

Асинхронные машины

Рабочие характеристики

Опыт холостого хода

Опыт короткого замыкания

Пуск в ход асинхронных двигателей

РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АД

Рабочие характеристики определяют эксплуатационные свойства асинхронного двигателя (АД)

СКОРОСТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА $n_2 = f(P_2)$,

т.е. зависимость частоты вращения ротора n_2 от полезной механической мощности двигателя $- P_2$.

Т.к. $n_2 = n_1(1 - S)$, а $p_{\text{э2}} = P_{\text{эм}} \cdot S$,

то скольжение, а значит и частоту вращения n_2 определяют *отношением электрических потерь в роторе $p_{\text{э2}}$ к электромагнитной мощности $P_{\text{эм}}$:*

$$S = p_{\text{э2}} / P_{\text{эм}} \quad n_2 = n_1(1 - p_{\text{э2}} / P_{\text{эм}})$$

В режиме холостого хода можно принять $p_{э2} \approx 0$, поэтому $S \approx 0$, $n_{20} = n_1$.

С увеличением нагрузки на валу эл.потери в роторе $p_{э2}$ возрастают, скольжение S увеличивается, n_2 уменьшается.

С увеличением активного сопротивления обмотки ротора r_2 угол наклона к оси абсцисс у кривой $n_2 = f(P_2)$ будет увеличиваться, т.к. возрастают электрические потери в роторе $P_{э2}$.

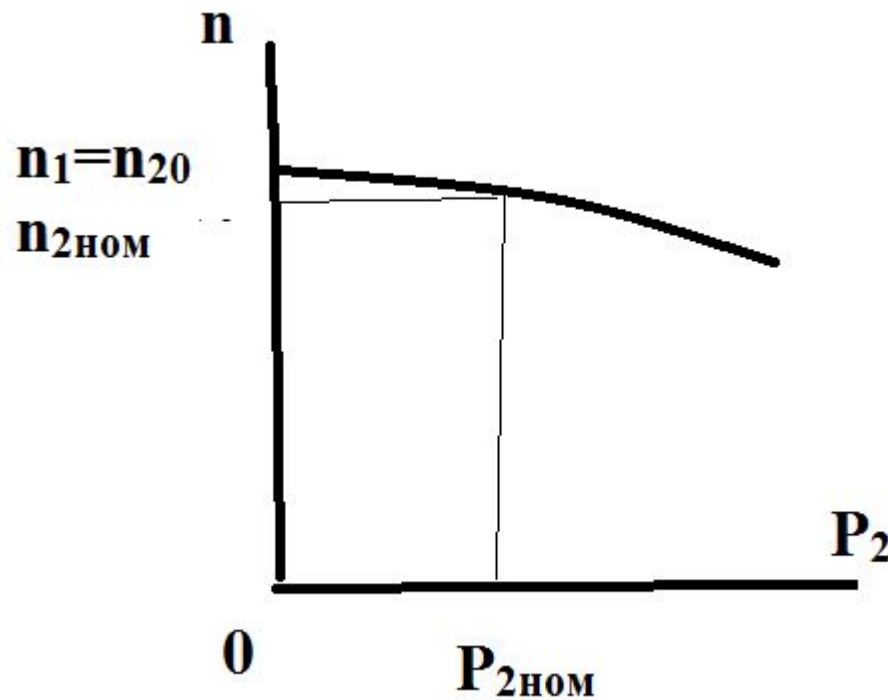


Рис.1

МОМЕНТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА $M_2 = f(P_2)$

Поскольку $M_2 = P_2 / \omega = 9,55 P_2 / n_2$, то с увеличением нагрузки полезная мощность увеличивается и полезный момент M_2 также пропорционально увеличивается, если частота вращения $n_2 = \text{const}$ - график имел бы вид прямой (рис. 2). Однако, в АД с увеличением нагрузки частота вращения ротора n_2 уменьшается ($n_2 = \text{var}$), поэтому график $M_2 = f(P_2)$ отклоняется от прямой:

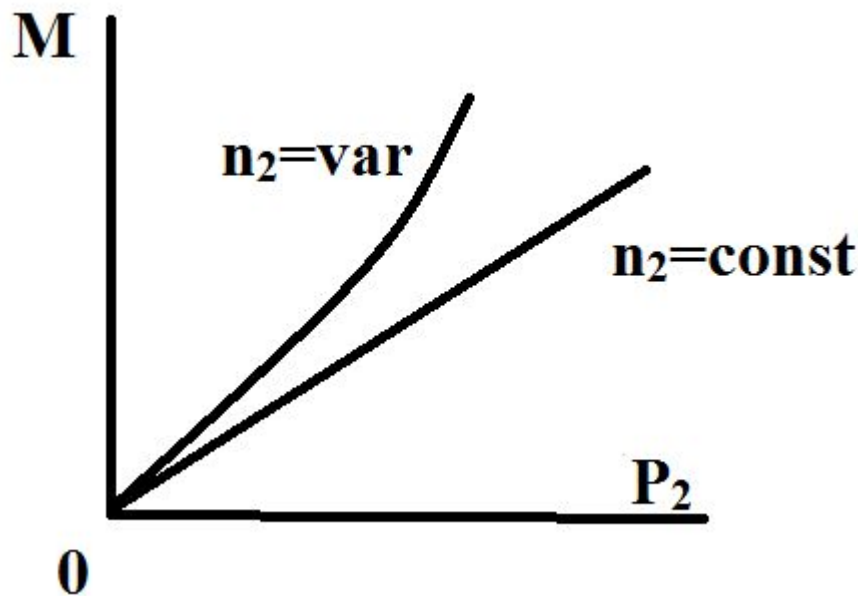


Рис.2

N.B.
 $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2)$

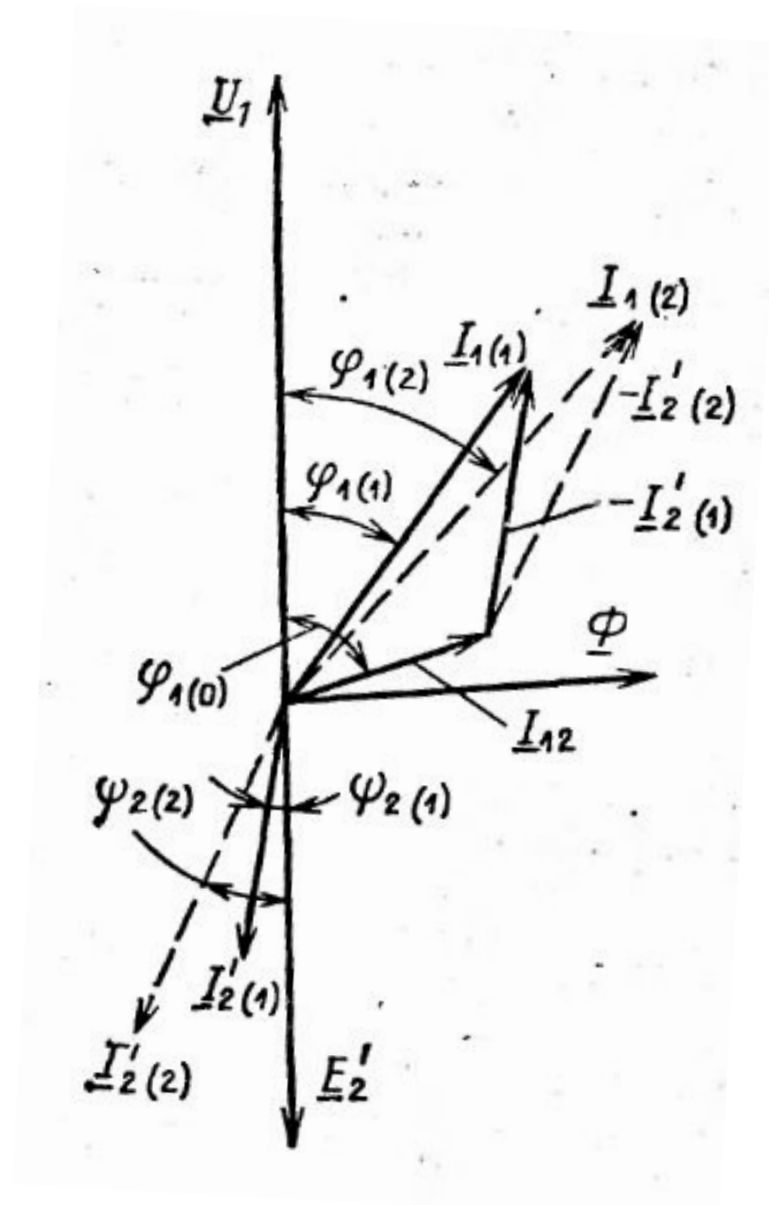


Рис. 3 Влияние нагрузки двигателя на $\cos \varphi_1$

ЗАВИСИМОСТЬ $\cos\phi_1 = f(P_2)$

Коэффициент мощности $\cos\phi_1$ АД меньше единицы, т.к. ток статора I_1 имеет реактивную составляющую, необходимую для создания магнитного поля статора.

