

# **АВИАЦИОННЫЕ И СПЕЦИАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ**

## **Тема 1.3. Трехфазные асинхронные электрические машины**

### **Лекция 12**

**12.1. Пусковые свойства трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.**

**12.2. Пуск асинхронных двигателей с фазным ротором.**

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, в силу ряда существенных достоинств (простота конструкции, высокая надежность и экономичность), в настоящее время составляют основу электропривода, в котором около 80 % всего парка электродвигателей составляют асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором.

Основной недостаток этих двигателей — неудовлетворительные пусковые свойства, особенно при их средней и большой мощности.

По этим причинам рассмотрению вопросов преодоления этого недостатка уделяется особое внимание.

К пусковым свойствам асинхронных двигателей, как и к двигателям другого принципа действия, предъявляются следующие требования.

1. Двигатель должен создавать начальный пусковой момент, превышающий статический момент сопротивления, чтобы ротор двигателя мог прийти во вращение и достичь установившейся частоты вращения.

2. Пусковой ток не должен достигать значений, вызывающих повреждение двигателя, и создавать в сети значительного падения напряжения, нарушающего работу других потребителей.

3. Схема пуска должна быть по возможности простой, экономичной, удобной в обслуживании; продолжительность пуска должна быть минимальной.

Пусковой ток асинхронного двигателя, А,

$$I_{\text{п}} = \frac{U_1}{z_{\text{к}}},$$

где  $z_{\text{к}}$  — полное сопротивление двигателя в начальный момент пуска (режим короткого замыкания), Ом

$$z_{\text{к}} = \sqrt{(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2}.$$

Пусковой момент асинхронного двигателя

$$M_{\text{п}} = \frac{m_1 p U_1^2 r_2'}{2\pi f_1 z_{\text{к}}^2}.$$

Исходя из требований к пусковым свойствам двигателя желательно уменьшение пускового тока и увеличение пускового момента. Однако эти требования противоречивы, так как обычно средства, способствующие повышению пускового момента, вызывают увеличение пускового тока, и наоборот.

Пусковой ток асинхронных двигателей в 5 — 7,5 раз может превышать номинальный. Отсутствие скользящих контактов (коллектора или контактных колец) допускает в двигателях с короткозамкнутым ротором значительные кратности пускового тока.

Благодаря кратковременности процесса пуска, двигатель не успевает перегреваться. Исключения составляют приводы с частым включением или реверсированием. В остальных случаях основной причиной, ограничивающей прямое включение двигателя в сеть, является недостаточная мощность этой сети и ударное механическое воздействие пускового момента на подвижные части двигателя и рабочей машины.

*Пуск непосредственным включением в сеть*

применяют для асинхронных двигателей малой, а иногда и средней мощности. Предельная мощность двигателя для прямого включения в сеть определяется в каждом конкретном случае в зависимости от допустимой нагрузки для этой сети и условиями пуска двигателя (пуск в режиме холостого хода или под нагрузкой). Включение двигателей в сеть, питающую другие силовые и осветительные устройства, не должно вызывать падения напряжения в ней более чем на 5 % от номинального значения.



Основным средством уменьшения пускового тока является временное (на время пуска) понижение напряжения  $U_1$ , подводимого к обмотке статора. На этом основаны все специальные способы пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Однако следует помнить, что с понижением напряжения  $U_1$  уменьшается *пусковой момент*, который пропорционален квадрату этого напряжения.

Поэтому пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором *при пониженном напряжении* допустим лишь для случаев пуска без нагрузки или с небольшой нагрузкой на валу.

Для асинхронных двигателей, работающих при соединении обмотки статора «треугольником», обычно применяют метод пуска *переключением обмотки статора со «звезды» на «треугольник»* (рис. 12.1).

