



**СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**Кафедра «ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ И  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ»**

**Дисциплина:**

**«Автоматизированный электрический привод»**

**Лекция № 6:**

**МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В  
ДВИГАТЕЛЬНОМ И ТОРМОЗНЫХ РЕЖИМАХ**

**Доцент кафедры к. т. н.**

**ГОРПИНЧЕНКО Александр Владимирович**

1. Влияние параметров сети и двигателя на механическую характеристику АД.
2. Механические характеристики АД в тормозных режимах.

## ЛИТЕРАТУРА

М.Г.Чиликин, А.С.Сандлер  
«Общий курс электропривода», стр. 82...89.

# 1. Влияние параметров сети и двигателя на механическую характеристику АД

Знание механических характеристик АД необходимо для оценки работы двигателя:

- 1) при ухудшении качества электроэнергии в питающей сети ( $U_1, f_1$ );
- 2) при формировании пускового режима АД;
- 3) при регулировании скорости вращения АД.

$$s_k = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_2')^2}} \quad (1)$$

$$M_k = \frac{3U_1^2}{2\Omega_0 [(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_2')^2})^2]} \quad (2)$$

а) изменение напряжения сети

$U_1 = \text{var}$ ,  $f_1 = \text{const}$ , тогда  $\Omega_0 = \text{const}$ , т.к.  $\Omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}$

Если допустить, что  $R_1$  мало, то из (1)  $s_K \approx \frac{R'_2}{X_K} \approx \text{const}$  где

$X_K = X_1 + X'_2$ ,  
 $M_K \equiv U_1^2$  из (2).

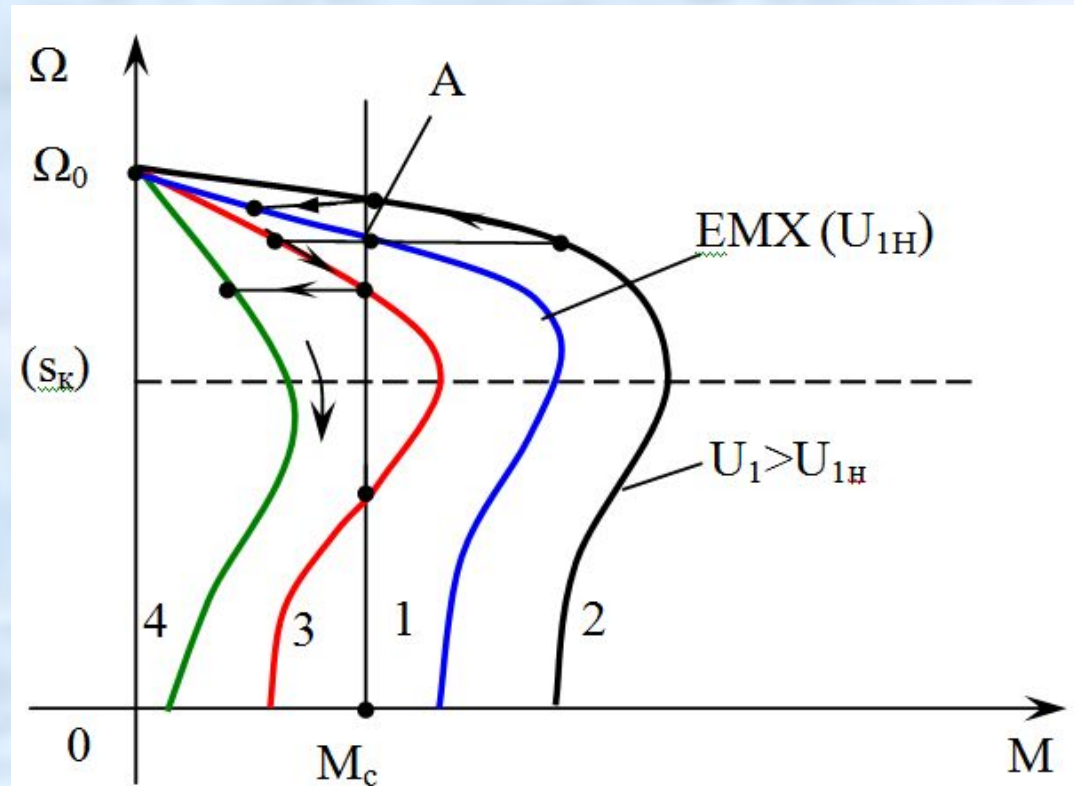


Рисунок 1. Механические характеристики АД при изменении напряжения.