В режиме холостого хода $\cos\phi_1$ наименьший, т.к. ток I_0 при любой нагрузке постоянен и имеет реактивный (индуктивный) характер, из-за чего сдвиг по фазе между I_1 и ϕ_1 большой, т.е. $\phi_1 \approx 90^\circ$, а $\cos 90^\circ = 0$.

При увеличении нагрузки увеличивается активная составляющая тока I_1 (рис.3) и при нагрузке близкой к номинальной $\cos\phi_1 = 0,8 - 0,9$, т.е. наибольший.

При дальнейшем увеличении нагрузки $\cos\phi_1$ уменьшается, т.к. увеличивается индуктивное сопротивление обмотки вращающегося ротора X_{2s} из-за увеличения скольжения, т.е. при

$$\uparrow P_2 \rightarrow n_2 \downarrow \rightarrow s \uparrow \rightarrow \uparrow f_2 = f_1 s \rightarrow \uparrow X_{2s} = 2\pi f_2 L_\sigma.$$

Если АД работает недогруженным, то для увеличения $\cos\phi_1$, нужно уменьшить напряжение сети U_1 .

Например, в АД работающем недогруженным при соединении фазных обмоток “треугольником” можно их переключить на “звезду” (рис.4). При этом фазное напряжение уменьшится в $\sqrt{3}$ раз, т.е. уменьшится величина магнитного потока. Следовательно, и ток холостого хода уменьшится в $\sqrt{3}$ раз, а значит увеличится активная составляющая тока статора I_1 по отношению к реактивной составляющей I_0 , поэтому увеличится $\cos\phi_1$

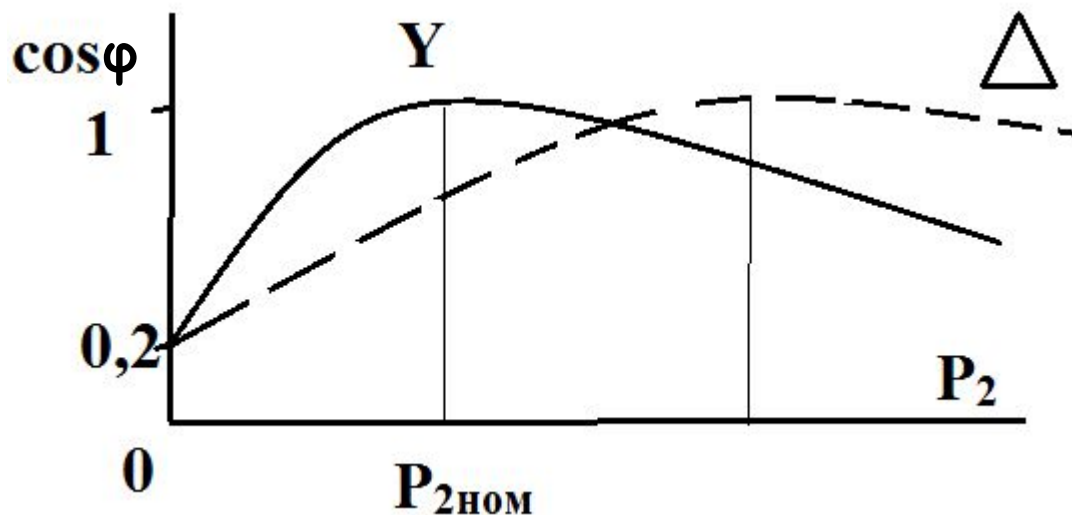


Рис.4

ТОКОВАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА $I_1 = f(P_2)$

Кривая этой характеристики не выходит из начала координат, т.к. в режиме холостого хода ($P_2 = 0$) двигатель потребляет из сети ток I_0 , обусловленный потерями холостого хода (в их число входят потери в обмотке статора $P_{\text{эл}} = m_1 I_0^2 r_1$, поэтому вид кривой слегка параболический)

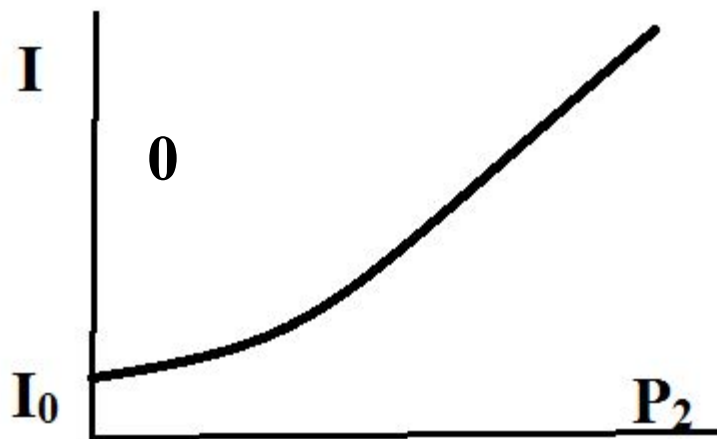


Рис.5

ЗАВИСИМОСТЬ $\eta = f(P_2)$

$\eta = f(P_2)$ график этой характеристики изображен на рис.6. Как видно из рисунка, наибольший КПД - при нагрузках близких к номинальной.

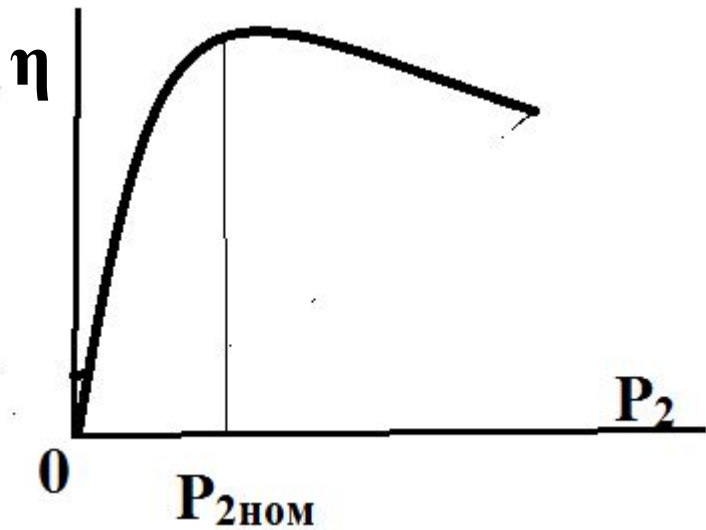


Рис.6

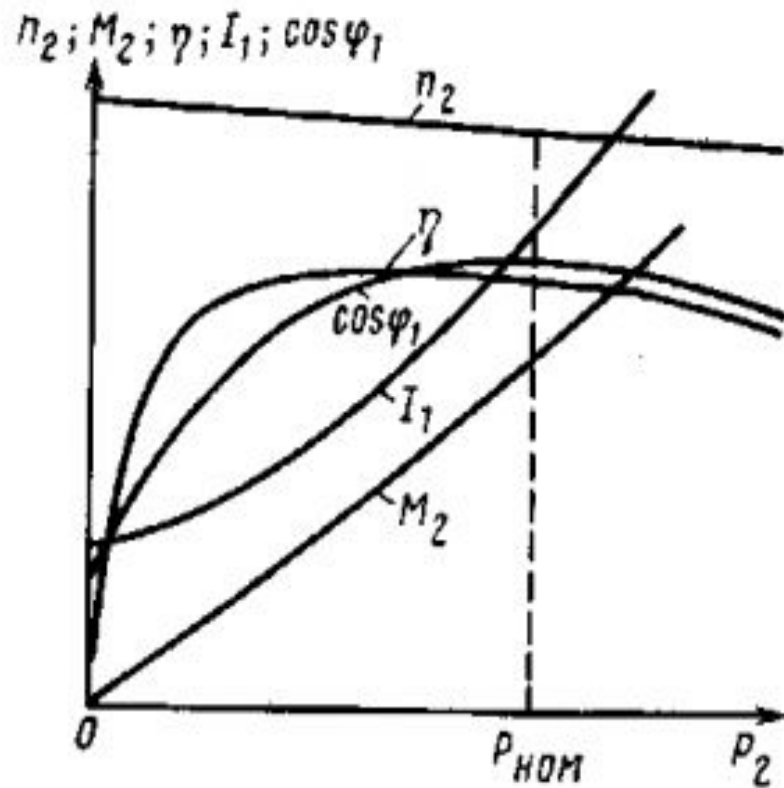


Рис.7

На рис.7 показаны все пять характеристик АД

Чтобы получить данные для построения рабочих характеристик АД существует два метода: метод непосредственной нагрузки (его применяют для АД мощностью не более 10-15кВт) и более универсальный косвенный метод, не имеющий ограничений по мощности исследуемого АД.

Метод заключается в выполнении двух экспериментов: опыта холостого хода и короткого замыкания.