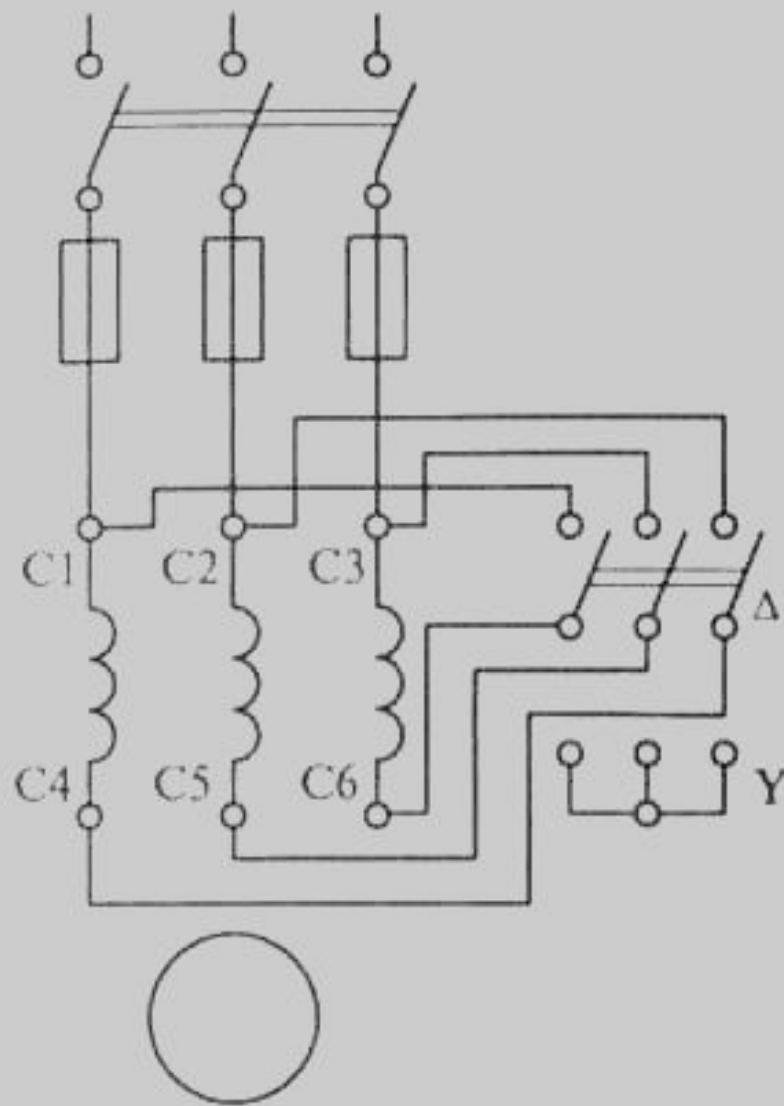


Рис. 12.1 Пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором переключением обмотки статора со «звезды» на «треугольник»

Во время подключения двигателя к сети переключатель ставят в положение  $Y$ , при этом напряжение на фазных обмотках статора понижается в  $\sqrt{3}$  раз. Во столько же раз уменьшается ток в фазных обмотках статора, но величина тока в линейных проводах сокращается в 3 раза. Объясняется это тем, что если бы обмотка статора была соединена в «треугольник», то линейный ток был бы больше фазного в  $\sqrt{3}$

Следовательно, соединив обмотки статора «звездой», мы добиваемся уменьшения линейного тока в  $\sqrt{3}$  раза.

После разгона ротора до частоты вращения, близкой к установившейся, переключатель переводят в положение  $\Delta$ . При этом обмотки статора оказываются под линейным напряжением, что вызывает небольшой бросок тока.

Однако следует иметь в виду, что при включении двигателя с соединением обмоток статора «звездой», когда напряжение на фазных обмотках понижается в  $\sqrt{3}$  раз, *пусковой момент* уменьшается в 3 раза.

Применение рассмотренного способа пуска ограничено двигателями, рассчитанными для работы при соединении обмотки статора «треугольником», при этом на панель коробки выводов должны быть выведены все шесть концов фазных обмоток статора.

Более универсальным является **способ**  
**понижения напряжения посредством пусковых**  
**резисторов  $R_{\Pi}$  или дросселей (реакторов)  $L$ ,**  
включаемых в линейные провода последовательно с  
обмоткой статора двигателя (рис. 12.2, а).

Пуск двигателя происходит при срабатывании  
контактора КМ1 (при разомкнутых контактах  
контактора КМ2). За счет падения напряжения в  
пусковых резисторах  $I_{\Pi}R_{\Pi}$  напряжение на зажимах  
обмотки статора понижается до значения  $U'_1$ .