б) изменение частоты сети

$f_1 = \text{var}$  ,  $U_1 = \text{const}$ , тогда  $\Omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p} = \text{var} \equiv f_1$  , а  $M_{\text{к}} \equiv \frac{1}{f_1}$  из (2).

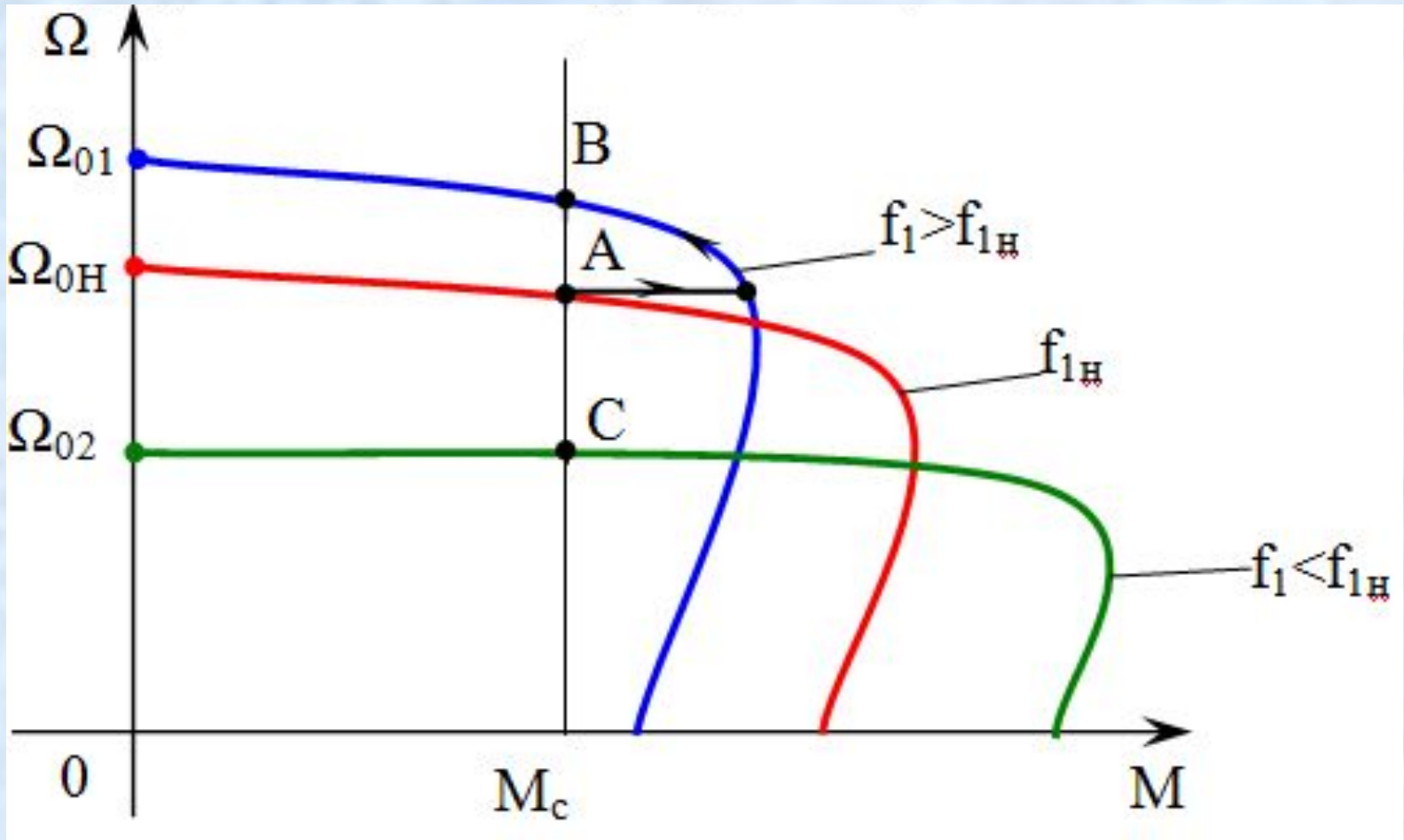


Рисунок 2 - Механические характеристики АД при изменении частоты.

