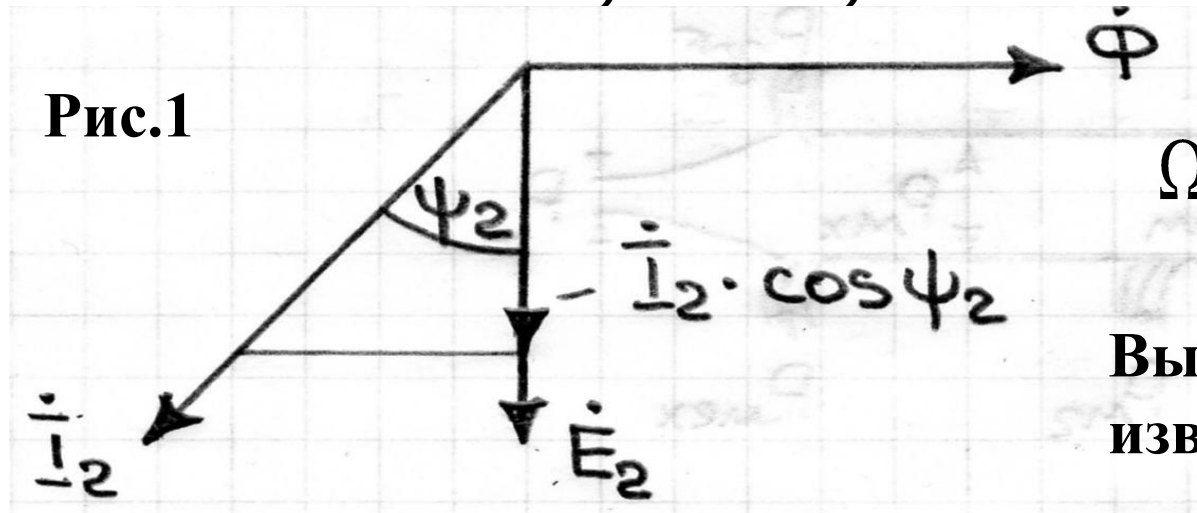


# Асинхронные машины

- **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:

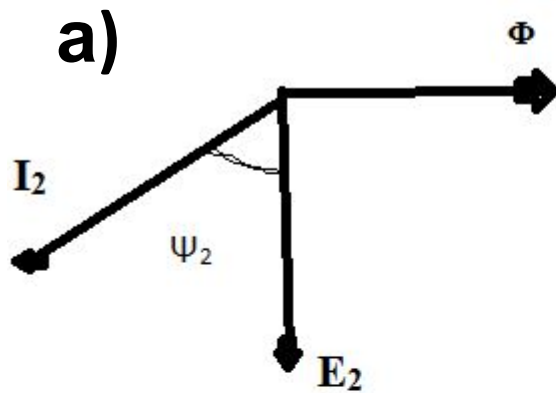
Момент АМ зависит от:

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

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

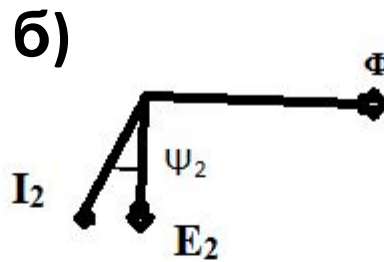
Н.В. Сравнить с моментом в машинах пост. тока:

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



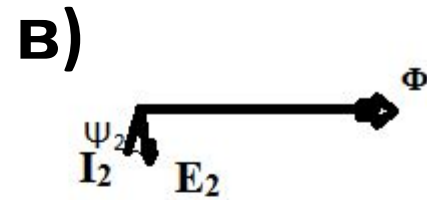
$S = 1$   
 $n_2 = 0$   
 угол  $\psi_2 \sim 90^\circ$   
 $\cos \psi_2 \div 0,15$