Опыты холостого хода и короткого замыкания

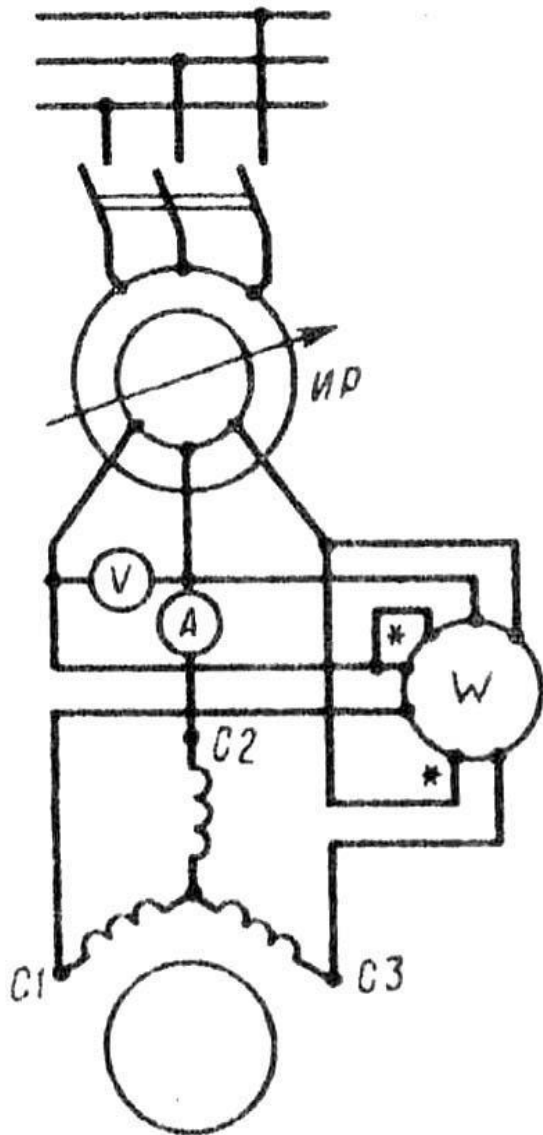


Рис.8 Схема включения трехфазного асинхронного двигателя при опытах х.х. и к.з.

Ваттметр W измеряет активную мощность P_0 , потребляемую двигателем в режиме х.х., которая включает в себя электрические потери в обмотке статора $P_{\text{эл}} = m_1 I_0^2 r_1$, магнитные потери в сердечнике статора P_m и механические потери $P_{\text{мех}}$ (Вт): $P_0 = m_1 I_0^2 r_1 + P_m + P_{\text{мех}}$

Здесь r_1 - активное сопротивление фазы обмотки статора (Ом), измеренное непосредственно после отключения двигателя от сети, чтобы обмотка не успела охладиться.

Сумма магнитных и механических потерь двигателя (Вт)

$$P'_0 = P_m + P_{\text{мех}} = P_0 - m_1 I_0^2 r_1$$

Коэффициент мощности для режима х.х.

$$\cos \varphi_0 = P_0 / (m_1 U_1 I_0).$$

Опыт начинают с повышенного напряжения

$$U_1 = 1,15U_{1\text{ном}}, \text{ понижая его постепенно до } 0,4U_{1\text{ном}}$$

По результатам измерений и вычислений строят характеристики х.х. I_0 , P_0 , P'_0 и $\cos \varphi_0 = f(U_1)$, на которых отмечают значения величин $I_{0ном}$, $P_{0ном}$, $P'_{0ном}$ и $\cos \varphi_0$, соответствующих номинальному напряжению $U_{1ном}$ (рис. 9).

Если график $P'_0 = f(U_1)$ продолжить до пересечения с осью ординат ($U_1 = 0$), то получим величину потерь $P_{мех}$.

Это разделение магнитных и механических потерь основано на том, что при неизменной частоте сети f_1 частота вращения двигателя в режиме х.х. n_0 , а, следовательно, и механические потери $P_{мех}$ неизменны. В то же время магнитный поток Φ прямо пропорционален ЭДС статора E_1 . Для режима х.х. $U_1 \approx E_1$, а поэтому при $U_1 = 0$ и магнитный поток $\Phi = 0$, а, следовательно, и магнитные потери $P_m = 0$. Определив величину механических потерь $P_{мех}$, можно вычислить магнитные потери (Вт):

$$P_m = P'_0 - P_{мех}$$

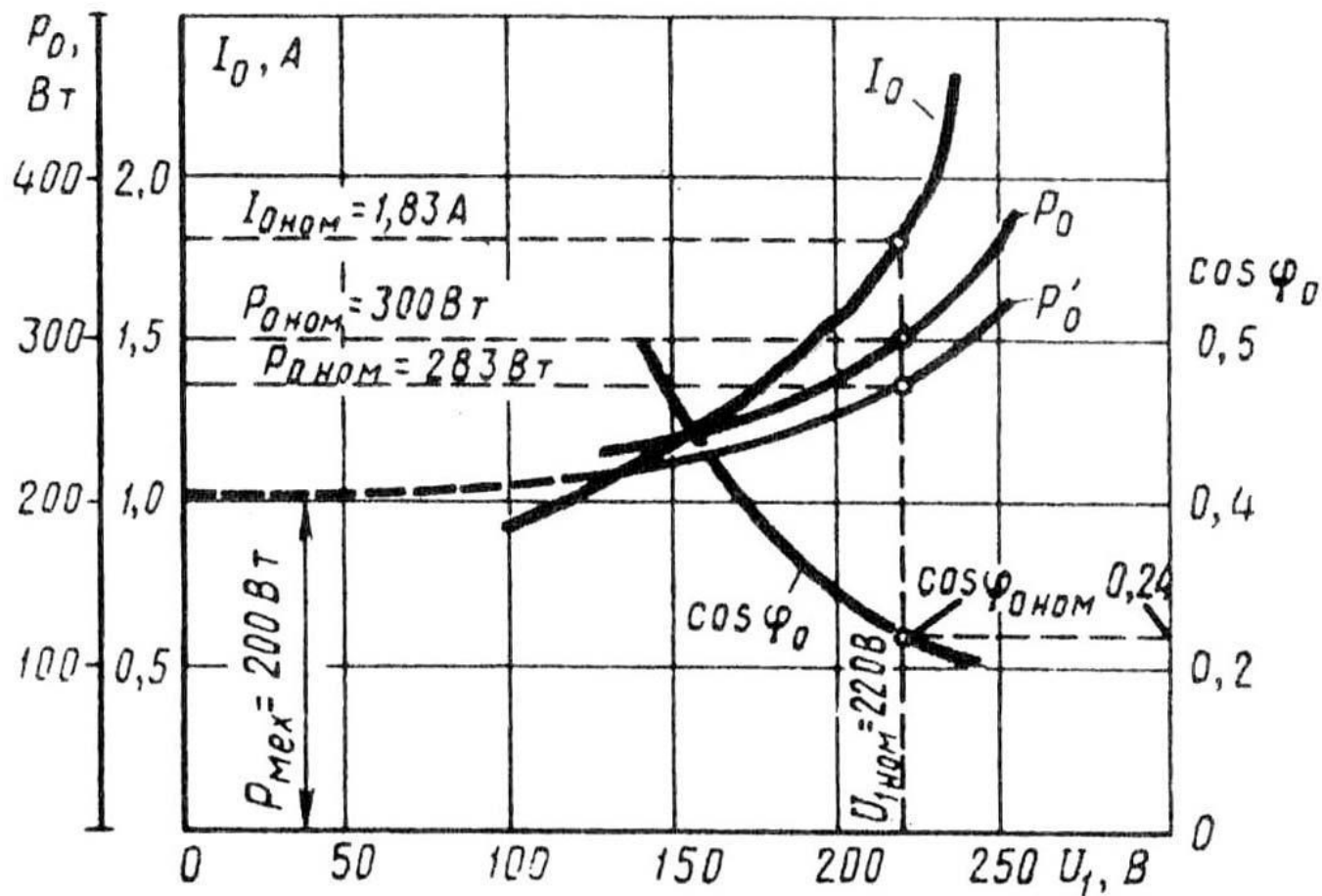


Рис.9. Характеристики х.х. трехфазного асинхронного двигателя (3,0 кВт, 220/380 В, 1430 об/мин)

Для асинхронных двигателей с фазным ротором в опыте холостого хода определяют

коэффициент трансформации напряжений между обмотками статора и ротора.

Этот коэффициент с достаточной точностью может быть определен по отношению средних арифметических линейных (междуфазовых) напряжений статора к аналогичным напряжениям ротора...

Опыт короткого замыкания

Схема соединений асинхронного двигателя при опыте к.з. остается, как и в опыте х.х. (см. рис. 8). Но при этом измерительные приборы должны быть выбраны в соответствии с пределами измерения тока, напряжения и мощности. Ротор двигателя следует жестко закрепить, предварительно установив его в положение, соответствующее среднему току к.з.

