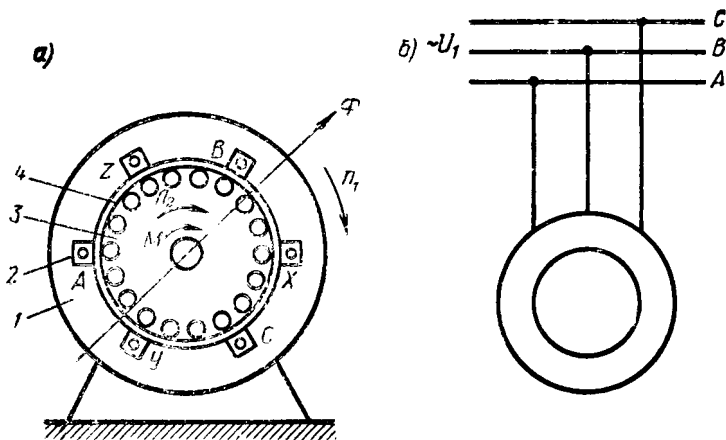


Рис. 1. Схемы асинхронного двигателя: а) — электромагнитная схема; б) — схема включения электродвигателя с короткозамкнутым ротором

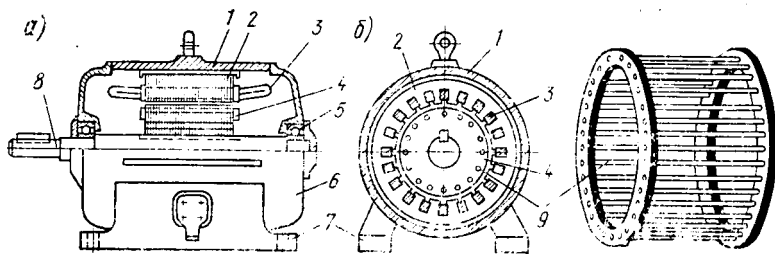


Рис. 2. Асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором: 1 — корпус (станина); 2 — сердечник статора; 3 — обмотка статора; 4 — сердечник ротора; 5 — подшипник; 6 — подшипниковый щит; 7 — лапы для крепления электродвигателя; 8 — вал ротора; 9 — обмотка ротора (беличья клетка).

мотка типа «беличья клетка». Это наиболее простой тип обмотки, который не требует изоляции от сердечника ротора и не имеет никаких выводов.

В двигателях с фазным ротором (рис. 3, а) обмотка ротора трехфазная; от трех ее фаз имеются выводы к трем контактным кольцам, установленным на валу ротора (рис. 3, б). К этим кольцам с помощью трех щеток подключается реостат с целью улучшения условий пуска (увеличения пускового момента и уменьшения пускового тока) и регулирования

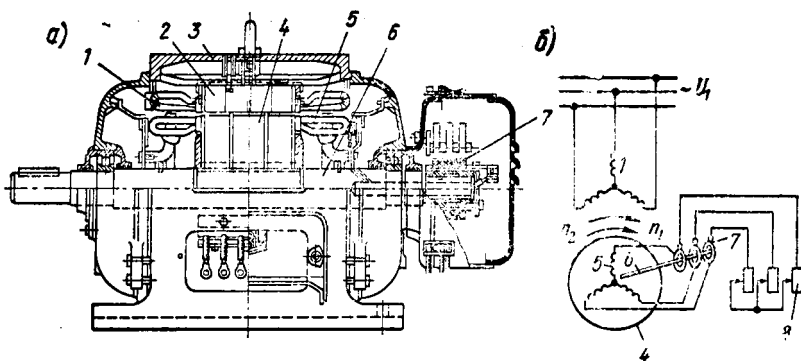


Рис. 3. Асинхронный электродвигатель с фазным ротором: 1 — обмотка статора; 2 — сердечник статора; 3 — корпус (станина); 4 — сердечник ротора; 5 — обмотка ротора; 6 — вал ротора; 7 — контактные кольца; 8 — пусковой реостат

частоты вращения ротора электродвигателя. В некоторых типах двигателей имеется приспособление для подъема щеток и замыкания колец накоротко после выключения реостата.

При питании трехфазным током обмотки статора создается вращающееся магнитное поле, частота вращения которого

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

где f_1 — частота тока в питающей сети;
 p — число пар полюсов.

Вращающийся магнитный поток Φ индуцирует в обмотках статора и ротора переменные ЭДС:

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= 4,44 f_1 W_1 k_{об1} \Phi_m \\ E_2 &= 4,44 f_2 W_2 k_{об2} \Phi_m \end{aligned} \right\}$$

где W_1 и W_2 — числа витков в фазах обмоток и ротора;
 $k_{об1}$, $k_{об2}$ — обмоточные коэффициенты этих обмоток ($k_{об} < 1$);

f_1 и f_2 — частоты переменных токов в обмотках.

Под действием ЭДС E_2 в обмотке ротора возникает ток I_2 , который, взаимодействуя с магнитным полем, образует электромагнитный вращающий момент M .

Величина ЭДС E_2 , индуцированная в обмотке ротора, и ее частота f_2 зависят от частоты пересечения вращающимся полем проводников обмотки ротора, т. е. от разности частот вращения магнитного поля n_1 и ротора n_2 . Чем больше разность $n_1 - n_2$, тем больше ЭДС E_2 и частота f_2 . Следовательно, необходимым условием для возникновения в асинхронной машине электромагнитного вращающего момента является неравенство частот вращения n_1 и n_2 . Только при этом условии в обмотке ротора индуцируется ЭДС E_2 и возникает ток I_2 . По этой причине машина называется асинхронной (ротор ее вращается несинхронно с полем).

Относительная разность частот вращения поля и ротора называется скольжением:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \quad (1)$$

или в %:

$$z = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\%.$$

Частота $f_2 = f_1 \cdot s$.

Частота вращения ротора, выраженная через величину скольжения, согласно формуле (1)

$$n_2 = n_1(1 - s).$$

Она зависит от величины внешнего нагрузочного момента $M_{\text{вн}}$, приложенного к валу ротора.