Режим пуска



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

Режим разгона

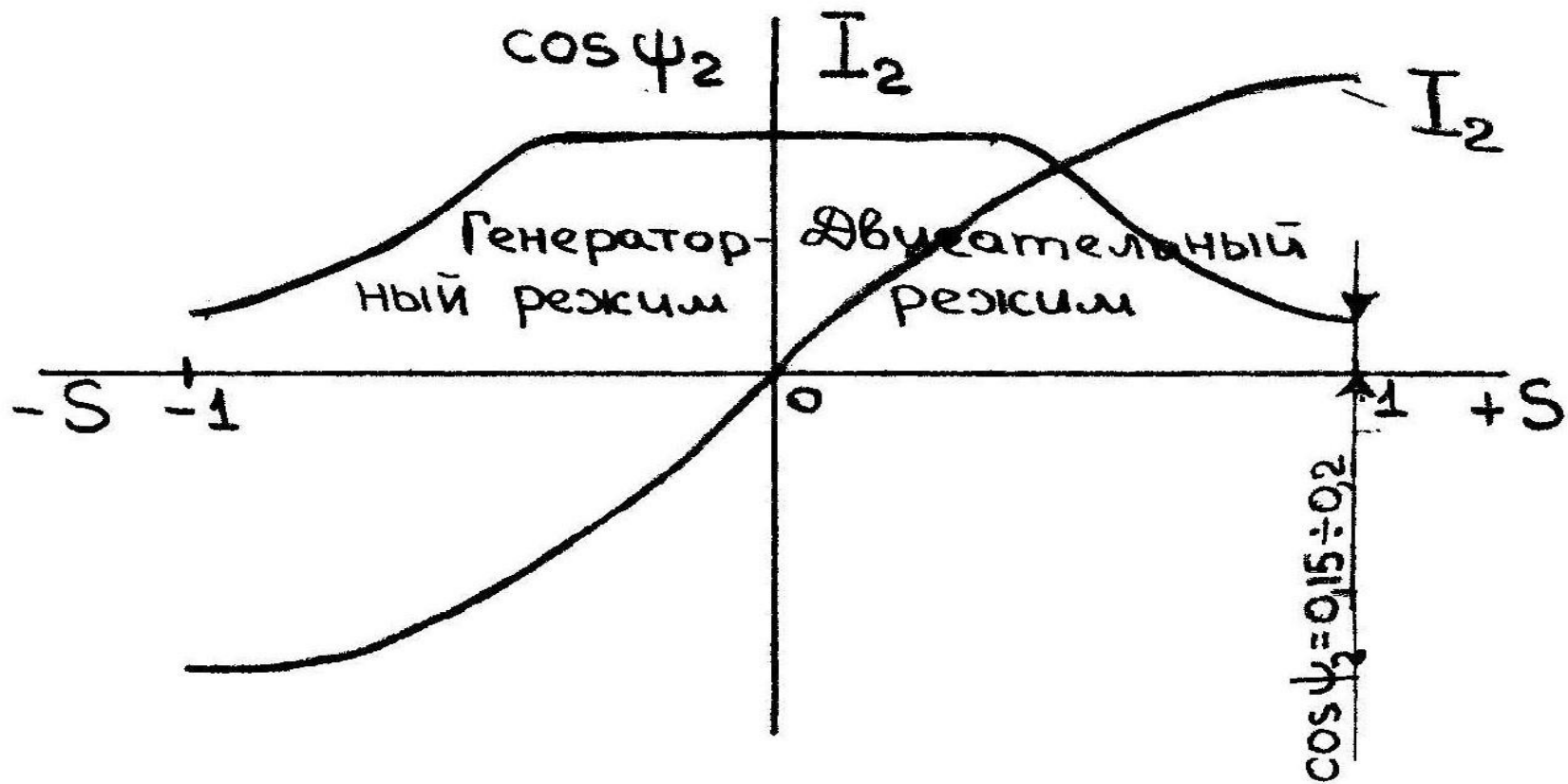


$S \approx 0$   
 $n_2 \approx n_1$   
 $\psi_2 = 0$   
 $\cos \psi_2 = 1$   
 Режим  
 холостого  
 хода

