Асинхронные машины

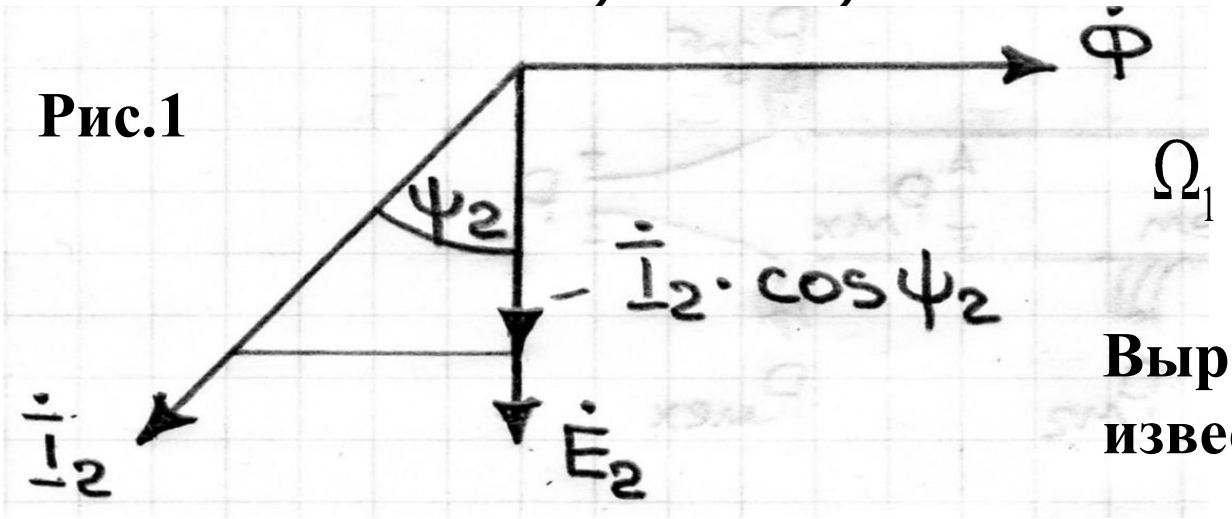
- **Активная составляющая тока. Выражение для момента**
- **Изменение $\cos\Psi_2$ в процессе разгона двигателя**
- **График изменения силы, действующей на проводники ротора**
- **Выражение для момента (связь со всеми параметрами)**
- **Механическая характеристика $M = f(s)$**
- **Выражения для пускового 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:

$$I_2 \times \cos\Psi_2$$

Рис.1



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:

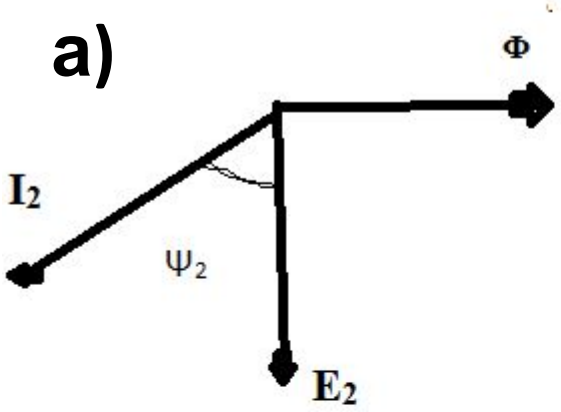
1) **величины магнитного потока Ф,**
2) **постоянной составляющей $C_м$, связанной с параметрами конструкции машины,**
3) **величины активной составляющей тока ротора $I_2 \cdot \cos\Psi_2$:**

$$M = C_м \cdot Ф \cdot (I_2 \cdot COS\Psi_2)$$

N.B. Сравнить с моментом в машинах пост. тока:

$$M = C_м \cdot Ф \cdot I$$

а)



S =1

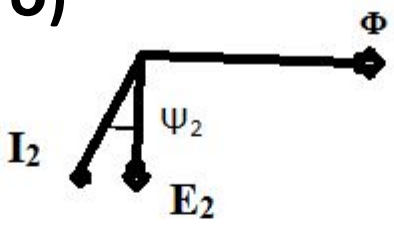
$n_2 = 0$

угол $\Psi_2 \sim 90^0$

$COS\Psi_2 \div 0{,}15$

Режим пуска

б)