При работе машины в двигательном режиме, когда к валу ротора приложен тормозной (нагрузочный) момент, ротор будет вращаться с частотой n_2 меньшей n_1 , т. е. с некоторым положительным скольжением, требуемым для создания соответствующего электромагнитного момента M . В общем случае при установившейся частоте вращения ротора скольжение s должно иметь такую величину, чтобы создаваемый двигателем электромагнитный момент M уравновешивал внешний момент нагрузки $M_{\text{вн}}$ и момент $M_{\text{тр}}$, обусловленный трением в машине.

Основное уравнение динамики при работе электродвигателя имеет вид:

$$M - M_{\text{вн}} - M_{\text{тр}} \pm M_{\text{дин}} = 0,$$

где $M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega_2}{dt}$ — динамический момент, возникающий при ускорении (разгоне) и замедлении (торможении) ротора;

J — момент инерции вращающихся масс ротора и приводимого электродвигателем механизма;

$\frac{d\omega_2}{dt}$ — угловое ускорение ротора.

При постоянной частоте вращения ротора указанное уравнение принимает вид:

$$M = M_{\text{вн}} + M_{\text{тр}}.$$

Следовательно, чем больше внешний момент нагрузки $M_{\text{вн}}$, приложенный к валу ротора, тем большим должен быть

электромагнитный момент M и создающий его ток I_2 в обмотке ротора, т. е. тем больше должны быть ЭДС E_2 и скольжение s , и тем меньше — частота вращения ротора n_2 . При отсутствии нагрузки на валу ротора (при холостом ходе) электродвигатель потребляет из сети некоторый ток холостого хода I_0 . Ток I_0 в асинхронном двигателе значительно больше, чем в трансформаторе (составляет 20—40% от номинального тока), так как в магнитной цепи электродвигателя имеется воздушный зазор. При нагрузке ток двигателя I_1 (ток в обмотке статора) возрастает, так как к току холостого хода добавляется ток I_2' , обусловленный возникновением тока I_2 в обмотке ротора.

Если ротор асинхронной машины разогнать каким-либо двигателем до частоты вращения $n_2 > n_1$, то скольжение станет отрицательным, и магнитный поток Φ будет вращаться относительно ротора в направлении, противоположном n_2 . При этом изменяет свое направление электромагнитный момент M , который становится тормозным. В этом случае машина будет работать в генераторном режиме: получать механическую мощность от внешнего двигателя и отдавать электрическую мощность в сеть. Для выработки электрической энергии асинхронные генераторы применяются редко; генераторный режим асинхронной машины используют практически только для целей электрического торможения производственных механизмов.

Таким образом, асинхронная машина имеет следующие особенности:

а) частота вращения n_2 ротора не равна частоте вращения n_1 вращающегося магнитного поля, т. е. машина всегда работает с некоторым скольжением. В двигательном режиме $0 < n_2 < n_1$, что соответствует изменению скольжения в диапазоне $1 > s > 0$, в генераторном режиме $n_2 > n_1$, т. е. $s < 0$;

б) частота тока f_2 в обмотке ротора отличается от частоты тока f_1 в обмотке статора и питающей сети;

в) ЭДС E_2 , индуктируемая в роторе, реактивное сопротивление ротора x_2 , ток ротора I_2 , а также ток статора I_1 зависят от величины скольжения s .

2. Электромагнитный момент асинхронного двигателя

Электромагнитный момент асинхронного двигателя возникает в результате взаимодействия тока ротора с вращающимся магнитным полем:

$$M = c_m \Phi_m I_2 \cos \psi_2 = c_m \Phi_m I_{2a} \cos \psi_2, \quad (2)$$

где c_m — коэффициент, зависящий от конструктивных параметров данной машины: для данной машины $c_m = \text{const}$;

Φ_m — амплитуда магнитного потока;

I_2 — ток ротора;

$I_{2a} = I_2 \cos \psi_2$ — активная составляющая тока ротора;

ψ_2 — угол сдвига фаз между векторами тока ротора I_2 и ЭДС E_2 , индуцируемой в обмотке ротора.

Из данной формулы следует, что электромагнитный момент определяется не самим током ротора, а его активной составляющей. На рис. 4 показаны векторные диаграммы тока I_2 и ЭДС E_2 в фазе для электродвигателя с короткозамкнутым ротором при двух режимах: работе при номинальной нагрузке (рис. 4, а) и в режиме пуска (рис. 4, б). При пуске в ход электродвигателя возникает очень большой ток ротора $I_{2п}$, который в 5—7 раз больше тока $I_{2\text{ном}}$. Но так как при пуске угол $\psi_{2п}$ значительно больше, чем угол ψ_2 при номинальной нагрузке, то электромагнитный момент при пуске $M_{п}$ сравнительно велик и составляет (0,7—1,8) $M_{\text{ном}}$.

Указанная формула (2) с учетом значений тока I_2 и $\cos \psi_2$ может быть преобразована к следующему виду:

$$M = \frac{3 U_1^2 r_2' s}{\omega_1 [(sr_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_{2н}')^2 \cdot s^2]} \quad (3)$$

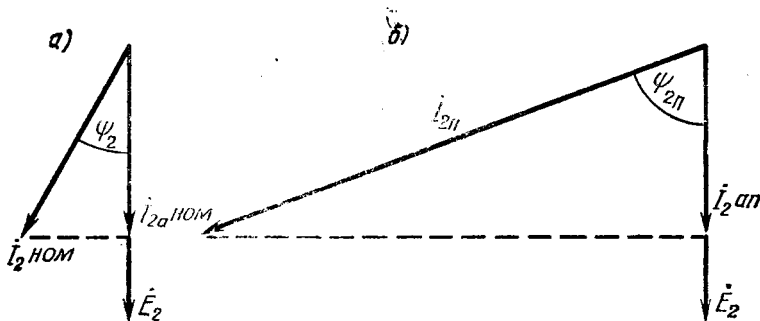


Рис. 4. Векторные диаграммы тока I_2 и ЭДС E_2 : а — при работе с номинальной нагрузкой; б — при пуске

где r_2^1 — активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора;

$\omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p}$ — угловая частота вращения магнитного поля;

$x_{2н}^1$ — реактивное сопротивление ротора (при неподвижном роторе), приведенное к обмотке статора;

r_1 и x_1 — активное и реактивное сопротивление обмотки статора.

