

Асинхронные машины

Асинхронная машина относится к электрическим машинам переменного тока. Она обратима и может служить для взаимного преобразования электрической энергии переменного тока и механической энергии вращательного движения. Различают трехфазные, двухфазные и однофазные асинхронные машины. Асинхронные генераторы переменного тока применяются относительно редко.

Машины мощностью до 0,5 кВт обычно выполняются однофазными и двухфазными. Более мощные машины выполняют трехфазными.

Асинхронный двигатель, впервые разработанный в 1889 году русским инженером М.О. Доливо-Добровольский, практически не подвергся серьезным изменениям до наших дней.

В основу конструкции асинхронного двигателя положено создание системы трехфазного переменного тока принадлежащее этому же автору. Переменный ток, подаваемый в трехфазную обмотку статора двигателя, формирует в нем вращающееся магнитное поле.

Асинхронные машины

Вращающееся магнитное поле и его особенности

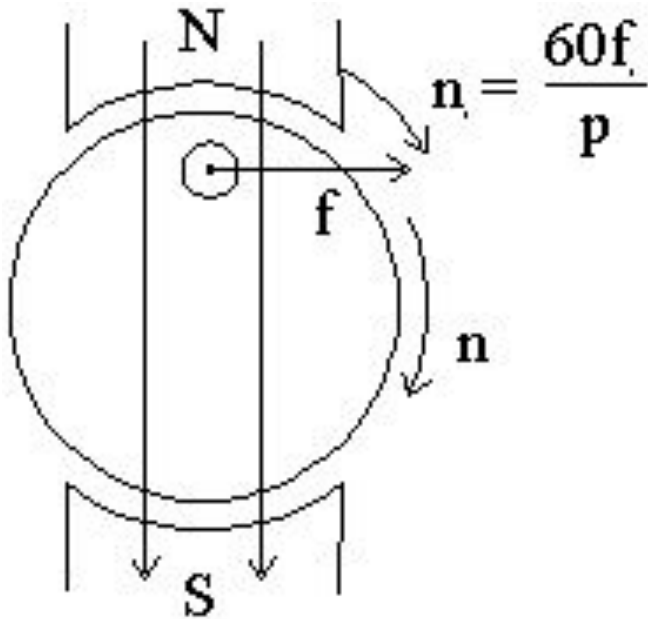
Основными частями асинхронной машины являются:

- неподвижный стальной кольцевой сердечник, имеющий на внутренней поверхности пазы, в которых уложены катушки электрической обмотки;
- подвижный стальной цилиндрический сердечник, снабженный электрической обмоткой.

Статор и ротор разделены воздушным зазором от 0,1 мм до 1,5 мм. Пакет статора с целью уменьшения потерь на вихревые токи набирают из штампованных изолированных листов электротехнической стали. В пазы статора укладывают обмотку, которая в простейшем случае состоит из трех катушек - фаз, сдвинутых в пространстве на 120 эл. градусов.

Ротор асинхронного двигателя представляет собой цилиндр, набранный из штампованных листов электротехнической стали. На поверхности ротора имеются продольные пазы для обмотки. Листы сердечника ротора специально не изолируют, т.к. в большинстве случаев достаточно изоляции от окалины.

Асинхронные машины



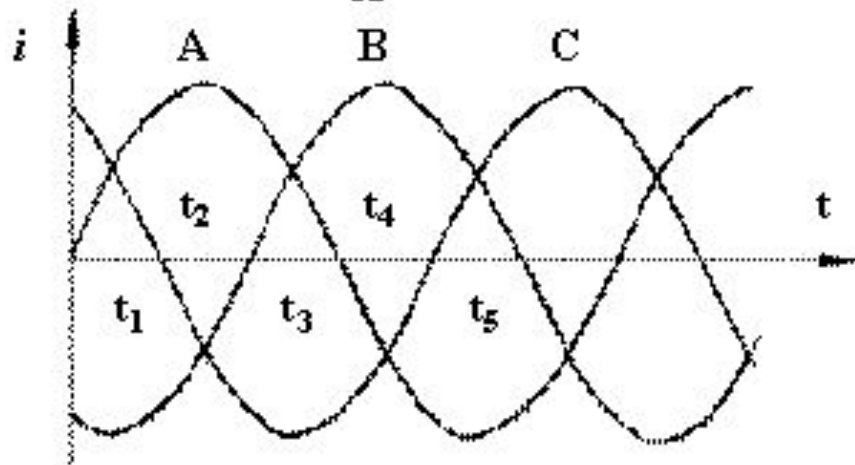
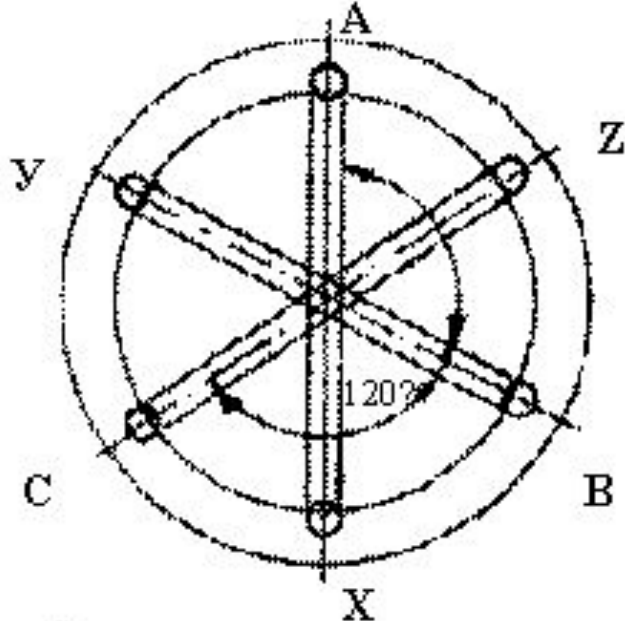
При включении обмотки статора в сеть, создается вращающееся магнитное поле. Это поле пересекая обмотку ротора наводит в ней ЭДС. Под действием этой ЭДС по обмотке будет протекать ток. Этот ток будет взаимодействовать с магнитным потоком. Взаимодействие вращающегося магнитного поля статора с током в роторе создает вращающий момент, за счет которого ротор будет вращаться в ту же сторону, что и поле, но с небольшим отставанием.

При вращении поля n_1 в проводнике ротора наведется ЭДС к нам, правило правой руки. Ток также будет направлен к нам. По правилу левой руки проводник с током попал в магнитное поле на него будет действовать сила f , под действием которой ротор будет вращаться в ту же сторону, что и магнитное поле статора.