S = 0,5

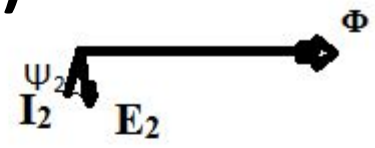
$n_2 = 0{,}5\ n_1$

$\Psi_2 \sim 45^0$

$\cos \Psi_2 \sim 0{,}707$

Режим разгона

в)



$S \approx 0$

$n_2 \approx n_1$

$\Psi_2 = 0$

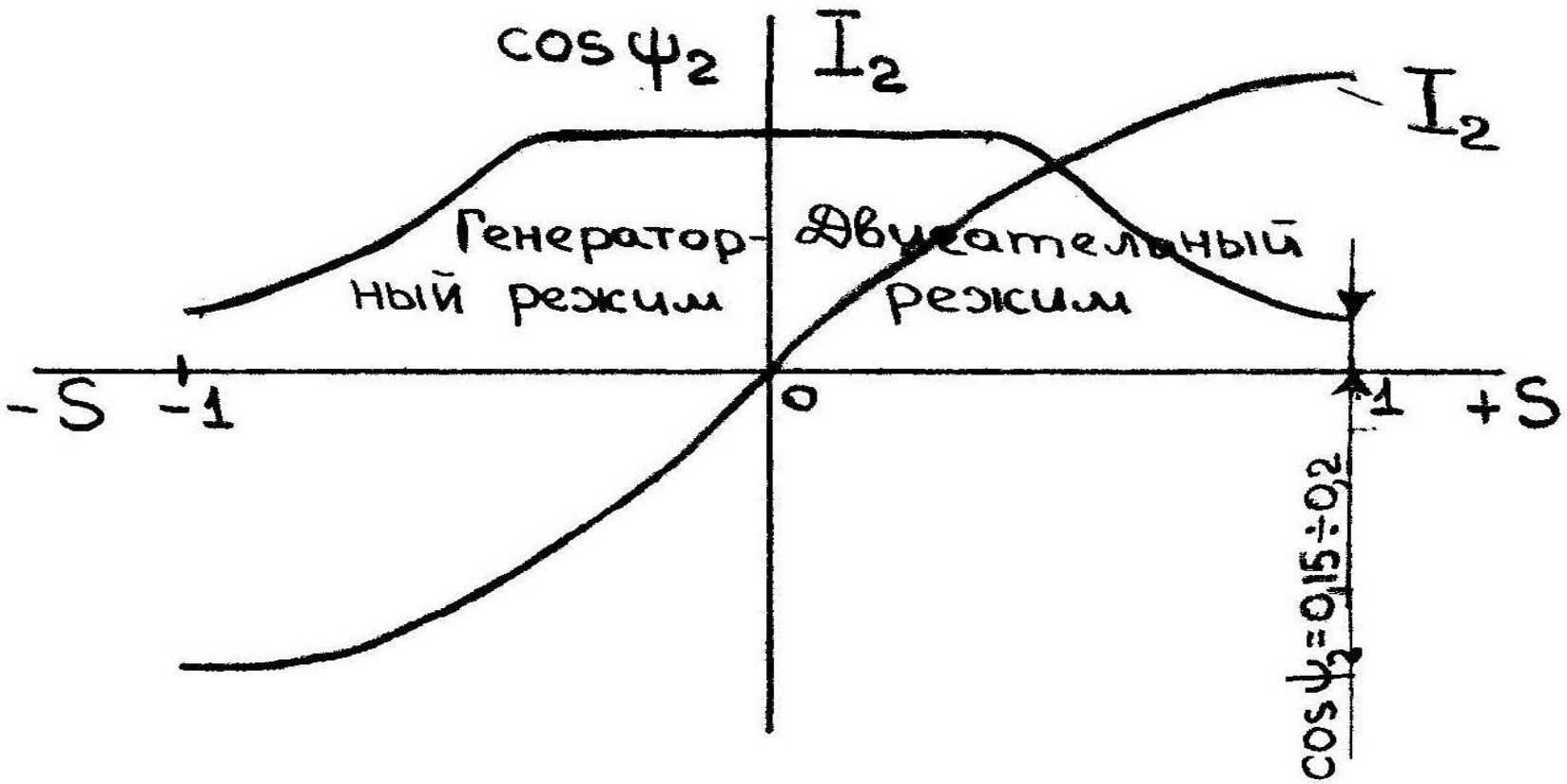
$\cos\Psi_2 = 1$

Режим холостого хода

Рис.2.Изменение угла Ψ_2 и $\cos \Psi_2$

<u>Вывод</u>: 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



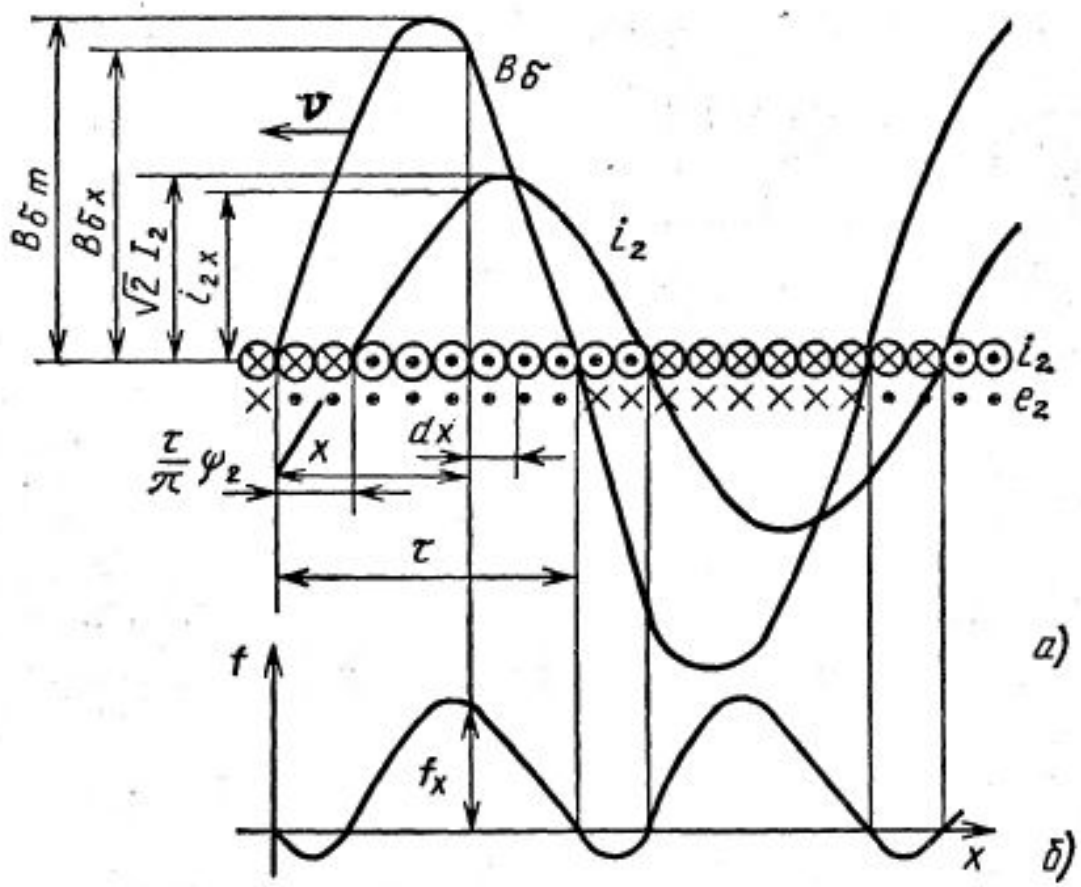


Рис.4. Образование вращающегося электромагнитного момента в результате взаимодействия тока ротора с магнитным полем.

F =B•I•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 $P_{эм}$:

$$p_{м2} = S \times P_{эм}$$

Потери в обмотке ротора $p_{м2} = m_2 \cdot (I_2)^2 \cdot r_2 = m_1 (I'_2)^2 \cdot r'_2$

Заменим ток I'_2 $$p_{M2} = m_1 \times r_2' \left(\frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + \frac{r_2'}{S})^2 + (x_1 + x_2')^2}} \right)^2$$

$M = P_{эм} / \Omega_1 = p_{м2} / S \cdot \Omega_1$ $$\Omega_1 = 2\pi \times n_1 = \frac{2\pi \times f_1}{p} = \frac{\omega_1}{p}$$

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

Вывод:

Момент пропорционален квадрату напряжения.

Это хорошо, но это же является и недостатком.