в) изменение сопротивления в цепи ротора

Такой вариант возможен только для двигателя с фазным ротором.

$$R'_{2\Pi} = R'_2 + R'_\Pi = \text{var.}$$

Из (1)  $s_K = \frac{R'_{2\Pi}}{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}} \equiv R'_{2\Pi}$ , а  $M_K$  из (2) не зависит от  $R'_2$ , следо-

вательно  $M_K = \text{const.}$

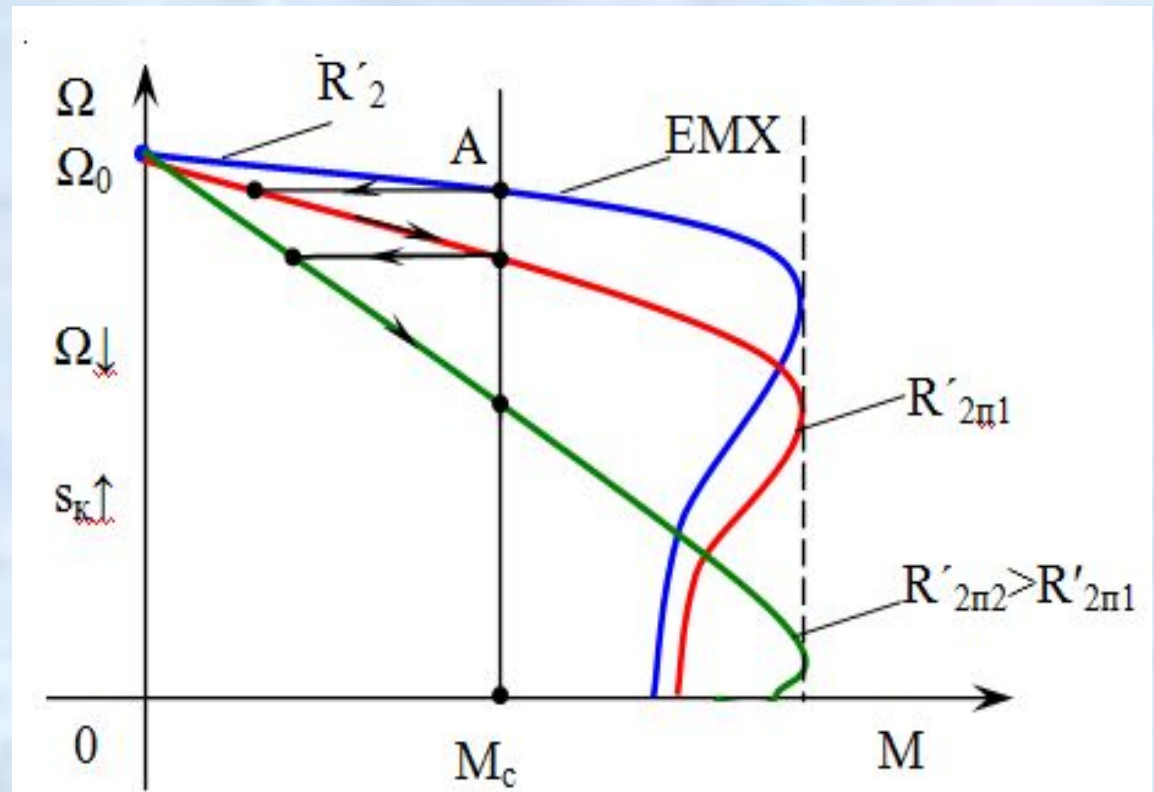


Рисунок 3 Механические характеристики АД при изменении  $R'_2$

г) изменение сопротивления в цепи статора

$R_{1\pi} = R_1 + R_{\pi} = \text{var.}$  При этом из (1)  $s_k \equiv \frac{1}{R_1}$  и  $M_k \equiv \frac{1}{R_1}$  из (2).