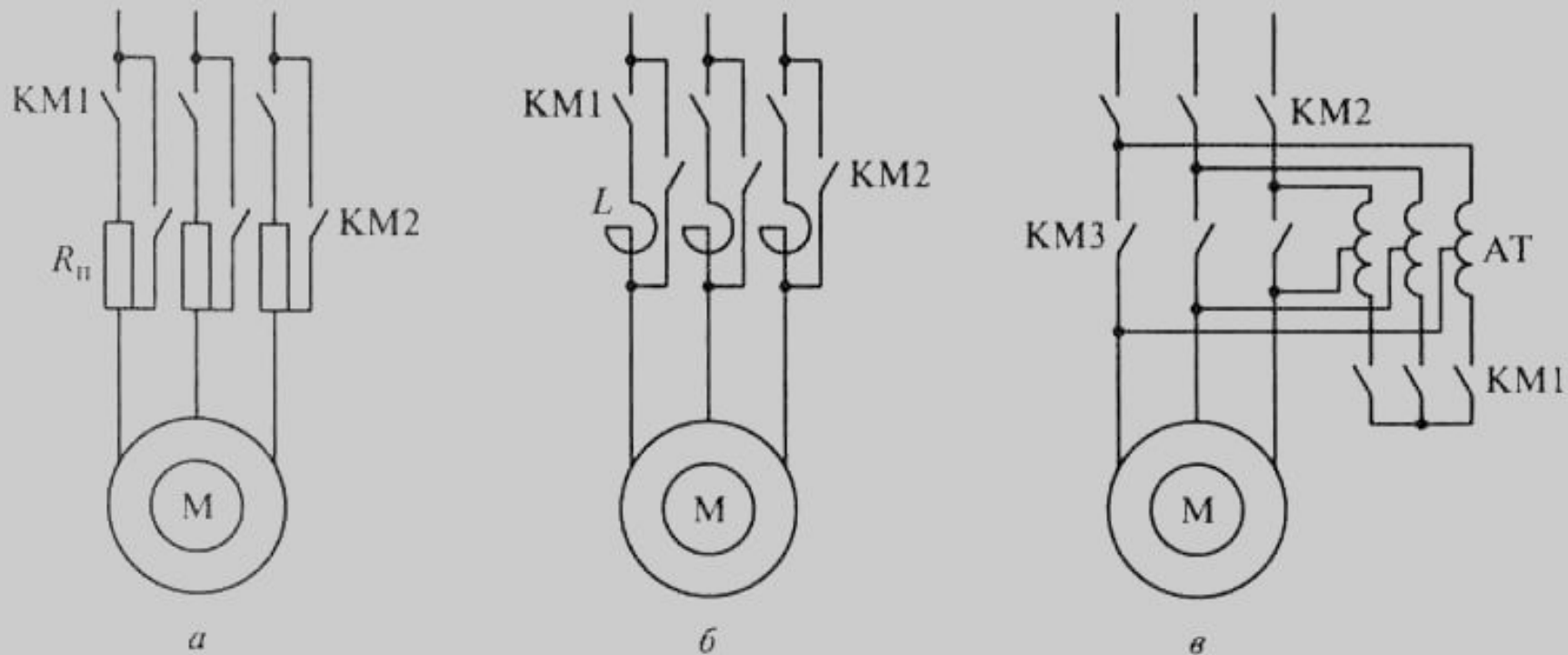


Рис 12.2 Способы уменьшения пускового тока асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором:

*a* — пусковыми резисторами  $R_{н}$ ; *б* — дросселями  $L$ ; *в* — трехфазным автотрансформатором АТ



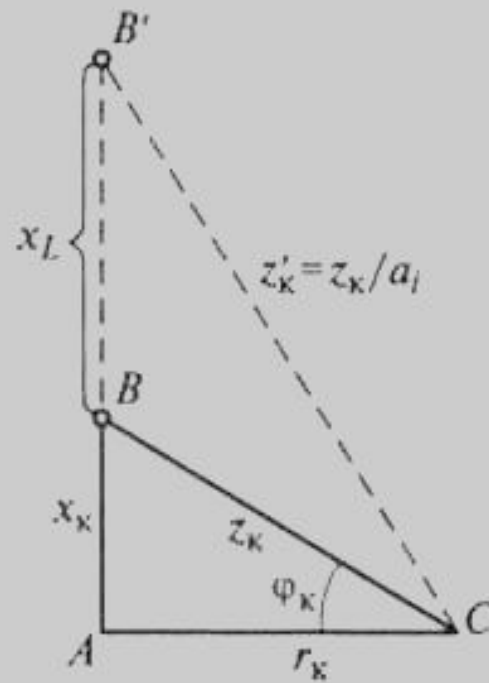
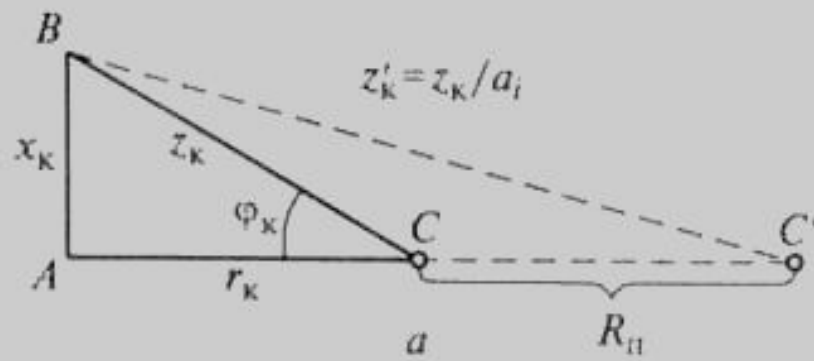
После разгона ротора срабатывает контактор КМ2, и двигатель оказывается под номинальным напряжением сети  $U_I$ . При этом искусственный пусковой ток по сравнению с естественным током уменьшается в  $a_i = (U'_I/U_I)$  раз, а искусственный пусковой момент по сравнению с естественным сокращается в  $\alpha_M = a_i^2$  раз.