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

**Вывод:** угол  $\psi_2$  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  $I_2$



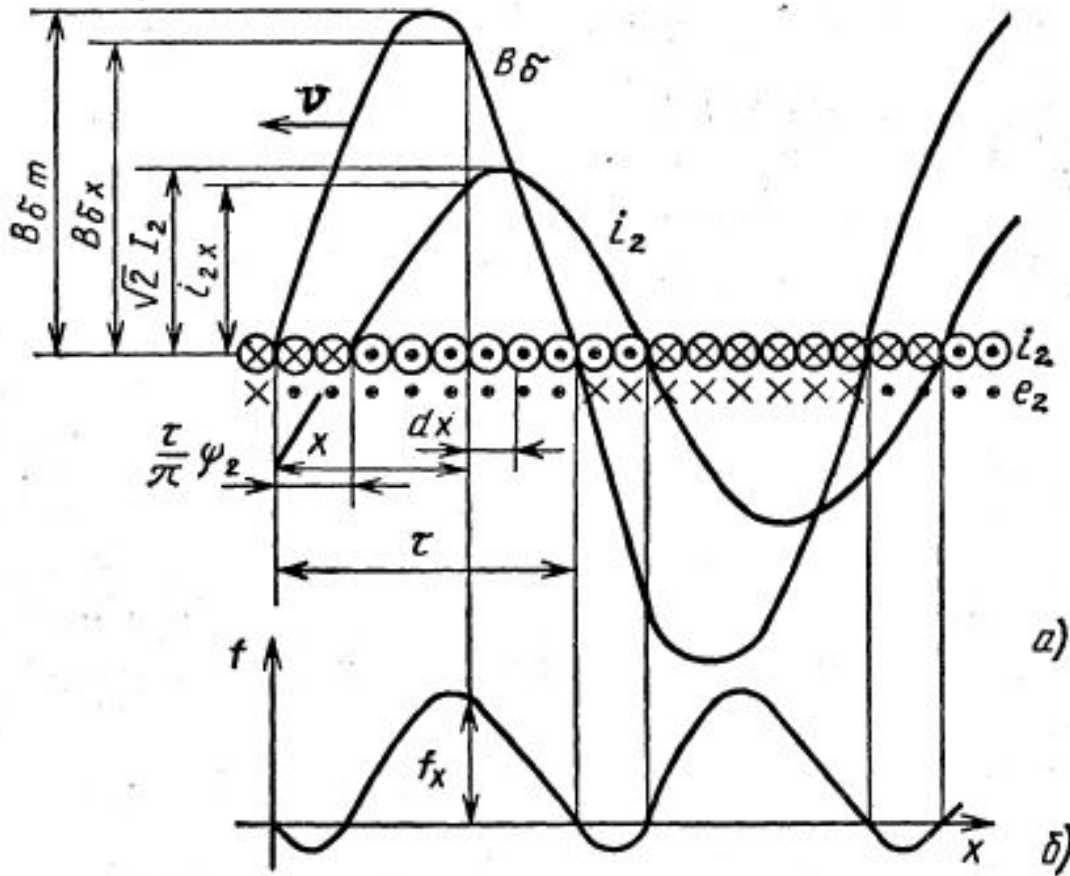


Рис.4. Образование вращающегося электромагнитного момента в результате взаимодействия тока ротора с магнитным полем.

$$F = B \cdot I \cdot L$$

На полюсном делении  $\tau$  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  $\psi_2$  ( $\operatorname{tg} \psi_2 = x_2 s / r_2$ ), 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  $U_{\text{кв}} = 10\text{кВ}$ .**