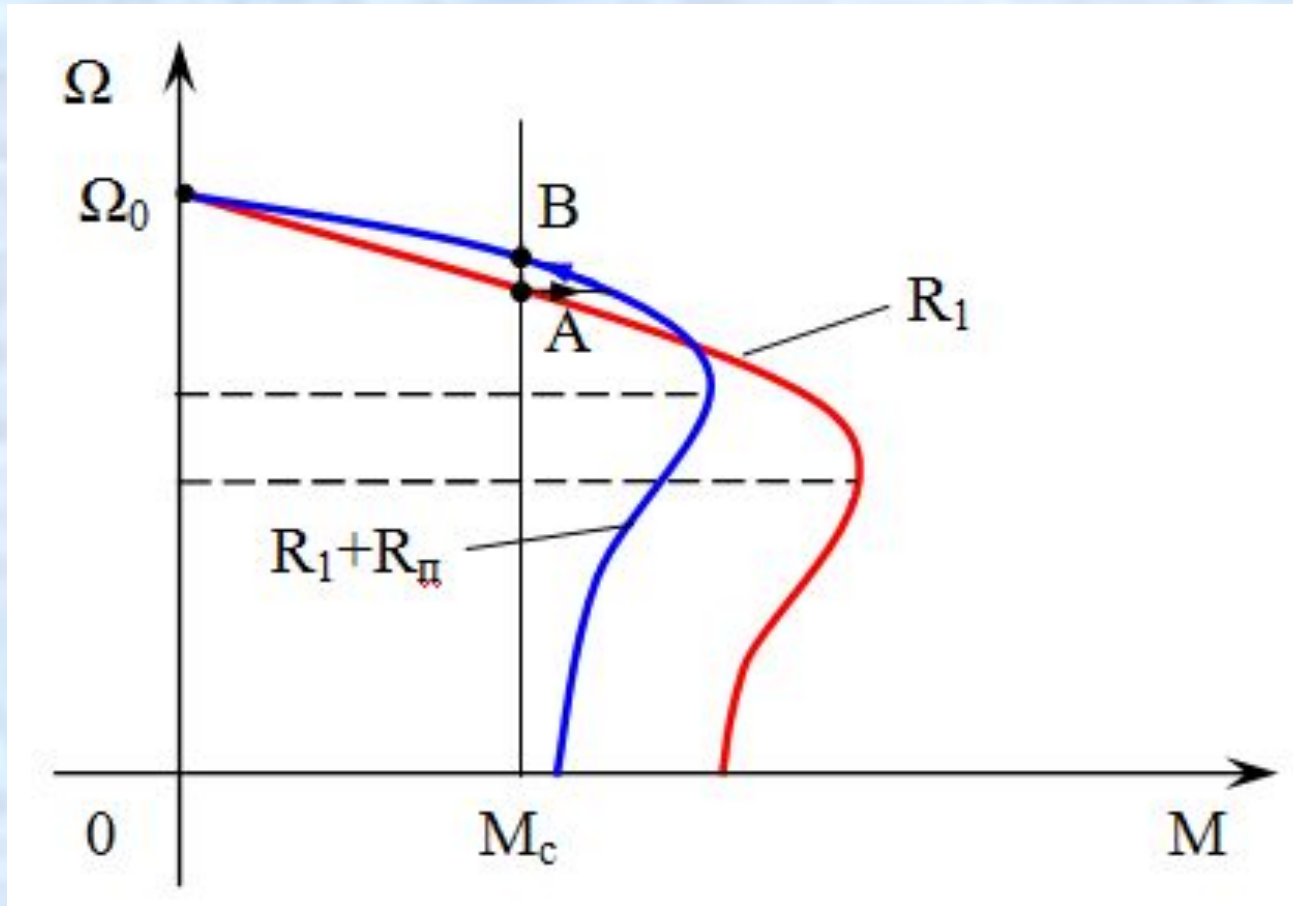


Рисунок 4 – Механические характеристики АД при изменении активного сопротивления статора.

д) изменение числа пар полюсов  $p$

$$p = \text{var} , \quad \Omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p} \text{из} \left( \frac{1}{p} \right) \quad M_k \equiv p .$$