С этой целью к двигателю подводят небольшое напряжение ($U_K = 0,1U_{ном}$) и, медленно поворачивая ротор, следят за показанием амперметра, стрелка которого будет колебаться в зависимости от положения ротора двигателя. Объясняется это взаимным смещением зубцовых зон ротора и статора, вызывающего колебания индуктивных сопротивлений обмоток двигателя.

Предельное значение тока статора при опыте к.з. устанавливаются, исходя из допустимой токовой нагрузки питающей сети и возможности провести опыт в минимальный срок, чтобы не вызвать опасного перегрева двигателя.

Для двигателей мощностью до 1 кВт возможно проведение опыта, начиная с номинального напряжения $U_K = 0,1U_{ном}$.

В этом случае предельный ток $I_K = (1,5 \div 2,5) \times I_{1ном}$. Для двигателей большей мощности сила предельного тока $I_K = (2,5 \div 5) \times I_{1ном}$. При выполнении опыта к.з. в учебных целях можно ограничиться предельным током $I_K = (1,5 \div 2,5) \times I_{1ном}$.

При выполнении опыта к.з. желательно соединение обмотки статора выполнять звездой.

Определив диапазон изменения тока статора при опыте к.з., опыт начинают с предельного значения этого тока, установив на индукционном регуляторе соответствующее напряжение к.з. U_K .

Затем постепенно снижают это напряжение до значения, при котором ток I_K достигнет нижнего предела установленного диапазона его значений.

При этом снимают показания приборов для 5—7 точек, одна из которых должна соответствовать номинальному току статора ($I_K = I_{1ном}$).

Продолжительность опыта должна быть минимально возможной. С этой целью измеряют лишь одно линейное напряжение (например, $U_{кAB}$), так как некоторая несимметрия линейных напряжений при опыте к.з. не имеет значения.

Линейные токи измеряют хотя бы в двух линейных проводах (например, $I_{кA}$ и $I_{кB}$).

За расчетное значение тока к.з. принимают среднее арифметическое этих двух значений.

После снятия последних показаний приборов двигатель следует отключить и сразу же произвести замер активного сопротивления фазы обмотки статора r'_1 , чтобы определить температуру обмотки. Линейные напряжения и токи пересчитывают на фазные U_K и I_K

Ваттметр W измеряет активную мощность к.з. P_K . По полученным значениям напряжений U_K , токов I_K и мощностей P_K вычисляют следующие параметры:

1. коэффициент мощности при к.з. $\cos \varphi_k = P_k / (m_1 U_k I_k)$;
2. полное сопротивление к.з. (Ом) $z_k = U_k / I_k$;
3. активные и индуктивные составляющие этого сопротивления (Ом) $r_k = r_k \cos \varphi_k$; $x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}$

Измеренные и вычисленные величины заносят в таблицу, а затем строят характеристики к.з. (рис. 10).:

$$I_k; P_k \text{ и } \cos \varphi_k = f(U_k)$$

При опыте к.з. обмотки двигателя быстро нагреваются до рабочей температуры, так как при неподвижном роторе двигатель не вентилируется.

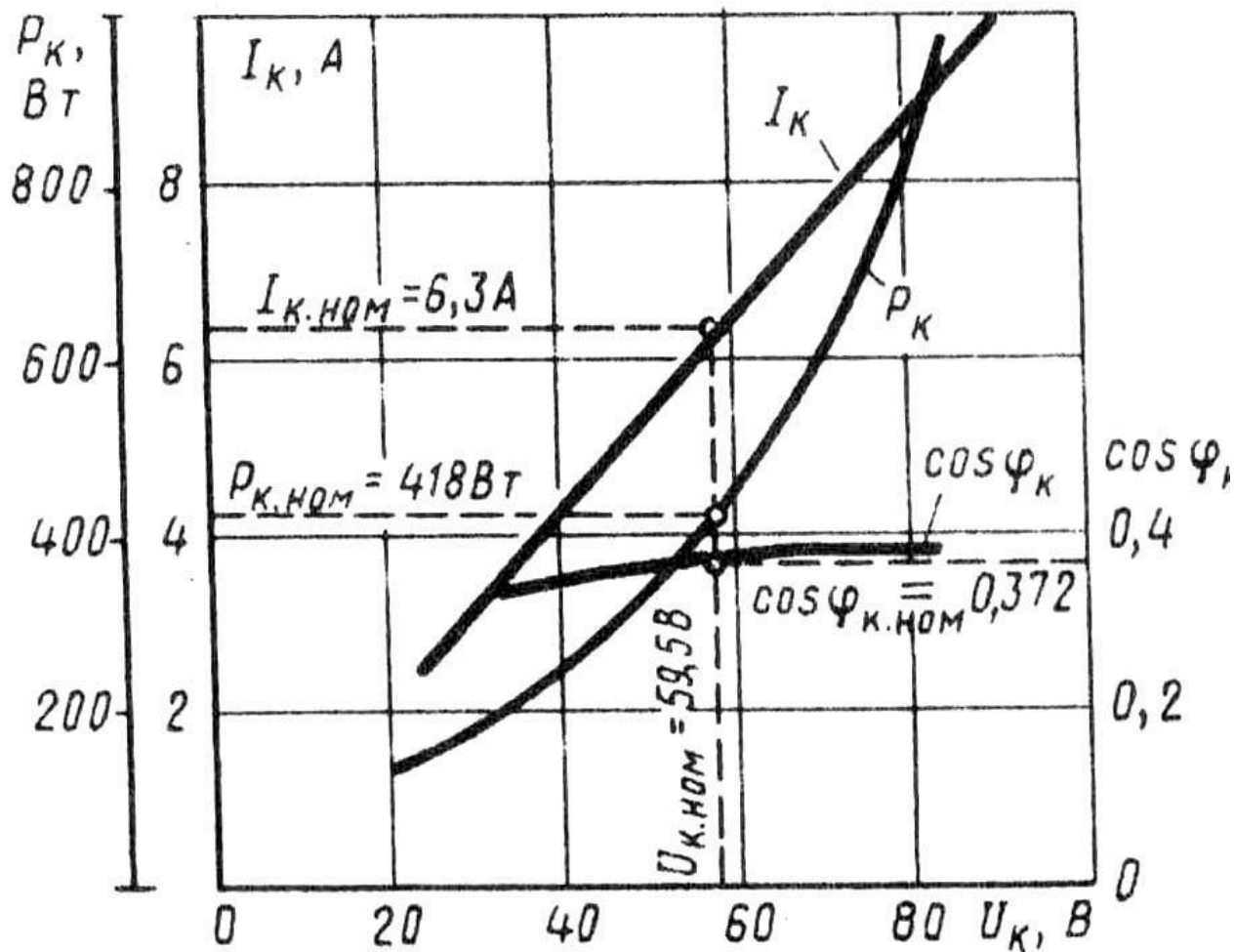


Рис.10. Характеристики к.з. трехфазного асинхронного двигателя (3,0 кВт, 220/380 В, 1430 об/мин)

Пуск в ход асинхронных двигателей

Пусковые свойства двигателя оценивают:

1. значением пускового тока I_{Π} или его кратностью

$$K_{\Pi I} = I_{\Pi} / I_{\text{НОМ}}$$

2. значением пускового момента M_{Π} или его кратностью

$$K_{\Pi M} = M_{\Pi} / M_{\text{НОМ}}. \text{ (кратности выражают в долях от номинальных величин тока и момента).}$$

3. продолжительностью и плавностью пуска,

4. сложностью пусковой операции, ее экономичностью (стоимость и надежность пусковой аппаратуры и потерь энергии в ней).