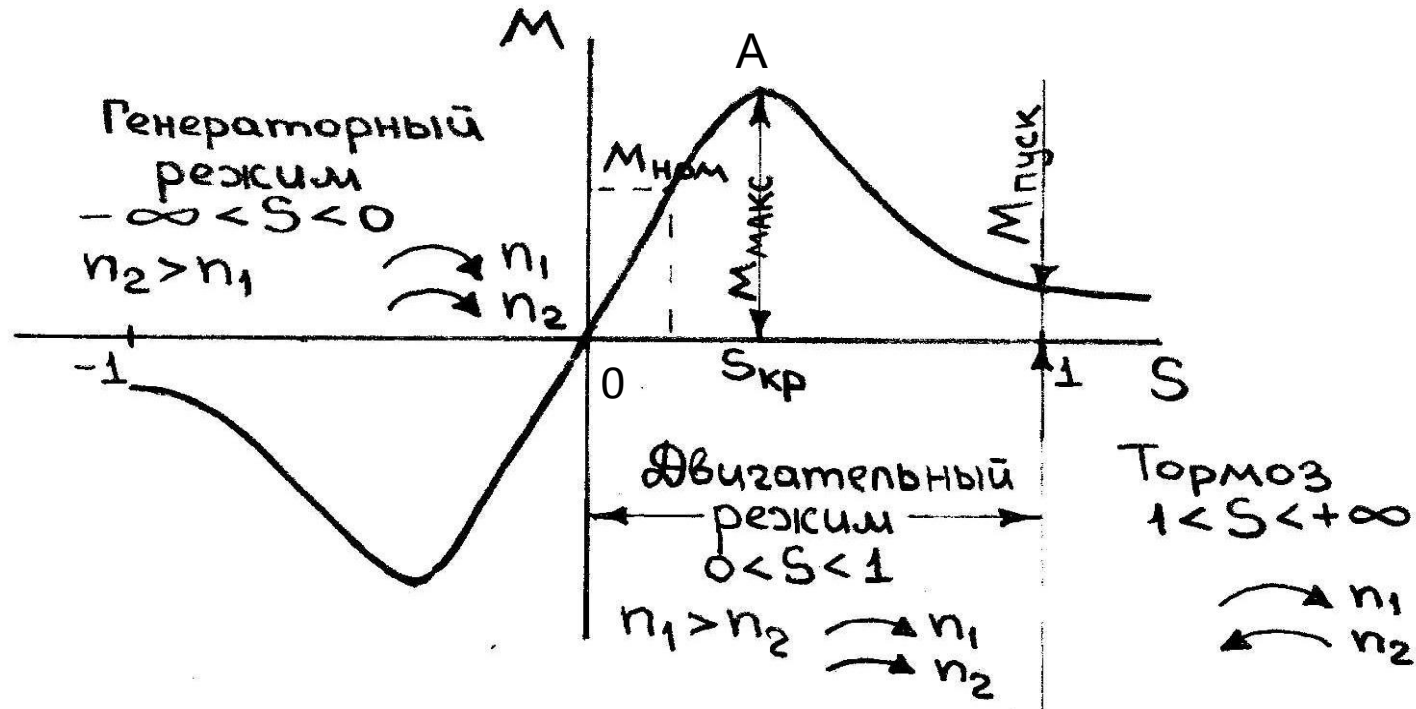
**Пусть  $U_{\text{кв}}$  уменьшилось до  $7\text{кВ}$  – момент уменьшится до величины, пропорциональной соотношению напряжений в квадрате::**