Например, если напряжение было понижено в  $\sqrt{3}$  раз, то искусственный пусковой ток будет уменьшен в  $\sqrt{3}$  раз, а искусственный пусковой момент — в 3 раза.

Аналогично происходят процессы при использовании дросселей  $L$  (рис. 12.2, б). Однако следует помнить, что применение резисторов  $R_{\text{п}}$  вызывает значительные потери при пуске двигателя, пропорциональные квадрату пускового тока  $P_{\text{п}} = I_{\text{п}}^2 R_{\text{п}}$ . В то время как применение дросселей  $L$  таких потерь не вызывает, поскольку их активное сопротивление весьма незначительно.

На рис. 12.3, а показан прямоугольный треугольник сопротивлений короткого замыкания асинхронного двигателя  $ABC$ . При этом начальный пусковой ток двигателя

$$I_{\Pi} = \frac{U_1}{z_k}$$



б

Рис. 12.3 Треугольники сопротивлений короткого замыкания при применении резисторов (а) и дросселей (б) в цепи статора для уменьшения пускового тока

Если с целью уменьшения начального пускового тока в линейные провода статора включить последовательно резисторы  $R_{\Pi}$ , то катет активного сопротивления удлинится на величину  $R_{\Pi}$  и треугольник примет вид  $ABC'$ , при этом полное сопротивление двигателя окажется равным  $z'_k$  и искусственный пусковой ток

$$I'_{\Pi} = \frac{U_1}{z'_k}$$

Таким образом, отношение искусственного пускового тока к его естественному значению обратно пропорционально отношению соответствующих полных сопротивлений:

$$\frac{I'_{\Pi}}{I_{\Pi}} = \frac{z_{\kappa}}{z'_{\kappa}},$$

откуда

$$z'_{\kappa} = \frac{I_{\Pi}}{I'_{\Pi}} z_{\kappa} = \frac{z_{\kappa}}{\alpha_j},$$

где

$$\alpha_l = \frac{I'_{\Pi}}{I_{\Pi}}$$

— коэффициент, показывающий, до какого значения уменьшится искусственный пусковой ток  $I'_{\Pi}$  после включения в линейные провода статора резисторов  $R_{\Pi}$

Из треугольника  $ABC'$  видим, что

$$z'_k{}^2 = x_k^2 + (r_k + R_{II})^2.$$

Решая это уравнение относительно  $R_{II}$  получим формулу для расчета сопротивления резистора  $R_{II}$  который следует включить в линейные провода статора, чтобы искусственный пусковой ток двигателя уменьшился до значения  $I'_{II} = I_{II} \alpha_i$ , :

$$R_{II} = \sqrt{\left(\frac{z_k}{\alpha_i}\right)^2 - x_k^2} - r_k.$$

Если для ограничения пускового тока применены дроссели  $L$  (см. рис. 12.2, б), то, построив треугольник сопротивлений  $AB'C$  (рис. 12.3, б) и проделав аналогичные преобразования, получим формулу для расчета индуктивного сопротивления дросселей, включение которых в линейные провода статора приведет к уменьшению пускового тока до требуемого значения  $I'_{\Pi} = I_{\Pi} \alpha_i$ :

$$x_L = \sqrt{\left(\frac{z_K}{\alpha_i}\right)^2 - r_K^2 - x_K},$$

где  $z_K$  — полное сопротивление двигателя в режиме короткого замыкания, Ом,

$$z_K = \frac{U_1}{I_{\Pi}};$$

$x_K$  и  $r_K$  — индуктивная и активная составляющие этого сопротивления:

$$r_K = z_K \cos \varphi_K; \quad x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2}.$$



Уменьшение пускового момента при включении

$R_{\Pi}$  или  $L$  составит

$$M'_{\Pi} = \alpha_M M_{\Pi},$$

где

$$\alpha_M = \alpha_i^2,$$

т.е. если  $\alpha=0,7$ , то пусковой момент уменьшается

до значения

$$M'_{\Pi} = \alpha_i^2 M_{\Pi} = 0,7^2 M_{\Pi} \approx 0,5 M_{\Pi}.$$

При пуске двигателя через понижающий автотрансформатор (см. рис. 12.2, в) сначала срабатывает контактор КМ1 и при разомкнутых контактах контактора КМ3 и замкнутых контактах КМ2 двигатель оказывается включенным в сеть на напряжение

$$U_1' = \frac{U_1}{k_A}$$

где  $k_A$  — коэффициент трансформации понижающего автотрансформатора АТ.

