



**Министерство образования Республики Беларусь**

**Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»**

**Кафедра «Автоматизированный электропривод»**

**Л. В. Веппер, В. В. Логвин**

# **РЕЛЕЙНО-КОНТАКТОРНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

**ПРАКТИКУМ**

**по выполнению лабораторных работ  
для студентов специальности 1-53 01 05  
«Автоматизированные электроприводы»  
дневной формы обучения**

**Гомель 2024**

УДК 621.316(075.8)  
ББК 31.261я73  
В30

*Рекомендовано научно-методическим советом  
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 10 от 27.06.2023 г.)*

Рецензент: доц. каф. «Информационные технологии» ГГТУ им. П. О. Сухого  
канд. техн. наук, доц. *В. С. Захаренко*

**Веппер, Л. В.**  
В30 Релейно-контакторные системы управления : практикум по выполнению лаборатор. работ для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» днев. формы обучения / Л. В. Веппер, В. В. Логвин. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2024. – 37 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Предназначен для овладения навыков разработки релейно-контакторных схем для автоматизации пуска, торможения и реверса асинхронного двигателя.

Для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» дневной формы обучения.

УДК 621.316(075.8)  
ББК 31.261я73

© Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2024

## **1. РЕЛЕЙНО-КОНТАКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ**

Под управлением электроприводом понимается пуск его в работу, регулирование скорости, реверсирование, торможение, а также поддержание постоянства заданной скорости, момента, мощности или какой-либо другой величины, обеспечивающей технологический процесс рабочей машины. Если управление электроприводом осуществляется с помощью аппаратов ручного управления (рубильников, кнопочных или пакетных выключателей, контроллеров и т. п.), то имеет место неавтоматическое (ручное) управление. Электропривод, управляемый таким способом, называется неавтоматизированным. Если же при управлении электроприводом человек участвует только в подаче начального управляющего воздействия, а остальное действие по управлению осуществляют различные аппараты (реле, контакторы, логические и бесконтактные устройства), то такой управляемый электропривод называется автоматизированным.

В зависимости от типа используемых регулирующих устройств автоматики системы управления могут быть: а) релейно-контакторными; б) с усилителями (электромашинные, электронные, магнитные, полупроводниковые); в) с преобразователями (электромашинные, полупроводниковые); г) комбинированными.

Наиболее распространенной операцией является пуск электродвигателей, который производится в функции: а) скорости; б) тока; в) времени.

## **2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Асинхронные двигатели (АД) широко применяются в промышленности и сельском хозяйстве, так как они просты по конструкции, надежны в эксплуатации. В большинстве случаев асинхронные двигатели питаются непосредственно от сети переменного тока промышленной (50 Гц) частоты. Только в специальных случаях двигатели питаются от преобразовательных установок.

Асинхронный двигатель имеет две обмотки: обмотку статора, расположенную в станине неподвижно, и вращающуюся обмотку ротора. В зависимости от исполнения ротора различают асинхронные двигатели с фазным ротором (с контактными кольцами), у которого каждый конец обмотки фазы выводится на контактное кольцо КК

(рис. 2.1, а, б), и с короткозамкнутым ротором (рис. 2.1, в) (короткозамкнутые двигатели), обмотка ротора которого выполняется в виде «беличьей клетки».

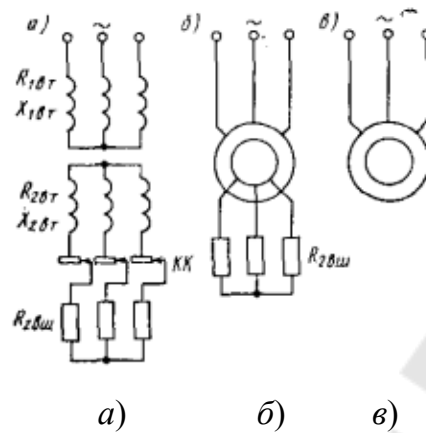


Рис. 2.1. Схемы включения асинхронных двигателей

Обмотка статора в зависимости от номинального напряжения, на которое выполнен двигатель, и напряжения сети может быть соединена в звезду или треугольник, обмотка ротора, как правило, в звезду. В цепь ротора двигателя с фазным ротором включается внешнее сопротивление  $R_{2вщ}$ . Большинство асинхронных двигателей выполняются трехфазными, поэтому при дальнейшем изложении электромеханические свойства будут рассматриваться для этих двигателей.

Упрощенная схема замещения одной фазы асинхронного двигателя с фазным ротором приведена на рис. 2.2, где обозначения с индексом 1 относятся к обмотке статора (первичной цепи), а с индексом 2 – к обмотке ротора (вторичной цепи):  $U_{1ф}$  – действующее значение фазного напряжения;  $I_m, I_1$  – ток намагничивания и ток обмотки статора;  $X_m$  – индуктивное сопротивление контура намагничивания;  $X_1, R_1$  – индуктивное и активное сопротивления обмотки фазы статора;  $I'_2, R'_2, X'_2$  – приведенные к обмотке статора ток ротора, активное и индуктивное сопротивления фазы ротора;  $s$  – скольжение двигателя.

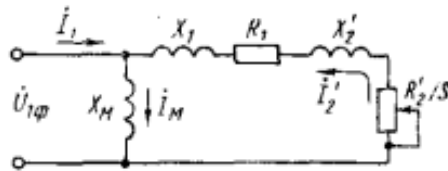


Рис. 2.2. Схема замещения одной фазы асинхронного двигателя с фазным ротором

Так как обмотка статора подключается к питающей сети, то для удобства рассмотрения протекающих процессов и упрощения уравнений обмотка ротора приводится к обмотке статора. Смысл приведения состоит в условной замене действительной роторной обмотки фиктивной, имеющей число фаз и витков, а также обмоточный коэффициент такие же, как и у статорной обмотки.

Отношение ЭДС обмоток статора и ротора при неподвижном роторе определяется коэффициентом трансформации ЭДС:

$$K_E = E_1 / E_2. \quad (2.1)$$

Коэффициент  $K_E$  можно найти, исходя из паспортных данных двигателя:

$$K_E \approx 0,95U_{ном} / E_{2к}, \quad (2.2)$$

где 0,95 – коэффициент, учитывающий 5%-ную потерю напряжения в обмотке статора;  $U_{ном}$  – номинальное линейное напряжение статора;  $E_{2к}$  – ЭДС между кольцами неподвижного ротора.

Из определения коэффициента  $K_E$  известно, что приведенная к обмотке статора ЭДС ротора  $E_2'$  равна  $E_1$

$$E_2' = E_2 K_E = E_1. \quad (2.3)$$

Коэффициент трансформации тока

$$K_t = I_2 / I_2', \quad (2.4)$$

где  $I_2$  – действительный ток ротора.

Коэффициенты трансформации тока и ЭДС связаны зависимостью

$$K_t = K_E m_1 / m_2, \quad (2.5)$$

где  $m_1$  и  $m_2$  – число фаз статора и ротора.

Приведенный к статору ток ротора

$$I'_2 = I_2 / (K_E m_1 / m_2).$$

Приведенные к обмотке статора сопротивления ротора

$$\begin{aligned} R'_2 &= R_2 K_E K_T = R_2 (m_1 / m_2) K_E^2; \\ X'_2 &= X_2 (m_1 / m_2) K_E^2, \end{aligned} \quad (2.6)$$

где  $R_2, X_2$  – действительные активное и индуктивное сопротивления фазы роторной цепи.

На практике у большинства двигателей  $m_1 = m_2$ , тогда формулы (2.6) принимают более простой вид:

$$R'_2 = R_2 K_E^2, \quad X'_2 = X_2 K_E^2. \quad (2.7)$$

В общем случае полное сопротивление фазы роторной цепи

$$Z_{2\lambda} = E_2 / (\sqrt{3} I_2) = \sqrt{R_2^2 + X_2^2}. \quad (2.8)$$

Если обмотки двигателя соединены в треугольник, то его следует заменить схемой эквивалентной звезды, для которой сопротивления принять равными  $\frac{1}{3}$  от фактических сопротивлений фаз статора и ротора.

Для того чтобы при неподвижном роторе (например, при пуске двигателя) получить в его фазах значения токов, равные  $I_{2ном}$ ; каждая фаза роторной цепи должна иметь сопротивление

$$R_{2ном} = E_{2к} / (\sqrt{3} I_{2ном}). \quad (2.9)$$

Для асинхронных двигателей с фазным ротором номинальным сопротивлением фазы роторной цепи называется активное сопротивление, равное сумме сопротивлений  $R_{2ВТ}$  и  $R_{2ВШ}$ , которые при номинальных для статора частоте и напряжении в сети при неподвижном роторе ограничивают ток номинальным значением.

Сопротивление  $R_{2ном}$ , найденное по формуле (2.9), по существу, является полным сопротивлением, так как  $X_{2ВТ} \approx 0$ :

$$Z_{2ном} = R_{2ном}.$$

Если обмотки статора и ротора двигателя соединены звездой, то при введении в цепь обмоток статора и ротора внешних активных или индуктивных сопротивлений их суммарные значения

$$\begin{aligned} R_{1\Sigma} &= R_{1BT} + R_{1BШ}; X_{1BT} = X_{1BT} + X_{1BШ}; \\ R_{2\Sigma} &= R_{2BT} + R_{2BШ}; X_{2BT} = X_{2BT} + X_{2BШ}, \end{aligned}$$

где  $R_{1BT}, R_{2BT}, X_{1BT}, X_{2BT}$  – внутренние активные и индуктивные сопротивления обмоток фаз статора и ротора;  $R_{1BШ}, R_{2BШ}, X_{1BШ}, X_{2BШ}$  – активные и индуктивные внешние сопротивления фаз статора и ротора.