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

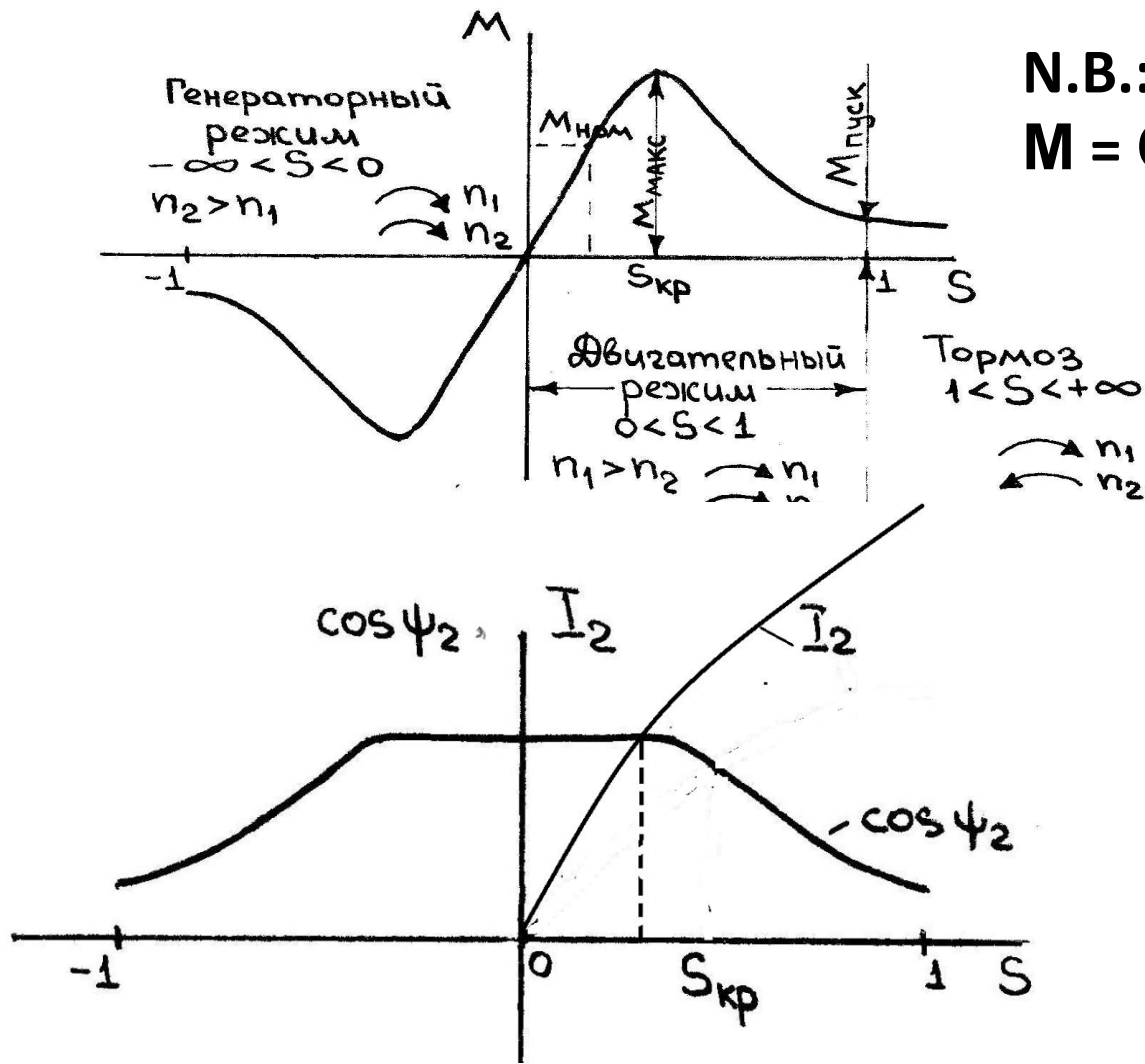
**Т.е. момент уменьшился наполовину и электровоз может остановиться.**