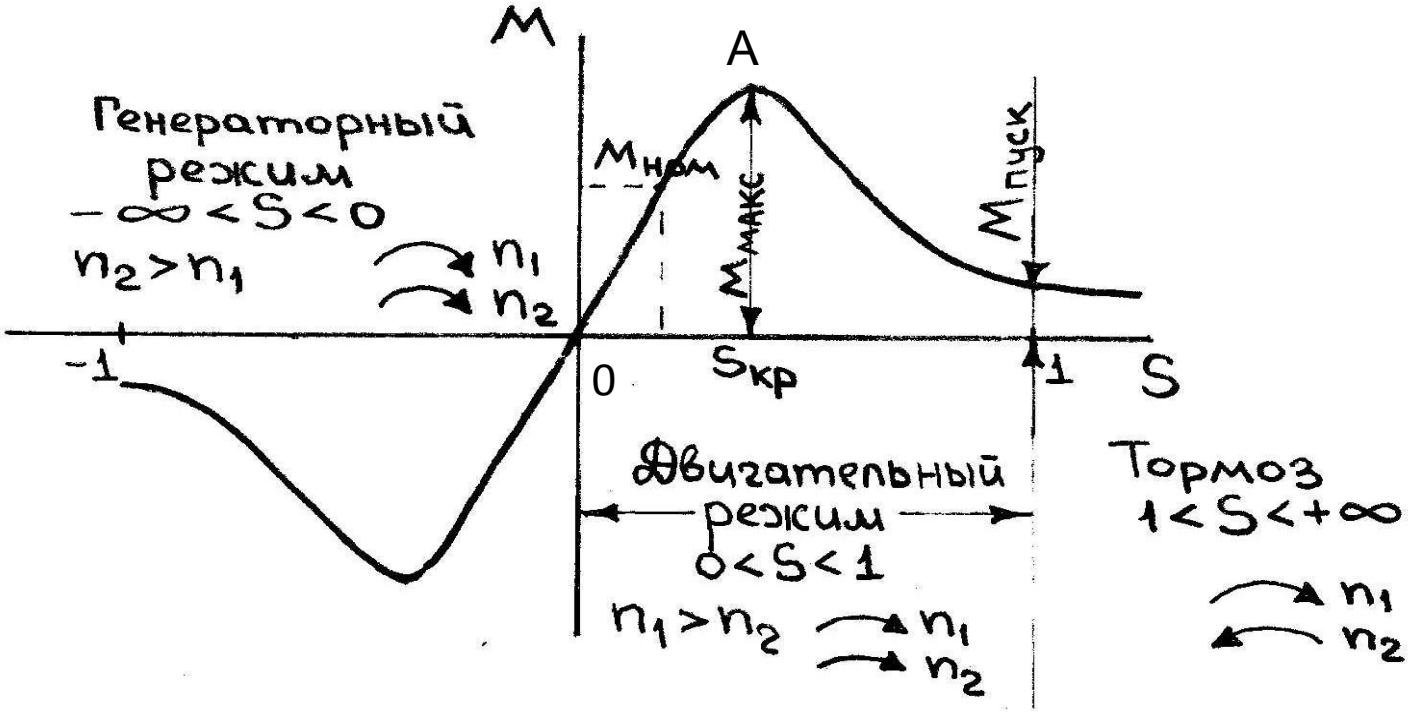
Пример: вспомогательный двигатель развивает момент M_1 при напряжении в контактной сети $U_{кс}$ = 10кВ.