Асинхронные машины

Вращающееся магнитное поле и его

составляющие

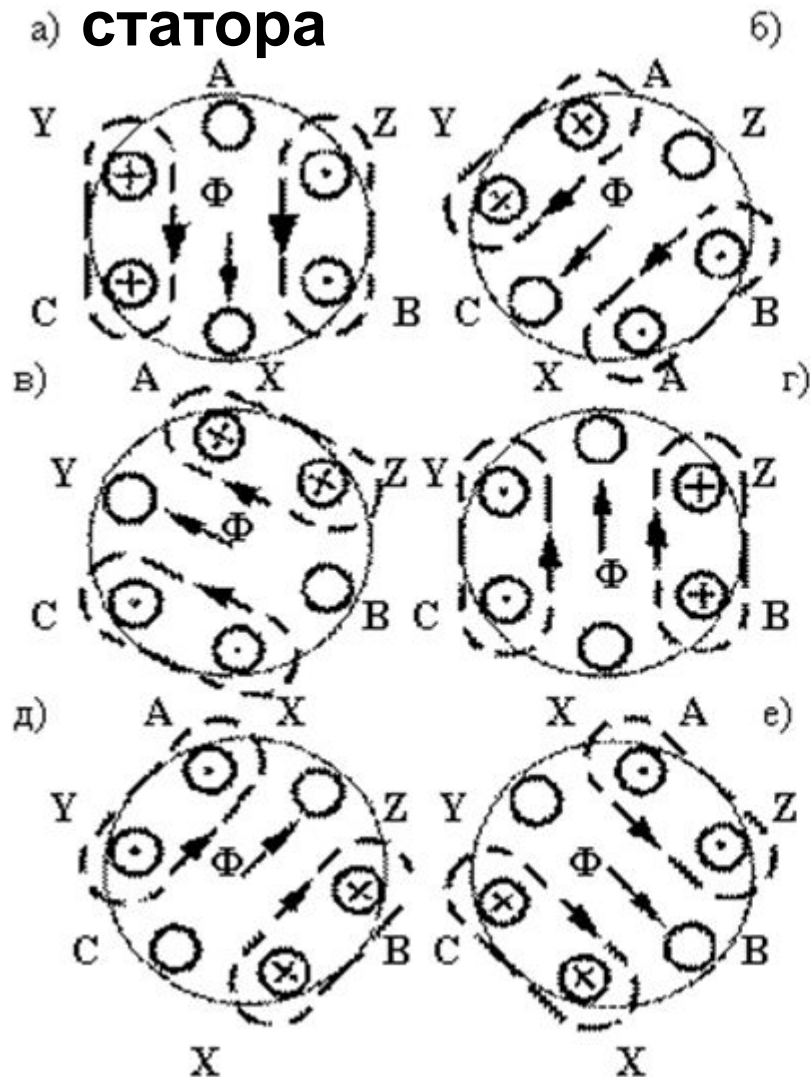


На статоре трехфазного двигателя расположены 3 обмотки (фазы), которые смещены в пространстве по отношению друг к другу на 120 эл. градусов. Токи, подаваемые в фазные обмотки, отодвинуты друг от друга во времени на $1/3$ периода.

Теперь рассмотрим электромагнитное состояние обмоток статора в каждые из принятых, моментов времени.

Асинхронные машины

Электромагнитные состояния трехфазной обмотки



Рассмотрим вначале точку t_1 . Ток в фазе А равен нулю, в фазе С он будет положительным - (+), а в фазе В - отрицательным (-). Поскольку каждая фазная обмотка имеет замкнутую форму, то конец фазной обмотки В-У будет иметь противоположный знак, т.е. У - (+), а конец Z обмотки С-Z - (-).

Проведем силовую магнитную линию вокруг проводников С и У и, соответственно, В и Z (штриховые линии).

В момент времени t_2 тока в фазе В не будет. В проводнике А фазы А-Х он будет иметь знак (+), а в проводнике С фазы С-Z он будет иметь знак (-).

Асинхронные машины

Электромагнитные состояния трехфазной обмотки статора

Из рисунков наглядно видно, что магнитное поле в обмотках и его поток Φ совершают круговое вращение.

Направление вращения магнитного поля определяется порядком чередования токов в фазах обмотки статора: поле поворачивается в сторону фазы с отстающим током.

Частота вращения магнитного поля статора определяется следующей формулой:

$$n_1 = \frac{60f}{p} \text{ [об/мин]}$$

где f - частота тока питающей сети, Гц; p - число пар полюсов.

Если принять $f=50$ Гц, то для различных чисел пар полюсов ($p=1, 2, 3, 4, \dots$) $n_1=3000, 1500, 1000, 750, \dots$ об/мин.

Асинхронные машины

Принцип действия асинхронного

двигателя

Вращающееся магнитное поле статора пересекает проводники обмотки ротора и наводит в них ЭДС. Так как роторная обмотка замкнута, то в проводниках ее возникают токи. Ток каждого проводника, взаимодействуя с полем статора, создает электромагнитную силу - $F_{эм}$. Совокупность сил всех проводников обмотки создает электромагнитный момент M , который приводит ротор во вращение в направлении вращающегося поля.

Пусть ротор вращается с частотой n_2 равной частоте вращающегося поля статора n_1 . В этом случае поле не будет пересекать проводники роторной обмотки. Следовательно, в них не будет наводиться ЭДС и не будет токов, а это значит, что вращающий момент $M = 0$. Таким образом, ротор асинхронного двигателя принципиально не может вращаться синхронно с полем статора. Разность между частотами поля статора n_2 и ротора n_1 называется частотой скольжения Δn .

Отношение частоты скольжения к частоте поля называется скольжением:

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

Асинхронные машины

Принцип действия асинхронного

В ~~обдвигателе~~ скольжение в асинхронном двигателе может изменяться от нуля до единицы. Однако номинальное скольжение S_n обычно составляет от 0,01 до 0,1 %.

Частоту вращения ротора можно выразить:

$$n_2 = n_1(1 - S) = \frac{60f}{p}(1 - S)$$

Обмотка ротора асинхронного двигателя электрически не связана с обмоткой статора. В этом отношении двигатель подобен трансформатору, в котором обмотка статора является первичной обмоткой, а обмотка ротора - вторичной. В отличие от вторичной обмотки трансформатора, неподвижной, обмотка ротора двигателя вместе с ним вращается.