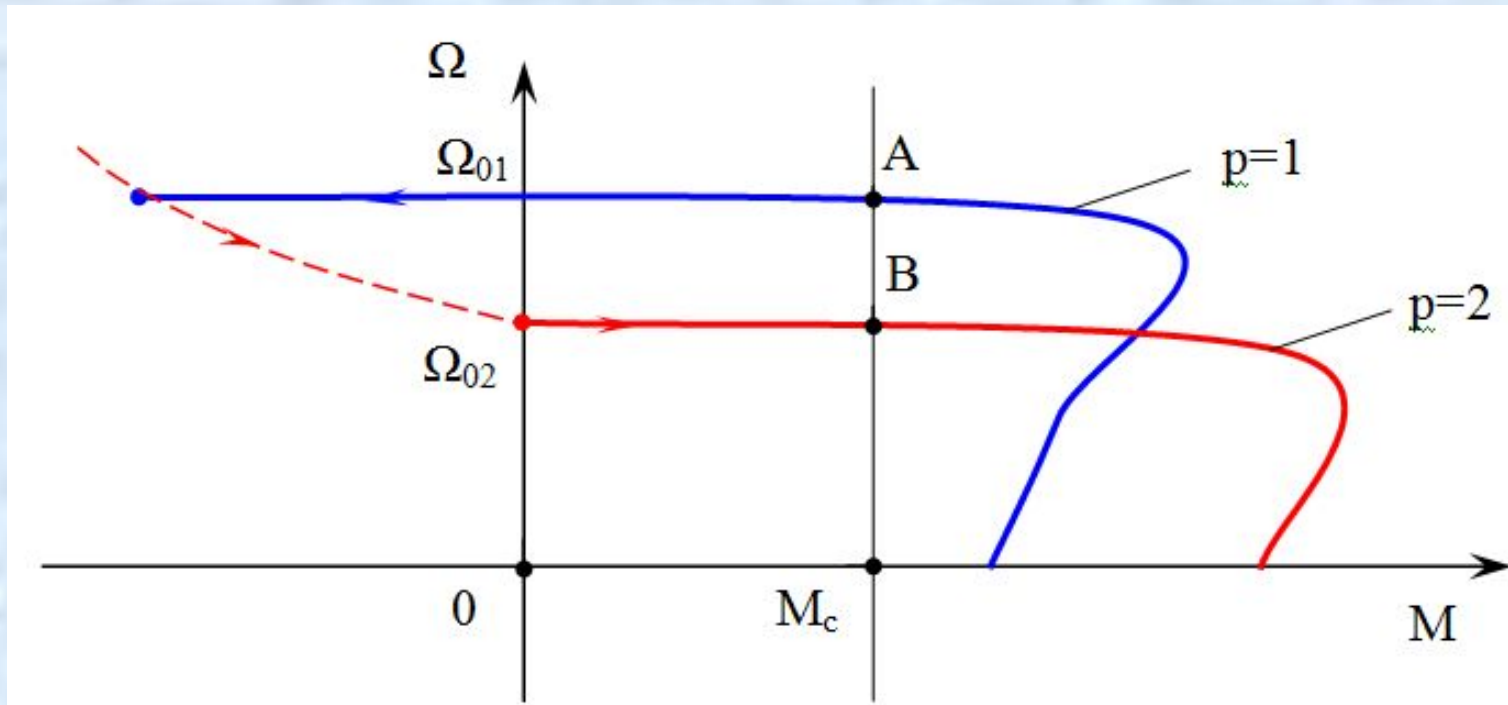


Рисунок 5 – Механические характеристики АД при изменении числа пар полюсов



Для торможения АД могут применяться те же способы, что и для ЭД постоянного тока:

- 1) генераторное торможение с отдачей энергии в сеть;
- 2) торможение противовключением;
- 3) динамическое торможение.

*а) генераторное торможение с отдачей энергии в сеть*

Генераторное торможение возможно при скорости вращения ротора выше синхронной, т.е. при  $\Omega > \Omega_0$ .

Проводники обмотки статора пересекаются вращающимся магнитным полем в прежнем направлении, а проводники ротора – в обратном, в связи с чем направление ЭДС меняет знак

$$\left( s = \frac{\Omega_0 - \Omega}{\Omega_0} < 0 \right).$$

Используем выражение для тока ротора, записанного в комплексной форме из T-образной схемы замещения АД

$$I_2' = \frac{E_2'}{\frac{R_2'}{s} + jX_2'} \quad (3)$$

$$I_2' = \frac{E_2' s}{R_2' + jX_2' s} = \frac{E_2' R_2' s}{R_2'^2 + (X_2' s)^2} - j \frac{E_2' X_2' s^2}{R_2'^2 + (X_2' s)^2} \quad (4)$$

Изменение направления активной составляющей тока соответствует углу сдвига между  $\underline{U}_1$  и  $\underline{I}_1$  на угол  $\varphi_1 > \pi / 2$ , при таком угле  $\varphi_1$  причиной тока является уже не напряжение сети, а ЭДС  $E_1$ , т.е. двигатель работает генератором, создавая тормозной момент (рисунок 6).