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

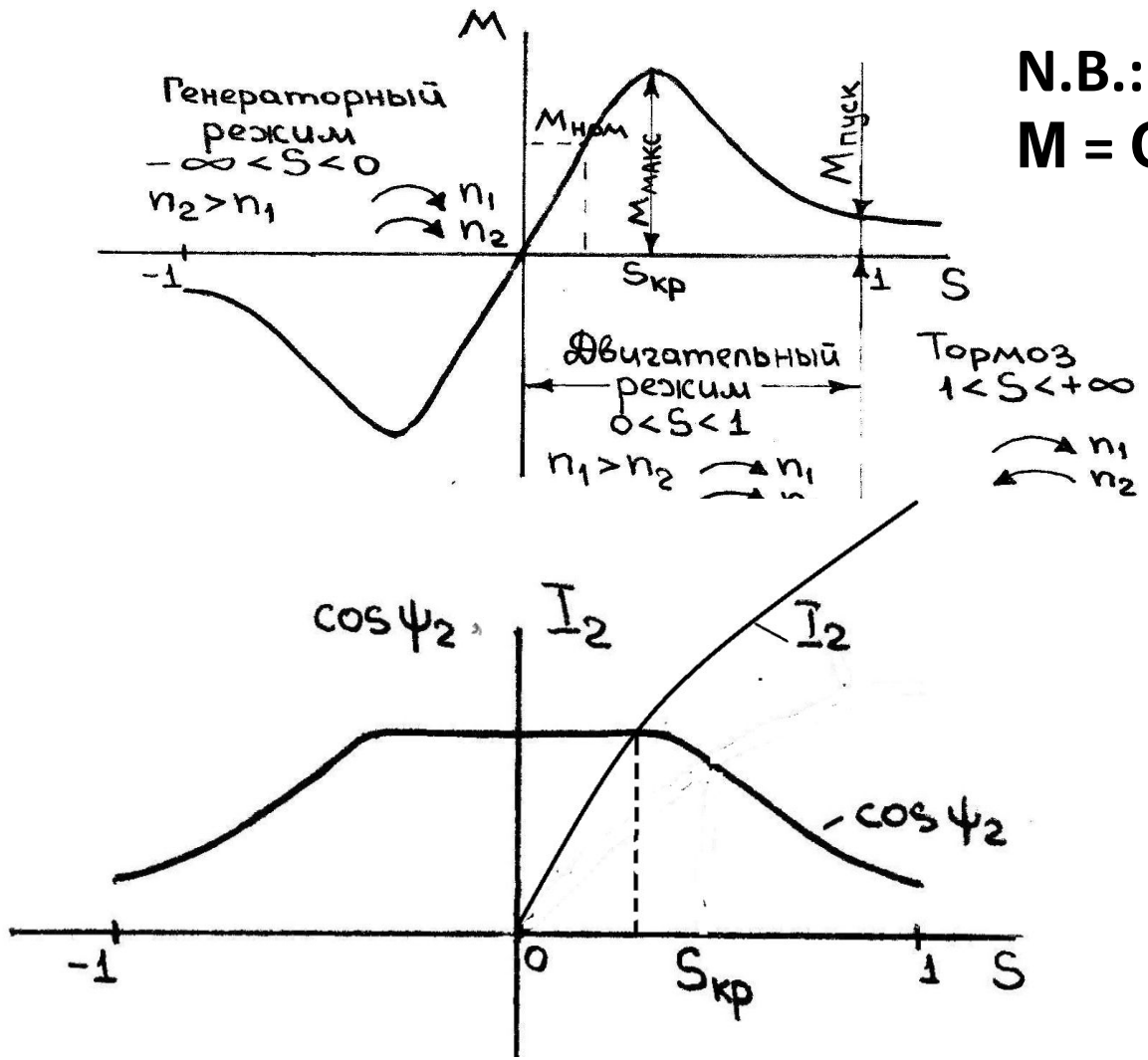
$$M = \left(\frac{7}{10}\right)^2 \times M_1 = 0{,}49M$$

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 А); $M_{макс}$ – максимальный (критический, перегрузочный, опрокидывающий) момент (соответствует критическому скольжению $S_{кр}$).



N.B.:

$$M = C_м \bullet Ф \bullet (I_2 \bullet \cos\Psi_2)$$

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

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:

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

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

N.B.:

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

Более компактное выражение для пускового момента

Пусковой момент

$$M_{\text{п}} = \frac{pm_1 U_1^2 r_2'}{\omega\left[\left(r_1 + c_1 r_2'\right)^2 + \left(x_1 + c_1 x_2'\right)^2\right]}.$$

Сопротивления короткого замыкания:

$$z_{\text{к}}^2 = (r_1 + c_1 r_2')^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2 = r_{\text{к}}^2 + x_{\text{к}}^2.$$

$$M_{\text{п}} = \frac{pm_1 U_1^2 r_2'}{\omega z_{\text{к}}^2} = \frac{pm_1}{\omega} I_{\text{п}}^2 r_2',$$

Коэффициенты кратностей пускового и максимального моментов:

$K_{\text{п}} = M_{\text{п}}/M_{\text{ном}} \geq 1$ $\qquad$ $K_{\text{мах}} = M_{\text{мах}}/M_{\text{ном}} \geq 1{,}8$

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.** $r_1 << (x_1 + x_2')$

Имеем окончательно:

$S_{кр} = \pm \frac{r_2'}{x_1 + x_2'}$; $S_{кр} = \pm \frac{r_2'}{x_k}$ $M_{макс} = \pm \frac{pm_1 U^2}{4\pi f_1 x_k}$

Вывод:

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

$M_{макс}$ не зависит от r_2' (сопротивления в цепи ротора).