ЭДС роторной обмотки, в свою очередь, зависит от частоты вращения ротора. Синхронная частота вращения магнитного поля статора перемещается относительно ротора с частотой скольжения Δn . Она же наводит в обмотке ротора ЭДС E_2 , частота которой f_2 связана со скольжением S :

$$f_2 = f_1 S$$

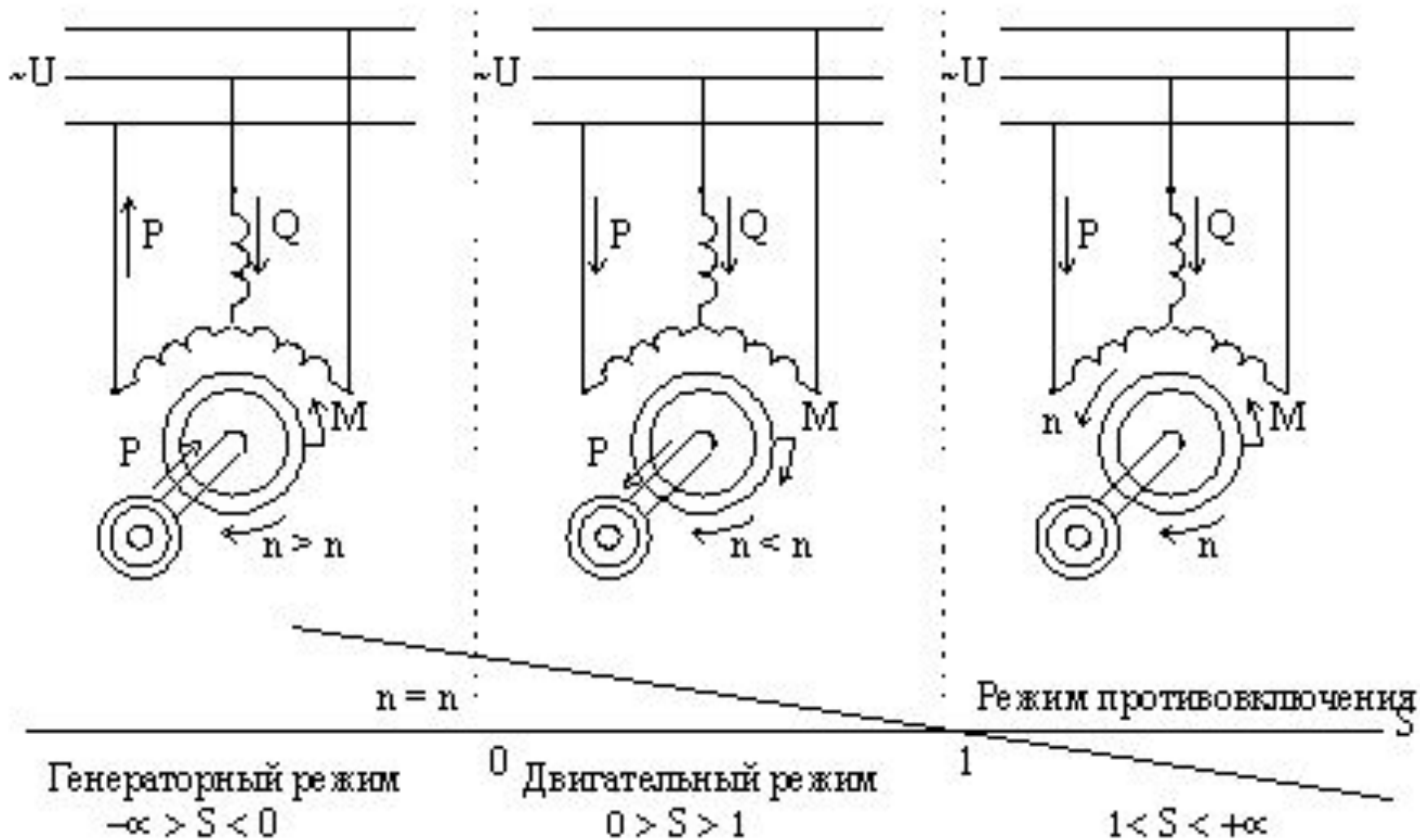
Асинхронные машины

Режимы работы асинхронной машины

1. Скольжение $s=1 - n_2=0$, ротор неподвижен.
2. Скольжение $s=0 - n_2=n_1$, ток ротора равен 0, момент равен нулю.
3. Скольжение $0 < s < 1 - n_2 < n_1$, двигательный режим, мощность потребляемая из сети будет преобразована в механическую на валу.
4. Скольжение $s < 0 - n_2 > n_1$, генераторный режим, механическая мощность будет преобразована в электрическую, которая будет отдаваться в сеть P_1 , а реактивная будет потребляться для создания магнитного потока – Q .
5. Скольжение $s > 1 - n_2 < 0$, режим противовключения, ротор подключенный к сети асинхронной машины вращается за счет подводимой извне к ротору механической энергии против вращения поля. На практике в этом режиме обычно $1 < s < 2$. Машина потребляет из сети активную мощность и развивает положительный вращающий момент, действующий в сторону вращения поля. Но, поскольку ротор вращается в обратном направлении, на него этот момент действует тормозящим образом. Как мощность, потребляемая из сети, так и мощность, потребляемая с ротора, расходуется на потери в машине.

Асинхронные машины

Режимы работы асинхронной машины



Асинхронные машины

Магнитные поля и ЭДС асинхронного двигателя

Основной магнитный поток асинхронного двигателя, вращаясь в пространстве, пересекает обмотку статора со скоростью n_1 и обмотку ротора со скоростью n_2 , наводя в них основные ЭДС:

$$E_1 = 4,44 f_1 W_1 \Phi k_1 \cdot 10^{-8}$$

$$E_{2S} = 4,44 f_2 W_2 \Phi k_2 \cdot 10^{-8}$$

где $W_1 k_1$ и $W_2 k_2$ - произведения чисел витков на обмоточные коэффициенты; $E_{2s} = E_2 S$.

Потоки рассеяния Φ_{pc1} Φ_{pc2} наводят в обмотках ЭДС рассеяния E_{p1} и E_{p2} , которые, как в трансформаторе, могут быть выражены через соответствующие токи I_1 и I_2 и индуктивные сопротивления x_1 и x_{2s} .

$$E_{p1} = jI_1 x_1$$

$$E_{p2} = jI_2 x_{2s}$$

где x_1 и x_{2s} - индуктивные сопротивления рассеяния обмоток статора и ротора.