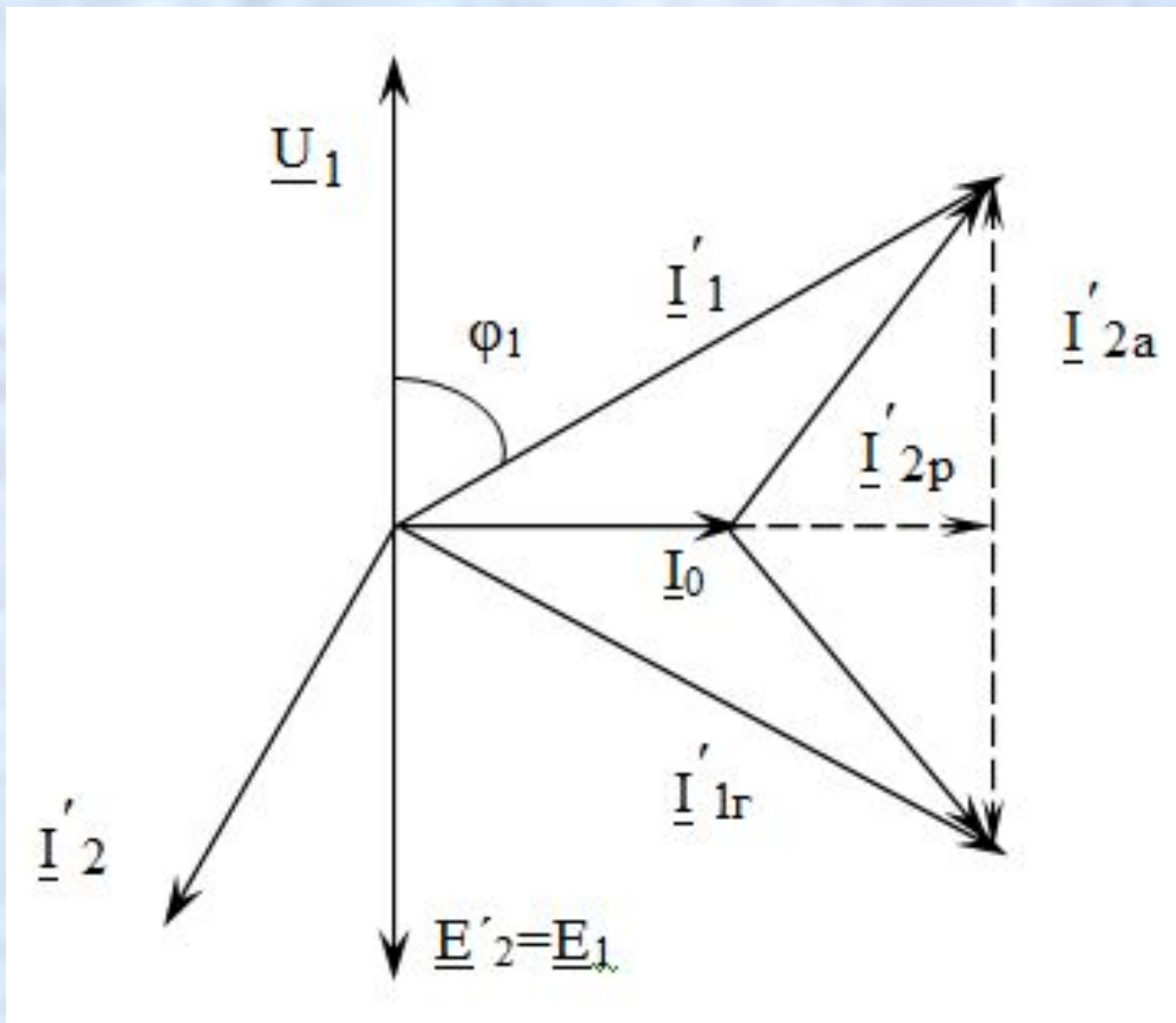


Рисунок 6 – Векторная диаграмма АД при рекуперативном торможении

В режиме генераторного торможения электромагнитная мощность меняет свой знак.

$$P_{\text{эм}} = M_{\text{эм}} \Omega_0 = \frac{3I_2'^2 \cdot R_2'}{\Omega_0 s} \cdot \Omega_0 \quad (5)$$

Отсюда 
$$P_{\text{эм}} = 3I_2'^2 \frac{R_2'}{s} \quad (6)$$

Следовательно, при  $s < 0$   $P_{\text{эм}} < 0$

Из Г-образной схемы замещения АД  $Q_{\Gamma} = 3UI_2' \sin(\varphi_2)$

Отсюда 
$$Q_{\Gamma} = \frac{3U_1^2}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + X_K^2}} \cdot \frac{X_K}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + X_K^2}} = \frac{3U_1^2 \cdot X_K \cdot s^2}{(R_1 s + R_2')^2 + (X_K s)^2} \quad (8)$$