Сопротивления короткого замыкания двигателя с фазным ротором при замкнутых кольцах и неподвижном роторе

$$R_2 = R_{1\Sigma} + R'_{2\Sigma}; X_k = X_{1\Sigma} + X'_{2\Sigma}. \quad (2.10)$$

При подключении обмотки статора двигателя к сети трехфазного тока возникает вращающееся магнитное поле, угловая скорость которого  $\omega_0$ , называемая синхронной, прямо пропорциональна частоте тока  $f_i$  и обратно пропорциональна числу пар полюсов  $p$  обмотки статора:

$$\omega_0 = 2\pi f_1 / p. \quad (2.11)$$

В двигательном режиме ротор вращается в направлении вращения магнитного поля с угловой скоростью  $s$ , меньшей скорости  $\omega_0$ . В режиме идеального холостого хода, когда потери в цепи ротора равны нулю, угловая скорость ротора равна угловой скорости магнитного поля.

Разность между синхронной угловой скоростью и текущим значением угловой скорости ротора, отнесенная к скорости  $\omega_0$ , называется скольжением:

$$S = (\omega_0 - \omega) / \omega_0. \quad (2.12)$$

Зная скольжение, можно определить угловую скорость ротора:

$$\omega = \omega'_0 (1 - s). \quad (2.13)$$

Для двигательного режима  $s = 1 - 0$ .

По известным паспортным данным двигателя и подсчитанном значении  $S_{ном}$  можно найти активное сопротивление обмотки фазы ротора:

$$R_{2BT} = E_{2K} S_{ном} / (\sqrt{3} I_{2ном}) = R_{2ном} S_{ном}. \quad (2.14)$$

Согласно схеме замещения (рис. 2.2), приведенный ток ротора в рабочем контуре

$$I_2' = U_{1\phi} / \sqrt{(R_1 + R_2' / S)^2 + (X_1 + X_2')^2}. \quad (2.15)$$

В режиме идеального холостого хода через обмотки статора протекает только ток намагничивания  $I_M$ , который создает магнитный поток в статоре, поэтому в общем случае ток статора является геометрической суммой приведенного тока ротора и намагничивающего тока:

$$I_1 = \sqrt{I_2'^2 + I_M^2}.$$

Так как  $I_m \ll I_2'$ , то с некоторым приближением можно считать ток  $I_2'$  и  $\cos \varphi_2$  ротора равными соответствующим значениям статора ( $I_2' \approx I_1$ ,  $\cos \varphi_2 \approx \cos \varphi_1 \approx \cos \varphi$ ).

Активное сопротивление обмотки фазы статора  $R_{1BT}$  значительно меньше, чем  $X_{1BT} + X_2'$ . Тогда, считая  $R_{1BT} = 0$ , после преобразования (2.15) получим

$$I_1 = s U_{1\phi} / \sqrt{R_2'^2 + s X_K}. \quad (2.16)$$

По паспортным данным двигателя этот ток подсчитывается по формуле

$$I_{ном} = P_{ном} / (\sqrt{3} U_{ном} \cos \varphi_{ном} \eta_{ном}).$$

На основании (2.15) и (2.16) с учетом (2.13) можно построить зависимости  $\omega = f(I_2')$  и  $\omega = f(I_1)$  (рис. 2.3), называемые электро-механическими характеристиками асинхронного двигателя. На этом же рисунке показано и изменение  $\cos \varphi$  по мере уменьшения  $s$ . Из рассмотрения зависимости  $\cos \varphi$  от  $1$ , можно сделать заключение, что в процессе пуска активная мощность двигателя  $P_3 = 3 m_1 U_{1\phi} \cos \varphi$  будет изменяться нелинейно, а это, в свою очередь, вызовет соответствующее изменение момента двигателя.



### 3. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ДВИГАТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ

Электромагнитная мощность трех фаз, которая передается через воздушный зазор ротору двигателя,

$$P_{эм} = 3I_2'^2 R_2' / s. \quad (3.1)$$

Эта же мощность через электромагнитный момент представится как  $P_{эм} = M_{эм} \omega_0$ , откуда

$$M_{эм} = P_{эм} / \omega_0 = 3I_2'^2 R_2' / (\omega_0 S). \quad (3.2)$$

Подставив значение  $I_2'$  из (2.15) и считая  $M_{эм} = M$  (потерей момента пренебрегаем), получим зависимость момента двигателя от скольжения:

$$M = \frac{3U_{1\phi}^2 R_2'}{\omega_0 S \left[ (R_1 + R_2' / s)^2 \right] + (X_1 + X_2')^2}. \quad (3.3)$$

Зависимость (3.3) с учетом (2.13) представляет собой механическую характеристику, которая имеет два максимума. В этом можно убедиться, если по общему правилу исследования функций на максимум взять производную  $dM/ds$ , приравнять ее к нулю и полученное уравнение, которое оказывается при этом квадратным, решить относительно  $s$ . Скольжение, при котором момент двигателя будет максимальным, называется критическим и определяется выражением

$$s_{кр} = \pm R_2' / \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}, \quad (3.4)$$

где знак «+» соответствует двигательному режиму, а знак «-» – генераторному режиму (рекуперативное торможение).

Подставив в уравнение (3.3) значение  $s = s_{кр}$  из (3.4), получим значение момента при критическом скольжении, называемого критическим или опрокидывающим:

$$M_{кр} = \frac{3U_{1\phi}^2}{2\omega_0 \left[ R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]}, \quad (3.5)$$

где знак «+» перед корнем отвечает  $s_{кр} > 0$ , т. е. двигательному режиму, а знак «-» соответствует  $s_{кр} < 0$ , т. е. режиму рекуперативного торможения.

Так как в (3.5) все величины положительны, то  $M_{кр}$  при рекуперативном торможении будет больше  $M_{кр}$  двигательного режима.

Уравнению механической характеристики (3.3) можно придать более простой и удобный для расчетов вид, если взять отношение  $M$  к  $M_{кр}$ . После соответствующих преобразований получим уравнение механической характеристики

$$M = \frac{2M_{кр}(1 + as_{кр})}{S/S_{кр} + S_{кр}/S + 2as_{кр}}, \quad (3.6)$$

где  $M_{кр}$ ,  $s_{кр}$  и  $a = R_1/R'_2$  являются неизменными параметрами, а  $s$  – изменяемым.

Критический момент для двигательного режима можно найти по каталожной величине  $\lambda = M_{кр}/M_{ном}$ , называемой перегрузочной способностью двигателя:

$$M_{кр} = \lambda M_{ном}.$$

Величина  $\lambda$  характеризует возможность двигателей к недлительным перегрузкам. Для различных серий двигателей  $\lambda$  имеет следующие пределы: для краново-металлургической  $\lambda = 2,3 \div 3$ , для двигателей общего назначения  $\lambda = 1,7 \div 2,4$ .

Критическое скольжение можно найти с помощью величин  $\lambda$  и  $S_{ном}$ .

Для двигателей малой мощности

$$S_{кр} = S_{ном} \frac{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1 + 2S_{ном}(\lambda - 1)}}{1 - 2S_{ном}(\lambda^2 - 1)}, \quad (3.7)$$

для двигателей средней и большой мощности

$$S_{кр} = S_{ном} (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}). \quad (3.7a)$$

Для двигателей большой мощности сопротивление обмотки статора невелико. Поэтому практически  $R_1 < X_k$  и  $as_{кр} \ll 1$ . С учетом этого уравнение механической характеристики примет еще более простой вид (уравнение Клосса):

$$M = 2M_{кр} / (S/S_{кр} + S_{кр}/S). \quad (3.8)$$

Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя (при  $U = U_{\text{ном}}$ ,  $f_1 = f_{\text{ном}}$ ,  $R_2 = R_{2\text{вт}}$ ), отвечающая уравнениям (3.3), (3.6) и (3.8), приведена на рис. 3.1, где  $\omega$  и  $s$  связаны зависимостью (2.13).

Участок характеристики от  $s = 0$  до  $s = s_{\text{кр}}$  называется устойчивой частью характеристики. На этом участке от  $M = 0$  до  $M = M_{\text{ном}}$  величина  $s \ll s_{\text{кр}}$ . Поэтому в выражении (3.8) отношением  $s = s_{\text{кр}}$  можно пренебречь. Тогда уравнение этой части механической характеристики примет вид уравнения прямой линии

$$M = (2M_{\text{кр}} / S_{\text{кр}})S. \quad (3.8a)$$

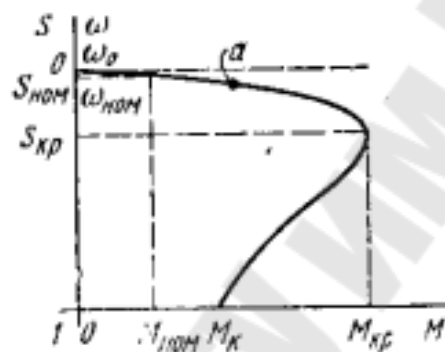


Рис. 3.1. Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя

Участок характеристики от  $s_{\text{кр}}$  до  $s = 1$  (или от  $M_{\text{кр}}$  до  $M_{\text{к}}$ ) используется лишь в процессе пуска двигателя и называется неустойчивой частью характеристики.