Рассмотрим пуск АД с фазным ротором (рис.11), предварительно вспомнив выражение для тока и момента при пуске:

$$M_{\Pi} = \frac{mU_1^2 r_2'}{\omega_1 [(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2]} \quad (1)$$

$$I_{\Pi} \approx I'_{2\Pi} = \frac{U_1}{V \sqrt{(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2}} \quad (2)$$

Пуск АД с фазным ротором (рис.11),

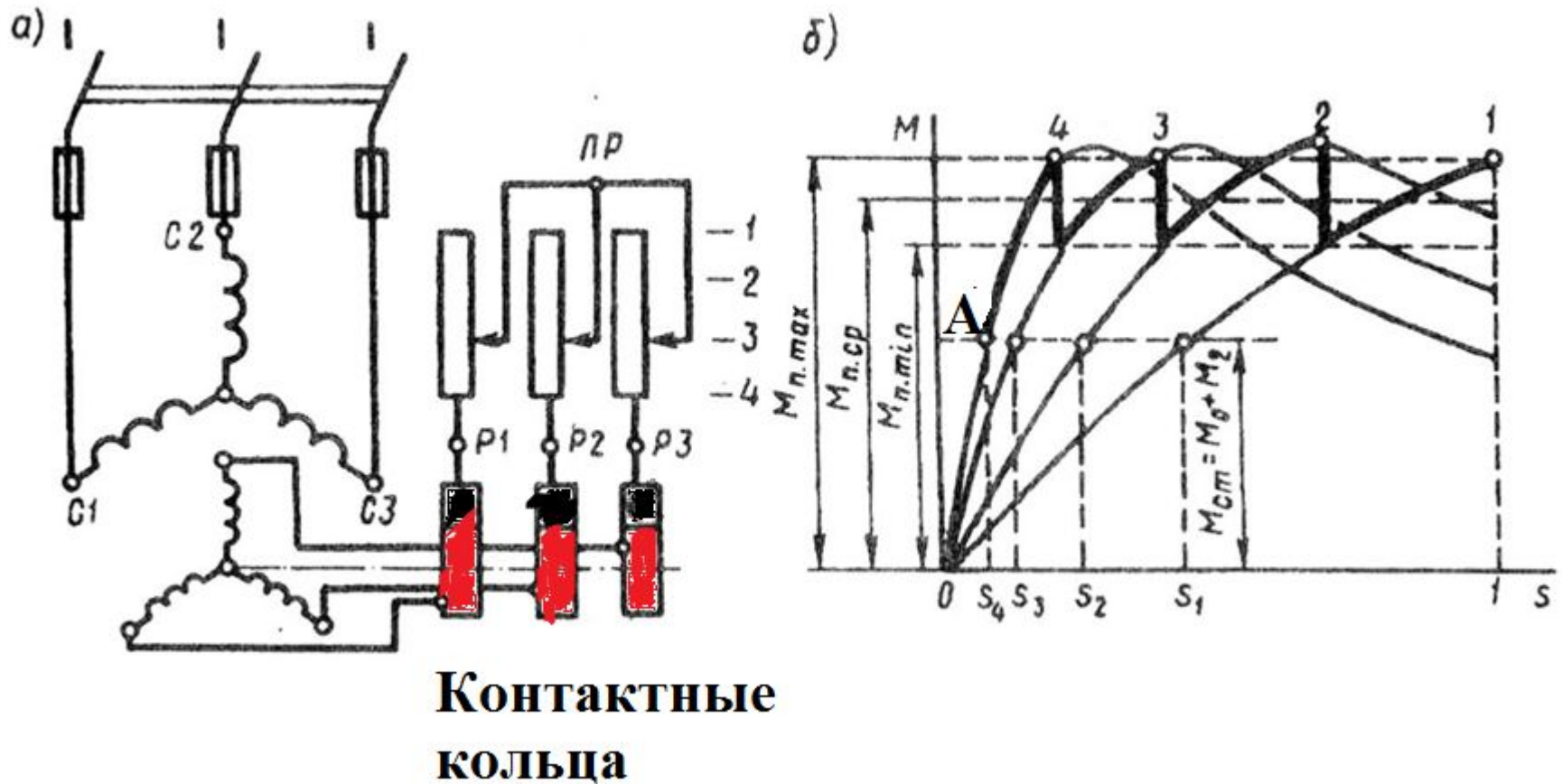


Рис.11.Схема включения пускового реостата (а) и построение графика пускового момента (б) асинхронного двигателя с фазным ротором

Описание пуска:

На рис. 11, а показана схема включения 4-х ступенчатого ПР в цепь фазного ротора. В процессе пуска двигателя ступени ПР переключают таким образом, чтобы ток ротора оставался приблизительно неизменным, а среднее значение пускового момента было близко к наибольшему.

На рис. 11, б представлен график изменения пускового момента АД при четырех ступенях ПР.

Так, в начальный момент пуска (первая ступень реостата - кривая 1) пусковой момент равен $M_{п.маx}$. По мере разгона двигателя его момент уменьшается по кривой 1. Как только значение момента уменьшится до значения $M_{п.мин}$ рычаг реостата переводят на вторую ступень (кривая 2) и сопротивление реостата уменьшается.

Теперь зависимость $M = f(s)$ выражается кривой 2 и пусковой момент двигателя вновь достигает $M_{п.маx}$. Затем ПР переключают на третью и на четвертую ступени (кривые 3 и 4). После того как электромагнитный момент двигателя уменьшится до значения, равного значению противодействующего момента на валу двигателя $M_{СТ}$ (точка А), частота вращения ротора достигнет установившегося значения $n_2 = n_1(1-S_4)$ и процесс пуска двигателя будет закончен.

Таким образом, в течение всего процесса пуска значение пускового момента остаётся приблизительно постоянным, равным $M_{п.ср}$. Следует иметь в виду, что при слишком быстром переключении ступеней реостата пусковой ток может достигнуть недопустимо больших значений.

Этот способ довольно простой, его широко применяют в промышленности.

Пуск двигателей с короткозамкнутым ротором

Здесь существует несколько способов пуска:

а) Прямой пуск $I_H = (5 - 7)I_H$. M_H – маленький (рис.12).

б) Пуск при пониженном напряжении: различают три вида переключения (рис. 13 и 14а,б):

- 1) Переключение с треугольника на звезду на момент пуска (рис. 13)
- 2) Включением резистора между сетью и обмоткой статора (рис.14,а)
- 3) Включение автотрансформатора между сетью и статором (рис. 14.б)

При эксплуатации обращают внимание на условия работы нагрузки. Если важно увеличение пускового момента, то используют двигатель с фазным ротором, а если важно уменьшение пускового тока, то можно использовать АД с короткозамкнутым ротором.

Прямой пуск

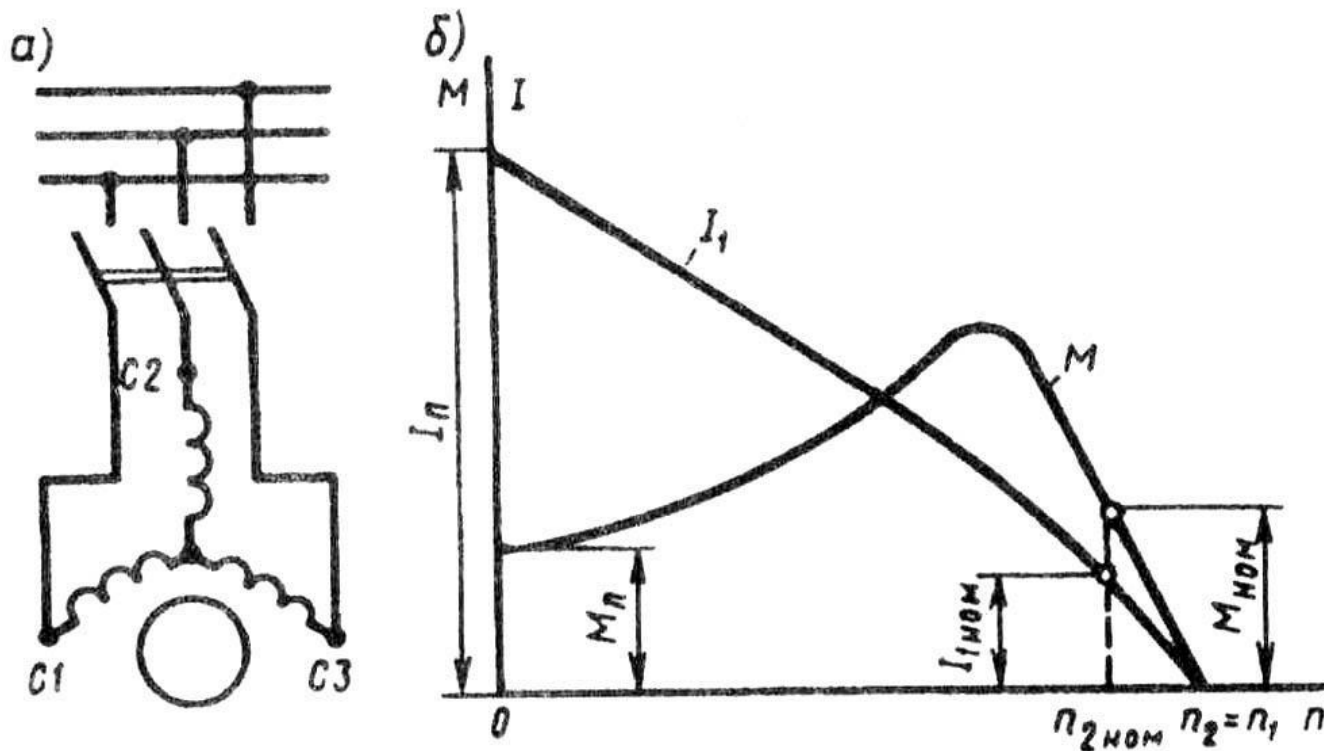


Рис.12.Схема непосредственного включения в сеть (а) и графики изменения тока и момента при пуске (б) АД с короткозамкнутым ротором