При этом пусковой ток уменьшается в  $k_A$  раз, а ток в линейных проводах сети (на входе автотрансформатора) — в  $k_A^2$  раз. Объясняется это тем, что в понижающем автотрансформаторе первичный ток меньше вторичного в  $k_A$  раз.

После разгона ротора отключается контактор КМ 1 и своими контактами размыкает обмотки АТ, в итоге автотрансформатор превращается в дроссель (реактор), при этом напряжение на входе двигателя несколько повышается, что вызывает небольшой бросок пускового тока.

При достижении частоты вращения, близкой к номинальной, срабатывает контактор КМЗ, и двигатель оказывается под номинальным напряжением сети.

Как и при предыдущих способах пуска, основанных на понижении напряжения, автотрансформаторный пуск также сопровождается уменьшением пускового момента. В связи с повышенной стоимостью автотрансформатора и большого количества коммутирующих устройств этот способ имеет ограниченное применение. Обычно его используют для пуска асинхронных и синхронных двигателей значительной мощности.

## 12.2. Пуск асинхронных двигателей с фазным ротором

Конструкция асинхронных двигателей с фазным ротором позволяет включать в цепь ротора добавочный резистор с активным сопротивлением  $r_{доб}$ , что дает возможность воздействовать на пусковые параметры двигателя.

Так, с увеличением активного сопротивления фазной цепи ротора  $R'_2 = r'_2 + r_{доб}$  увеличивается критическое скольжение двигателя  $s_{кр}$ , при этом максимальный момент  $M_{max}$  остается неизменным.

Это подтверждается механическими характеристиками двигателя (см. рис. 12.4), построенными для ряда нарастающих значений сопротивления добавочного резистора в цепи обмоток фазного ротора  $r_{доб}$ .

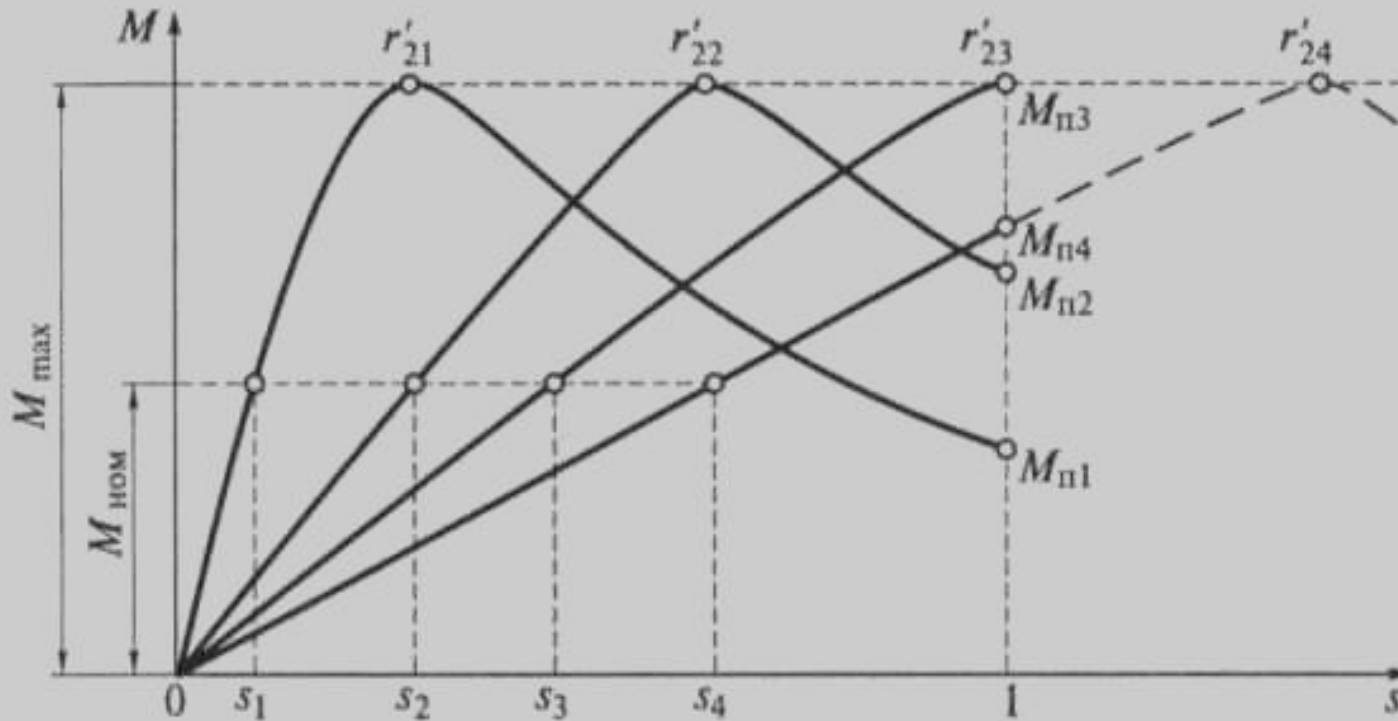


Рис 12.4 Влияние активного сопротивления обмотки ротора на механические характеристики асинхронного двигателя