Пусковые свойства асинхронного двигателя оцениваются значениями начального пускового момента  $M_{\text{пуск}}$  и начального пускового тока  $I_{\text{пуск}}$  при  $s = 1$ . Для двигателей с короткозамкнутым ротором в каталогах указываются кратности пускового момента  $M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}}$  и тока  $I_{\text{пуск}}/I_{\text{ном}}$ . Обычно пусковой момент серии краново-металлургических двигателей  $M_{\text{пуск}} = (2,3 \div 3,0) M_{\text{ном}}$ , а двигателей общего назначения  $M_{\text{пуск}} = (1,0 \div 1,9) M_{\text{ном}}$ . Пусковой ток краново-металлургических двигателей превышает номинальный в 3–6 раз, двигателей общего назначения – в 4–7 раз.

Отсутствие пропорциональности между моментом и током в пусковой области характеристики объясняется значительным снижением коэффициента мощности (рис. 2.3).

Чтобы улучшить пусковые характеристики на основании (2.15) и (3.5), необходимо на время пуска увеличить активное сопротивление

ние обмотки ротора и за счет этого повысить вращающий момент и снизить пусковой ток.

Для двигателей с фазным ротором, имеющим контактные кольца на роторе, это осуществляется за счет включения дополнительного внешнего сопротивления – реостата (рис. 2.1, а), которое в процессе пуска уменьшают. В связи с такой возможностью значения  $M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}}$  и  $I_{\text{пуск}}/I_{\text{ном}}$  для двигателей с фазным ротором в каталогах не приводятся.

Для повышения пускового момента и снижения пускового тока двигателей с короткозамкнутым ротором в специальных сериях ротор выполняют с глубоким пазом или двойной «беличьей клеткой». При пуске двигателя проявляется поверхностный эффект вытеснения тока в паз ротора, что эквивалентно увеличению сопротивления роторной цепи, в результате чего снижается пусковой ток.

Желание повысить пусковой момент привело к созданию нескольких серий двигателей с короткозамкнутым ротором. На рис. 3.5 представлены естественные характеристики  $\omega_* = f(M_*)$  асинхронных двигателей с различным исполнением ротора: краново-металлургических (МТК), с повышенным скольжением (АС), с повышенным пусковым моментом (АП), с ротором нормального исполнения (А4).

У двигателей с короткозамкнутым ротором значение  $M_{\text{пуск}}$  не всегда является наименьшим. При  $s \sim 0,8$  действительная характеристика имеет «провал» момента  $M_{\text{мин}}$ , который меньше пускового. Причина этого – наличие дополнительных моментов, обусловленных высшими гармоническими составляющими тока, эффектом вытеснения тока в пазах и неравномерностью магнитного поля ротора. Поэтому для двигателей с короткозамкнутым ротором в каталогах указывается отношение  $M_{\text{мин}}/M_{\text{ном}}$ . На рис. 3.2 для двигателей серии А4 показан примерный вид реальной характеристики, имеющей «провал», отмеченный штриховой линией.

Расчет и построение естественной механической характеристики осуществляются на основании каталожных данных двигателя. Для построения рабочей прямолинейной части характеристики достаточно двух точек. Для этого при известной скорости ном и мощности двигателя  $P_{\text{ном}}$  определяется номинальный момент. Первая точка находится по координатам  $\omega = \omega_{\text{ном}}$ ,  $M = M_{\text{ном}}$ . Вторая точка – угловая скорость идеального холостого хода  $\omega_0$  при  $M = 0$  – находится по формуле

(2.11). Координатами второй точки будут  $\omega = \omega_0$ ,  $M = 0$ . Рабочая часть характеристики на рис. 3.1 показана между точками  $\omega_0 = a$ .

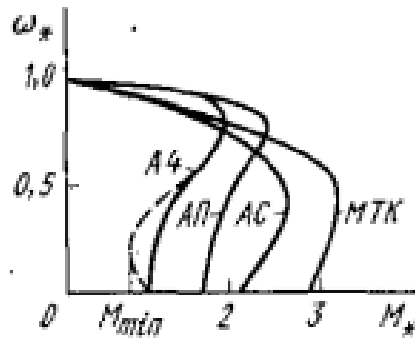


Рис. 3.2. Механические характеристики различных серий короткозамкнутых двигателей

Для построения полной (с неустойчивой частью) характеристики по формулам (3.12), (3.20) или (3.23а) подсчитывается значение  $s_{кр}$ . Затем, задаваясь значениями  $s$  от 0 до 1 для двигательного режима определяют соответствующие значения момента  $M$ . При этом скольжению  $s_{кр}$  отвечает момент  $M_{кр}$ .

При увеличении активного сопротивления  $R_{2\Sigma}$ . В цепи ротора на основании формулы (3.4) пропорционально повышается критическое скольжение. Так как различным значениям  $s_{кр}$  соответствуют значения  $M_{кр}$ , не зависящие от  $R_{2вт}$  (3.5), то при неизменных значениях  $\omega_0$  и  $M_{кр}$  повышение  $s_{кр}$  будет определять наклон механических характеристик (рис. 3.3). Зависимость  $s_{кр}$  от  $R_{2\Sigma}$  при  $M_{кр} = const$  используется для увеличения начального пускового момента (или  $M_k$ ) при  $s = 1$  двигателей с фазным ротором. Так, например, на рис. 3.3 при  $R_{2\Sigma 2}$  момент  $M_{к2}$  становится равным критическому.

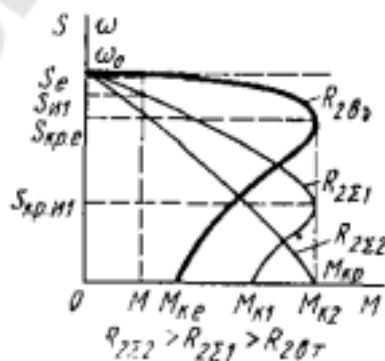


Рис. 3.3. Реостатные механические характеристики асинхронного двигателя

Для построения реостатной механической характеристики двигателя с фазным ротором скольжение рассчитывается на основании пропорциональной зависимости  $s_{кр}$  от  $R_{2\Sigma}$ . Тогда для естественной и искусственной (реостатной) характеристик исходя из формулы (3.8) для различных значений  $s_{кр}$

$$S_{кр.н} / S_{кр.е} = (R'_{2BT} + R'_{2ВШ}) / R'_{2BT} = R_{2B} / R_{2BT}, \quad (3.9)$$

где  $s_{кр.н}$ ,  $s_{кр.е}$  – критическое скольжение на искусственной (реостатной) и естественной характеристиках.

Соотношение (3.9) соблюдается и для текущих значений скольжений

$$S_H / S_E = R_{2\Sigma} / R_{2BT}, \quad (3.9a)$$

где  $S_H$  и  $S_E$  – скольжения на искусственной и естественной характеристиках при некотором моменте двигателя.

На искусственной характеристике скольжение

$$S_H = S_E R_{2\Sigma} / R_{2BT}, \quad (3.10)$$

Для построения реостатных характеристик задаются рядом значений  $S_E$  и при соответствующих значениях  $M$  определяют  $S_H$  (рис. 3.3).

Перепишем формулу (3.10) относительно  $R_{2\Sigma}$ :

$$R_{2\Sigma} = S_H R_{2BT} / S_E = R_{2BT} + R_{2ВШ},$$

откуда

$$R_{2ВШ} = (S_H / S_E) R_{2BT} - R_{2BT}, \quad (3.10a)$$

Полученное уравнение используется для определения сопротивлений секций пускового и регулировочного реостата.

На механическую характеристику можно влиять и изменением индуктивного сопротивления роторной цепи  $X_2$ .

При введении в цепь ротора реактора суммарное индуктивное сопротивление увеличится:  $X_{2\Sigma} = X_{2BT} + X_{2ВШ}$ . Тогда при подключении двигателя к сети пусковой ток в соответствии с (2.15) уменьшается ( $I_{к1} < I_{к.е}$ ) (рис. 3.4). Критическое скольжение, критический и пусковой моменты двигателя тоже уменьшатся (кривые  $M_{и1}$  и  $I_{и1}$ ).

Более приемлемые результаты получаются при последовательном включении в цепь ротора дополнительного активного  $R_{2ВШ}$  и индуктивного  $X_{2ВШ}$  сопротивлений. При этом в момент пуска двигателя ( $s = 1$ ) при частоте тока ротора, равной частоте сети  $f_1$ , индуктивное

сопротивление  $X_{2вн}$  велико и пусковой ток равен  $1\text{кг}$ . По мере разгона двигателя ЭДС ротора  $E_2$  уменьшается, но одновременно с этим снижается и частота  $f_2$  во вторичной цепи. Индуктивное сопротивление реактора уменьшается, в результате чего момент и ток ротора будут снижаться медленнее, чем при наличии одного активного сопротивления (кривые  $M_{и2}$  и  $I_{и2}$ ).

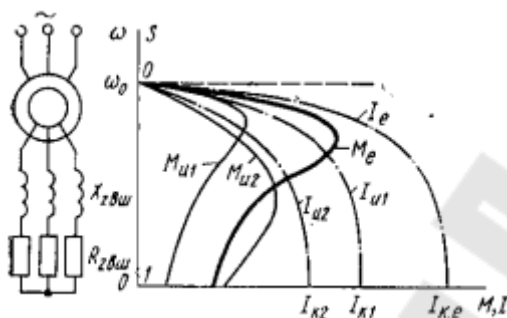


Рис. 3.4. Механические и электромеханические характеристики асинхронного двигателя при введении в цепь ротора реактивного и активного сопротивлений

При работе двигателя, когда ток статора не отличается существенно от номинального значения, можно считать, что ЭДС статора  $E_{1\phi} \approx U_{1\phi}$ . Тогда

$$U_{1\phi} \approx E_{1\phi} = 4,44 f_1 \omega_1 \Phi, \quad (3.11)$$

где  $\omega_1$  = число витков обмотки фазы статора.