В случае электродвигателя с фазным ротором под r_2^1 в данной формуле понимается суммарное активное сопротивление самого ротора и реостата, который вводится в каждую его фазу при пуске или для регулирования частоты вращения.

При пуске в ход электродвигателя, когда $s = 1$, получим формулу для пускового момента (электромагнитного момента в начальный момент пуска):

$$M_{п} = \frac{3 U_1^2 r_2^1}{\omega_1 [(r_1 + r_2^1)^2 + (x_1 + x_{2н}^1)^2]} \quad (4)$$

3. Характеристики электродвигателя

Механическая характеристика — зависимость частоты вращения ротора n_2 от вращающего момента M (рис. 5, а) при неизменных питающем напряжении U_1 и частоте f_1 . Эта ха-

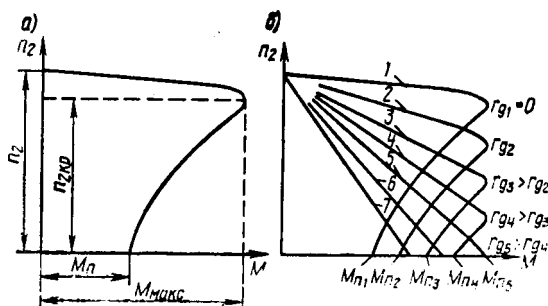


Рис. 5. Механические характеристики асинхронного электродвигателя: а — естественная; б — при различных сопротивлениях в цепи обмотки ротора

характеристика может быть снята экспериментально или же построена по формуле (*) для электромагнитного момента.

На рабочем участке от $M = 0$ до $M_{\text{макс}}$ механическая характеристика асинхронного двигателя жесткая; частота вращения ротора с ростом электромагнитного момента уменьшается мало (см. рис. 5, а). При идеализированных условиях (отсутствие трения) частота вращения ротора в режиме холостого хода равна n_1 ($s = 0$). В действительности частота вращения ротора при холостом ходе n_{20} несколько меньше n_1 . Максимальный электромагнитный момент, который может развивать электродвигатель

$$M_{\text{макс}} \approx \frac{3 U_1^2}{2\sigma_1 (x_1 + x_{2н}^1)} \quad (5)$$

Скольжение, при котором электромагнитный момент достигает максимального значения, называется критическим:

$$s_{\text{кр}} = \frac{r_2^1}{x_1 + x_{2н}^1}$$

Соответствующая ему частота вращения

$$n_{2 \text{ кр}} = n_1 (1 - s_{\text{кр}}).$$

Отношение $M_{\text{макс}} / M_{\text{ном}} = k_m$ называется кратностью максимального момента. Согласно ГОСТам на асинхронные двигатели общепромышленного применения это отношение должно быть не менее 1,7—2. При этом критическое скольжение $s_{\text{кр}} = 0,1 \div 0,2$.

Пусковой момент M_p двигателя с короткозамкнутым ротором или двигателя с фазным ротором при работе без реостата в цепи ротора меньше максимального момента.

Для электродвигателей с короткозамкнутым ротором согласно ГОСТам кратность начального пускового момента $k_m = M_p / M_{\text{ном}}$ должна быть не менее 0,7—1,8. Меньшие значения относятся к двигателям большей мощности. Кратность пускового тока $k_I = I_p / I_{\text{ном}}$ должна быть не больше 5,5—7.

При увеличении активного сопротивления цепи ротора r_2^1 в двигателях с фазным ротором с помощью реостата жесткость механической характеристики уменьшается — она становится более крутопадающей. При этом момент $M_{\text{макс}}$ остается

неизменным, а величина $s_{кр}$ возрастает, поэтому уменьшается частота вращения, при которой электромагнитный момент достигает максимального значения. Следовательно, включая в цепь ротора реостат и изменяя его сопротивление, мы можем получить характеристики (рис. 5, б), каждая из которых соответствует определенному значению r_2^1 .

Характеристика 1, соответствующая активному сопротивлению самого ротора без реостата ($r_{д1} = 0$), называется естественной. Характеристики 2, 3, 4, и 5 — реостатными. При этом характеристика 2 соответствует некоторому сопротивлению реостата $r_{д2}$, характеристика 3 — сопротивлению $r_{д3} > r_{д2}$, характеристика 4 — сопротивлению $r_{д4} > r_{д3}$ и т. д.

Из рассмотрения рис. 5, б видно, что при увеличении r_2^1 (включении реостата с сопротивлением r_d) пусковой момент увеличивается от $M_{п1}$ до $M_{п5}$. При работе электродвигателя по характеристике 5 $M_{п5} = M_{макс}$.

Следовательно, характеристика 5 обеспечивает пуск электродвигателя при максимальном пусковом моменте. Если еще больше увеличивать сопротивление реостата r_d в цепи ротора, то пусковой момент будет уменьшаться (характеристики 6 и 7).

Рабочими характеристиками (рис. 6) называются зависимости частоты вращения n_2 , момента на валу M , тока статора I_1 , коэффициента полезного действия $\eta \cos \varphi_1$ от полезной мощности P_2 при $U_1 = U_{1 ном} = const$ и $i_1 = i_{1 ном} = const$. Они обычно строятся только для зоны практически устойчивой работы электродвигателя, т. е. для скольжения не более 0,1—0,2.

Зависимость $n_2 = f(P_2)$ является практически линейной. Заметим, что при переходе от режима холостого хода к режиму номинальной нагрузки n_2 изменяется незначительно (на 2—8%), так как при проектировании электродвигателя стремятся, чтобы скольжение $s_{ном}$ при номинальной нагрузке двигателя было небольшим. Это делается с целью уменьшения электрических потерь мощности в обмотке ротора, которые пропорциональны скольжению.

Полезный момент на валу $M_в$ связан с полезной мощностью соотношением

$$M_в = \frac{P_2}{\omega_2},$$

где ω_2 — угловая частота вращения ротора.