Пуск при пониженном напряжении $Y \rightarrow \Delta$

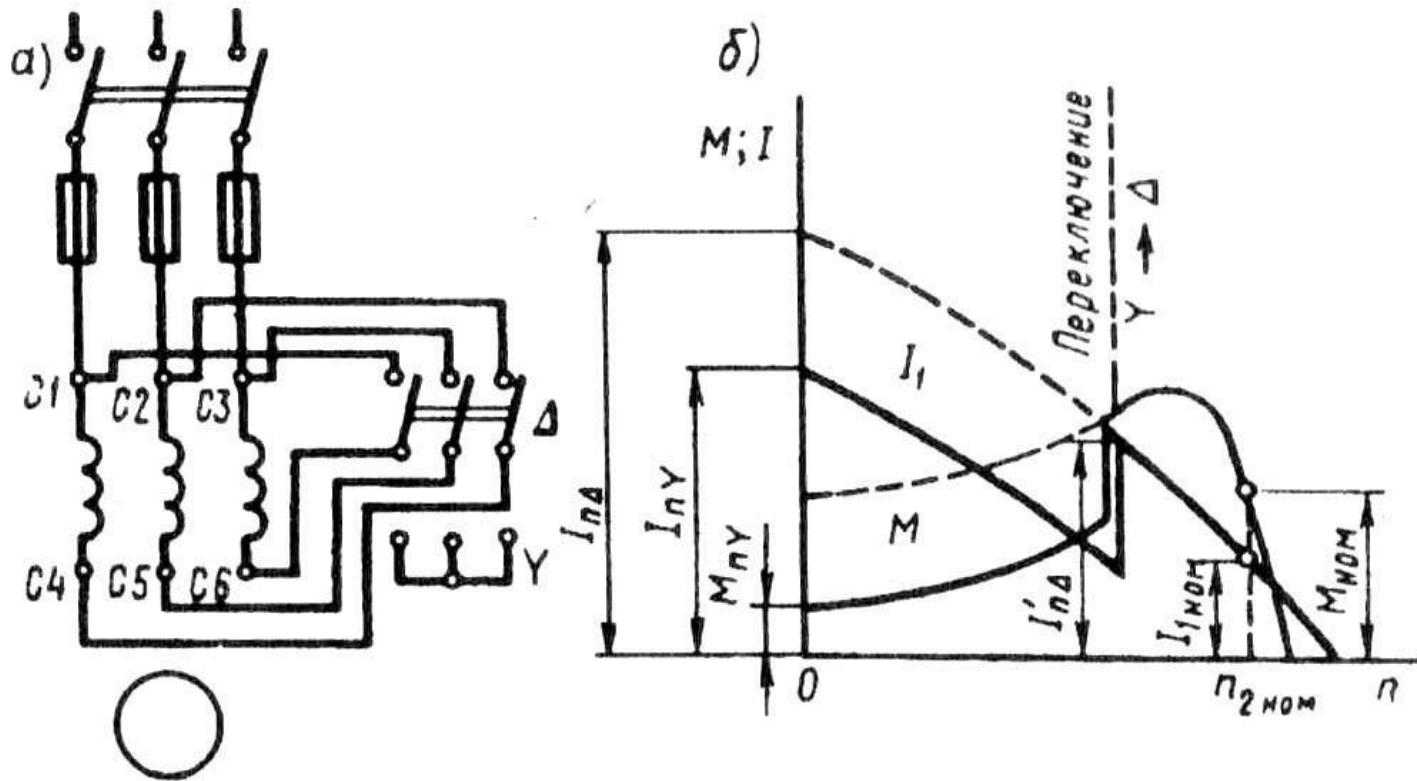


Рис.13.Схема включения (а) и графики изменения момента и тока (фазного) при пуске (б) асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором переключением обмотки статора со звезды на треугольник

В момент подключения двигателя к сети переключатель ставят в положение «звезда», при котором обмотка статора оказывается соединенной в звезду. При этом фазное напряжение на статоре понижается в $\sqrt{3}$ раз. Во столько же раз уменьшается и ток в фазных обмотках двигателя.

(рис. 13, б). Кроме того, при соединении обмоток звездой, линейный ток равен фазному, в то время как при соединении этих же обмоток треугольником линейный ток больше фазного в $\sqrt{3}$ раз. Следовательно, переключив обмотки статора «звездой», мы добиваемся уменьшения линейного тока в $(\sqrt{3})^2=3$ раза.

Рассмотренный способ пуска имеет существенный недостаток - уменьшение фазного напряжения в $\sqrt{3}$ раз сопровождается уменьшением пускового момента в три раза, так как, согласно (2), пусковой момент асинхронного двигателя прямо пропорционален квадрату напряжения U_1 .

Более универсальным является способ с понижением подводимого к двигателю напряжения посредством реакторов (реактивных катушек — дросселей) (рис.14,а).

Порядок включения двигателя в этом случае следующий: при разомкнутом рубильнике 2 включают рубильник 1.

При этом ток из сети поступает в обмотку статора через реакторы R , на которых происходит падение напряжения $j_{I_n}' x_p$ (где x_p — индуктивное сопротивление реактора, Ом).

В результате на обмотку статора подается пониженное напряжение U'_1 . После разгона ротора двигателя включают рубильник 2 и подводимое к обмотке статора напряжение оказывается номинальным $U_{1ном}$. Недостаток этого способа пуска в том, что уменьшение напряжения в $U'_1 / U_{1ном}$ раз сопровождается уменьшением пускового момента M_{II} в $(U'_1 / U_{1ном})^2$ раз.

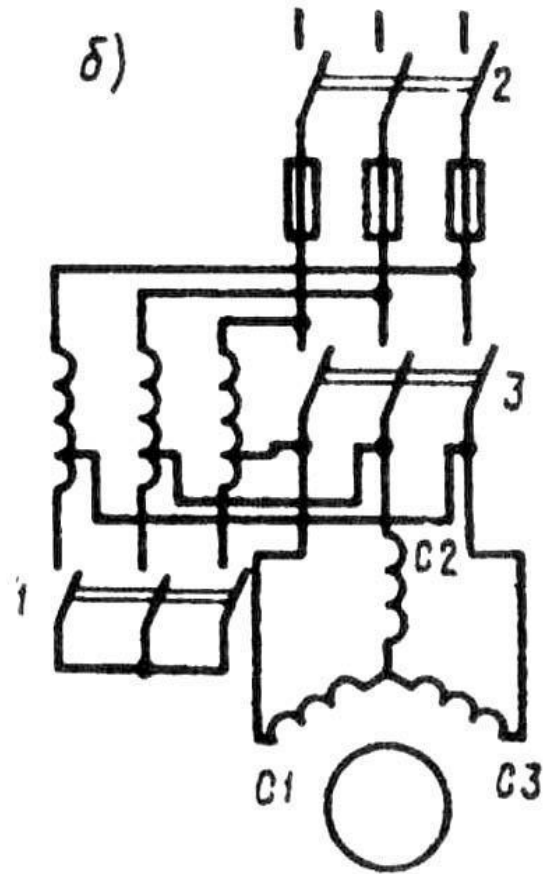
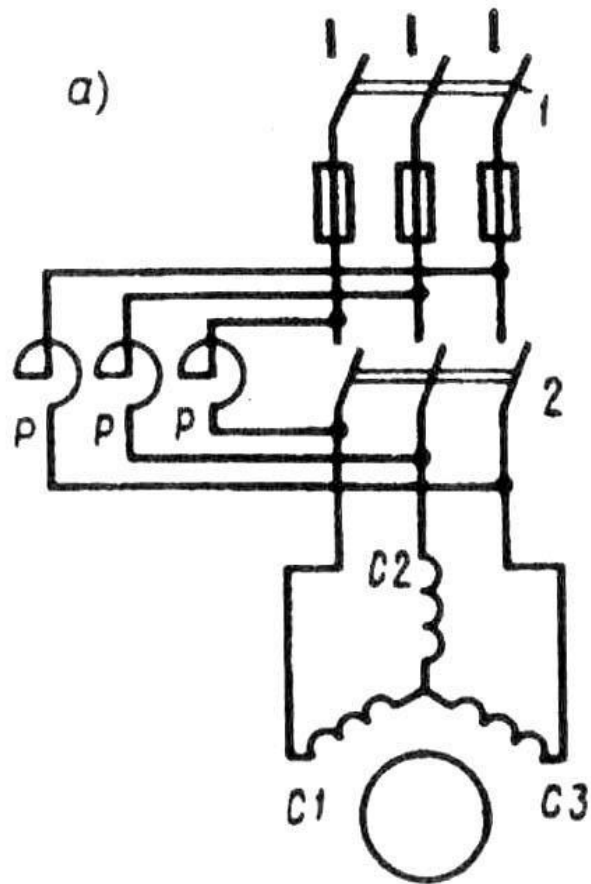


Рис.14. Схемы реакторного (а) и автотрансформаторного (б) способов пуска АД с короткозамкнутым ротором

При автотрансформаторном пуске (рис.14,б) пусковой ток двигателя, измеренный на выходе автотрансформатора, уменьшается в K_A раз, (где K_A — коэффициент трансформации автотрансформатора). Что же касается тока в питающей двигатель сети, т. е. тока на входе автотрансформатора, то он уменьшается в K_A^2 раз по сравнению с пусковым током при непосредственном включении двигателя в сеть.