При неизменной частоте  $f_1$  снижение напряжения  $U_{1\phi}$  вызывает уменьшение магнитного потока. Поэтому приложенное к обмоткам статора напряжение может рассматриваться как управляющее воздействие, аналогичное напряжению на обмотке возбуждения двигателя постоянного тока.

При изменении напряжения питания двигателя его момент [см. (3.3) и (3.5)] изменяется пропорционально квадрату приложенного напряжения, а критическое скольжение [см. (3.4)] остается неизменным. Тогда при уменьшении напряжения на статоре до значения  $U_1 = aU_{ном}$ , где  $a = U_1/U_{ном} < 1$ , отношение моментов на естественной и искусственной характеристиках при  $s = \text{const}$  будет равно отношению соответствующих квадратов напряжений:

$$M_e / M_n = M_{кр.e} / M_{кр.n} = U_{ном}^2 / U_1^2 = 1/a^2, \quad (3.12)$$

где  $M_e$ ,  $M_{и}$  – моменты на естественной и искусственной характеристиках.

Таким образом, искусственную характеристику при  $U_1/U_{ном}$  можно получить и построить из естественной, если ординаты ее пересчитать в  $a^2$  раз. Механические характеристики при различных напряжениях питания двигателя изображены на рис. 3.5.

При введении дополнительных сопротивлений  $R_{1вш}$  и  $X_{1вш}$  в цепь статора снижаются ток двигателя [см. (2.15)], а также критическое скольжение, критический и пусковой моменты [см. (3.4) и (3.5)]. В цепь статора крупных двигателей сопротивления вводятся для ограничения пусковых токов до значения, допускаемого по условиям падения напряжения в питающей сети. Иногда введение сопротивления используется для уменьшения пускового момента, с тем чтобы при пуске двигателя смягчить удары в передаточных механизмах и обеспечить более плавный разгон электропривода.

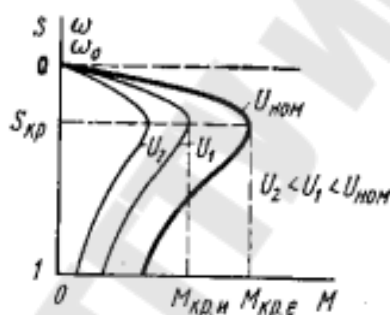


Рис. 3.5. Механические характеристики при различных напряжениях питания асинхронного двигателя

На механическую характеристику асинхронного двигателя в соответствии с (2.11) можно влиять изменением частоты  $f_1$  и числа пар полюсов  $p$ .

При изменении частоты тока  $f_1$  пропорционально будет изменяться  $\omega_0$  и обратно пропорционально частоте – магнитный поток  $\Phi$  [см. (3.11)]. Так как в номинальном режиме магнитная система двигателя насыщена, то при  $U_{ном}$  допустимо только увеличение частоты питающего напряжения. Тогда при значении  $f_1$ , большем  $f_{1ном}$ , соответственно увеличатся  $\omega_0$  и индуктивное сопротивление короткого замыкания  $X_{к.и} = X_{к.е} (f_1/f_{1ном})$  и уменьшится магнитный поток  $\Phi$ . В соответствии с (3.5) увеличение  $\omega_0$  и  $X_k = X_1 + X_2$  вызывает уменьшение критического момента. Критическое скольжение с увеличени-



ем  $X_k$  и на основании (3.4) уменьшится. Механическая характеристика при  $f_1 > f_{1ном}$ ,  $U = U_{ном}$  показана на рис. 3.6.

При уменьшении частоты  $f_1 < f_{1ном}$  снижается угловая скорость  $\omega_0$ , а магнитный поток  $\Phi$  увеличивается. Это приводит к глубокому насыщению магнитной цепи и увеличению намагничивающего тока  $I_m$ , что, в свою очередь, вызывает снижение энергетических показателей двигателя ( $\cos\phi, \eta$ ). Для того чтобы поток  $\Phi$  при увеличении или уменьшении частоты  $f_1$  оставался постоянным [см. (3.11)], необходимо при изменении частоты в той же кратности изменять напряжение, т. е. изменять эти величины так, чтобы:

$$U / f_1 = \text{const.} \quad (3.13)$$

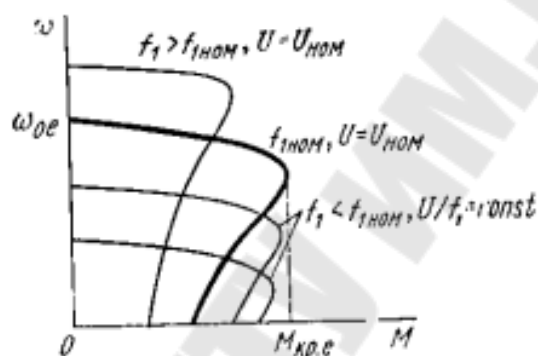


Рис. 3.6. Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении числа пар полюсов в два раза

При соблюдении условия (3.13) критический момент изменяется – увеличивается с ростом частоты и уменьшается с ее снижением. Механические характеристики при изменении частоты и одновременном пропорциональном изменении напряжения приведены на рис. 3.6.

При изменении числа пар полюсов и одной и той же частоте тока, и неизменном напряжении сети [см. (2.11)] его угловая скорость будет изменяться обратно пропорционально числу пар полюсов. Для изменения числа пар полюсов необходимо, чтобы в статоре были уложены независимые обмотки с различными значениями  $p$  либо при одной обмотке статора имелась возможность изменения ее схемы соединений.

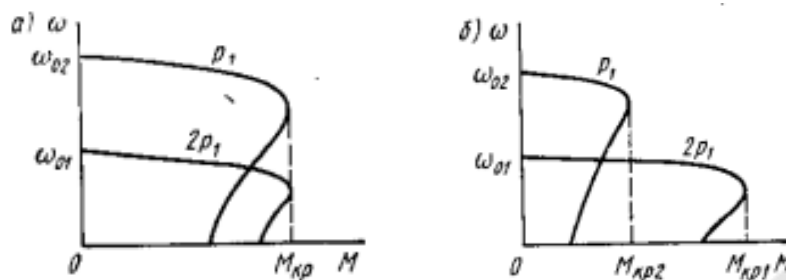


Рис. 3.7. Механические характеристики асинхронного двигателя при изменении числа пар полюсов в два раза

Так, обмотки отдельных фаз статора двухскоростного двигателя состоят из двух частей. При переключении обмоток каждой разы с последовательного соединения на параллельное число пар полюсов уменьшается вдвое, а угловая скорость двигателя возрастает. Критический момент двигателя при различных числах полюсов зависит от конструктивного исполнения обмоток. Двигатели с изменяемым числом пар полюсов выполняются с постоянной мощностью или постоянным моментом. Примерные механические характеристики двухскоростного асинхронного двигателя с постоянным моментом показаны на рис. 3.7, а (при  $p_1$  и  $2p_1, M_{кр} = const$ ), а с постоянной мощностью – на рис. 3.7, б (при  $2p_1, M_{кр1}$ , при  $p_1, M_{кр2}$ ).

#### 4. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ТОРМОЗНЫХ РЕЖИМАХ

Асинхронный двигатель может работать в тех же тормозных режимах, что и двигатель постоянного тока: рекуперативного торможения, торможения противовключением, динамического торможения с независимым возбуждением и самовозбуждением.

Рекуперативное торможение возникает при  $\omega > \omega_0$  соответственно при  $s < 0$ . Переход двигателя в этот режим осуществляется без отключения от сети, только за счет действия активного момента нагрузки на его валу. Двигатель при  $\omega > \omega_0$  превращается в генератор и отдает активную энергию в сеть. У многоскоростных двигателей режим рекуперативного торможения возникает при переходе (без остановки) электропривода с большей скорости на меньшую.

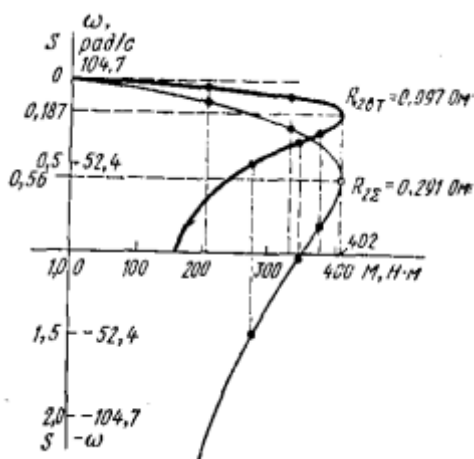


Рис. 4.1. Механические характеристики асинхронного двигателя

Механические характеристики этого режима являются продолжением характеристик двигательного режима в область квадранта II (рис. 4.2). Скольжение  $s$  и момент  $M$  при торможении имеют знак «-». Расчет координат  $\omega$  для построения механических характеристик в режиме рекуперативного торможения производится по формуле (3.5), как и для двигательного режима.