## 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  $S_{кр}$ )**

## 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  $r_2'$  (сопротивления в цепи ротора).

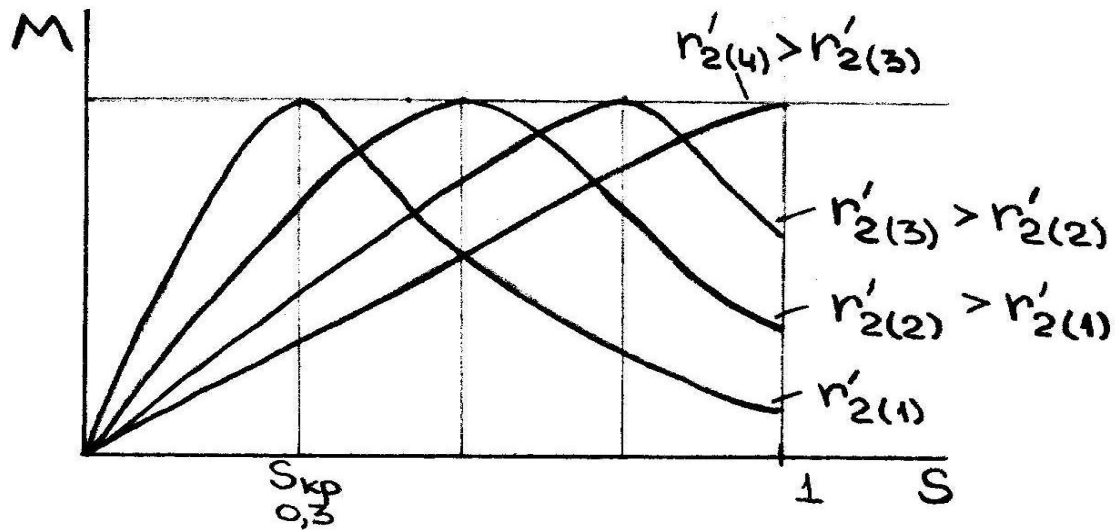


Рис.7. Вид механической характеристики при разных величинах  $r'_2$ :  $M_{\text{макс}}$  не изменяется, а  $S_{кр}$  смещается в сторону больших скольжений.

