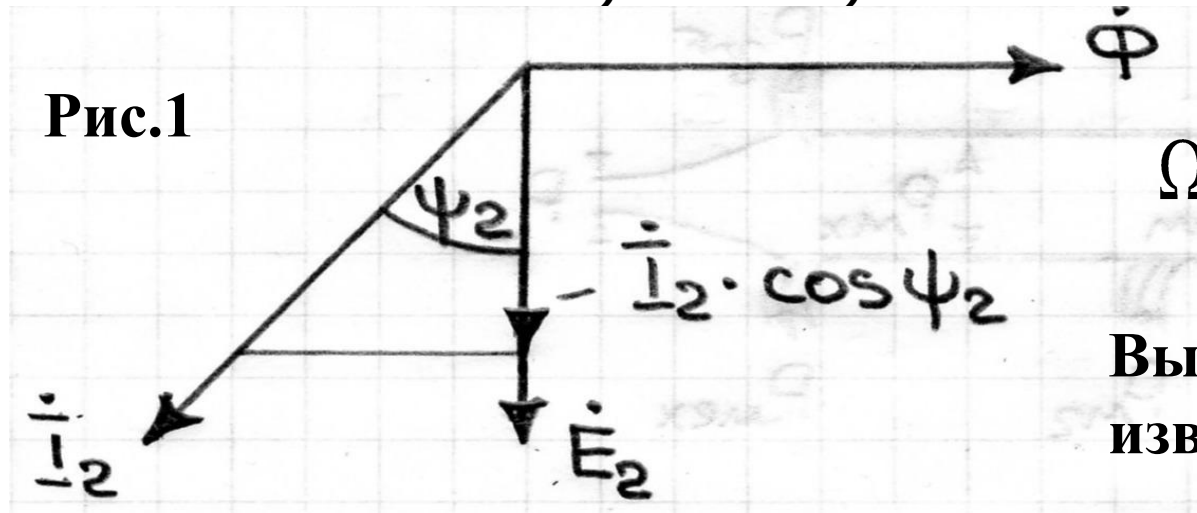


Асинхронные машины

- **Активная составляющая тока. Выражение для момента**
- **Изменение $\cos\psi_2$ в процессе разгона двигателя**
- **График изменения силы, действующей на проводники ротора**
- **Выражение для момента (связь со всеми параметрами)**
- **Механическая характеристика $M = f(s)$**
- **Выражения для пускового и максимального моментов**
- **Иллюстрация к образованию максимального момента**
- **Формула Клосса**
- **Устойчивость работы двигателя. Характеристики рабочих механизмов**

Активная составляющая тока ротора

Из векторной диаграммы активная составляющая тока - это проекция вектора тока ротора I_2 на вектор ЭДС: $I_2 \times \cos \psi_2$,



Угловая частота

$$\Omega_1 = 2\pi \times n_1 = \frac{2\pi \times f_1}{p} = \frac{\omega_1}{p}$$

Выразим момент через известные величины:

$$M = \frac{P_{эм}}{\Omega_1} = \frac{m_2 \times E_2 \times I_2 \times \cos \psi_2}{\frac{2\pi \times f_1}{p}} = \frac{m_2 \times 4,44 \times k_{об} \times W_2 \times f_1}{\frac{2\pi \times f_1}{p}} \times \Phi \times I_2 \times \cos \psi_2$$

Получим: $M = c_M \times \Phi \times I_2 \times \cos \psi_2$

Вывод:

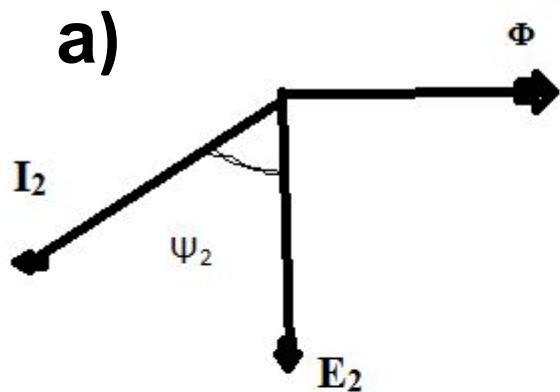
Момент АМ зависит от:

- 1) величины магнитного потока Φ ,
- 2) постоянной составляющей C_M , связанной с параметрами конструкции машины,
- 3) величины активной составляющей тока ротора $I_2 \cdot \cos \Psi_2$:

$$M = C_M \cdot \Phi \cdot (I_2 \cdot \cos \Psi_2)$$

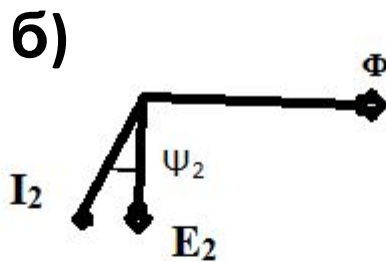
Н.В. Сравнить с моментом в машинах пост. тока:

$$M = C_M \cdot \Phi \cdot I$$



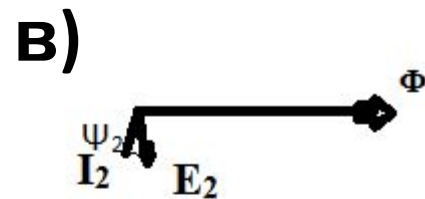
$S = 1$
 $n_2 = 0$
 угол $\psi_2 \sim 90^\circ$
 $\cos \psi_2 \div 0,15$