Торможение противовключением возникает в том случае, когда ротор двигателя вращается в направлении, противоположном направлению вращения магнитного поля статора. Этого можно достичь переключением обмоток статора на противоположное направление вращения (две фазы меняют местами) или, не отключая двигателя от сети, за счет действия активного момента нагрузки заставить ротор вращаться в другую сторону. Характеристики торможения противовключением являются продолжением характеристик двигательного режима в область скольжений  $s > 1$  (рис. 4.3). Уравнения механических характеристик те же, что и для двигательного режима. Расчет координат  $\omega$  для построения механических характеристик в режиме противовключения производится на основании естественной характеристики и зависимости (3.10). Так же, как и для двигателей постоянного тока, для асинхронных двигателей режим торможения противовключением применяется в двух случаях:

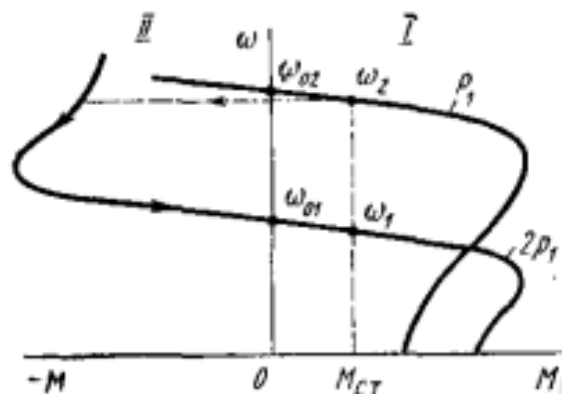


Рис. 4.2. Механические характеристики асинхронного двухскоростного двигателя при рекуперативном торможении

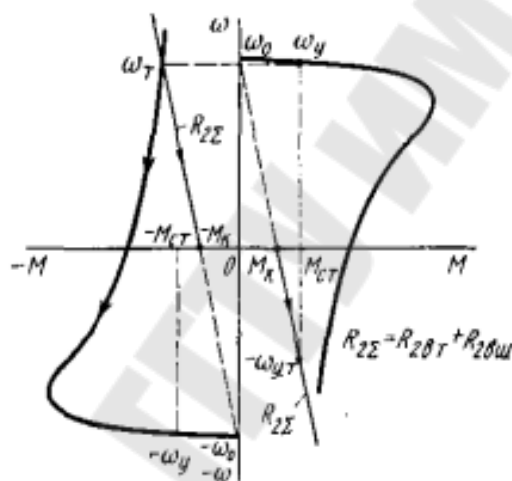


Рис. 4.3. Механические характеристики асинхронного двигателя при торможении противовключением

1) при торможении электропривода до  $\omega = 0$ ; 2) при установившейся работе с активным моментом  $M_{ст}$ .

В первом случае при  $\omega = 0$  двигатель отключают от сети (см. на рис. 4-3 часть характеристик в квадрантах II и IV). Если двигатель не отключить от сети, то произойдет реверс и при  $-M_{ст}$  угловая скорость будет  $-\omega_y$ .

Во втором случае под действием активного момента  $M_{ст}$  (например, спуск груза на кране) установившаяся скорость при торможении будет равна  $\omega_{y.т}$ .

Динамическое торможение с независимым возбуждением получается при отключении двигателя от сети переменного тока и после-

дующем подключении обмоток статора к сети постоянного тока. Обмотки фаз статора при питании постоянным током могут быть соединены между собой различными способами. Наиболее распространенные схемы включения представлены на рис. 4.4, а–в. При протекании по обмоткам статора постоянного тока возникает неподвижное относительно статора магнитное поле, под действием которого в проводниках обмотки вращающегося ротора наводится переменная ЭДС и, следовательно, в цепи обмотки ротора протекает переменный ток. Взаимодействие этого тока с магнитным полем статора обуславливает возникновение тормозного момента. При полном торможении ротора, когда  $\omega = 0$ , ЭДС, ток ротора и момент становятся равными нулю. Асинхронный двигатель при динамическом торможении работает генератором, у которого генерируемая энергия рассеивается в роторной цепи.

Так как магнитный поток неподвижен в пространстве, то угловая скорость ротора будет являться той скоростью, при которой проводники ротора пересекают магнитные силовые линии поля. Отношение угловой скорости ротора к синхронной угловой скорости магнитного поля двигательного режима представляет собой скольжение при динамическом торможении

$$S_T = \omega / \omega_0 = \omega_*, \quad (4-1)$$

откуда

$$\omega_* = 1 - S_T. \quad (4-2)$$

Из соотношений (4.1) и (4.2) следует, что скольжение при динамическом торможении будет тем больше, чем выше угловая скорость ротора.

Так как при питании постоянным током обмотки фаз статора участвуют в создании МДС по-разному, то для расчетов удобно ввести понятие эквивалентного намагничивающего тока  $I_{м.эк}$ . Этот ток эквивалентен такому переменному току, который при одинаковом значении в трех фазах создает такую же м.д.с., как и постоянный ток  $I_-$ , в действительности протекающий в обмотке. В зависимости от способа включения обмоток статора соотношение между  $I_{м.эк}$  и  $I_-$  различно. Так, для схем, приведенных на рис. 4.4, а–в, соответственно

$$I_{м.эк} = 0,82I_-; I_{м.эк} = 0,71I_-; I_{м.эк} = 0,44I_-;$$

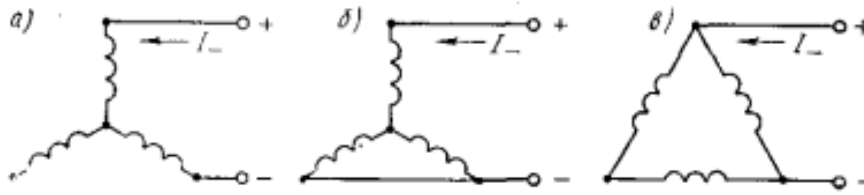


Рис. 4.4. Схемы включения при динамическом торможении с независимым возбуждением асинхронного двигателя

Протекающий в цепи ротора переменный ток образует противодействующую МДС, которая складывается с МДС статорной обмотки.

Результирующая МДС создает магнитный поток, который при неподвижном роторе из-за отсутствия размагничивающего действия со стороны ротора будет равен эквивалентному. При вращающемся роторе  $I_M = I_{M.ЭК} - I_2$ . Поэтому с увеличением угловой скорости, а следовательно, и тока ротора значение  $I_M$  уменьшается.

Наведенная ЭДС в обмотках фаз статора  $E_1$  является функцией намагничивающего тока  $I_M$ . Обобщенный график этой функции, называемой кривой намагничивания, в относительных приведен на рис. 4.5. На графике  $I^*_M = I_M / I_{1X}$ , где  $I_{1X}$  – ток в обмотках фаз статора при холостом ходе двигателя с  $U_{НОМ}$ , когда  $I_M \approx I_{1X}$ . Вместе с тем ЭДС  $E_1$  может быть выражена через индуктивное сопротивление контура намагничивания  $X_M$  и ток  $I_M$ , т. е.  $E_1 = I_M X_M$ , откуда

$$X_M = E_1 / I_M. \quad (4.3)$$

Так как  $E_1$ , зависит от тока  $I_M$  нелинейно, то и  $X_M$  будет зависеть от  $I_M$  так же нелинейно. Эта зависимость в относительных единицах показана на рис. 4.5.

Уравнение механической характеристики в режиме динамического торможения аналогично (3.8):

$$M_T = 2M_{T.KP} / (S_T / S_{T.KP} + S_{T.KP} / S_T). \quad (4.4)$$

Критический (или максимальный) момент

$$M_{T.KP} = 3(I_{M.ЭК} X_M)^2 / [2\omega_0 (X_M + X'_2)]. \quad (4.5)$$

Критическое скольжение, соответствующее критическому моменту,

$$S_{T.KP} = R'_2 / (X_M + X'_2). \quad (4.6)$$

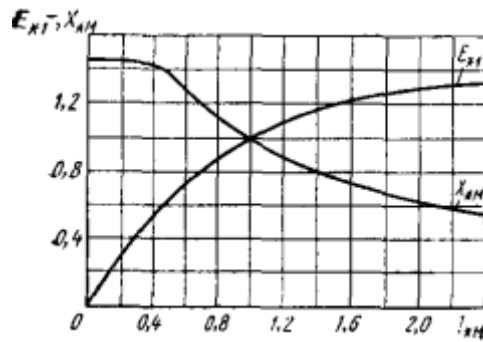


Рис. 4.5. Обобщенные зависимости ЭДС и индуктивного сопротивления намагничивания от намагничивающего тока

Анализируя последние три уравнения, можно заключить, что с увеличением внешнего сопротивления  $R_{2\text{вн}}$  в цепи ротора скольжения  $s_{\text{т.кр}}$  возрастает, а  $M_{\text{т.кр}}$  при  $I_{\text{М.ЭК}} = \text{const}$  остается неизменным. Это явление используют для поддержания тормозного момента двигателей с фазным ротором по мере снижения его угловой скорости.

Механические характеристики динамического торможения с независимым возбуждением представлены в квадранте II осей  $\omega$ ,  $M$  (рис. 4.6). При  $\omega = 0$  тормозной момент  $M_{\text{т}} = 0$ , а поэтому все характеристики сходятся в одной точке. При изменении  $I_{\text{М.ЭК}}$  критический момент на основании (4.5) изменяется пропорционально

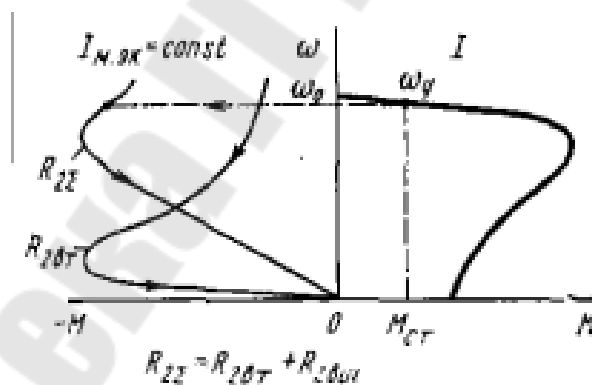


Рис. 4.6. Механические характеристики асинхронного двигателя при динамическом торможении с независимым возбуждением

Динамическое торможение с самовозбуждением получается при наличии конденсаторной батареи, которая подключается параллельно обмоткам статора двигателя (рис. 4.7, а). Эта батарея при работе в двигательном режиме на характеристики двигателя никакого влияния не оказывает. При отключении двигателя от сети реактивная мощ-

ность, необходимая для создания магнитного потока в статоре двигателя, генерируется конденсаторами  $C$ , в связи с чем рассматриваемый режим часто называется режимом конденсаторного торможения.