Поскольку ω_2 изменяется мало, зависимость $M_n = f(P_2)$ близка к линейной. На рис. 6 пунктиром показана также зависимость электромагнитного момента M от мощности P_2 , которая располагается несколько выше зависимости $M_n = f(P_2)$. При $P_2 = 0$ двигатель развивает некоторый момент M_0 , необходимый для компенсации момента трения $M_{тр}$.

Зависимость $I_1 = f(P_2)$ также близка к линейной, так как ток I_1 определяется потребляемой мощностью $P_1 = P_2 + \Delta P$ (где ΔP — суммарные потери мощности в машине). При увеличении P_2 возрастает P_1 и, следовательно, ток

$$I_1 = \frac{P_1}{3U_1 \cos \varphi_1}$$

При $P_2 = 0$ электродвигатель потребляет ток холостого хода I_0 , который для машин мощностью 10 — 100 кВт составляет 20—40% от номинального тока.

Зависимость $\eta = f(P_2)$ имеет вид, общий для всех электрических машин и трансформаторов. КПД асинхронного двигателя может быть выражен формулой:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{эл.1} + \Delta P_{эл.2} + \Delta P_{магн} + \Delta P_{тр}}$$

где $\Delta P_{эл.1}$ и $\Delta P_{эл.2}$ — электрические потери в обмотках статора и ротора;

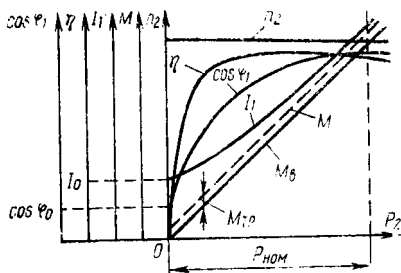


Рис. 6. Рабочие характеристики

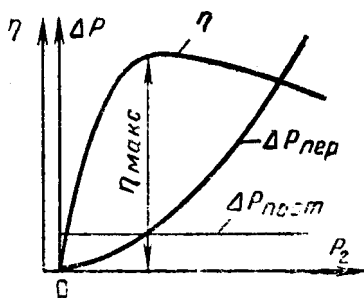


Рис. 7. Графики изменения КПД, потерь мощности $\Delta P_{пер}$ и $\Delta P_{пост}$ в зависимости от полезной мощности P_2

$\Delta P_{\text{магн}}$ — магнитные потери в стали сердечника машины (в основном в статоре);

$\Delta P_{\text{тр}}$ — механические потери, обусловленные трением в машине.

Электрические потери в статоре и роторе пропорциональны квадрату тока, протекающего по соответствующим обмоткам, поэтому их сумма может быть представлена в виде переменных потерь $\Delta P_{\text{пер}} = \Delta P_{\text{эл 1}} + \Delta P_{\text{эл 2}}$. Магнитные потери в стали сердечника и потери, обусловленные трением, практически не зависят от тока и могут быть представлены в виде постоянных потерь $\Delta P_{\text{пост}} = \Delta P_{\text{магн}} + \Delta P_{\text{тр}}$:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{\text{пер}} + \Delta P_{\text{пост}}} \quad (6)$$

На рис. 7 показаны графики изменения $\Delta P_{\text{пер}}$, $\Delta P_{\text{пост}}$ и η в зависимости от мощности P_2 . При холостом ходе $\Delta P_{\text{пер}}$ близки к нулю, но остаются потери $\Delta P_{\text{пост}}$, поэтому при $P_2 = 0$, $\eta = 0$. При возрастании мощности P_2 , отдаваемой электродвигателем, η начинает увеличиваться, как следует из формулы (6), и при $\Delta P_{\text{пер}} = \Delta P_{\text{пост}}$ он достигает максимального значения. Затем η начинает уменьшаться, так как потери $\Delta P_{\text{пер}}$, пропорциональные квадрату тока нагрузки, возрастают быстрее, чем P_2 . Максимального значения КПД достигает при нагрузках, составляющих 60—85% от номинальной. Величина $\eta_{\text{макс}}$ для мощных асинхронных электродвигателей составляет 0,92—0,95, а для машин мощностью примерно 10 кВт — 0,85—0,9. Коэффициент мощности асинхронного двигателя $\cos \varphi_1$ зависит в сильной степени от нагрузки. При холостом ходе коэффициент мощности составляет 0,15—0,20. При возрастании нагрузки $\cos \varphi_1$ растет и при номинальной нагрузке достигает для двигателей большой мощности 0,92—0,94, а при мощности порядка 10 кВт — 0,8—0,9. Малый коэффициент мощности $\cos \varphi_1$ при холостом ходе объясняется тем, что в этом режиме двигатель потребляет из сети сравнительно большой намагничивающий ток, который является реактивным. По мере увеличения нагрузки возрастает мощность P_2 , отдаваемая двигателем, а следовательно, и активная мощность P_1 , потребляемая из сети. В результате увеличивается $\cos \varphi_1$. Следовательно, с энергетической точки зрения работа двигателя при холостом ходе и малых нагрузках нежелательна.

4. Пуск в ход электродвигателей

При пуске двигателя в ход должны по возможности удовлетворяться следующие основные требования: процесс пуска должен быть простым и осуществляться без сложных пусковых устройств, пусковой момент — достаточно большим, а пусковые токи — по возможности малыми. Иногда к этим требованиям добавляются и другие: необходимость плавного пуска, максимального пускового момента и пр., обусловленные особенностями конкретных приводов, в которых используются двигатели.

Практически используются следующие способы пуска:

- а) непосредственное подключение обмотки статора к сети (прямой пуск);
- б) понижение напряжения, подводимого к обмотке статора при пуске;
- в) подключение к обмотке ротора пускового реостата.

Прямой пуск применяется для пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Двигатели этого типа малой и средней мощности обычно проектируют так, чтобы при непосредственном подключении обмотки статора к сети возникающие пусковые токи не создавали чрезмерных электродинамических усилий и превышений температуры, опасных с точки зрения механической и термической прочности основных элементов машины.