Асинхронные машины

Основные уравнения асинхронного двигателя

Напряжение U_1 , приложенное к фазе обмотки статора, уравновешивается основной ЭДС E_1 , ЭДС рассеяния и падением напряжения на активном сопротивлении обмотки статора

$$U_1 = (-E_1) + I_1 x_1 + I_1 r_1$$

В роторной обмотке аналогичное уравнение будет иметь вид:

$$U_2 = E_{2s} + I_2 x_{2s} + I_2 r_2$$

Но т.к. роторная обмотка замкнута, то напряжение $U_2=0$, и если учесть еще, что $E_{2s}=SE_2$ и $x_{2s}=Sx_2$, то уравнение можно переписать в виде:

$$0 = E_2 - I_2 x_2 - I_2 \frac{r_2}{S}$$

Уравнение токов асинхронного двигателя повторяет аналогичное уравнение трансформатора:

$$I_1 = I_{01} + (-I'_2) = I_{01} + \left(-I_2 \frac{w_2}{w_1} \right)$$

Асинхронные машины

Приведение параметров обмотки ротора к обмотке статора

Для того чтобы параметры ротора и статора изобразить на одной векторной диаграмме, произведем приведение параметров обмотки ротора к параметрам обмотки статора. При этом обмотку ротора с числом фаз m_2 , обмоточным коэффициентом k_2 и числом витков W_2 заменяют обмоткой с $m_1 \times k_1 \times W_1$, соблюдая при этом энергетический баланс в роторе.

$$1) \quad E_2 \rightarrow E'_2$$

$$\frac{E'_2}{E_2} = \frac{W_1 K_{01}}{W_2 K_{02}} = K_e \quad - \text{коэффициент трансформации по ЭДС}$$

$$E'_2 = E_2 K_e$$

Асинхронные машины

Приведение параметров обмотки ротора к обмотке статора

2) $I_2 \rightarrow I'_2$ - (полная мощность ротора до и после приведения должна быть неизменной)

где $m_1 E'_2 I'_2 = m_2 E_2 I_2$

$$I'_2 = I_2 \frac{m_2 E_2}{m_1 E'_2} = I_2 \frac{m_2 W_2 K_{02}}{m_1 W_1 K_{01}}$$

$$I'_2 = \frac{I_2}{K_i}$$

$$K_i = \frac{m_1 W_1 K_{01}}{m_2 W_2 K_{02}} \quad - \text{коэффициент трансформации по току.}$$

Асинхронные машины

Приведение параметров обмотки ротора к обмотке статора

3) $I_2 \rightarrow I'_2$ - (потери в роторе до и после приведения должны быть неизменными)

$$m_1 I_2'^2 r_2' = m_2 I_2^2 r_2$$

$$r_2' = r_2 \frac{m_2}{m_1} \left(\frac{I_2'}{I_2} \right)^2 = r_2 \frac{m_2 m_1^2 (W_1 K_{01})^2}{m_1 m_2^2 (W_2 K_{02})^2} = r_2 \frac{W_1 K_{01}}{W_2 K_{02}} \cdot \frac{m_1 W_1 K_{01}}{m_2 W_2 K_{02}} = r_2 K_e K_i$$

где $m_1 \neq m_2$

Для двигателей с фазным ротором $m_1 = m_2$

$$r_2' = r_2 K_e K_i$$

$$r_2' = r_2 K_e^2$$

Асинхронные машины

Приведение параметров обмотки ротора к обмотке статора

4) $X_2 \rightarrow X'_2$ - (угол сдвига между ЭДС и током ротора до и после приведения должен быть неизменным)

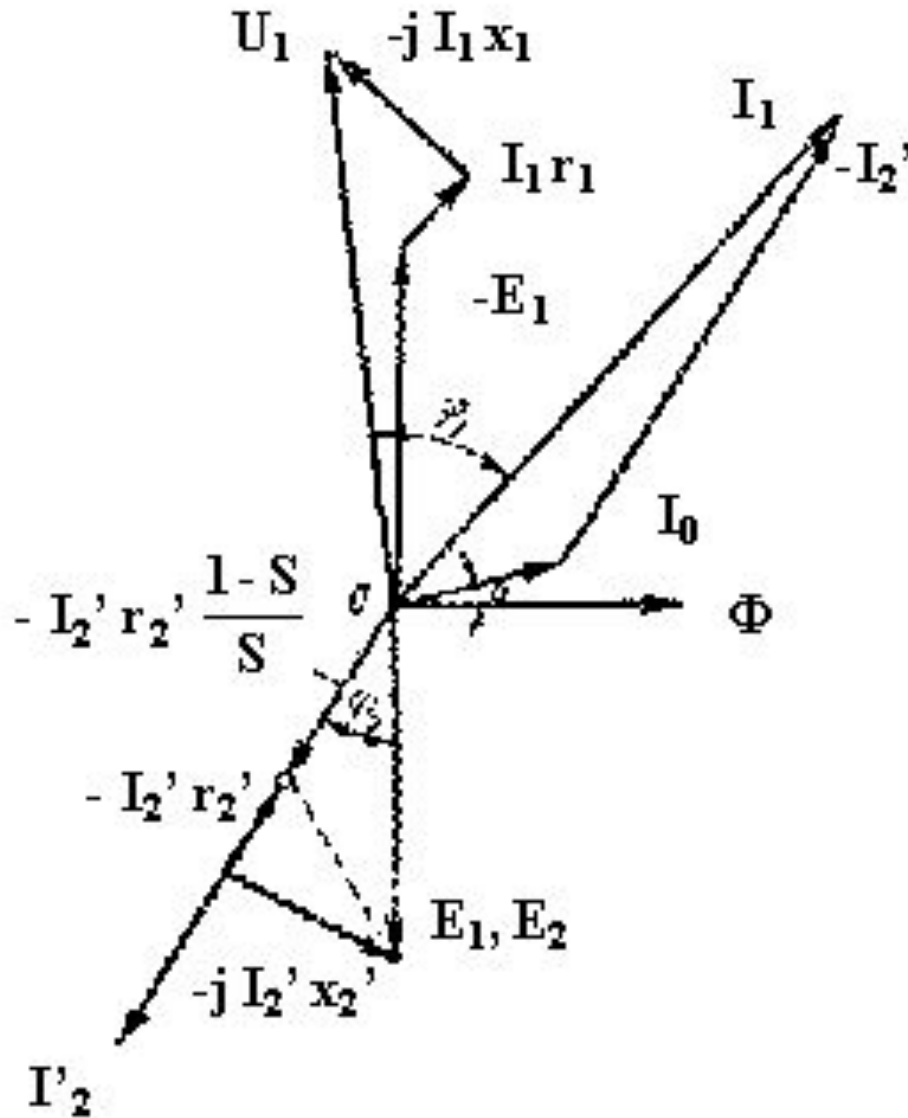
$$\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{X_2}{r_2} = \frac{X'_2}{r'_2} \quad X'_2 = X_2 \frac{r'_2}{r_2} = X_2 K_e^2 \quad X'_2 = X_2 K_e^2$$

Соответственно $Z'_2 = Z_2 K_e^2$

Далее во всех схемах замещения и на векторных диаграммах будем использовать приведенные параметры ротора.