Режим пуска



$S = 0,5$
 $n_2 = 0,5 n_1$
 $\psi_2 \sim 45^\circ$
 $\cos \psi_2 \sim 0,707$

Режим разгона

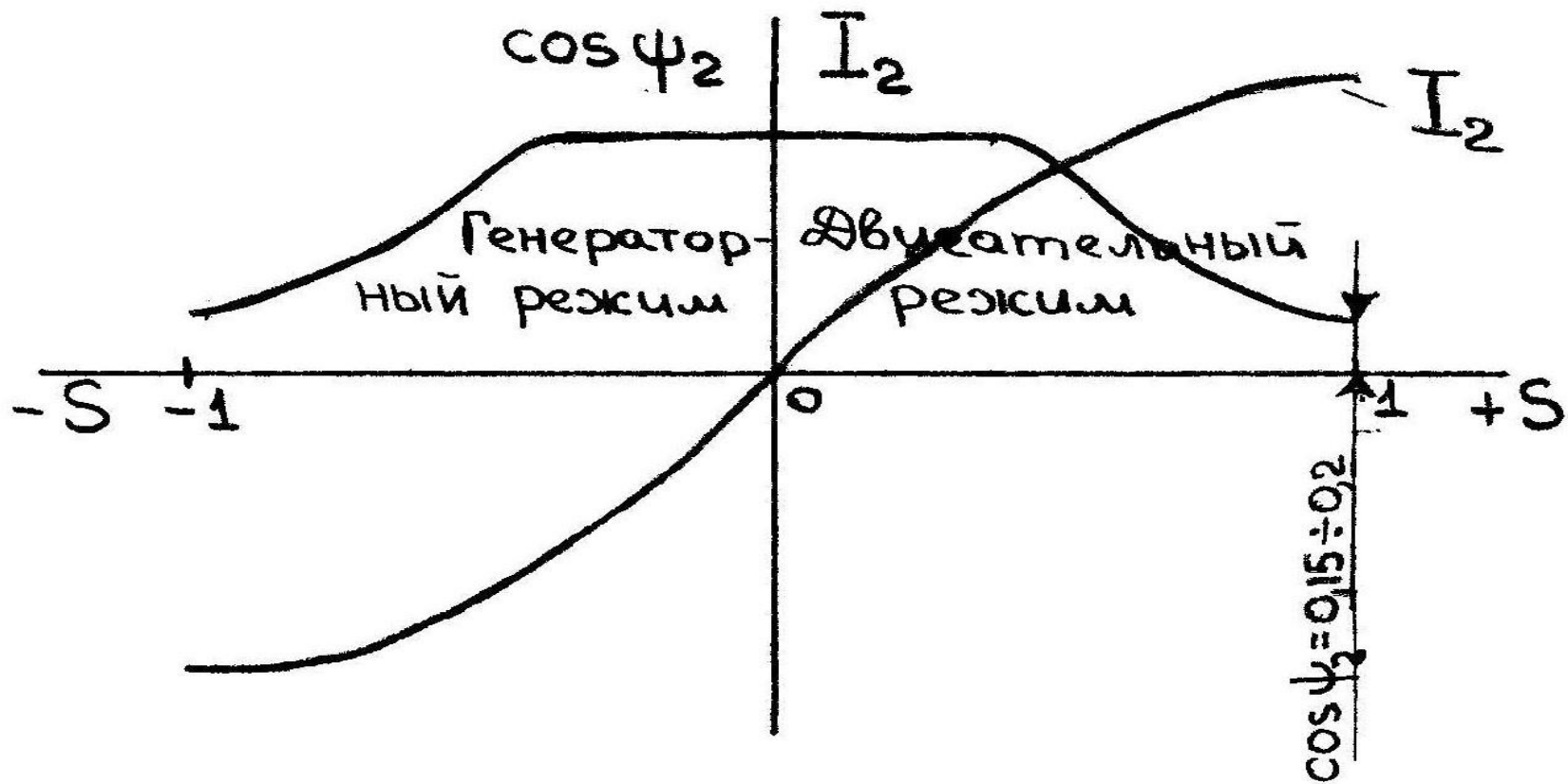


$S \approx 0$
 $n_2 \approx n_1$
 $\psi_2 = 0$
 $\cos \psi_2 = 1$
 Режим
 холостого
 хода

Рис.2.Изменение угла ψ_2 и $\cos \psi_2$

Вывод: угол ψ_2 уменьшается до нуля, а $\cos \psi_2$ возрастает до значения единицы при холостом ходе (см. график на Рис.3)