Двигатель обычно пускается с помощью контактора К (электромагнитного выключателя) (рис. 8). Если пусковой момент двигателя $M_{\text{п}}$ будет больше нагрузочного момента $M_{\text{нагр}}$, то ротор двигателя разгоняется до частоты вращения, соответствующей условию $M_{\text{в}} = M_{\text{нагр}}$. При прямом пуске действующее значение начального пускового тока превосходит номинальный ток в 5—7 раз, а пусковой момент составляет (0,7—1,8) $M_{\text{ном}}$ в зависимости от типа двигателя. Прямой пуск широко применяется в технике. Однако, при прямом пуске двигателей большой мощности, особенно при подключении их к недостаточно мощным электрическим сетям, могут возникать чрезмерно большие падения напряжения (свыше 10—15%). В этом случае прямой пуск для двигателей с короткозамкнутым ротором не применяют и пускают их при пониженном напряжении. Недостатками прямого пуска являются большой пусковой ток и сравнительно небольшой пусковой момент.

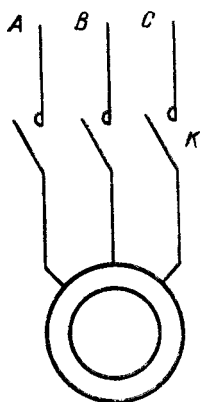


Рис. 8. Схема прямого пуска электродвигателя

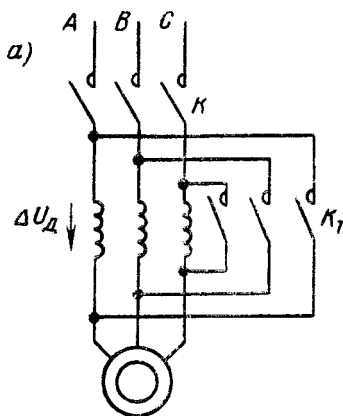
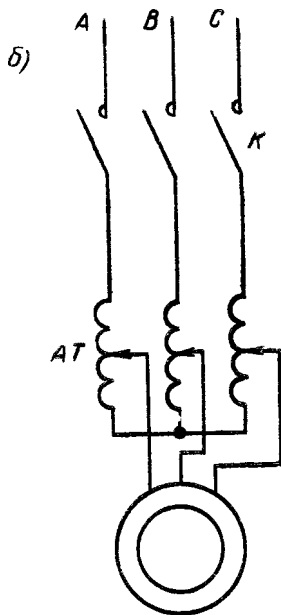


Рис. 9. Схема пуска при пониженном напряжении: а — путем включения реактора в цепь обмотки статора; б — путем включения автотрансформатора



Пуск при пониженном напряжении применяется для пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором большой мощности. Понижение напряжения может осуществляться следующими способами:

1) путем включения в цепь обмотки статора на период пуска реактора (катушки индуктивности) с некоторым реактивным сопротивлением (рис. 9, а). При этом на реакторе создается некоторое падение напряжения ΔU_d , пропорциональное пусковому току, вследствие чего к обмотке статора будет приложено пониженное напряжение. По мере разгона ротора двигателя уменьшается ЭДС E_2 , индуцированная в обмотке ротора, а следовательно, и пусковой ток. В результате этого уменьшается падение напряжения ΔU_d , и возрастает приложенное к двигателю напряжение. Таким образом, при рассматриваемом способе пуска напряжение, приложен-

ное к обмотке статора двигателя, автоматически растет по мере разгона ротора. После окончания разгона ротора двигателя реактор замыкается накоротко контактором K_1 ;

2) путем подключения двигателя к сети через понижающий автотрансформатор АТ (рис. 9, б). Последний имеет несколько ступеней, которые в процессе пуска двигателя переключаются соответствующей аппаратурой.

Недостатком указанного способа является значительное уменьшение пускового и максимального моментов двигателя, которые пропорциональны квадрату приложенного напряжения. Поэтому он применяется только при пуске двигателей без нагрузки.

Пуск с помощью пускового реостата применяется для пуска двигателей с фазным ротором. Пусковой реостат обычно имеет четыре—шесть ступеней (рис. 10, а), что позволяет в процессе пуска постепенно уменьшать пусковое сопротивление, поддерживая высокое значение пускового момента в течение всего времени разгона ротора двигателя.

Вначале двигатель пускается по характеристике 4 (рис. 10, б) соответствующей сопротивлению пускового реостата $r_{д1} + r_{д2} + r_{д3}$, и развивает вращающий момент $M_{п.макс}$. По мере увеличения частоты вращения момент M уменьшается и становится равным некоторому моменту $M_{п.мин}$. При $M_p = M_{п.мин}$ часть $r_{д3}$ сопротивления пускового реостата выводят, замыкая контактор $K3$. Вращающий момент при этом возрастает до $M_{п.макс}$, а затем с увеличением частоты вращения изменяется по характеристике 3, соответствующей сопротивлению реостата $r_{д1} + r_{д2}$.

При дальнейшем уменьшении момента M до $M_{п.мин}$ часть $r_{д2}$ сопротивления реостата снова выключают контактором $K2$ и двигатель переходит на работу по характеристике 2, соответствующей сопротивлению $r_{д1}$. Таким образом, при постепенном (ступенчатом) уменьшении сопротивления пускового реостата вращающий момент двигателя изменяется в пределах от $M_{п.макс}$ до $M_{п.мин}$, а частота вращения возрастает по ломаной кривой, показанной на рис. 10, б жирной линией.

В конце пуска пусковой реостат полностью выводят контактором $K1$, обмотка ротора замыкается накоротко, и двигатель переходит на работу по естественной характеристике 1. При этом он будет работать в режиме, соответствующем

точке А пересечения характеристики 1 с механической характеристикой 5 производственного механизма, создающего нагрузочный момент M_n . Выключение отдельных ступеней пускового реостата в процессе разгона ротора на практике может осуществляться вручную или автоматически с помощью специальной схемы управления пуском.

Недостатком рассмотренного способа являются: относительная сложность пуска, возникновение потерь энергии в пусковом реостате и необходимость применения более сложных и дорогих двигателей с фазным ротором. В связи с этим двигатели с фазным ротором применяют только при тяжелых условиях пуска (когда необходимо развивать максимально возможный пусковой момент), при малой мощности электрической сети или при необходимости плавного регулирования частоты вращения.