Асинхронные машины

Векторная диаграмма асинхронного

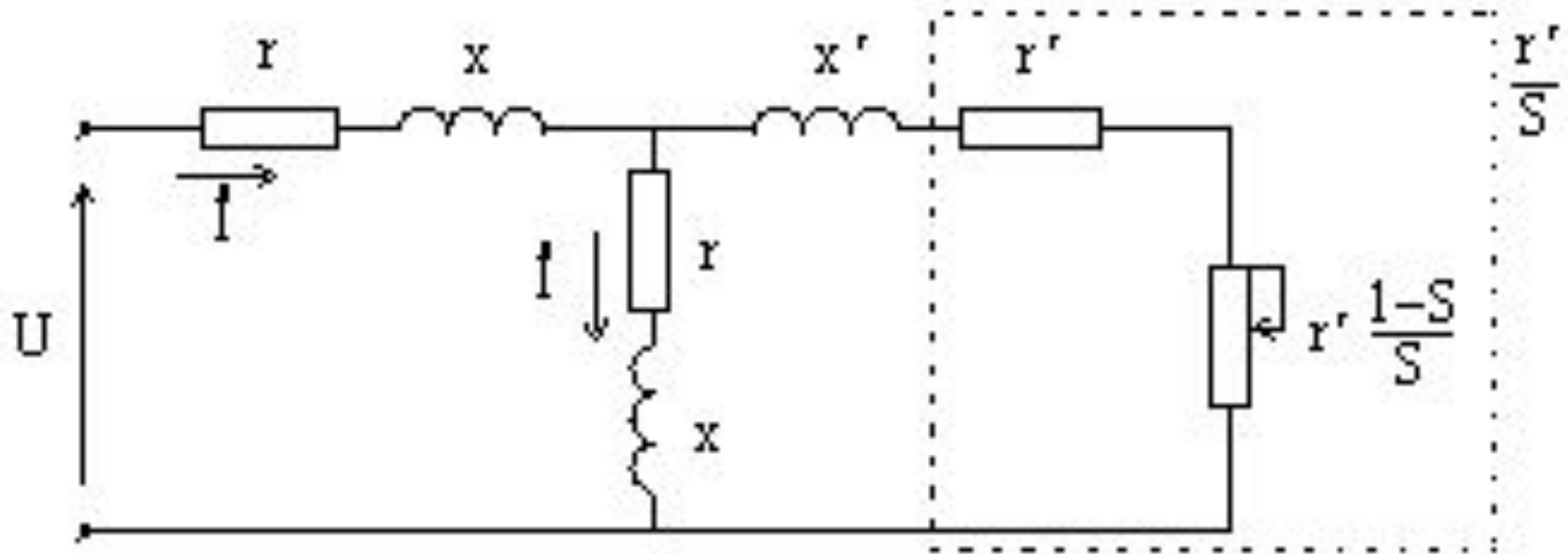


1. $U_1 = (-E_1) + I_1 x_1 + I_1 r_1$
2. $0 = E'_2 - I'_2 x'_2 - I'_2 \frac{r'_2}{S}$
3. $I_1 = I_{01} + (-I'_2)$

Асинхронные машины

Схема замещения асинхронной машины

Реально обмотки статора и ротора связаны электромагнитно. Схемы, где электромагнитная связь обмоток заменяется электрической, называются схемами замещения асинхронной машины. В теории асинхронных машин используются две схемы замещения: а) Т-образная; б) Г-образная.



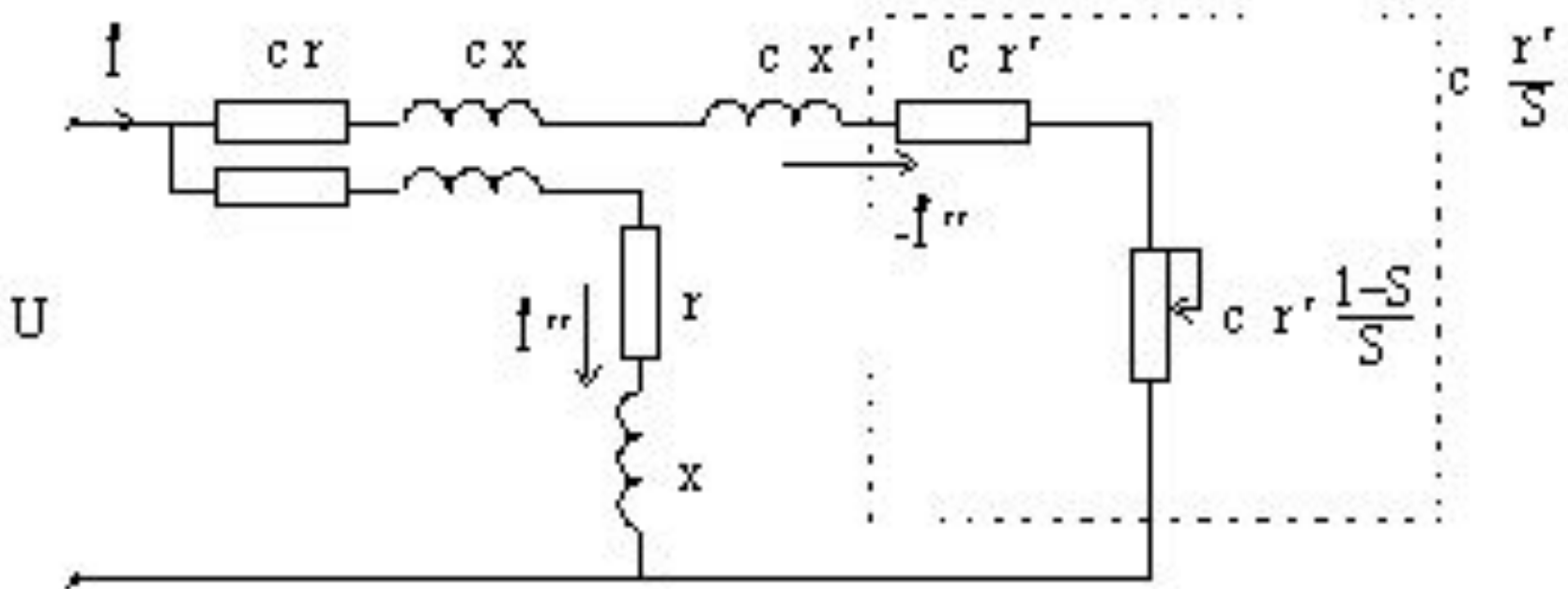
Т-образная схема
замещения

Асинхронные машины

Схема замещения асинхронной

машины. Чаще пользуются Г-образной схемой замещения. При переходе к Г-образной схеме замещения:

- ток I_1 должен оставаться неизменным, т.е. $I_1 = \text{const}$;
- изменяя скольжение $S = 0$ ток $I_0 = I_2''$, т.е. ток I_2'' должен проходить по тем же сопротивлениям Z_1 и Z_m ;
- параметры первичной обмотки и вторичной обмотки соответственно должны измениться на коэффициент C_1 и C_1^2 .