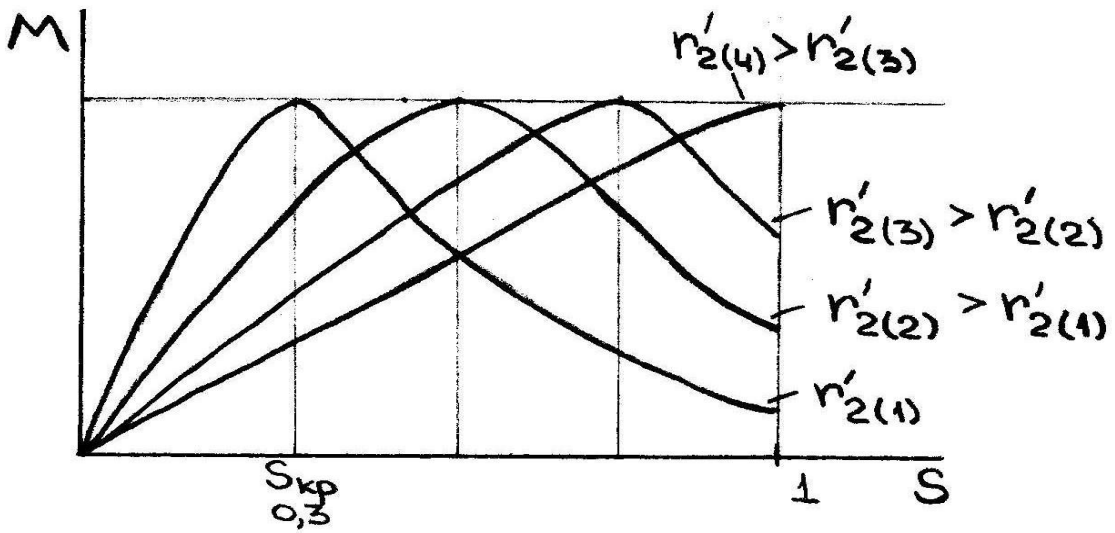


Рис.7. Вид механической характеристики при разных величинах r'_2: $M_{макс}$ не изменяется, а $S_{кр}$ смещается в сторону больших скольжений.