Увеличение пускового момента введением в цепь ротора добавочного сопротивления  $r_{доб}$  ведет к увеличению сопротивления  $z_K$ , а следовательно, способствует уменьшению пускового тока.

В качестве добавочных сопротивлений в цепи ротора применяют пусковые реостаты ПР. Рассмотрим процесс пуска трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором с применением ПР, управляемого контакторами КМ1, КМ2 и КМ3 (рис12.5, а).

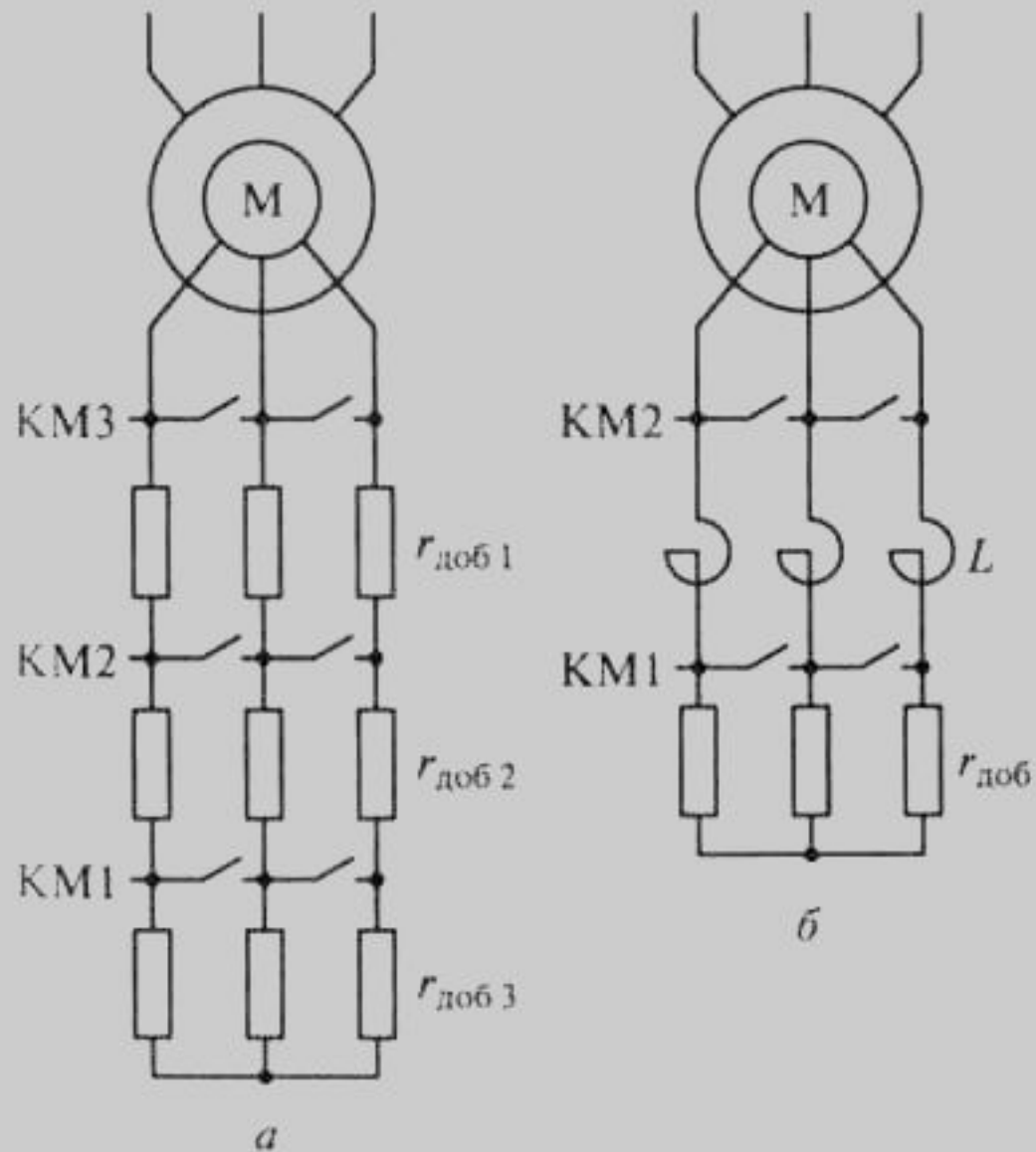


Рис. 12.5 Пусковые реостаты:  
*a* — трехступенчатый; *б* — двухступенчатый  
 с дросселями



Механические характеристики асинхронного двигателя  $n=f(M)$  при работе на разных ступенях ПР представлены на пусковой диаграмме двигателя (рис. 12.6).