Асинхронные машины

Схема замещения асинхронной

машины

В Г-образной схеме рабочая ветвь и цепь намагничивания независимы, а сопротивления активные и индуктивные можно просуммировать. В Г-образной схеме замещения:

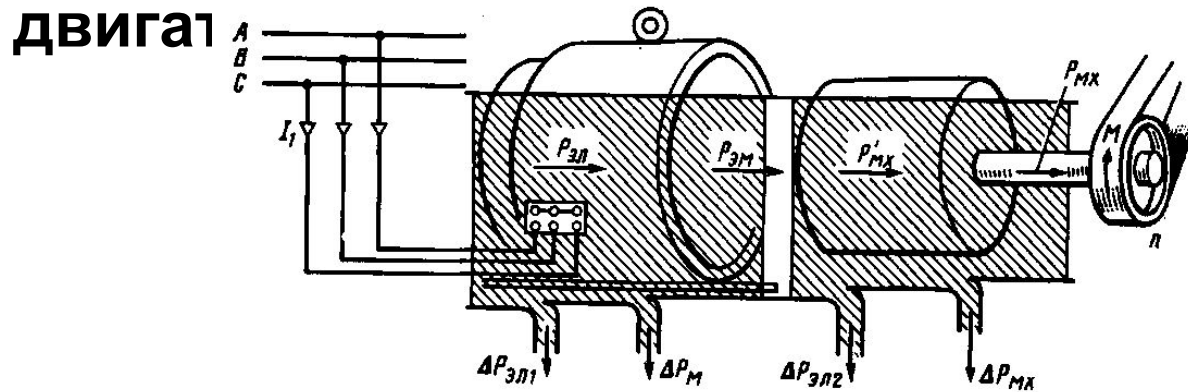
$$\dot{I}_0 = \frac{\dot{U}}{Z_m + Z_1} = \frac{\dot{U}}{Z_m \left(1 + \frac{Z_1}{Z_m} \right)} = \frac{\dot{U}}{C_1 Z_m}$$

$$C_1 = 1 + \frac{Z_1}{Z_m} = \frac{Z_m + Z_1}{Z_m} \cdot \frac{\dot{I}_0}{\dot{I}_0} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_0 Z_m}$$

$$-\dot{I}_2 = \dot{I}_1 - \dot{I}_0 = \frac{\dot{U}}{Z_1 + \frac{Z_m Z'_2}{Z_m + Z'_2}} - \frac{\dot{U}}{C_1 Z_m} = \frac{\dot{U}}{C_1 Z_1 + C_1^2 Z'_2}$$

Асинхронные машины

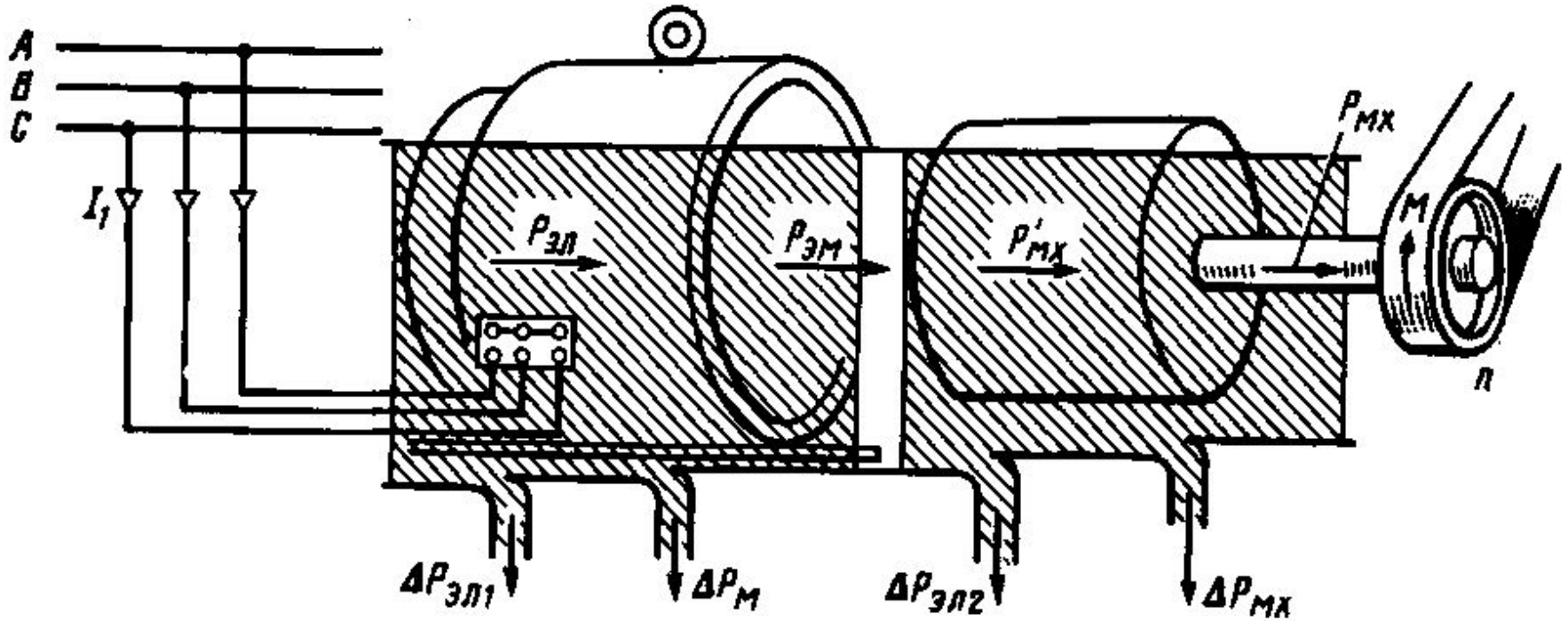
Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя



Двигатель потребляет из сети электрическую мощность $P_{эл} = 3U_1 I_1 \cos\phi_1$ и отдает приводимому им во вращение механизму механическую мощность $P_{мх}$. В процессе преобразования энергии в машине имеют место потери мощности: электрические в обмотках статора $\Delta P_{эл1}$ и ротора $\Delta P_{эл2}$, магнитные ΔP_m от гистерезиса и вихревых токов в ферромагнитных частях машины и механические $\Delta P_{мх}$ от трения в подшипниках и вращающихся частей о воздух. Из статора в ротор вращающимся электромагнитным полем передается электромагнитная мощность $P_{эм}$ роторе она превращается в механическую мощность ротора $P'_{мх}$. Полезная механическая мощность на валу двигателя $P_{мх}$ меньше мощности $P'_{мх}$ на значение потерь мощности на трение $\Delta P_{мх}$.