Рис.3. График изменения $\cos\psi_2$ и I_2



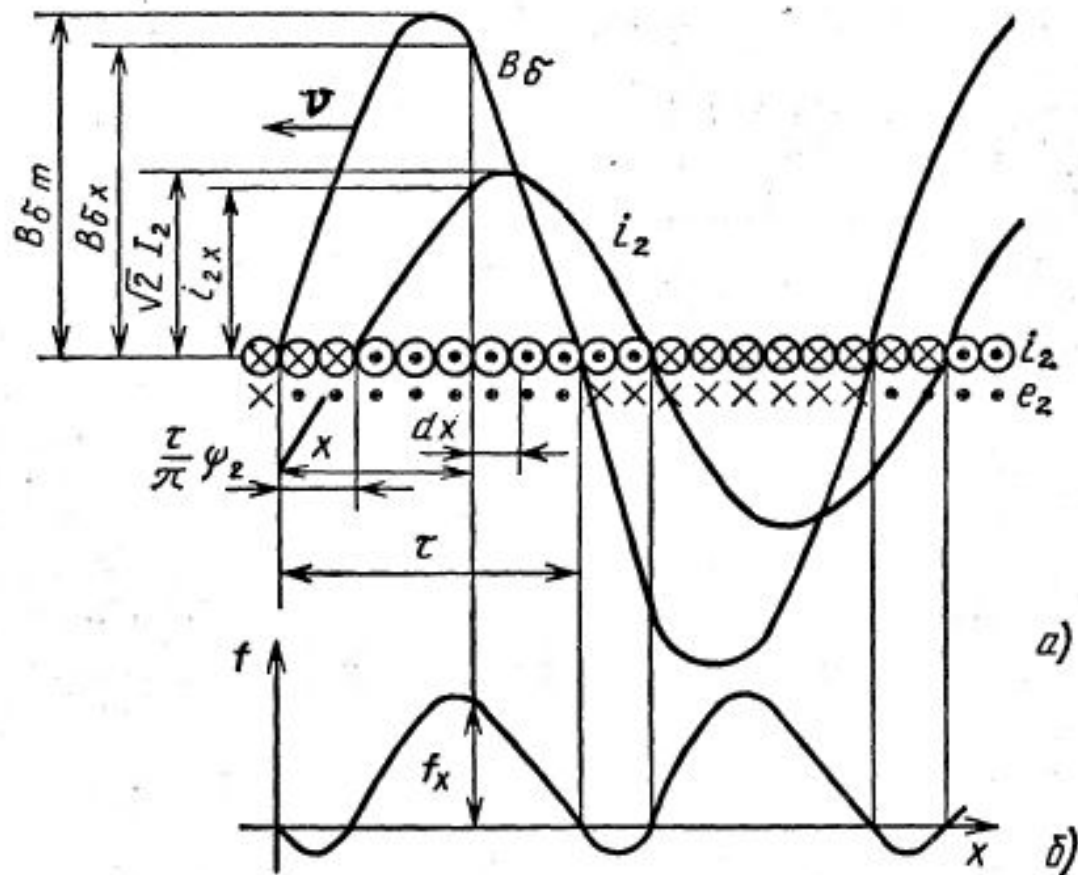


Рис.4. Образование вращающегося электромагнитного момента в результате взаимодействия тока ротора с магнитным полем.

$$\mathbf{F} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{I} \cdot \mathbf{L}$$

На полюсном делении τ расположено по 8 проводников: в кружочках проставлены направления токов i_2 в стержнях, под кружочками - направление ЭДС e_2 в стержнях.

Так как ток в роторе \underline{I}_2 отстает от ЭДС \underline{E}_2 на угол ψ_2 ($\operatorname{tg} \psi_2 = x_2 s / r_2$), которому на рис. 4, а соответствует пространственная координата $\frac{\tau}{\pi} \psi_2$, то кривая распределения тока по проводникам обмотки будет смещена относительно кривой ЭДС и индукции. Направление тока в проводниках показано внутри проводников.

Электромагнитная сила, действующая на проводник, находящийся в данный момент времени на расстоянии x от начала отсчета, будет равна:

$$f_x = B_{\delta x} i_{2x} l = B_{\delta m} \left(\sin \frac{\pi}{\tau} x \right) \sqrt{2} I_2 \sin \left(\frac{\pi}{\tau} x - \psi_2 \right) l,$$

Выражение для момента (связь со всеми параметрами)

Из энергетической диаграммы было установлено, что эл. потери в роторе составляют S-ную долю от $P_{эм}$:

$$P_{M2} = S \times P_{эм}$$

Потери в обмотке ротора $P_{M2} = m_2 \cdot (I_2)^2 \cdot r_2 = m_1 (I'_2)^2 \cdot r'_2$

Заменяем ток I'_2 $P_{M2} = m_1 \times r'_2 \left(\frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + \frac{r'_2}{S})^2 + (x_1 + x'_2)^2}} \right)^2$

$$M = P_{эм} / \Omega_1 = P_{M2} / S \cdot \Omega_1 \quad \Omega_1 = 2\pi \times n_1 = \frac{2\pi \times f_1}{p} = \frac{\omega_1}{p}$$

$$M = \frac{p \times m_1 \times \frac{r'_2}{S} \times U_1^2}{\omega_1 \times \left[\left(r_1 + \frac{r'_2}{S} \right)^2 + (x_1 + x'_2)^2 \right]}$$

Вывод:

Момент пропорционален квадрату напряжения.

Это хорошо, но это же является и недостатком.

Пример: вспомогательный двигатель развивает момент M_1 при напряжении в контактной сети $U_{\text{кв}} = 10\text{кВ}$.