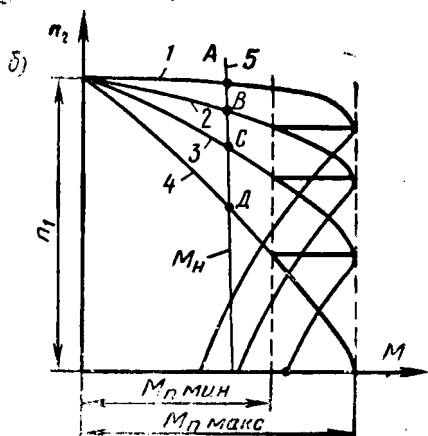
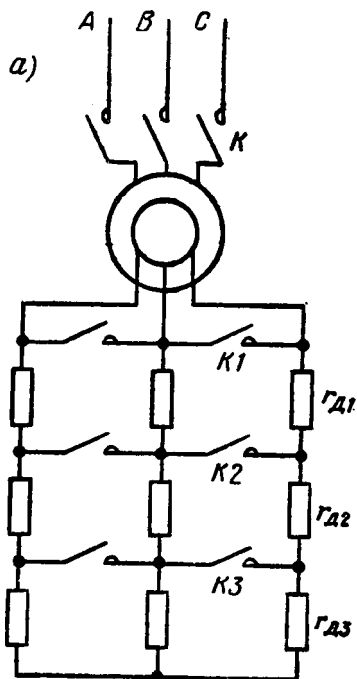


Рис. 10. Схема (а) механические характеристики (б) при пуске путем включения пускового реостата в цепь обмотки ротора

5. Регулирование частоты вращения электродвигателей

Частота вращения электродвигателя определяется по формуле:

$$n_2 = n_1(1 - s) = \frac{60 f_1}{p} (1 - s). \quad (6)$$

Следовательно, ее можно регулировать, изменяя частоту f_1 питающего напряжения, число пар полюсов p или величину скольжения s .

Рассмотрим более подробно эти способы регулирования.

1. Регулирование путем изменения числа пар полюсов позволяет получить ступенчатое изменение частоты вращения. Для изменения числа полюсов обмотки статора в отношении 2 : 1 каждая фаза этой обмотки разделяется на две части, которые переключаются обычно с последовательного соединения на параллельное. Чтобы не делать переключений в обмотке ротора, ее выполняют в этом случае короткозамкнутой.

Асинхронные двигатели с переключением числа полюсов называются многоскоростными. В многоскоростных двигателях частота вращения поля n_1 регулируется при $f_1 = 50$ Гц большими ступенями — в отношении 3000 : 1500 : 1000 об/мин. Соответственно изменяется и частота вращения ротора n_2 . Такие двигатели имеют несколько больший вес по сравнению с двигателями нормального исполнения, а следовательно, и большую стоимость.

2. Регулирование путем включения в цепь ротора реостата. Если из формулы (3) определить скольжение, получим, что оно зависит от электромагнитного момента M (т. е. нагрузочного момента на валу), приложенного напряжения U , и сопротивлений r_1 , r_2' , x_1 и x_2' . Скольжение можно изменять различными способами. Обычно его регулируют путем включения реостата в цепь ротора. При включении в цепь ротора реостата с различными значениями сопротивления r_{11} , r_{12} , r_{13} и т. д. (см. рис. 10, а) будет изменяться наклон (жесткость) механической характеристики двигателя к оси M (см. рис. 10, б). Следовательно, при данном нагрузочном моменте M_n двигатель будет работать при частотах вращения, соответствующих точкам В, С и Д пересечения механической характеристики нагрузки 5 с реостатными характеристиками 2, 3, 4 двигателя. В результате частота враще-

ния n_2 при включении реостата будет уменьшаться по сравнению с частотой вращения при работе на естественной характеристике 1 (при $r_1 = 0$).

Этот способ регулирования может быть использован только для двигателей с фазным ротором. При наличии в реостате большого числа ступеней изменения сопротивления он позволяет практически плавно изменять частоту вращения в широких пределах. Недостатком его являются большие потери энергии в реостате, поэтому его используют только при кратковременных и повторно-кратковременных режимах работы двигателя (например, в подъемных кранах).

3. Регулирование путем изменения частоты питающего напряжения. Этот способ требует наличия преобразователя частоты, к которому должен быть подключен асинхронный двигатель. Частотный способ регулирования является весьма перспективным, так как позволяет использовать наиболее простой и надежный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором и обеспечить плавное регулирование частоты вращения в очень широких пределах.

В качестве преобразователей частоты в настоящее время используются, главным образом, статические преобразователи на полупроводниковых вентилях.

Для обеспечения устойчивой работы двигателя в широком диапазоне изменения частоты вращения необходимо поддерживать неизменным максимальный момент, т. е. перегрузочную способность двигателя. Но величина максимального момента, как следует из формулы (5), приблизительно обратно пропорциональна квадрату частоты f_1' (угловая частота вращения ω_1 и индуктивные сопротивления x_1 и x_2' пропорциональны частоте f_1) и прямо пропорциональна квадрату напряжения U_1^2 . Поэтому для выполнения условия $M_{\text{макс}} = \text{const}$ необходимо одновременно с частотой f_1 изменять и подводимое к двигателю напряжение U_1 по закону

$$\frac{U_1}{f_1} = \text{const.}$$

6. Изменение направления вращения

Для изменения направления вращения ротора необходимо изменить направление электромагнитного момента M . Оно определяется направлением вращения магнитного по-

ля, которое, в свою очередь, зависит от порядка чередования тока в фазах. Для изменения направления вращения поля, а следовательно, и ротора двигателя необходимо переключить два любых провода, присоединяющих фазы обмотки статора к трехфазной сети. Так, например, если обмотка статора двигателя подключена к сети, как показано на рис. 11,а,

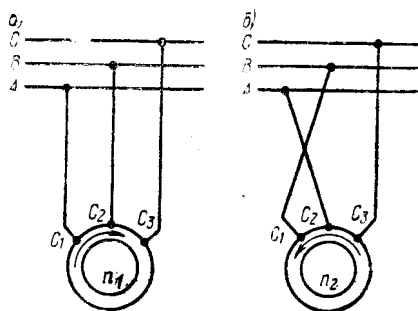


Рис. 11. Изменение направления вращения

то ротор двигателя вращается по часовой стрелке. При переключении двух любых фаз двигателя, например, первой и второй, магнитное поле начинает вращаться в противоположном направлении. Следовательно, изменяется и направление вращения ротора (рис. 11,б). Следует отметить, что изменение направления электромагнитного момента на ходу машины с целью торможения двигателя (реверс на ходу) можно осуществлять только в двигателях с фазным ротором. При этом в цепь обмотки ротора включают реостат для ограничения величины тока. Для двигателей с короткозамкнутым ротором этот режим является аварийным (резко возрастает ток в обмотках ротора и статора).

II. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

Испытание асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором

Цель работы — изучение устройства асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором; снятие и построение его рабочих и механических характеристик.

Описание лабораторной установки

Испытание электродвигателей производят на универсальном стенде, в котором в качестве нагрузочного устройства применен электромагнитный тормоз. Электромагнитный тормоз создает на валу двигателя тормозной момент, т. е. он позволяет изменять нагрузку двигателя.

Электромагнитный тормоз (рис. 12) состоит из четырехполюсного электромагнита 1, укрепленного на оси 3. Катушки обмотки возбуждения 2 тормоза соединяются так, чтобы диаметрально противоположные полюсы имели одноименную полярность. Обмотка возбуждения питается постоянным током. На оси 3 укреплен груз (противовес) 4, который мо-

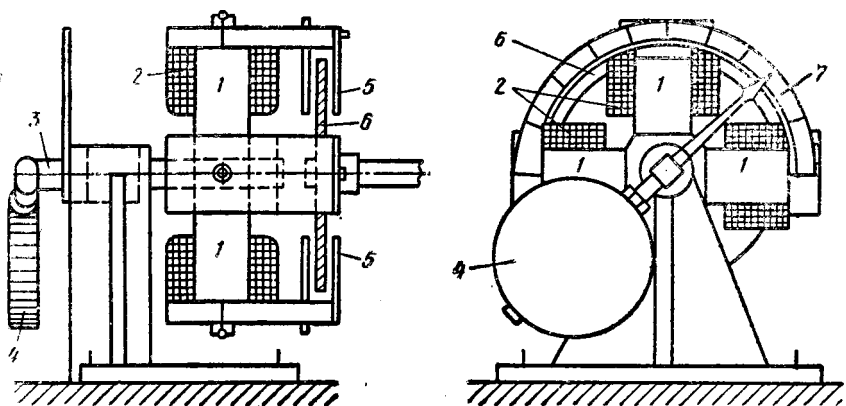


Рис. 12. Устройство электромагнитного тормоза

жет поворачиваться вместе с электромагнитом. Между полюсными наконечниками 5 электромагнита свободно вращается стальной диск 6, укрепленный на валу нагружаемого двигателя. При работе двигателя вращающийся диск пересекает магнитные линии, вследствие чего в нем индуцируются вихревые токи. Взаимодействие вихревых токов с магнитным потоком возбуждения создает тормозной момент, уравновешиваемый противовесом 4; величину тормозного момента отсчитывают по шкале 7.

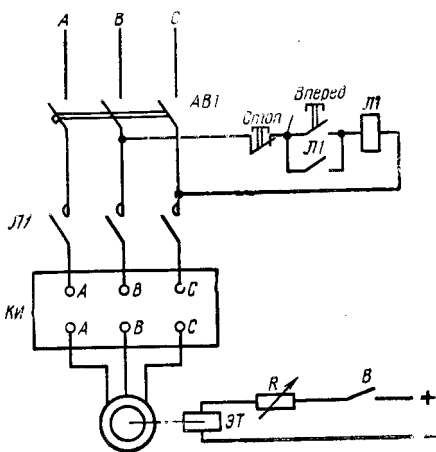


Рис. 13. Схема испытания асинхронного электродвигателя

Изменяя с помощью реостата R ток в обмотке возбуждения электромагнитного тормоза ЭТ (рис. 13), можно регулировать величину тормозного момента на валу асинхронного двигателя.

В цепь обмотки статора асинхронного двигателя включен комплект электроизмерительных приборов КИ, состоящий из амперметра, вольтметра и ваттметра. Амперметр измеряет линейный ток двигателя, вольтметр — фазное напряжение источника электрической энергии (соединенного звездой), а ваттметр — мощность одной фазы. Частота вращения ротора электродвигателя измеряется тахометром, состоящим из тахогенератора и указателя.

Подключение обмотки статора к сети осуществляется магнитным пускателем, состоящим из трехполюсного контактора Л1 и кнопок «вперед» и «стоп». Для защиты двигателя от коротких замыканий предусмотрен автоматический выключатель АВ1.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с приборами, аппаратами, машинами и другим оборудованием лабораторной установки и записать их основные технические характеристики.

2. Для сборки схемы испытания электродвигателя (см. рис. 13) подключить комплект измерительных приборов КИ и включить на стенде выключатели В1 и В2, остальные выключатели должны быть выключены.

3. Установить на приборах комплекта КИ пределы измерений, соответствующие номинальным данным электродвигателя. Цена деления ваттметра K_w определится в этом случае по формуле

$$K_w = \frac{\text{предел измерения амперметра} \times \text{предел измерения вольтметра}}{\text{число делений ваттметра}}$$

Так как ваттметр включен в одну фазу обмотки статора асинхронного двигателя, то для определения мощности, потребляемой двигателем, необходимо показания ваттметра умножить на три.

4. Осуществить пуск электродвигателя без нагрузки. При пуске ток в цепи обмотки возбуждения электромагнитного тормоза должен быть равен нулю (выключатель В должен быть выключен). Во избежание порчи приборов переключатель фаз комплекта КИ при пуске становится в положение «ноль». После проверки схемы преподавателем или лаборантом включить автоматический выключатель АВ1 и магнитный пускатель (нажать кнопку «Вперед»), подключающие обмотку статора к сети трехфазного тока.