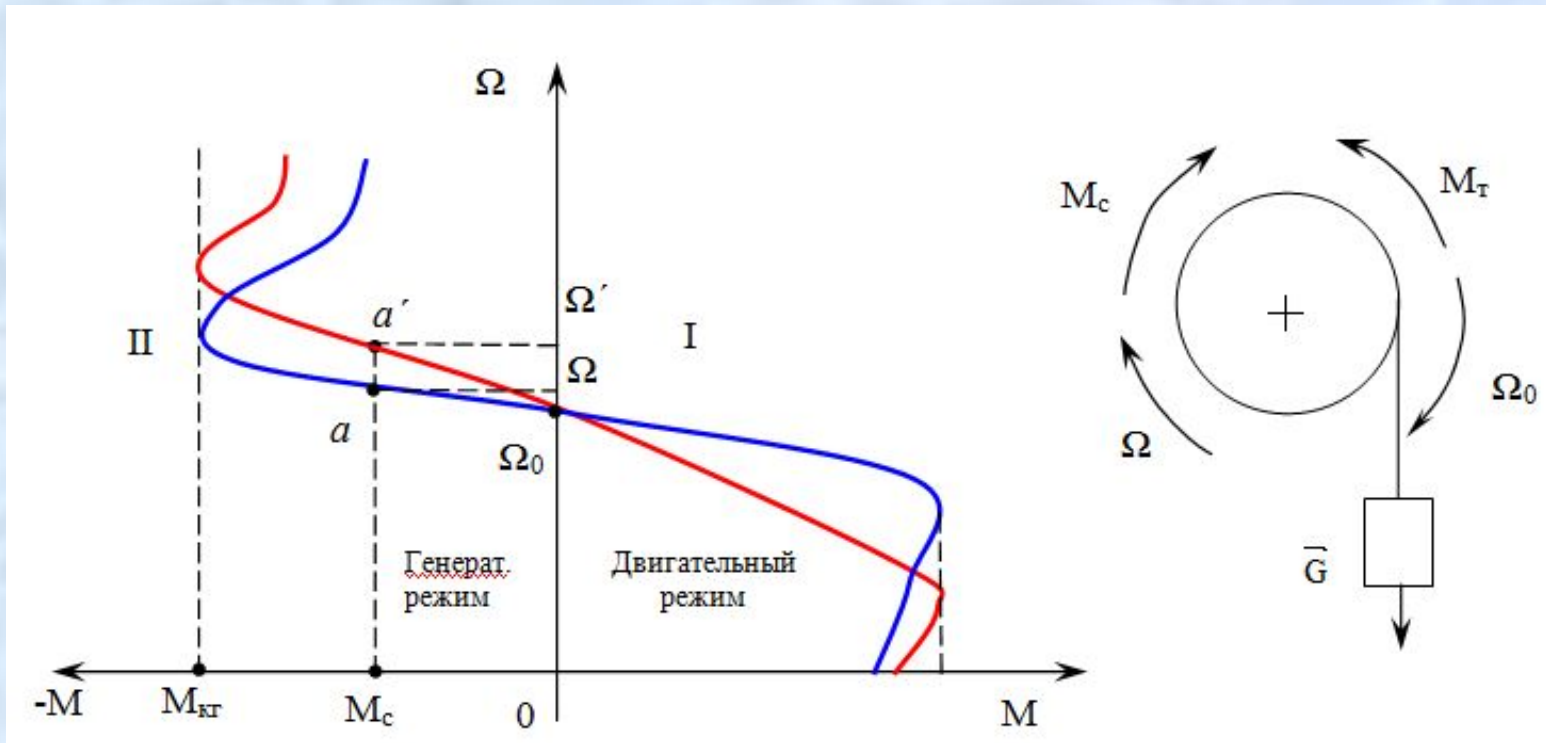


Рисунок 7 – Механические характеристики АД при рекуперативном торможении

Генераторному торможению соответствуют участки механических характеристик, расположенные в верхней части квадранта II. Точка установившегося режима спуска соответствует точке  $(a)$  с координатами  $(\Omega, M_c)$ .

Торможение с отдачей энергии в сеть будет иметь место также при уменьшении скорости асинхронного двигателя переключением числа пар полюсов с  $p$  на  $2p$ .

При этом  $\Omega_{01} = \frac{2\pi f_1}{p} > \Omega_{02} = \frac{2\pi f_1}{2p}$  (рисунок 8).