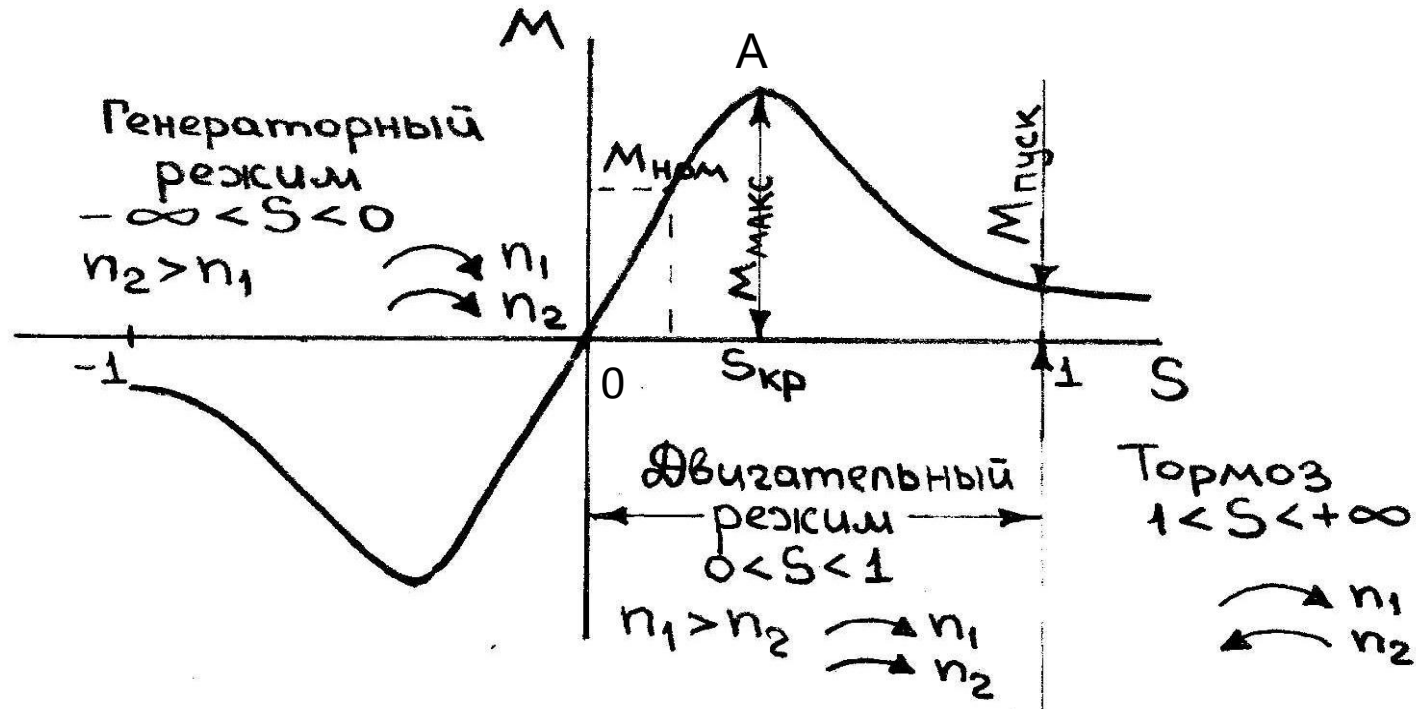
Пусть $U_{\text{кв}}$ уменьшилось до 7кВ – момент уменьшится до величины, пропорциональной соотношению напряжений в квадрате::

$$M = \left(\frac{7}{10}\right)^2 \times M_1 = 0,49M$$

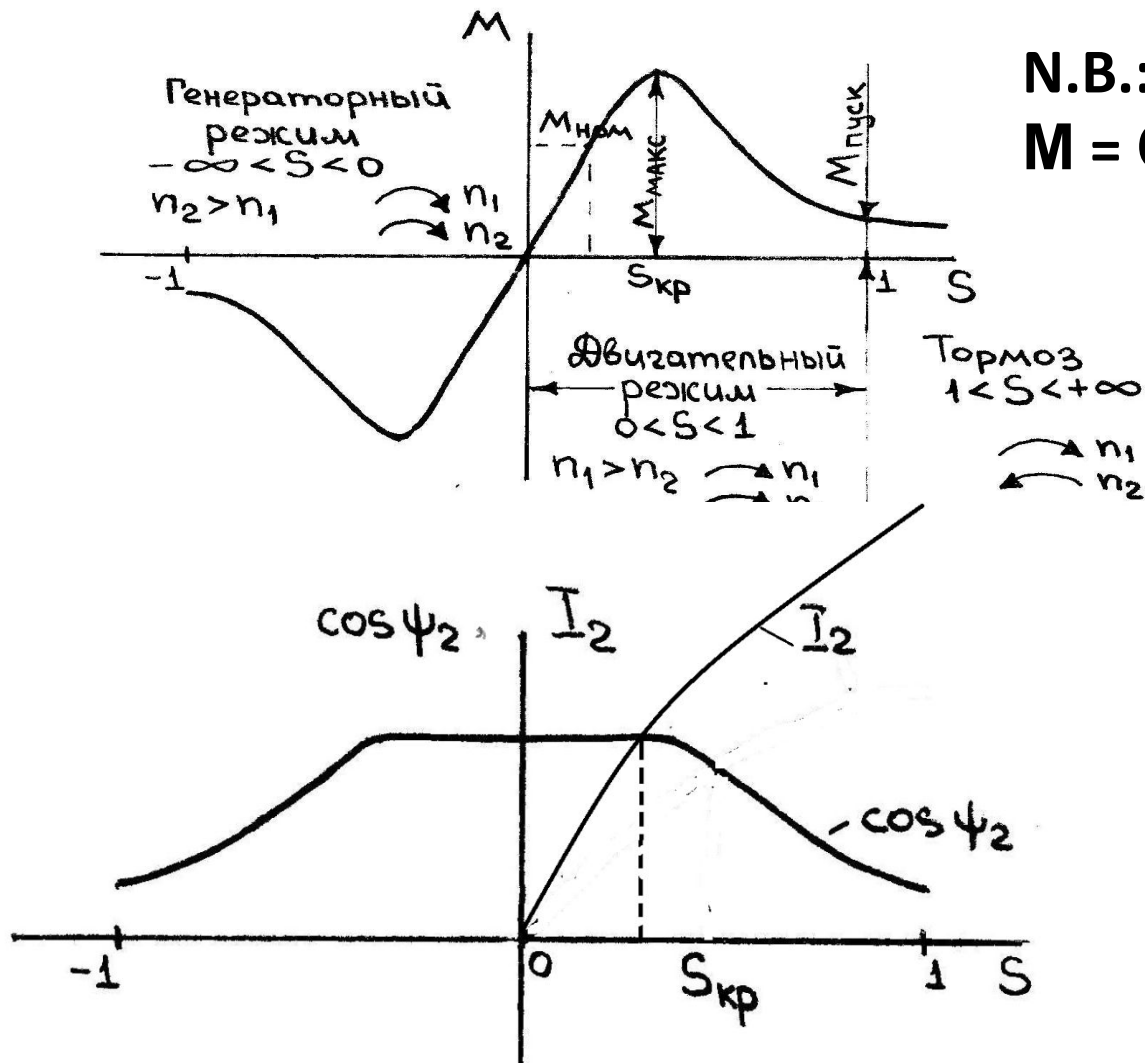
Т.е. момент уменьшился наполовину и электровоз может остановиться.