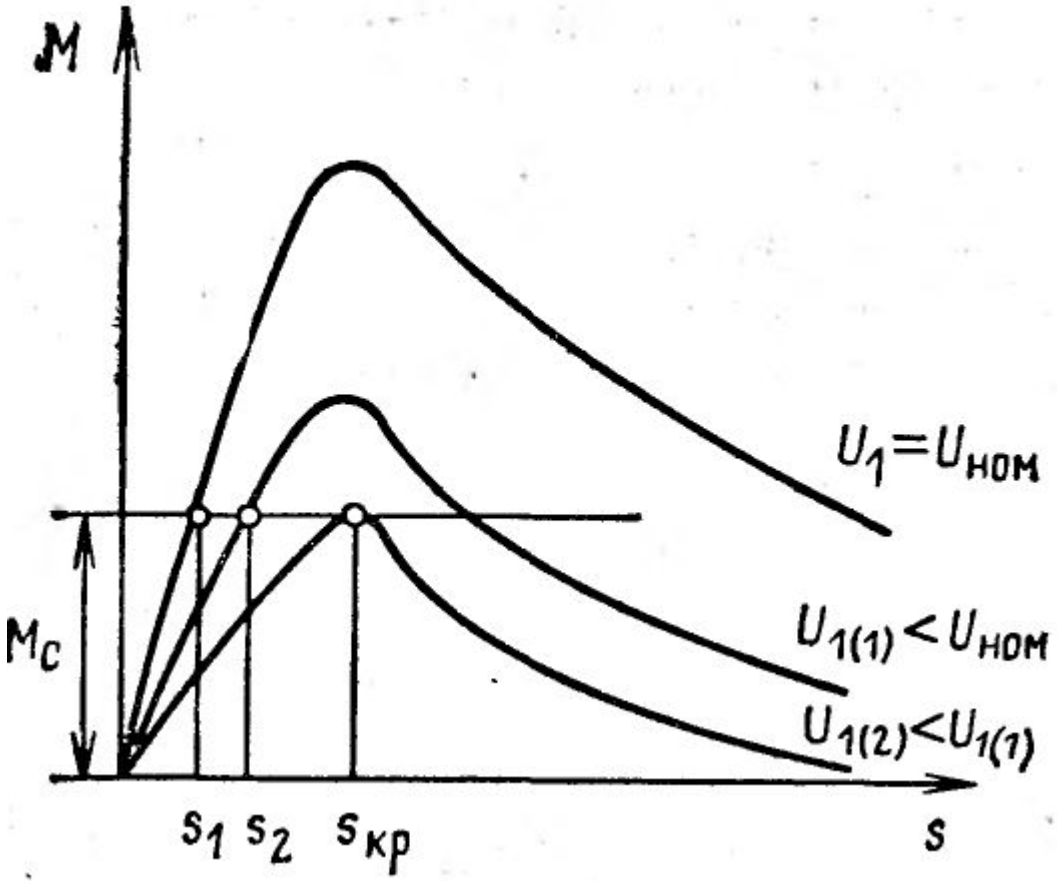


Рис. 8. Характеристики M =f(S) при различных значениях напряжения U.

<u>Вывод:</u> при уменьшении напряжения уменьшается перегрузочная способность АД

Построение механической характеристики M=f(s) по каталóжным данным. (Формула Клосса).

В каталоге обычно указывают $M_{ном}$, $S_{ном}$ и коэффициент перегрузки : *$K_м = M_{макс}/Mном$* (*по ГОСТу может составлять $k_м = 1{,}7 \div 3{,}5$.* 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

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

Критическое скольжение находят:

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

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

$$M / M_{ном} = f(S)$$

См. рис.9

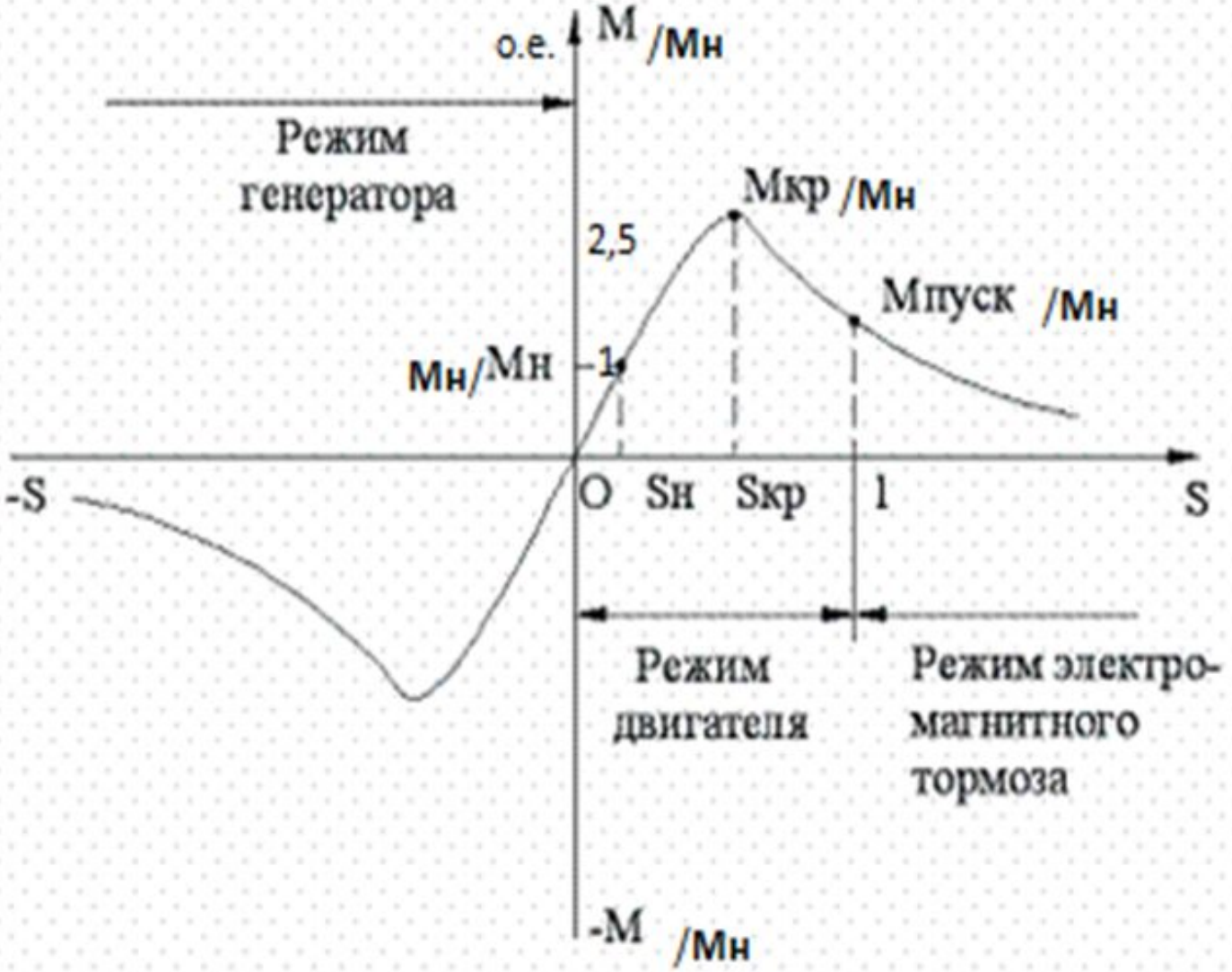

о.е.
M /Мн
Режим генератора
Мкр /Мн
2,5
Мпуск /Мн
Мн/Мн
1
-S
O
Sн
Sкр
1
S
Режим двигателя
Режим электро-магнитного тормоза
-M /Мн

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:

$$M = M_{ст} + J d\omega_2 / dt,$$

где M **— электромагнитный момент двигателя;**

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

$J d\omega_2 / dt$ **— 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.

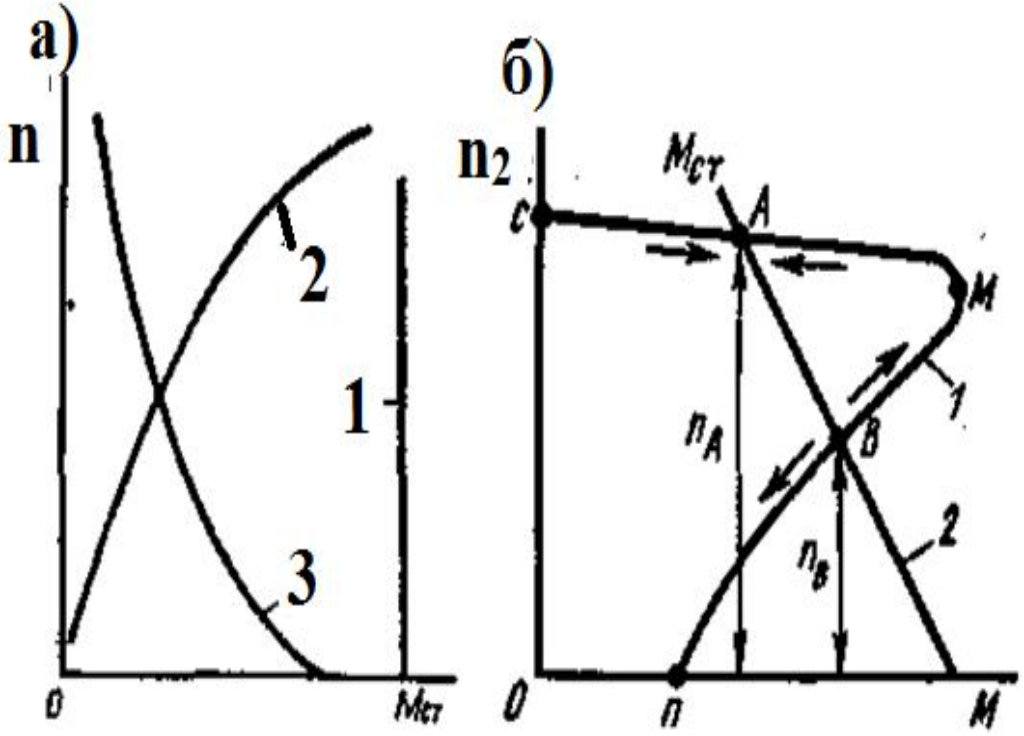


Рис.10. Механические характе-ристики некоторых производственных механизмов *(а)* и графи-ки для определения статической устойчивости асинхронного двигателя (б)

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 *1*)

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 *A*.

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

Здесь двигатель работает устойчиво.

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

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

.

Таким образом, *асинхронный двигатель при работе на участке С - М 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 *М – П* 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:**

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

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 *С - М* 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 *М - П* механической характеристики 1, устойчивая работа становится невозможной.