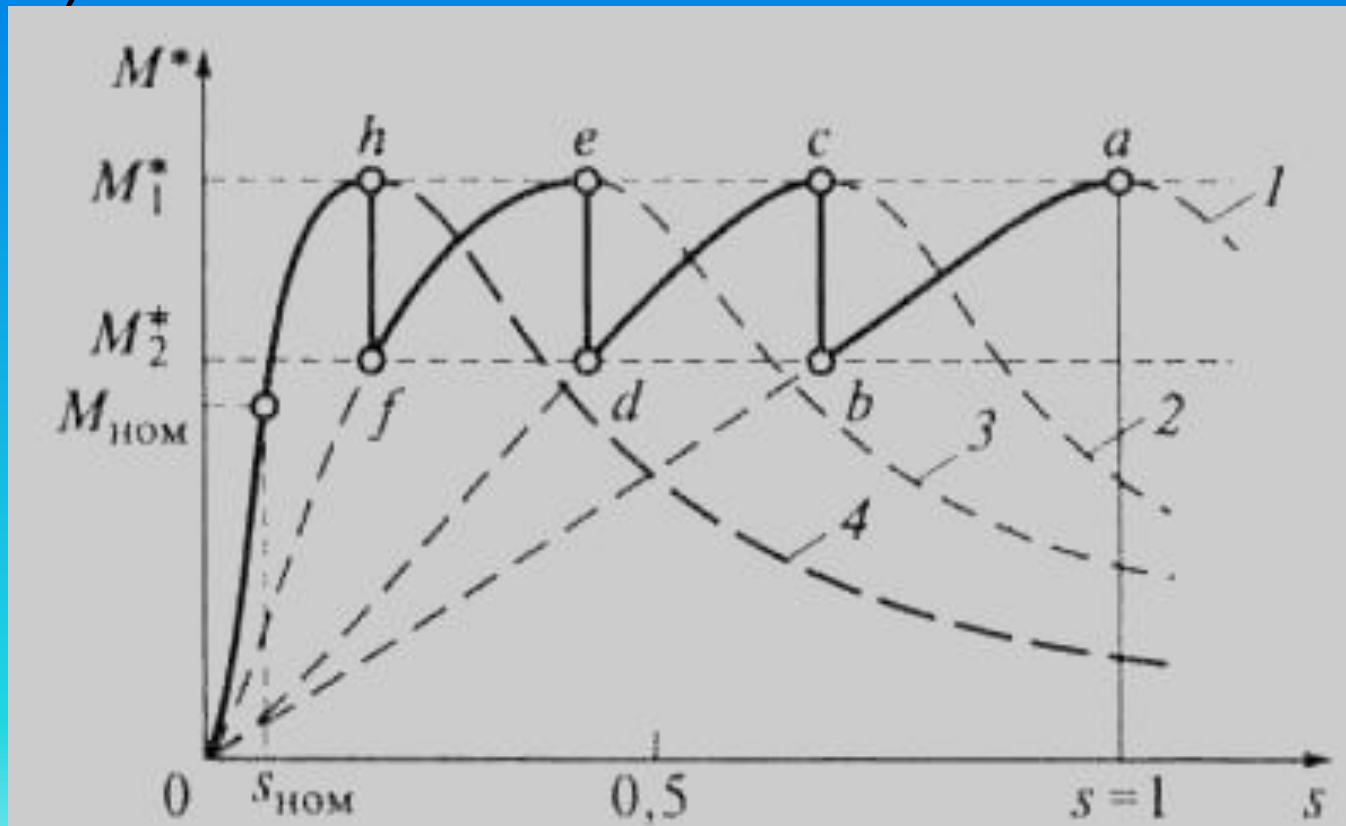


Рис. 12.6 Пусковая диаграмма асинхронного двигателя

Сопротивления ступеней реостата и моменты времени их переключения подобраны таким образом, что пусковой момент двигателя меняется от наибольшего значения  $M_1^*$ , называемого *начальным пусковым моментом*, до значения  $M_2^*$ , называемого *моментом переключений*.