Рис.5. Механическая характеристика АМ.

Это зависимость $M = f(S)$



$M_{ном}$ – номинальный момент (находится на линейной части кривой от 0 до точки A); $M_{макс}$ – максимальный (критический, перегрузочный, опрокидывающий) момент (соответствует критическому скольжению $S_{кр}$).



N.B.:

$$M = C_M \cdot \Phi \cdot (I_2 \cdot \cos \psi_2)$$

Рис.6. Иллюстрация к объяснению: как образуется максимальный момент (когда косинус уже большой и ток ещё не маленький – точка, совпадающая с $S_{\text{кр}}$)

Выражение для пускового момента.

Т.к. скольжение при пуске равно единице ($S = 1$), то, при подстановке этого значения в основную формулу, она преобразуется в вид:

$$M_{\Pi} = \frac{p \times m_1 \times r_2' \times U_1^2}{\omega_1 \times \left[(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]}$$

Вывод: пусковой момент зависит от активного сопротивления r_2 в цепи ротора и от напряжения в квадрате.

N.B.:

$$M = \frac{p \times m_1 \times \frac{r_2'}{S} \times U_1^2}{\omega_1 \times \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{S} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]}$$

Более компактное выражение для пускового момента

Пусковой момент

$$M_{\Pi} = \frac{pm_1 U_1^2 r'_2}{\omega \left[(r_1 + c_1 r'_2)^2 + (x_1 + c_1 x'_2)^2 \right]}.$$

Сопротивления короткого замыкания:

$$z_{\text{к}}^2 = (r_1 + c_1 r'_2)^2 + (x_1 + c_1 x'_2)^2 = r_{\text{к}}^2 + x_{\text{к}}^2.$$

$$M_{\Pi} = \frac{pm_1 U_1^2 r'_2}{\omega z_{\text{к}}^2} = \frac{pm_1}{\omega} I_{\Pi}^2 r'_2,$$

Коэффициенты кратностей пускового и максимального моментов:

$$K_{\Pi} = M_{\Pi} / M_{\text{НОМ}} \geq 1$$

$$K_{\text{маx}} = M_{\text{маx}} / M_{\text{НОМ}} \geq 1,8$$

Выражение для максимального момента.

Максимум момента определяют следующим образом: по основному уравнению берут производную, приравнивают её нулю, находят критическое скольжение, подставляют его в уравнение и определяют максимальный

момент: $\frac{dM}{dS} = 0$ $S_{кр} = \pm \frac{r_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}}$,

где «+» - для двигательного режима, а «-» - для генераторного.

Обычно $r_1 \approx 0$, т.к. $r_1 \ll (x_1 + x_2')$

Имеем окончательно:

$$S_{кр} = \pm \frac{r_2'}{x_1 + x_2'} ; \quad M_{макс} = \pm \frac{p m_1 U^2}{4 \pi f_1 x_k}$$

Вывод:

$M_{\text{макс}}$ зависит лишь от конструктивных параметров (величины X_k) и в процессе эксплуатации изменён быть не может.

$M_{\text{макс}}$ не зависит от r_2^L (сопротивления в цепи ротора).

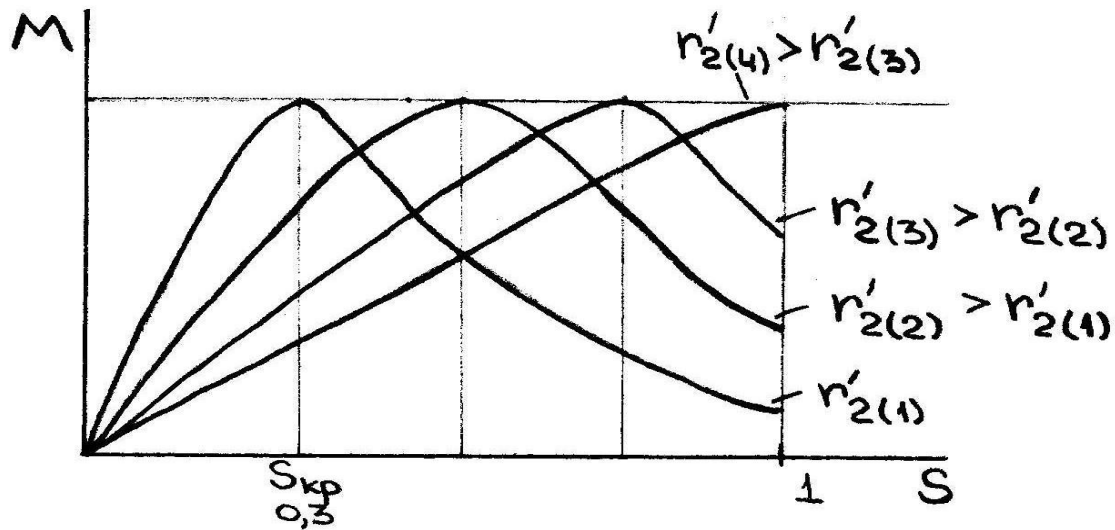


Рис.7. Вид механической характеристики при разных величинах r'_2 : $M_{\text{макс}}$ не изменяется, а $S_{кр}$ смещается в сторону больших скольжений.