Асинхронные машины

Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя



Асинхронные машины

Энергетическая диаграмма асинхронного

двигателя

1. Активная потребляемая мощность из сети

$$P_1 = m U_1 I_1 \cos \varphi$$

2. В статоре имеются магнитные потери $P_{\text{мг}}$, которые определяются из опыта холостого хода и потери в обмотках

$$P_{\text{эл1}} = m_1 I_1^2 r_1$$

3. $P_{\text{эм}}$ – электромагнитная мощность, она электромагнитным путем передается на ротор. В роторе потерями в стали пренебрегаем, т.к. $f = (2 - 3) \text{Гц}$

$$P_{\text{эм}} = P_1 - (P_{\text{эл1}} + P_{\text{мг}}) = M \cdot \omega_1$$

4. Потери в обмотке ротора

$P_{\text{эл2}}$

$$P_{\text{эл2}} = m_2 I_2^2 r_2 = m_2 I_2'^2 r_2'$$

Асинхронные машины

Энергетическая диаграмма асинхронного

4. Полная механическая
мощность

$$P'_{мх} = P_{эм} - P_{эл2} = M \cdot \omega_2 = m_1 I_2'^2 r_2' \frac{1-S}{S}$$

Тогда

$$а \quad P_{эл2} = P_{эм} - P'_{мх} = M\omega_1 - M\omega_2 = M\omega_1 \cdot S = P_{эм} S$$

5. Механическая мощность на валу
двигателя P_2

$$P_2 = P'_{мх} - (P_{мх} + P_{доб})$$

где $P_{мх}$ – механические потери вращения, $P_{доб}$ – добавочные потери, суммарно эти потери принимаются равными 0,5% от P_1 .

6. Коэффициент полезного
действия

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1}$$

Асинхронные машины

Уравнение вращающего

момента

Вращающий момент в асинхронном двигателе создается взаимодействием тока ротора с магнитным полем машины. Вращающий момент математически можно выразить через электромагнитную мощность машины:

$$M_1 = \frac{P_{\text{э}2}}{\omega_1 S} = \frac{m_1 I_2'^2 r_2'}{9,81 \omega_1 S}$$

Используя Г-образную схему замещения

получим

$$\begin{aligned} -I_2' &= C_1(-I_2'') = \frac{C_1 U_1}{\sqrt{\left(C_1 r_1 + C_1^2 \frac{r_2'}{S}\right)^2 + \left(C_1 X_1 + C_1^2 X_2'\right)^2}} = \\ &= \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + C_1 \frac{r_2'}{S}\right)^2 + \left(X_1 + C_1 X_2'\right)^2}} \end{aligned}$$

Асинхронные машины

Механическая характеристика

АД. Зависимость электромагнитного момента от скольжения называется механической характеристикой

$$M = \frac{m_1 U_1^2 \frac{r'_2}{S}}{\omega_1 \left[\left(r_1 + C_1 \frac{r'_2}{S} \right)^2 + (X_1 + C_1 X'_2)^2 \right]}$$

Из выражения видно, что электромагнитный момент асинхронного двигателя зависит от U^2 квадрата подведенного напряжения, т.е. если U уменьшить на 10%, то момент уменьшится на 19%.

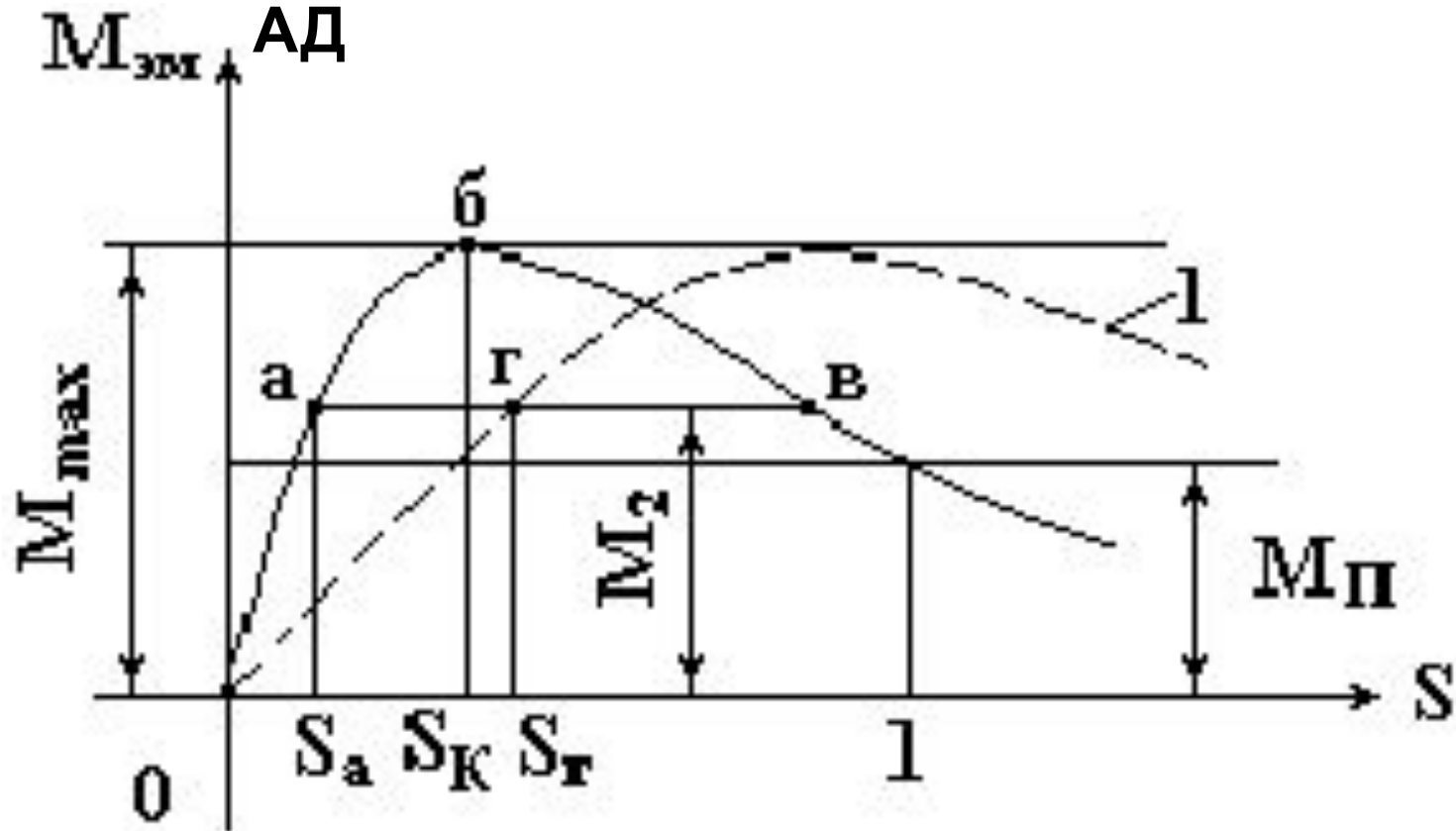
В момент пуска двигателя, когда $n_2=0$, скольжение $S=1$, тогда

$$M_n = \frac{m_1 U_1^2 r'_2 p}{2\pi f \left[(r_1 + C_1 r'_2)^2 + (X_1 + C_1 X'_2)^2 \right]}$$

Асинхронные машины

Механическая характеристика

АД



Пусть исполнительный механизм, приводимый во вращение данным двигателем, создает противодействующий тормозной момент M_2 .