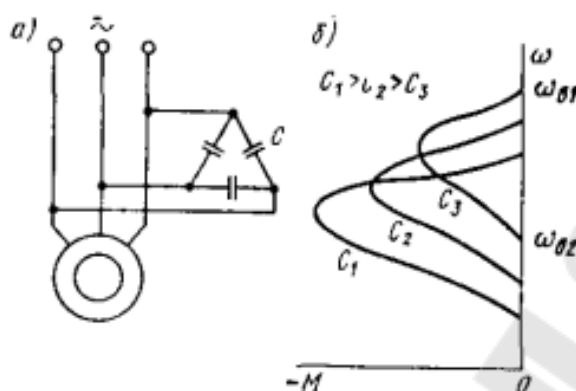


Рис. 4.7. Схема включения и механические характеристики асинхронного двигателя при динамическом торможении с сомовозбуждением

На время торможения двигатель становится самовозбужденным асинхронным генератором, энергия торможения в котором превращается в тепловую и рассеивается затем в окружающее пространство.

Началом процесса самовозбуждения является возникновение ЭДС в обмотках статора при вращающемся роторе за счет его остаточного намагничивания. Благодаря наличию конденсаторов появляется переменный трехфазный намагничивающий ток  $I_M$ , который, в свою очередь, увеличивает магнитный поток, а следовательно, и ЭДС в обмотке статора, что приводит к дальнейшему увеличению намагничивающего тока, росту ЭДС и т. д. Скорость двигателя  $\omega_{в1}$ , при которой начинается самовозбуждение, зависит от параметров цепи самовозбуждения – реактивного сопротивления ветви намагничивания  $X_M$  и конденсаторов  $C$ .

Самовозбуждение и тормозной момент появляются при скоростях выше  $(0,3 \div 0,5)\omega_0$ , поэтому при начальной скорости торможения, обычно превышающей указанное значение, за счет увеличения наведенной частоты переменного тока и соответствующего изменения параметров в цепи статора и ротора намагничивающий ток  $I_M$  будет меньше максимального значения. Соответственно значению намагничивающего тока двигатель будет развивать тормозной момент.

По мере понижения угловой скорости ротора в двигателе будут уменьшаться частота тока и индуктивное сопротивление (так как  $X_L = 2nfL$ ), а увеличиваться ток намагничивания  $I_M$  и емкостное сопро-



тивление [ $X_c = 1/(2\pi fC)$ ]. При некоторой угловой скорости  $\omega$  намагничивающий ток и соответственно тормозной момент будут иметь явно выраженный максимум (рис. 4.7, б). Дальнейшее снижение скорости приводит к уменьшению  $I_m$ ,  $M_T$ , а затем и к прекращению возбуждения при скоростях  $\omega_{в2}$ .

Тормозной режим существует при значениях угловой скорости  $\omega_{в1} - \omega_{в2}$ .

При увеличении емкости конденсаторов скорости  $\omega_{в1}$  и  $\omega_{в2}$  (или зона действия динамического торможения с самовозбуждением) перемещаются в область более низких значений. Ширина зоны торможения определяется соотношением индуктивных сопротивлений  $X_M/X_K$ : чем больше отношение  $X_M/X_K$ , тем шире зона действия торможения. Кроме того, изменение емкости конденсаторов приводит к изменению максимальных значений тормозного момента (рис. 4.7, б). С увеличением емкости  $C$  снижается угловая скорость  $\omega_{в1}$ , но растет тормозной момент двигателя.

## 5. РАСЧЕТ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ

Задача по расчету резисторов в цепях статора и ротора обычно формулируется следующим образом: известны паспортные данные двигателя; требуется рассчитать сопротивление добавочных резисторов в цепях ротора или статора, при включении которых искусственные характеристики пройдут соответственно через точки с координатами  $(\omega_{и}, I_{и})$  или  $(\omega_{и}, M_{и})$ . Расположение характеристик обычно задается по соображениям регулирования скорости или получения требуемых (допустимых) значений пусковых тока или момента АД.

Расчет резисторов в цепи статора. Рассмотрим наиболее распространенную задачу, когда включение добавочного резистора во все три Фазы статора (симметричная схема) должно обеспечить заданную кратность пускового тока  $a = I_{п.и}/I_{п.с}$  или момента  $\mu = M_{п.и}/M_{п.е}$ , где  $I_{п.и}$ ,  $I_{п.с}$  и  $M_{п.и}$ ,  $M_{п.е}$  – соответственно пусковые токи и моменты АД при включении добавочного резистора и без него.

Воспользуемся для расчета методикой, для чего введем понятия полного комплексного сопротивления короткого замыкания  $Z_K$ , соответствующего моменту пуска АД:

$$Z_K = U_{1\phi} / \sqrt{3} I_{п.е.}, \quad (5.1)$$

а также активного  $r$ , и реактивного  $x$ , сопротивлений короткого замыкания, определяемых по формулам

$$r_k = z_k \cos \varphi_n, \quad (5.2)$$

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}, \quad (5.3)$$

где  $\cos \varphi_n$  – коэффициент мощности АД в момент его пуска.

Тогда для получения заданных кратностей пусковых тока  $a$  или момента  $M$  требуемое сопротивление добавочного резистора определим по формулам

$$R_{1Д} = \sqrt{(z_k / \alpha)^2 - x_k^2 - r_k}; \quad (5.4)$$

$$R_{1Д} = \sqrt{(z_k / \mu)^2 - x_k^2 - r_k}. \quad (5.5)$$

Основная трудность при использовании формул (5.2)–(5.5) состоит в определении  $\cos \varphi_n = \cos \varphi_{кз}$  значение которого обычно не приводится в справочниках и каталогах. На рис. 5.2 приведены усредненные зависимости коэффициента мощности асинхронных двигателей от их номинальной мощности в режиме короткого замыкания (пуска), рассчитанные по паспортным данным двигателей серий 4А (кривая 2), и МТК (кривая 1) для различных скоростей вращения. Приблизительно для серии двигателей 4А с короткозамкнутым ротором можно принять  $\cos \varphi_n = 0,3–0,5$ , а для АД серий МТФ и МТН  $\cos \varphi_n = 0,6–0,7$ .

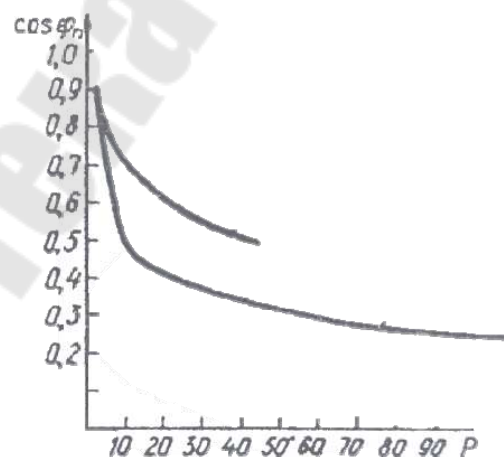


Рис. 5.2. Усредненные зависимости коэффициента мощности асинхронных двигателей от их номинальной мощности в режиме короткого замыкания

Расчет резисторов в цепи ротора. Обычно требуется определить сопротивление дополнительного резистора  $R_{2д}$  при включении которого АД будет иметь заданную искусственную характеристику или же она будет проходить через заданную точку с координатами  $(\omega_n, M_n)$ . При этом предполагается, что естественная механическая характеристика АД известна (рассчитана или снята экспериментально), а требуемая искусственная характеристика задана по условиям пуска или регулирования скорости.

Расчет сопротивления добавочного резистора  $R_{2д}$  может быть выполнен несколькими способами в зависимости от формы задания требуемой искусственной механической характеристики.

Если искусственная характеристика задана полностью и определена точка критического момента (например, характеристика 2 на рис. 5.1) с помощью которой находится отношение критических скольжений АД на естественной 1 и искусственной 2 характеристиках:

$$S_{к.е.} / S_{к.н.} = R'_p / (R'_p + R_{2д1}') = R_p / (R_p + R_{2д1}), \quad (5.6)$$

где  $R$  – сопротивление фазы обмотки ротора АД.