При включении двигателя в сеть контакторы КМ1, КМ2, КМ3 отключены, и сопротивление реостата на первой ступени максимально:

$$R_{\text{пр1}} = r_{\text{доб1}} + r_{\text{доб2}} + r_{\text{доб3}}$$

При этом пуск двигателя происходит на реостатной механической характеристике 1 и начальный пусковой момент равен  $M_1^*$  (график 1, точка *a*). Под действием момента  $M_1^*$  ротор разгоняется и при некоторой частоте вращения момент достигает значения  $M_2^*$  (точка *b*). При этом срабатывает контактор КМ 1 и сопротивление пускового реостата уменьшается до значения

$$R_{\text{ПР1}} = r_{\text{доб2}} + r_{\text{доб3}}$$

После этого пуск продолжается на реостатной характеристике 2, а пусковой момент восстанавливается до значения  $M_1^*$ . При некоторой частоте вращения (в точке  $d$ ) срабатывает контактор КМ2, и сопротивление пускового реостата вновь уменьшается до значения

$$R_{\text{ПР1}} = r_{\text{доб3}}$$

Пуск двигателя продолжается на реостатной характеристике 3, при этом пусковой момент восстанавливается .

И наконец, при некоторой частоте вращения (точка  $f$ ) срабатывает контактор КМЗ, обмотка ротора замыкается накоротко ( $R_{пр} = 0$ ), и двигатель переходит в рабочий режим (естественная механическая характеристика 4), при этом момент и частота вращения достигают установившихся значений, например,  $M_{НОМ}$  и  $s_{НОМ}$ .

При выборе числа ступеней  $Z$  пускового реостата следует иметь в виду, что с увеличением числа ступеней пуск двигателя становится более плавным, но повышается стоимость пусковой аппаратуры и возрастает продолжительность пусковой операции.

Для пуска асинхронных двигателей с фазным ротором общего назначения обычно применяют реостаты на число ступеней  $Z=2 — 4$ . Если же к электроприводу предъявляются повышенные требования по плавности пуска, то число ступеней увеличивают. При уменьшенном числе ступеней ПР пуск получается форсированным.

При решении задач на расчет сопротивлений резисторов  $r_{доб}$  пусковых реостатов, применяемых в цепях фазного ротора для ограничения пускового тока или регулирования частоты вращения, используют принцип: для данного асинхронного двигателя скольжение  $s$  пропорционально активному сопротивлению цепи ротора этого двигателя. В соответствии с этим принципом справедливо равенство

$$\frac{r_2 + r_{доб}}{s} = \frac{r_2}{s_{ном}}$$

где  $r_2$  — активное сопротивление собственно обмотки ротора при рабочей температуре;  $s$  — скольжение при введенном в цепь ротора резистора сопротивлением  $r_{доб}$  и номинальной нагрузкой на валу двигателя.

Из этого уравнения получим формулу для расчета активного сопротивления добавочного резистора  $r_{доб}$ , при включении которого в цепь фазного ротора скольжения двигателя будет равно требуемому значению  $s$  при номинальной нагрузке на валу двигателя:

$$r_{доб} = r_2 \left( \frac{s}{s_{ном}} - 1 \right).$$

Расчет ступеней пускового реостата при начальном пусковом моменте  $M_1^* \leq 0,75$  выполняют аналитическим методом.



Активное сопротивление фазной обмотки ротора определяем по формуле:

$$r_2 = \frac{S_{ном} E_2}{1,73 I_{2ном}},$$

где  $E_2$  — ЭДС неподвижного ротора при разомкнутой его обмотке, В;

$I_{2ном}$  — ток ротора при номинальной нагрузке, А.

Значения этих параметров приводятся в каталогах на асинхронные двигатели с фазным ротором.

Затем задаются относительным значением

момента переключений:

$$M_2^* = \frac{M_2}{M_{\text{ном}}},$$

и определяют требуемое отношение начального

пускового момента  $M_1^*$  к моменту переключений  $M_2^*$

по формуле

$$\lambda_2 = (Z + 1) \sqrt{\frac{1}{S_{\text{ном}} M_2^*}},$$

где  $Z$  — число ступеней пускового реостата.

Сопротивления резисторов на трех ступенях  
пускового реостата (см. рис. 12.5, а):

$$r_{доб3} = r_2(\lambda - 1);$$

$$r_{доб2} = r_{доб3}\lambda;$$

$$r_{доб1} = r_{доб2}\lambda.$$

Сопротивления пускового реостата на его  
ступенях:

$$R_{ПР1} = r_{доб1} + r_{доб2} + r_{доб3};$$

$$R_{ПР2} = r_{доб2} + r_{доб3};$$

$$R_{ПР3} = r_{доб3}.$$