Дело в том, что в понижающем автотрансформаторе первичный ток меньше вторичного в K_A раз и поэтому уменьшение пускового тока при автотрансформаторном пуске составляет $K_A K_A = K_A^2$ раз. Например, если кратность пускового тока A_D при непосредственном его включении в сеть составляет $I_{II} / I_{1ном} = 6$, а напряжение сети 380 В, то при автотрансформаторном пуске с понижением напряжения до 220 В кратность пускового тока в сети

$$I'_{II} / I_{1ном} = 6 / (380/220)^2 = 2 .$$

После первоначального разгона ротора двигателя рубильник 1 размыкают и автотрансформатор превращается в реактор. При этом напряжение на выводах обмотки статора несколько повышается, но все же остается меньше номинального.

Включением рубильника 3 на двигатель подается полное напряжение сети.

Таким образом, автотрансформаторный пуск проходит тремя ступенями:

на первой к двигателю подводится напряжение

$$U_1 = (0,50 \div 0,60) U_{1\text{ном}}$$

на второй — $U_1 = (0,70 \div 0,80) U_{1\text{ном}}$ и, наконец,

на третьей к двигателю подводится

номинальное напряжение $U_{1\text{ном}}$.

С точки зрения уменьшения пускового тока автотрансформаторный способ пуска лучше реакторного, так как при реакторном пуске пусковой ток в питающей сети уменьшается в $U'_1 / U_{1\text{ном}}$ раз, а при автотрансформаторном - в $(U'_1 / U_{1\text{ном}})^2$ раз.

Короткозамкнутые асинхронные двигатели с улучшенными
пусковыми свойствами
(глубокопазный и двухклеточный)

Глубокопазный АД

От обычного АД он отличается тем, что пазы ротора сделаны в виде узких глубоких щелей (рис.15,а), в которые уложены стержни обмотки ротора, представляющие собой узкие полосы. С обеих сторон эти стержни приварены к замыкающим кольцам. Часто глубокий паз имеет соотношение размеров $h_{\text{п}} / b_{\text{п}} = 9 \div 10$, где $h_{\text{п}}$, $b_{\text{п}}$ — высота и ширина паза.

(ср.: у обычного к.з. ротора $h_{\text{п}} / b_{\text{п}} = 4 \div 5$)

В момент пуска двигателя ($S=1$), когда частота тока в роторе имеет наибольшее значение ($f_2 = f_1$), индуктивное сопротивление нижней части каждого стержня значительно больше верхней.

Объясняется это тем, что нижняя часть стержня сцеплена с большим числом магнитных силовых линий поля рассеяния (рис. 15,в ,).

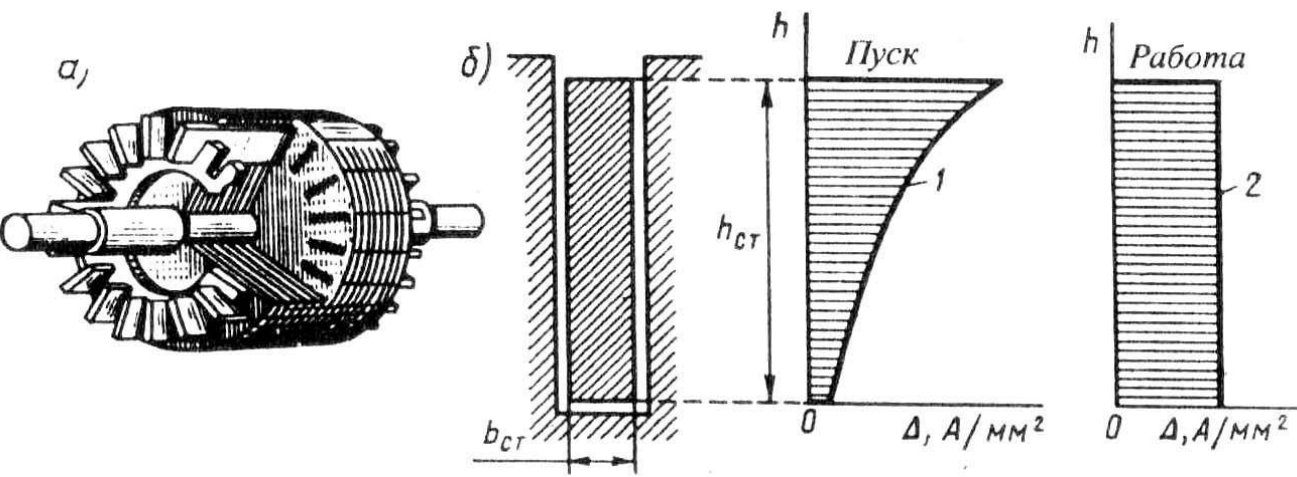


Рис. 15 Ротор с глубокими пазами:
а — устройство, **б** — распределение плотности тока ротора по высоте стержня при пуске и при работе двигателя

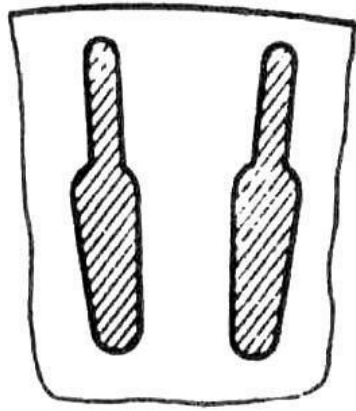
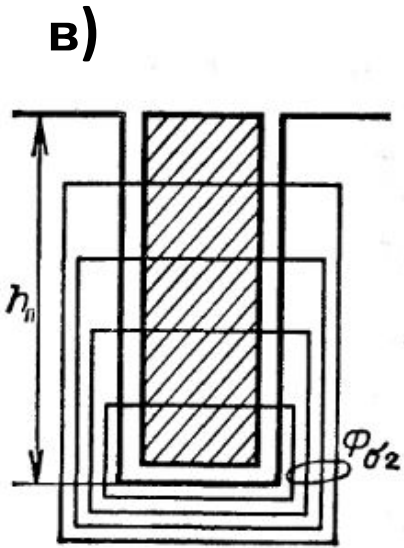


Рис. 16 Бутылочная форма стержней ротора



в)

На рис. 15, б «пуск» показан график распределения плотности пускового тока в стержне ротора. Из графика следует, что почти весь ток ротора проходит по верхней части стержня, поперечное сечение которой намного меньше сечения всего стержня. Это равноценно увеличению активного сопротивления ротора, что, как известно, способствует росту M_{Π} двигателя и некоторому ограничению I_{Π} (см. (1) и (2)).

Таким образом, двигатель с глубокими пазами на роторе обладает благоприятным соотношением пусковых параметров: большим M_{Π} при сравнительно небольшом I_{Π} . По мере нарастания частоты вращения ротора частота тока в роторе убывает из-за уменьшения скольжения S , т.е. $f_2 = Sf_1$.

В связи с этим уменьшается индуктивное сопротивление обмотки ротора $X_2 \equiv f_2$ и распределение плотности тока по высоте стержня в этом случае становится более равномерным (рис.15, б «работа»), что ведет к уменьшению активного сопротивления ротора.

При работе двигателя с номинальной частотой
вращения ($S=0,03\div 0,07$ о.е.), когда $f_2 \ll f_1$, **процесс**
«вытеснения» тока практически прекращается и двигатель
работает, как обычный короткозамкнутый.

Эффект вытеснения тока хорошо проявляется при пазах ротора бутылочной формы (рис. 16).

В этом случае «вытеснение» тока происходит в верхнюю часть паза, имеющую меньшее сечение, а, следовательно, большее активное сопротивление.

Применение пазов бутылочной формы позволяет сократить высоту пазов ротора, а, следовательно, уменьшить диаметр ротора по сравнению с глубокопазным ротором.