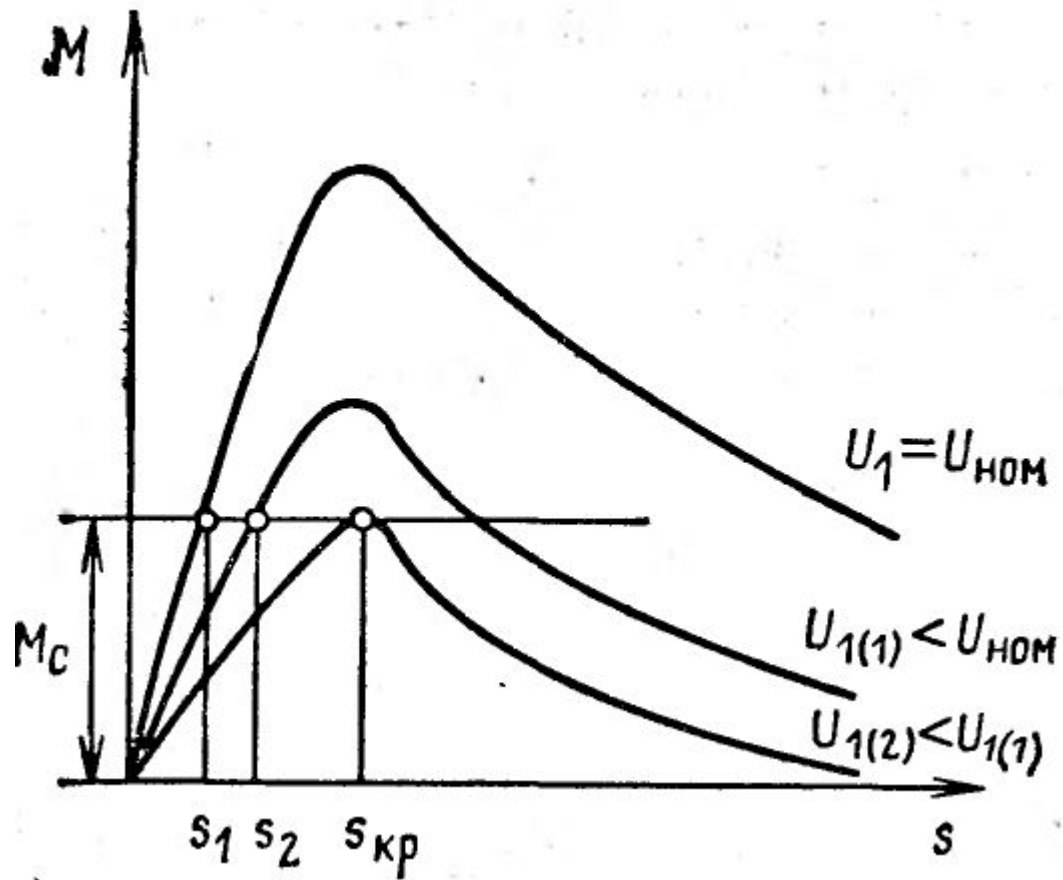


Рис. 8. Характеристики $M = f(s)$ при различных значениях напряжения U .

Вывод: при уменьшении напряжения уменьшается перегрузочная способность АД

**Построение механической характеристики $M=f(s)$
по каталожным данным. (Формула Клосса).**

В каталоге обычно указывают $M_{ном}$, $S_{ном}$ и коэффициент перегрузки : $K_M = M_{макс} / M_{ном}$ (по ГОСТу может составлять $k_M = 1,7 \div 3,5$. Большие значения имеют двигатели, работающие с большими перегрузками, — крановые, металлургические и т. п.)

Формула Клосса

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

Преобразованная для расчёта

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

Критическое скольжение находят:

$$S_{кр} = S_{ном} \left(K_M + \sqrt{K_M^2 - 1} \right)$$

**По формуле Клосса можно с достаточной
точностью построить механическую
характеристику в относительных единицах, т.е.**

$$M / M_{\text{НОМ}} = f(S)$$

См. рис.9

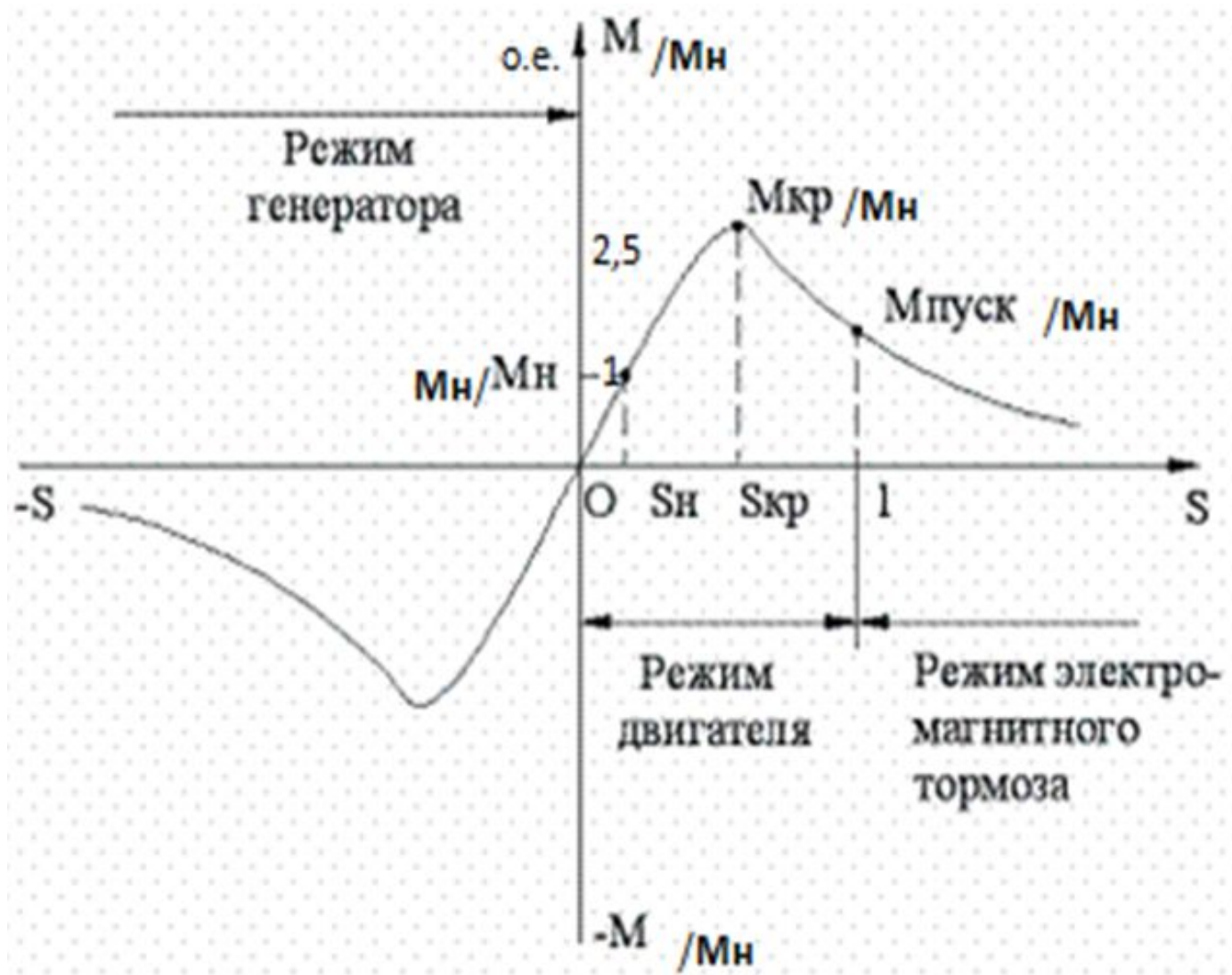


Рис.9

УСТОЙЧИВОСТЬ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Факторы, определяющие устойчивость.

Под *устойчивостью работы электродвигателя* понимают способность двигателя восстанавливать установившуюся частоту вращения при кратковременных возмущениях (изменениях нагрузки, напряжения питающей сети и пр.).

Рассмотрим известное из механики условие равновесия моментов, приложенных к ротору двигателя:

$$M = M_{ст} + Jd\omega_2/dt,$$

где M — электромагнитный момент двигателя;

$M_{ст}$ — статический момент нагрузки (момент сопротивления механизма, приводимого во вращение, с учетом механических потерь в двигателе);

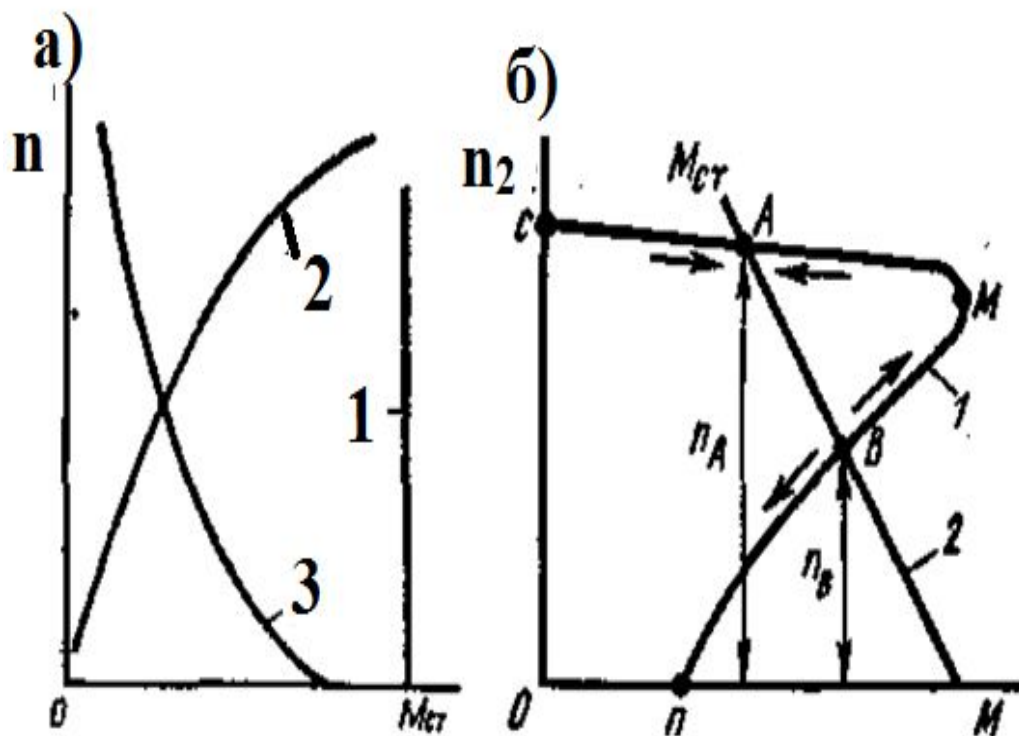
$Jd\omega_2/dt$ — динамический момент, зависящий от момента инерции вращающихся масс J и ускорения ротора $d\omega_2/dt$. При $M = M_{ст}$ ускорение ротора $d\omega_2/dt = (M - M_{ст})/J = 0$, т. е. ротор вращается с установившейся частотой.