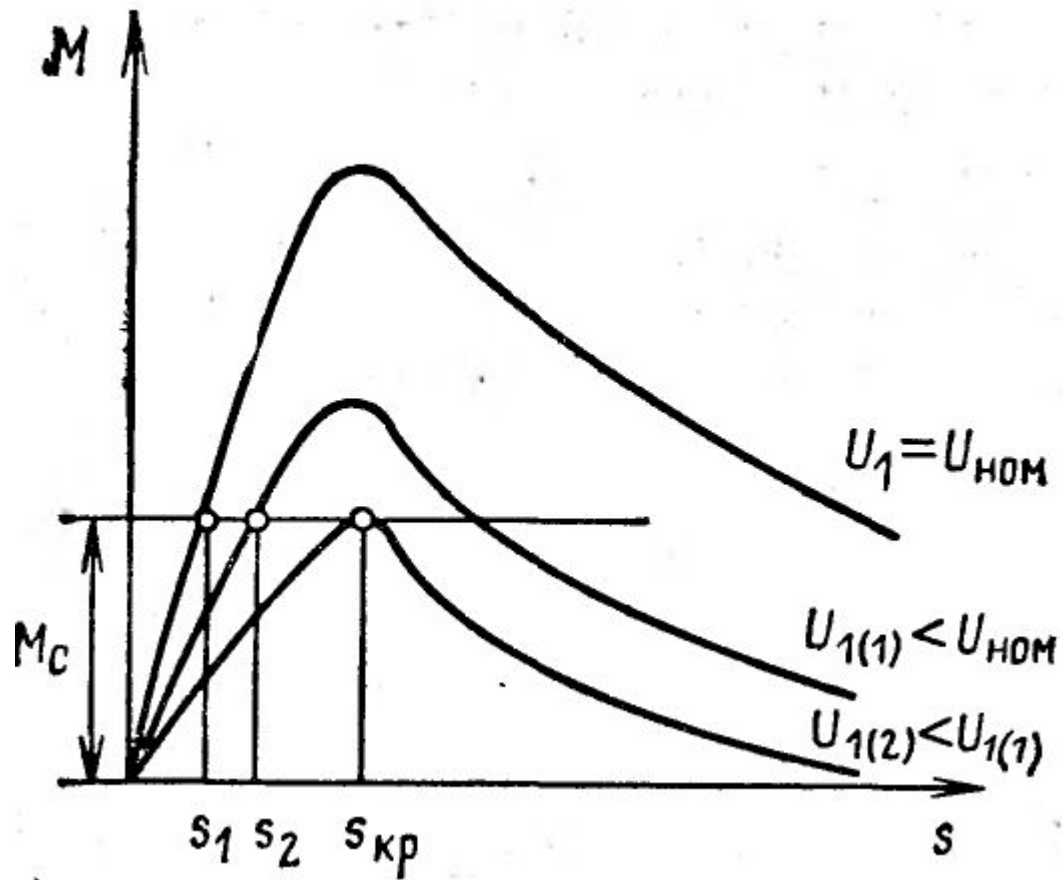


Рис. 8. Характеристики  $M = f(S)$  при различных значениях напряжения  $U$ .

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

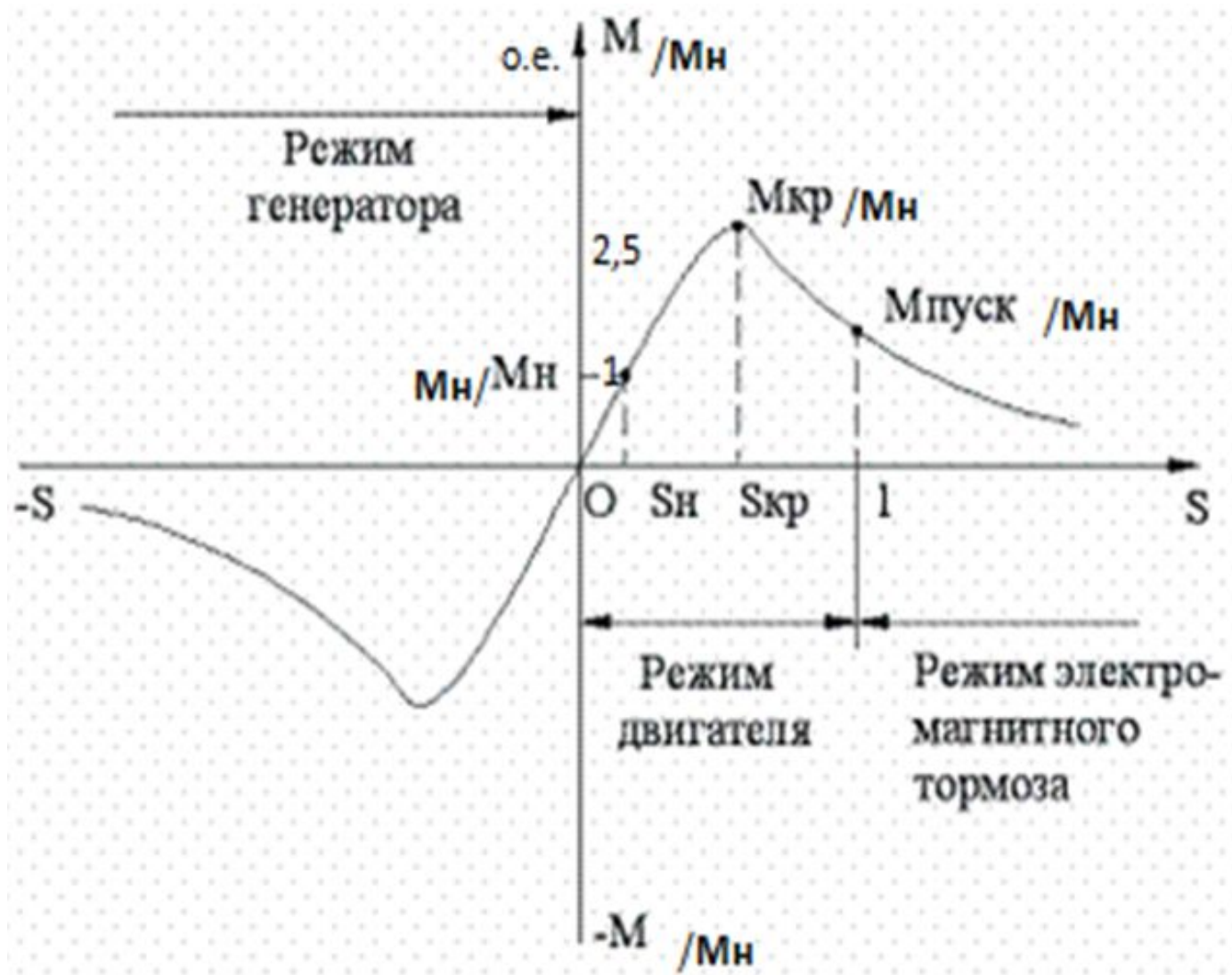
Критическое скольжение находят:

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

**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.

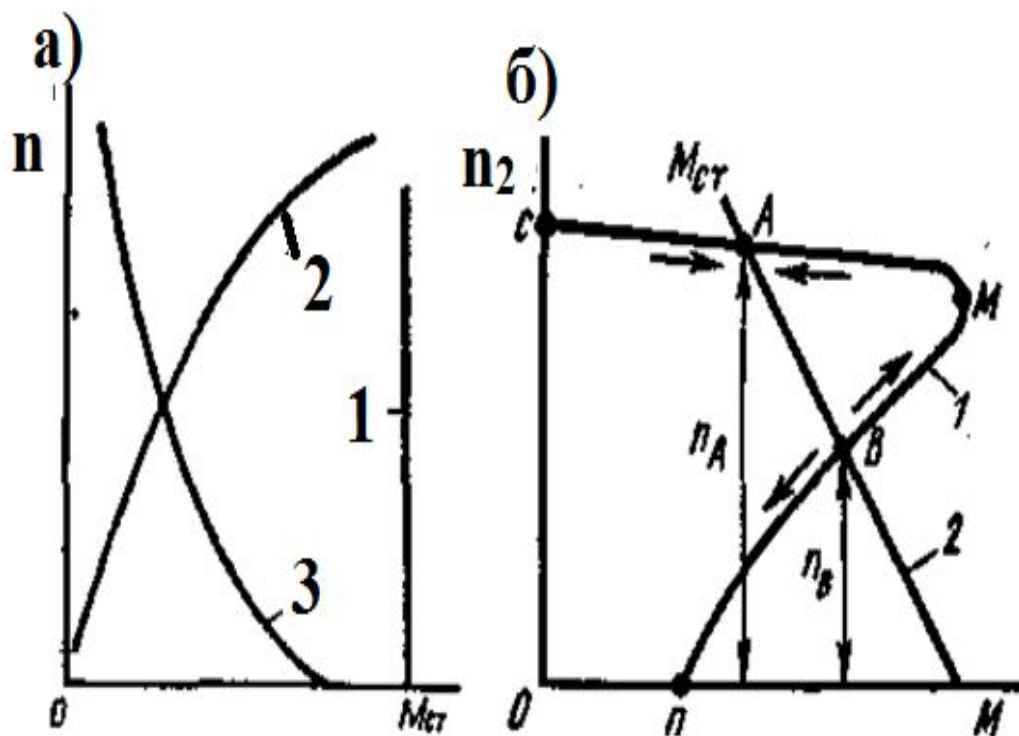


Рис.10. Механические характеристики некоторых производственных механизмов (а) и графики для определения статической устойчивости асинхронного двигателя (б)

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 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  $M - II$  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.