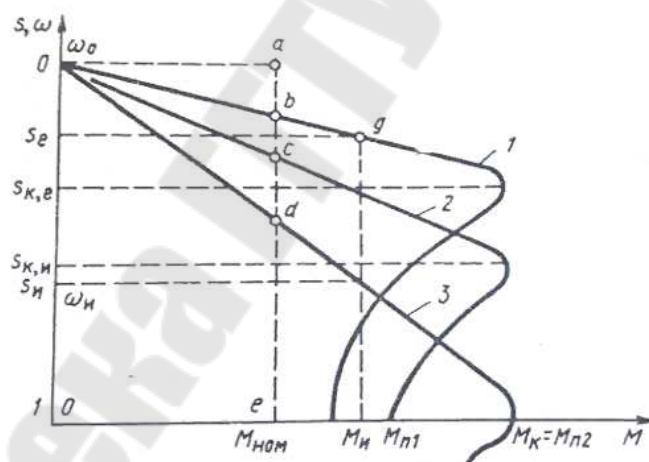


Рис. 5.1

Из (5.6) определим искомое значение

$$R_{2д1} = R_p (S_{к.н.} / S_{к.е.} - 1). \quad (5.7)$$

Формула (5.7) справедлива не только для критического момента  $M$ , но и для любого фиксированного момента  $M$ . Таким образом, если задана некоторая точка  $f$  искусственной характеристики 3 (см. рис. 5.1) с координатами  $M_n, S_n$ , то искомое сопротивление резистора можно найти по формуле

$$R_{2Д2} = R_p (S_{II} / S_e - 1). \quad (5.18)$$

где  $s_e$  – скольжение АД на естественной характеристике 1, соответствующее моменту  $M_{II}$ .

Отметим, что значение сопротивления обмотки ротора можно найти приближенно по следующей формуле с использованием паспортных данных АД:

$$R_p = E_{2к} S_{ном} / (\sqrt{3} I_{2ном}). \quad (5.9)$$

Если искусственная характеристика задана своей рабочей частью, то для расчета резисторов можно использовать метод отрезков. На рис. 5.7 выполнено такое построение, для чего проведена вертикальная линия, соответствующая номинальному моменту  $M_{ном}$ , и отмечены характерные точки  $a, b, c, d, e$ . Тогда сопротивление искомого резистора для получения характеристики 2

$$R_{2Д1} = R_{ном} bc / ae, \quad (5.10)$$

где  $R_{ном} = E_{2к} / (\sqrt{3} I_{2ном})$  – номинальное сопротивление АД;  $E_{2к}$  – ЭДС ротора при  $s = 1$ ;  $I_{2ном}$  – номинальный ток ротора.

С помощью метода отрезков и рис. 5.1 при необходимости по естественной характеристике 1 можно найти и сопротивление фазы обмотки ротора

$$R_p = R_{2ном} ab / ae. \quad (5.11)$$

Типовой задачей для ЭП с АД с фазным ротором является расчет резисторов в цепи ротора, обеспечивающих заданную пусковую диаграмму двигателя. Напомним, что пусковая диаграмма представляет собой совокупность нескольких искусственных механических характеристик АД, которые используются при его пуске. Пусковая диаграмма АД обычно строится по аналогии с ДПТНВ в предположении, что рабочий участок механических характеристик АД близок к линейному. При построении пусковой диаграммы АД момент  $M_2$ , обычно принимается не более (0,8–0,9)  $M_k$  а момент  $M_1$ , должен составлять (1,1–1,2)  $M_k$ . Число характеристик (ступеней) пусковой диаграммы  $m$  и значения моментов  $M_1$  и  $M_2$ , связаны между собой следующим соотношением:

$$m = \lg(1 / S_{ном} M_1) / \lg(M_1 / M_2). \quad (5.12)$$

Расчет пусковых резисторов, обеспечивающих требуемую пусковую диаграмму, производится с помощью формул (5.8) или (5.10).

## 6. ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Лабораторные работы выполняются на стенде, который позволяет исследовать 33 режима автоматизации пуска, торможения и реверса двигателя постоянного тока.

Студентам предлагается самостоятельно разработать одну из предложенных релейно-контакторных схем, собрать на стенде с помощью проводов и по загоранию светодиодов убедиться в правильности работы.

Релейно-контакторные схемы автоматизации пуска, торможения и реверса АД включают:

1. Пуск АД в функции скорости;
2. Пуск АД в функции времени;
3. Пуск АД в функции тока;
4. Прямой пуск АД и торможение противовключением в функции скорости;
5. Прямой пуск АД и торможение противовключением в функции времени;
6. Прямой пуск АД и торможение противовключением в функции тока;
7. Прямой пуск АД и динамическое торможение в функции скорости;
8. Прямой пуск АД и динамическое торможение в функции времени;
9. Прямой пуск АД и динамическое торможение в функции тока;
10. Пуск и торможение противовключением АД в функции скорости;
11. Пуск и торможение противовключением АД в функции времени;
12. Пуск и торможение противовключением АД в функции тока;
13. Пуск и динамическое торможение АД в функции скорости;
14. Пуск и динамическое торможение АД в функции времени;
15. Пуск и динамическое торможение АД в функции тока;
16. Пуск АД в функции скорости и торможение противовключением в функции времени;
17. Пуск АД в функции скорости и торможение противовключением в функции тока;

18. Пуск АД в функции времени и торможение противовключением в функции скорости;
  19. Пуск АД в функции времени и торможение противовключением в функции тока;
  20. Пуск АД в функции тока и торможения противовключением в функции скорости;
  21. Пуск АД в функции времени и торможение противовключением в функции времени;
  22. Пуск АД в функции скорости и динамическое торможение в функции времени;
  23. Пуск АД в функции скорости и динамическое торможение в функции тока;
  24. Пуск АД в функции времени и динамическое торможение в функции скорости;
  25. Пуск АД в функции времени и динамическое торможение в функции времени;
  26. Пуск АД в функции тока и динамическое торможение в функции скорости;
  27. Пуск АД в функции тока и динамическое торможение в функции времени;
  28. Пуск АД в функции скорости и реверсирование в функции времени;
  29. Пуск АД в функции скорости и реверсирование в функции тока;
  30. Пуск АД в функции времени и реверсирование в функции скорости;
  31. Пуск АД в функции времени и реверсирование в функции тока;
  32. Пуск АД в функции тока и реверсирование функции скорости;
  33. Пуск АД в функции тока и реверсирование функции времени.
- В качестве защиты лабораторных работ предлагается выбрать все электрические аппараты, которые используются для автоматизации пуска, торможения и реверса АД.

## **7. ВЫБОР ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

### **7.1. Выбор предохранителей**

Предохранители и плавкие вставки к ним выбираются по номинальному напряжению и току. Номинальное напряжение предохрани-

телей и вставок должно равняться или быть больше номинального напряжению сети, к которой подключена защищаемая нагрузка, т.е.  $U_{н.пр} \geq U_c$ , где  $U_{н.пр}$  – номинальное напряжение предохранителя;  $U_c$  – номинальное напряжение сети.

Для надежной работы предохранителя как защитного аппарата, при выборе номинальных токов плавкой вставки и патрона необходимо выполнить следующие основные условия:

– номинальный ток плавкой вставки по нагреву должен быть равен или несколько больше номинального тока защищаемой установки ( $I_{н.вст} \geq I_{н.уст}$ );

– плавкая вставка не должна перегорать при пуске, кратковременных допустимых для двигателя перегрузок, и в них не должно происходить старение плавкой вставки под действием этих токов;

– должна быть обеспечена селективность срабатывания, т.е. при нарушении нормального режима работы отключался бы только поврежденный участок электрической сети. Это осуществляется за счет того, что время срабатывания плавких вставок, стоящих выше в цепи, увеличивается на одну-две ступени по отношению к предохранителям, установленным ниже по схеме от пункта питания.

При пуске *асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором* пусковой ток может достигать значения  $7 \cdot I_{ном}$ . По мере разгона пусковой ток падает до значения, равного номинальному току электродвигателя. Поэтому для защиты таких электродвигателей от коротких замыканий величина плавкой вставки предохранителя должна удовлетворять условию:

$$I_{н.вст} \geq \frac{I_{пуск}}{\alpha} = \frac{I_{н.дв} \cdot K_I}{\alpha},$$

где  $I_{пуск}$  – пусковой ток двигателя;  $I_{н.дв}$  – номинальный ток двигателя;  $K_I$  – кратность пускового тока;  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий условия пуска и длительность пускового периода ( $\alpha=2,5$  – нормальные (легкие) условия пуска, время разгона от 2 до 5 с (привода металлорежущих станков с относительно небольшой инерцией механизма),  $\alpha=1.6-2.0$  – тяжелые условия пуска, время разгона больше 10 с (мощные вентиляторы, компрессоры, насосные установки, прессы, дробилки или работа в повторно-кратковременном режиме)).

Если предохранитель стоит в линии, питающей несколько двигателей, плавкую вставку рекомендуется выбирать по двум условиям:

$$I_{\text{н.вст}} \geq \sum I_{\text{н.дв}},$$

$$I_{\text{н.вст}} \geq \frac{\sum I_{\text{н.дв}} + (I_{\text{п.дв}} - I_{\text{н.дв}})}{\alpha},$$

где  $\sum I_{\text{н.дв}}$  – сумма номинальных токов двигателей, подключенных к линии;  $(I_{\text{п.дв}} - I_{\text{н.дв}})$  – разность пускового и номинального токов берется для двигателя, у которого она наибольшая.

Ток плавкой вставки выбирается по большей из величин, определенных по этим формулам.

Плавкие вставки предохранителей для защиты *асинхронных двигателей с фазным ротором и двигателей постоянного тока*, если они запускаются с помощью пусковых реостатов (кратность пускового тока не превышает 2,5), рекомендуется выбирать в соответствии с формулой:

$$I_{\text{н.вст}} \geq (1,15 \div 1,25) I_{\text{н.дв}}.$$

Для двигателей, работающих в повторно-кратковременном режиме, за номинальный принимается ток в режиме ПВ = 25 %.