Если $M > M_{ст}$, то ротор ускоряется,

Если $M < M_{ст}$, то ротор замедляется.

Устойчивость зависит от конкретных условий, при которых работает электродвигатель, в частности от формы механических характеристик двигателя и приводимого им во вращение производственного механизма.

Рис.10. Механические характеристики некоторых производственных механизмов (а) и графики для определения статической устойчивости асинхронного двигателя (б)



Для грузоподъемных механизмов (кранов, лифтов, лебедок и т. п.) характерным является неизменность статического момента $M_{ст}$, его практическое постоянство независимо от частоты вращения $M_{ст} = const$ (прямая 1 на рис.10, а).

Вентиляторы, центробежные насосы, гребные винты и прочие механизмы имеют характеристику (кривая 2), при которой нагрузочный момент $M_{ст}$ резко увеличивается с ростом частоты вращения, т.е. $M_{ст} \equiv n^2$. Эту характеристику часто называют *вентиляторной*.

Бетономешалки, шаровые мельницы и некоторые другие механизмы имеют большое трение в состоянии покоя и при малых частотах вращения, поэтому в таких механизмах с ростом частоты вращения нагрузочный момент падает $M \equiv C / f(n)$ (кривая 3 Рис.10).

Рассмотрим работу асинхронного электродвигателя [механическая характеристика 1 на рис.10, б], приводящего во вращение производственный механизм, у которого статический (нагрузочный) момент $M_{ст}$ падает с увеличением частоты вращения (механическая характеристика 2 на рис. 10, б).

В этом случае условие $M = M_{ст}$ выполняется в двух точках A и B при значениях частоты вращения n_A и n_B .

Однако, в точке B двигатель не может работать устойчиво, так как при малейшем изменении момента $M_{ст}$ (нагрузки) и возникающем в результате этого отклонении частоты вращения от установившегося значения появляется избыточный замедляющий или ускоряющий момент $\pm (M - M_{ст})$, увеличивающий это отклонение.
Разберём подробнее:

Работа в точке В (на участке М-П характеристики I)

Здесь двигатель работает не устойчиво.

При случайном небольшом увеличении статического момента $M_{ст}$ ротор двигателя начинает замедляться, а его частота вращения n_2 - уменьшаться. Это приводит к уменьшению электромагнитного момента M , т. е. к еще большему возрастанию разности $(M - M_{ст})$. В результате ротор продолжает замедляться до полной остановки.

При случайном уменьшении статического момента ротор начинает ускоряться, что приводит к дальнейшему увеличению момента M и еще большему ускорению до тех пор, пока машина не переходит в режим работы, соответствующий точке А.

Работа в точке А (на участке С-М характеристики 1).

Здесь двигатель работает устойчиво.

При случайном увеличении момента $M_{\text{ст}}$ и замедлении ротора (т. е. уменьшении частоты вращения n_2) электромагнитный момент M возрастает. Когда момент M станет равным новому значению $M_{\text{ст}}$, двигатель снова работает с установившейся, но несколько меньшей частотой вращения.

При случайном уменьшении момента $M_{\text{ст}}$ и ускорении ротора (т. е. увеличении частоты вращения n_2) электромагнитный момент M уменьшается. Когда момент M станет равным новому значению $M_{\text{ст}}$, двигатель снова работает с установившейся, но несколько большей частотой вращения.

Таким образом, асинхронный двигатель при работе на участке C - M механической характеристики обладает свойством внутреннего саморегулирования, благодаря которому его вращающий момент автоматически регулируется по закону $M = M_{ст}$.

Это регулирование осуществляется за счет увеличения или уменьшения частоты вращения ротора n_2 , т. е. система регулирования является статической.

При работе электродвигателя совместно с производственным механизмом, имеющим вентиляторную характеристику (см.кривая 2 рис.10, а), устойчивая работа возможна и на участке $M - II$ механической характеристики 1, т. е. при $S > S_{кр}$.

Однако допускать работу при скольжениях, больших критического, не следует, так как при этом резко уменьшается КПД двигателя, а потери мощности в его обмотках становятся настолько большими, что могут в короткое время вывести двигатель из строя.

Вывод и критерий устойчивости

Работа двигателя устойчива, если с увеличением частоты вращения n_2 статический момент $M_{ст}$ уменьшается медленнее, чем электромагнитный момент двигателя M . Это условие представим в следующем виде:

$$dM/dn_2 < dM_{ст}/dn_2 \quad \text{или} \quad dM/dn_2 < 0$$

Оно выполняется практически для всех механизмов с падающими характеристиками $M_{ст} = f(n)$ и с характеристиками, не зависящими от частоты вращения (кривые 3 и 1 на рис.10, а), если двигатель работает на участке $C - M$ характеристики 1 (рис.10,б). Следовательно, двигатель, приводящий во вращение подобные механизмы, может устойчиво работать только в диапазоне изменения скольжения $0 < S < S_{кр}$.

При $S > S_{кр}$, т.е. на участке $M - II$ механической характеристики 1, устойчивая работа становится невозможной.