Двухклеточный АД

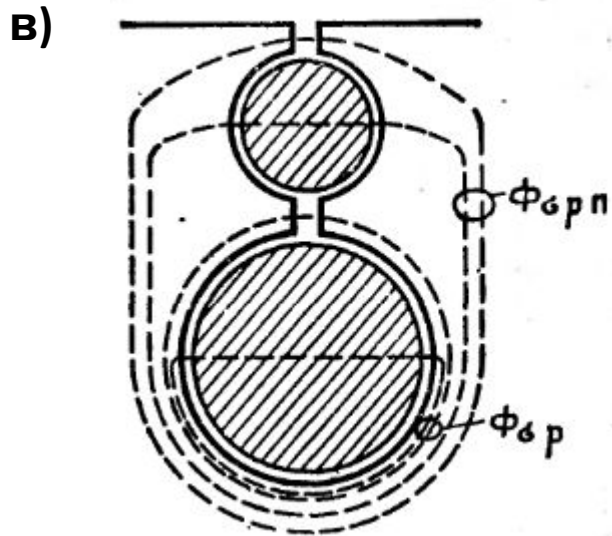
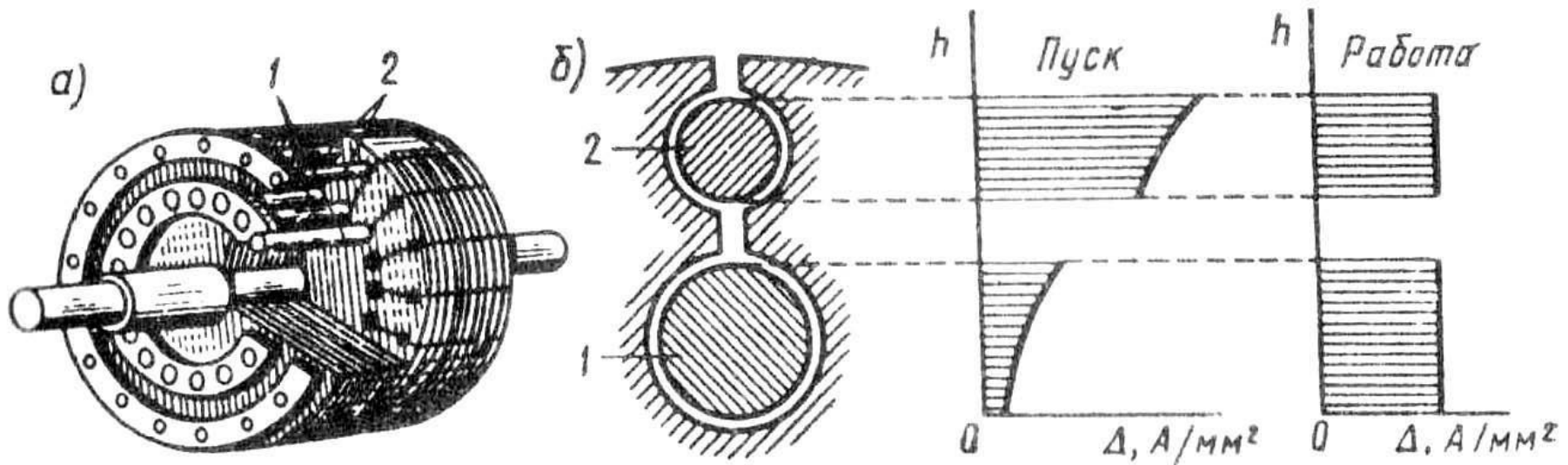


Рис. 17. Двухклеточный ротор:
а — устройство; б —
распределение плотности тока
в рабочей и пусковой клетках при
пуске
и работе двигателя; в- потоки
рассеяния

Двигатель с двумя клетками на роторе. Еще лучшими пусковыми свойствами обладают АД с двумя короткозамкнутыми клетками на роторе (рис. 17):

рабочей клеткой 1, стержни которой расположены в нижнем слое,

и пусковой клеткой 2, стержни которой расположены в верхнем слое, ближе к воздушному зазору.

Стержни пусковой клетки обычно выполняют из латуни или бронзы — материалов, обладающих более высоким, чем у меди, активным сопротивлением. Индуктивное сопротивление рассеяния пусковой клетки невелико, так как ее стержни расположены вблизи воздушного зазора и к тому же с двух сторон имеют воздушные щели (рис. 17, б).

Стержни рабочей клетки выполняются из меди, и по сравнению со стержнями пусковой клетки они имеют большее сечение. Это обеспечивает рабочей клетке малое активное сопротивление. Но зато индуктивное сопротивление рабочей клетки больше, чем у пусковой, особенно в начальный период пуска, когда частота тока в роторе сравнительно велика ($f_2 \approx f_1$).

В момент пуска двигателя ток ротора проходит в основном по верхней (пусковой) клетке, обладающей малым индуктивным сопротивлением.

При этом плотность тока в стержнях пусковой клетки намного больше плотности тока в стержнях рабочей клетки (рис. 17, б, пуск)..

Повышенное активное сопротивление этой клетки обеспечивает двигателю значительный: пусковой момент при пониженном пусковом токе. По мере увеличения частоты вращения ротора уменьшается частота тока в роторе, при этом индуктивное сопротивление рабочей клетки уменьшается, и распределение плотности тока в стержнях пусковой и рабочей клеток становится почти одинаковым.

В итоге происходит перераспределение вращающего момента между клетками: если в начальный период пуска момент создается главным образом токами пусковой клетки, то по окончании периода пуска вращающий момент создается в основном токами рабочей клетки.

Так как активные сопротивления клеток ротора неодинаковы, то зависимость $M = f(s)$ этих клеток изображается разными кривыми (рис. 18).

Максимальное значение момента пусковой клетки вследствие ее повышенного активного сопротивления смещено в сторону скольжений, близких к единице.

Вращающие моменты от обеих клеток направлены в одну сторону, поэтому результирующий момент двигателя равен сумме моментов пусковой $M_{п.к}$ и рабочей $M_{раб.к}$ клеток

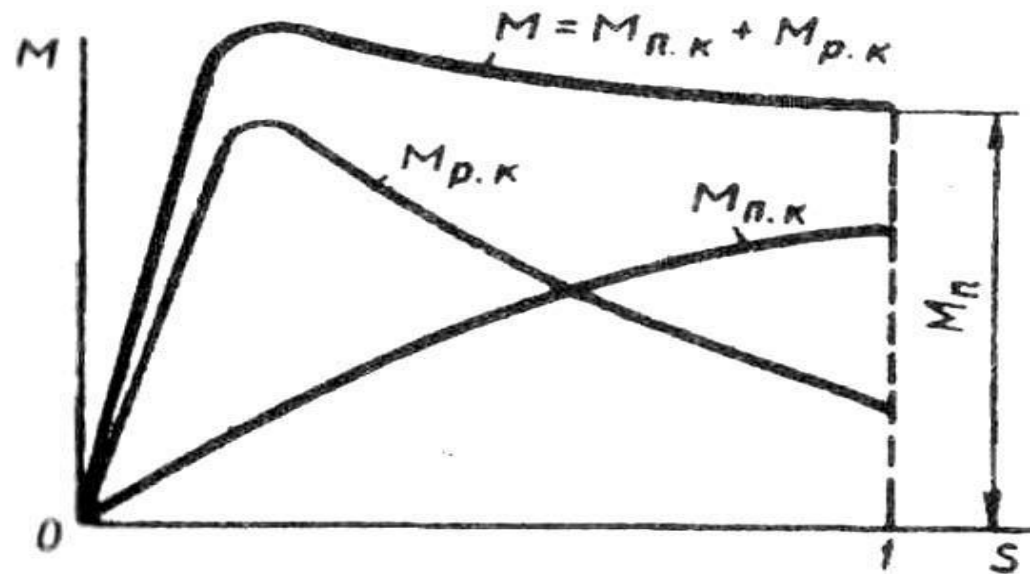
$$M = M_{п.к} + M_{раб.к}$$


Рис. 18. Механическая характеристика двухклеточного асинхронного двигателя

Пусковые характеристики рассмотренных трёх модификаций.
(сравнение)

Модификация ротора АД	Кратность тока	Кратность момента
	$I_{\Pi} / I_{Н}$	$M_{\Pi} / M_{Н}$
Нормальный КЗ ротор	4,5 ÷ 7	0,9 ÷ 1,3
Глубокопазный КЗ ротор	4 ÷ 5	1,2 ÷ 1,6
2-х клеточный КЗ ротор	4 ÷ 6	2,5 ÷ 3,0

Вывод:

в двухклеточном роторе ток в начальный момент пуска вытесняется в наружную пусковую обмотку (материал латунь), создающую большой пусковой момент, а по окончании процесса пуска протекает по рабочей обмотке (материал медь) с малым активным сопротивлением, вследствие чего двигатель работает с высоким КПД.

В глубокопазном АД используется эффект вытеснения тока в верхние слои стержня: индуктивность нижних слоёв намного больше индуктивности верхних слоёв в момент пуска. Ток как бы вытесняется в верхнюю часть паза, идёт по меньшему сечению и сопротивление увеличивается.

При этом пусковой момент будет больше, а пусковой ток меньше. После раскручивания машины индуктивность выравнивается и ток протекает по всему стержню, плотность тока становится постоянной. Глубокопазную обмотку применяют при мощностях более 100 кВт (до 200 кВт)

Двух клеточные двигатели: У этих двигателей имеется две обмотки, куда заранее закладывается возможность увеличения сопротивления путём использования материалов с различными удельными сопротивлениями: в рабочей клетке используют материалы с низким удельным сопротивлением (медь), в пусковой клетке, наоборот, (бронза, латунь)