Для расчета плавкой вставки при использовании предохранителей для защиты *цепей управления релейно-контакторных схем* поступают следующим образом. Рассматривают режимы работы релейно-контакторной схемы (пуск, торможение, реверс) и определяют наиболее тяжелый режим, т.е. включено наибольшее количество электрических аппаратов. Плавкая вставка выбирается по условию:

$$I_{\text{н.вст}} \geq I_{\text{п.мах}} + \sum I_{\text{р}},$$

где  $I_{\text{п.мах}}$  – пусковой ток катушки наибольшего аппарата;  $\sum I_{\text{р}}$  – сумма рабочих токов катушек аппаратов, кроме наибольшего, включенных в наиболее тяжелом режиме.

## 7.2. Выбор автоматических воздушных выключателей (автоматов)

Автоматы могут иметь электромагнитный, тепловой, комбинированный и другие расцепители. Для защиты электродвигателя, работающего в повторно-кратковременном режиме, номинальный ток электромагнитного расцепителя принимается равным току двигателя в режиме ПВ = 25 %.



Выбор автомата в общем случае осуществляется по двум условиям:

$$U_{н.а} \geq U_{н.с}, \quad I_{н.а} \geq I_{н.с},$$

где  $U_{н.а}$  и  $U_{н.с}$  – соответственно, номинальные напряжения автомата и сети;  $I_{н.а}$ ,  $I_{н.с}$  – соответственно, номинальные токи автомата и нагрузки.

Ток уставки электромагнитного расцепителя:

– для АД с короткозамкнутым ротором

$$I_{уст.эм} \geq (1,5 \div 1,8) I_{п.дв};$$

– для АД с фазным ротором и двигателей постоянного тока (ДПТ)

$$I_{уст.эм} \geq (2,5 \div 3) I_{н.дв};$$

– для группы короткозамкнутых АД

$$I_{уст.эм} \geq (1,5 \div 1,8) \left[ \sum I_{н.дв} + (I_{п.дв} - I'_{н.дв}) \right];$$

– для групп двигателей с фазным ротором

$$I_{уст.эм} \geq (1,5 \div 2) I'_{н.дв} + \sum I_{н.дв},$$

где  $I_{уст.эм}$  – ток уставки электромагнитного расцепителя;  $I_{п.дв}$ ,  $I_{н.дв}$  – соответственно, пусковой и номинальный токи двигателя;  $(I_{п.дв} - I'_{н.дв})$  – разность пускового и номинального токов для двигателя, у которого она наибольшая;  $I'_{н.дв}$  – номинальный ток двигателя с наибольшим пусковым током.

Ток срабатывания (отсечки)  $I_{ср.эм}$  электромагнитного расцепителя проверяется по максимальному кратковременному току  $I_{кр}$  линии (установки)

$$I_{ср.эм} \geq 1,25 I_{кр}.$$

Выбор автомата с электромагнитным расцепителем для защиты цепи управления релейно-контакторной схемы аналогичен выбору предохранителей.

Ток уставки теплового расцепителя и теплового реле:

– при питании одного электродвигателя

$$I_{уст. тр} \geq I_{н.дв};$$

– при затяжных пусках двигателя

$$I_{уст. тр} \geq (1,2 \div 1,25) I_{н.дв};$$

– с учетом температуры окружающей среды

$$I_{уст. тр} = I_{н.дв} / \beta,$$

где  $\beta = 1 + 0,006 (40 - t_{окр})$  – коэффициент, учитывающий температуру окружающей среды;  $t_{окр}$  – температура окружающей среды.

Автоматические выключатели с комбинированным расцепителем выбирается по двум условиям

$$I_{н.тр} \geq (1,15 - 1,25)I_{н.дв};$$

$$I_{ср.эм.(отс)} \geq 1,25I_{п.дв},$$

где  $I_{н.тр}$  – номинальный ток уставки теплового расцепителя;  $I_{ср.эм(отс)}$  – ток срабатывания электромагнитного расцепителя (отсечка).

### 7.3. Выбор токовых реле

Выбор *максимально – токовых реле* (для защиты от токов короткого замыкания) осуществляется из условия  $I_{н.р} \geq I_{н.дв}$ , а для двигателей, работающих в повторно-кратковременном режим при ПВ = 25 % (рис. 7.1)

$$I_{н.дв} = I_{н.дв25},$$

где  $I_{н.р}$ ,  $I_{н.дв}$  – номинальные токи реле и защищаемого двигателя;  $I_{н.дв25}$  – номинальный ток двигателя, работающего при ПВ = 25 %.

Уставка реле по току срабатывания для АД с короткозамкнутым ротором должна быть  $I_{уст} \geq (1,3 - 1,5)I_{п.дв}$ , где  $I_{п.дв}$  – пусковой ток двигателя. Для защиты двигателей с фазным ротором и ДПТ ток срабатывания выбирается из условия

$$I_{уст} \geq (2,25 \div 2,5)I_{н.дв}.$$

Если несколько двигателей с фазным ротором питаются через общий ввод (рис. 2.11), уставка реле КА1 и КА2 должна быть  $I_{уст} \geq (2,25 - 2,5)I_{н.дв}$ . Уставка реле КА0 выбирается из условия

$$I_{уст} = (1,25 - 1,5)I'_{н.дв25} + \sum I_{н.дв25},$$

где  $I'_{н.дв25}$  – номинальный ток двигателя наибольшей мощности (режим ПВ = 25 %);  $\sum I_{н.дв25}$  – сумма номинальных токов всех двигателей, защищаемых реле КАО.

Если токовое реле используется в качестве реле управления полем, то

$$I_{вкл} \approx I_1, I_{отк} = I_{вкл} / K_B,$$

где  $I_{отк}$ ,  $I_{вкл}$  – токи включения и отключения реле;  $K_B$  – коэффициент возврата реле (должен быть как можно больше);  $I_1$  – максимально допустимый ток на пусковой диаграмме.

Если токовое реле используется в качестве реле обрыва поля, то

$$I_{отк} = 0,9 \cdot I_{вmin}; I_{вmin} < I_{вкл} \leq 0,85 I_{вн},$$

где  $I_{вн}$  – номинальный ток возбуждения двигателя;  $I_{вmin}$  – ток возбуждения при ослабленном магнитном потоке двигателя.

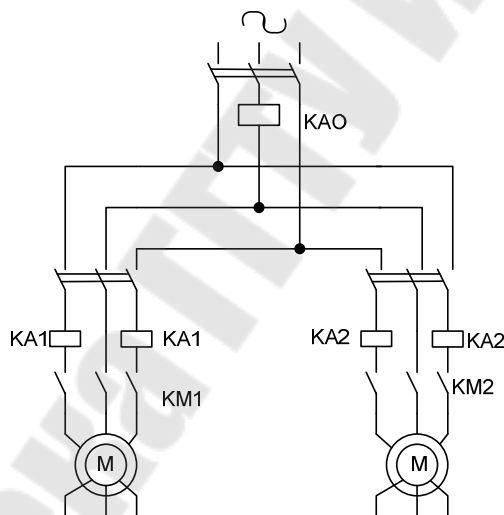


Рис. 7.1. Схема включения максимальных токовых реле

#### 7.4. Выбор контакторов и пускателей

Выбор силовых аппаратов следует производить с учетом следующих основных требований: напряжение и максимальный ток аппаратов должны соответствовать напряжению и допустимому длительному току цепи, аппараты должны без повреждений включать пусковой ток нагрузки и отключать полный рабочий ток, а также без разрушения допускать отключение пускового тока.

При выборе контакторов или пускателей, если не учитывать количество главных и вспомогательных контактов, продолжительность включения, число включений в час и требуемую электрическую износостойкость контактов, следует руководствоваться условиями:

$$I_{\text{нк}} \geq I_{\text{н.дв}}, I_{\text{нв}} \geq I_{\text{п}},$$

где  $I_{\text{нк}}$  – номинальный ток главных контактов контактора;  $I_{\text{нв}}$  – допустимый ток включения контактора;  $I_{\text{н.дв}}$ ,  $I_{\text{п}}$  – номинальный и пусковой токи двигателя.

Если окажется, что число вспомогательных контактов в выбранном контакторе или пускателе меньше числа контактов данного аппарата в принципиальной электрической схеме, то для «размножения» контактов выбирают промежуточное реле. Катушка этого реле получает питание от одного контакта уже выбранного аппарата, а все недостающие контакты этого аппарата заменяются на соответствующие контакты промежуточного реле.

## Содержание

1. Релейно-контакторное управление электроприводами .....	3
2. Основные понятия и соотношения для асинхронных двигателей ....	3
3. Механические характеристики асинхронных двигателей в двигательном режиме.....	9
4. Механические характеристики асинхронных двигателей в тормозных режимах .....	18
5. Расчет регулировочных резисторов.....	25
6. Выполнение лабораторных работ .....	29
7. Выбор электрических аппаратов.....	30
7.1 Выбор предохранителей.....	30
7.2 Выбор автоматических воздушных выключателей (автоматов).....	32
7.3 Выбор токовых реле .....	34
7.4 Выбор контакторов и пускателей.....	35

**Веппер Леонид Владимирович**  
**Логвин Владимир Васильевич**

## **РЕЛЕЙНО-КОНТАКТОРНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

**Практикум**  
**по выполнению лабораторных работ**  
**для студентов специальности 1-53 01 05**  
**«Автоматизированные электроприводы»**  
**дневной формы обучения**

Подписано к размещению в электронную библиотеку  
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного  
учебно-методического документа 11.07.24.

Пер. № 128Е.  
<http://www.gstu.by>