5. Снять механическую и рабочие характеристики двигателя при номинальных значениях питающего напряжения $U_1 = U_{1 \text{ ном}} = \text{const}$ и частоты $f_1 = f_{1 \text{ ном}}$. Первое измерение произвести при работе двигателя на холостом ходу (выключатель В выключен). В этом режиме измерить напряжение $U_{1 \text{ ф}}$, ток I_1 и мощность $P_{1 \text{ ф}}$ в обмотке статора, а также частоту вращения n_2 ротора при моменте на валу двигателя $M_в = 0$. Результаты измерений записать в таблицу.

Данные опыта					Данные расчета				
$U_{1 \text{ ф}}$, В	I_1 , А	$P_{1 \text{ ф}}$, Вт	n_2 , об/мин	$M_в$, Н·м	P_2 , Вт	P_1 , Вт	s , %	$\cos \varphi_1$	η

Затем включить выключатель B и, постепенно увеличивая ток в обмотке возбуждения электромагнитного тормоза, увеличивать тормозной момент на валу двигателя. Всего произвести семь измерений напряжения $U_{1\Phi}$, тока I_1 , мощности $P_{1\Phi}$, частоты вращения n_2 и момента M_B на валу двигателя. Нагрузку увеличивать до тех пор, пока ток электродвигателя не достигнет $I_1 = (1,25 - 1,30) I_{ном}$. Результаты измерений записать в таблицу.

Построение характеристик

1. По данным таблицы построить в одних осях координат рабочие характеристики электродвигателя:

$$n_2; P_1; I_1; M_B; \cos \varphi_1; \eta = f(P_2).$$

2. По данным таблицы построить механическую характеристику электродвигателя $n_2 = f(M_B)$ при $U_1 = \text{const}$ и $f_1 = \text{const}$.

При проведении расчетов использовать следующие формулы: мощность (полезная) на валу электродвигателя

$$P_2 = \frac{M_B \cdot n_2}{9,55};$$

скольжение

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

где n_1 — частота вращения магнитного поля — определяется как ближайшее к $n_{2ном}$ число из ряда чисел 3000—1500—1000—750 об/мин ($n_{2ном}$ берется из паспортных данных электродвигателя).

Коэффициент мощности электродвигателя

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{3 U_{1\Phi} I_1} = \frac{P_{1\Phi}}{U_{1\Phi} I_1};$$

КПД электродвигателя

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

ВОПРОСЫ НА КОЛЛОКВИУМЕ ПЕРЕД ВЫПОЛНЕНИЕМ РАБОТЫ

1. Перечислите основные части асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором и укажите их назначение.
2. Начертите электрическую схему асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.
3. Как осуществить пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором?
4. Что нужно сделать, чтобы изменить направление вращения ротора асинхронного электродвигателя?
5. Как изменится частота вращения ротора асинхронного электродвигателя при увеличении нагрузки (тормозного момента на валу)?
6. Как можно регулировать частоту вращения ротора асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором?








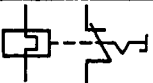


ВОПРОСЫ ПРИ СДАЧЕ ЗАЧЕТА ПО РАБОТЕ

1. Начертите поперечный разрез асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором и объясните назначение его основных узлов.
2. Напишите формулу для частоты вращения ротора асинхронного электродвигателя.
3. Напишите формулу для электромагнитного момента асинхронного электродвигателя.
4. Начертите механическую характеристику асинхронного электродвигателя и объясните, почему при увеличении тормозного момента на валу от нуля до M_{\max} уменьшается частота вращения n_2 .
5. Начертите зависимость КПД электродвигателя от мощности P_2 и объясните, почему при увеличении мощности P_2 КПД сначала возрастает, достигает максимального значения, а затем уменьшается.
6. Почему у асинхронного двигателя при работе в двигательном режиме n_2 должно быть меньше n_1 ?
7. Как определяется скольжение асинхронного электродвигателя и какую величину оно может иметь при номинальной нагрузке?
8. Как изменится коэффициент мощности $\cos \varphi_1$ асинхронного электродвигателя при уменьшении нагрузки от $M_{\text{ном}}$ до нуля?
9. Почему асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором имеет большой пусковой ток?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов Ю. М., Липатов Д. Н. Общая электротехника. М.: «Высшая школа». 1973.
2. Пантюший В. С. и др. Электротехника. М.: Высшая школа, 1976.
3. Блажкин А. Т. Общая электротехника. Л.: Энергия. 1979.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ В СХЕМАХ

<i>Наименование</i>	<i>Условное обозначение</i>
<i>Контакт коммутационного устройства замыкающий</i>	
<i>Контакт коммутационного устройства размыкающий</i>	
<i>Контакт для коммутации силовой цепи замыкающий</i>	
<i>Катушка контактора или реле</i>	
<i>Выключатель трехполюсный автоматический</i>	
<i>Выключатель кнопочный нажимной с замыкающим контактом</i>	
<i>Выключатель кнопочный нажимной с размыкающим контактом</i>	
<i>Реле электротепловое с возвратом нажатием кнопки</i>	
<i>Машина асинхронная трехфазная с короткозамкнутым ротором</i>	
<i>Машина асинхронная трехфазная с фазным ротором</i>	

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
I. Основные теоретические положения	4
1. Принцип действия и устройство	4
2. Электромагнитный момент асинхронного электродвигателя	8
3. Характеристики электродвигателя	10
4. Пуск в ход электродвигателей	15
5. Регулирование частоты вращения электродвигателей	19
6. Изменение направления вращения	20
II. Лабораторная работа. Испытание асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором	22
Литература	26

Александр Ефимович Зорохович, Юрий Иванович Чуверин,
Юрий Алексеевич Андреев

АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Методические указания к лабораторной работе

Редактор М. М. Тамаровская

Техн. редактор Н. Н. Васильева

Корректор И. Н. Терешкина

Сдано в набор 23/V 1984 г. Подписано в печать 11/I 1985 г.
Формат бумаги 60×90^{1/16}. Печ. л. 1,75. Зак. 977. Тир. 2000. Бесплатно.
Редакционно-издательский отдел МИИТа

Типография МИИТа, Москва, ул. Образцова, 15.