На рисунке имеются две точки, для которых справедливо равенство $M_{эм} = M_2$; это точки a и b .

Асинхронные машины

Механическая характеристика

В точке *a* ~~двигатель~~ ^{АД} работает устойчиво. Если двигатель под влиянием какой-либо причины уменьшит частоту вращения, то скольжение его возрастет, вместе с ним возрастет вращающий момент. Благодаря этому частота вращения двигателя повысится, и вновь восстановится равновесие $M_{эм} = M_2$.

В точке *b* работа двигателя не может быть устойчива: случайное отклонение частоты вращения приведет либо к остановке двигателя, либо к переходу его в точку *a*.

Следовательно, вся восходящая ветвь характеристики является областью устойчивой работы двигателя, а вся нисходящая часть - областью неустойчивой работы. Точка *b*, соответствующая максимальному моменту, разделяет области устойчивой и неустойчивой работы.

Максимальному значению вращающего момента соответствует критическое скольжение S_k . Скольжению $S = 1$ соответствует пусковой момент. Если величина противодействующего тормозного момента M_2 больше пускового МП, двигатель при включении не запустится, останется неподвижным.

Асинхронные машины

Механическая характеристика

Ток, при $s = 1$ равен пусковому, который в 5-7 раз больше номинального. При $s = 0$ ток $I_1 \neq 0$, т.к. при $s = 0$ двигателем потребляется реактивная мощность для создания вращающего поля, кроме того, двигателем потребляется активная мощность на покрытие потерь в статоре.

При $s = 0$ ток ротора $I_2' = 0$ т.к. $E_{2s} = E_2 s = 0$

Кривая зависимости $M = f(s)$ характеризуется тремя моментами:

а) Пусковой момент M_n при $s = 1$

б) Максимальный момент $M_{\max} \rightarrow s_{кр}$

в) Номинальный момент $M_n \rightarrow s_n$

Отношение максимального (критического) момента к номинальному, называется перегрузочной способностью

$$\lambda_{\max} = \frac{M_{кр}}{M_n}$$

Асинхронные машины

Максимальный (критический)

момент

Определим критическое скольжение – $S_{кр}$, соответствующего максимальному моменту

$$S_{кр} = \pm \frac{C_1 r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (X_1 + C_1 X_2')^2}}$$

обычно $r_1 \ll (X_1 + C_1 X_2')$, то $S_{кр} \cong \pm \frac{C_1 r_2'}{X_1 + C_1 X_2'}$

Выражение максимального момента

$$M_{кр} = \frac{m_1 U_1^2 P}{4\pi f_1 C_1 \left[\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (X_1 + C_1 X_2')^2} \right]}$$

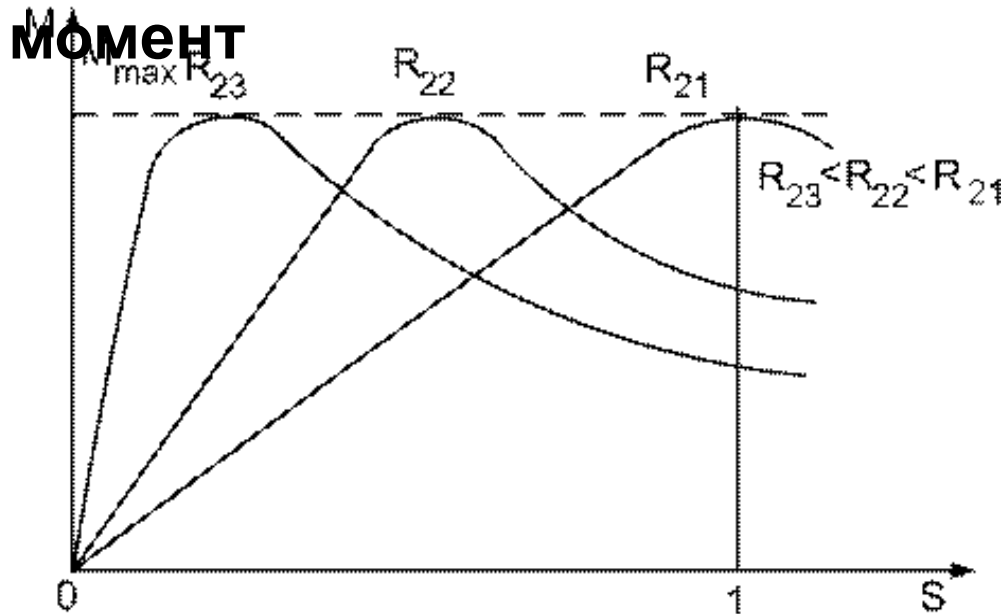
Знак + - соответствует двигательному режиму

Знак - - соответствует генераторному режиму

При генераторном режиме $M_{кр.г} > M_{кр.д}$

Асинхронные машины

Максимальный (критический)



$$M = \frac{(2 + \beta S_{кр}) M_{кр}}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S} + \beta S_{кр}}$$

$$\beta = 2 \frac{r_1}{r'_2}$$

Если
пренебречь

$\beta S_{кр}$ из-за его
малости

$$M = \frac{2M_{кр}}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S}}$$

Асинхронные машины

Расчетная формула вращающего момента

Момент асинхронного двигателя пропорционален потоку и активной составляющей тока ротора.

$$M = \frac{m_1 I_2'^2 r_2'}{\omega_1 S} = \frac{m_1 I_2'}{\omega_1} \cdot \frac{r_2'}{S}$$

$$I_2' \frac{r_2'}{S} = E_2' \cos \psi_2$$

$$E_2' = E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f_1 W_1 \Phi K_{01}$$

$$M = \frac{P m_1 2\pi f_1 W_1 K_{01}}{2\pi f_1 \sqrt{2}} \Phi I_2' \cos \psi_2 = C_M \Phi I_2' \cos \psi_2$$

C_M
 I_{2a}'

$\cos \psi_2$ - угол сдвига фаз тока ротора по отношению к ЭДС ротора

Асинхронные машины

Режим работы