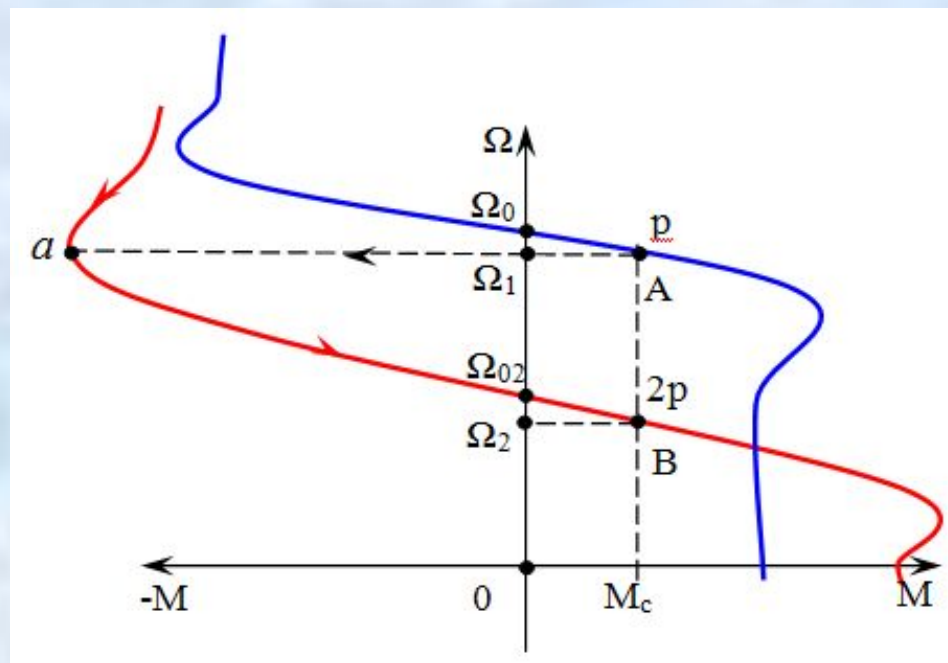
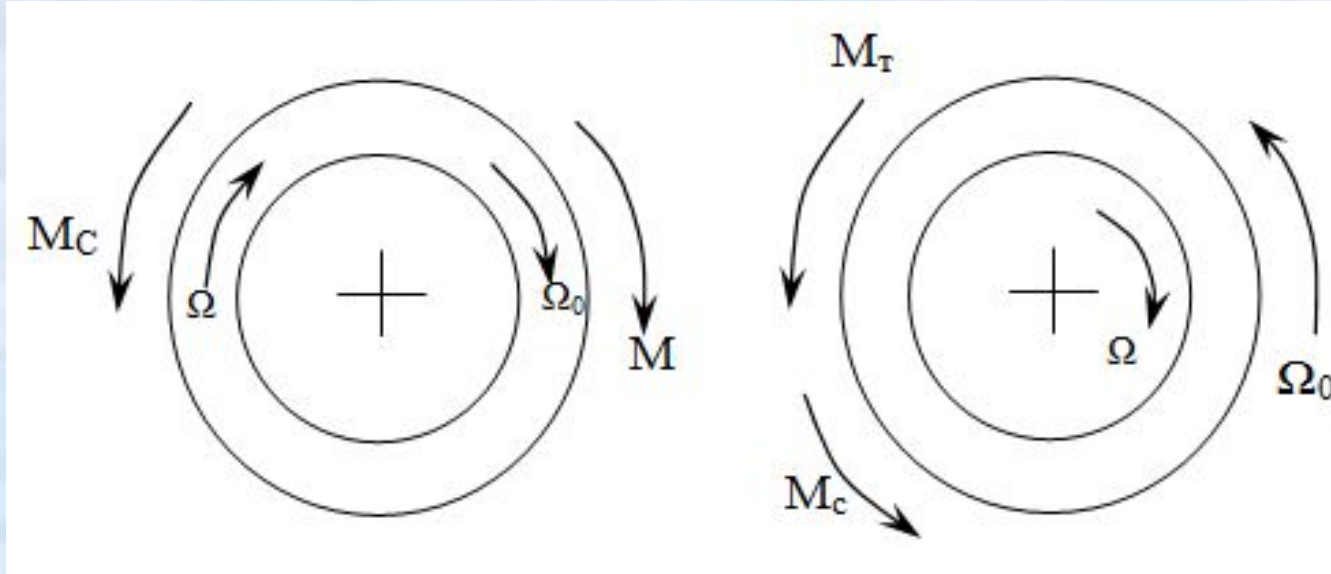


Рисунок 8 – Механические характеристики АД при переключении полюсов

б) *торможение противовключением*

Режим противовключения, это такой режим, при котором исполнительный механизм вращает двигатель в сторону, обратную действию момента, развиваемого двигателем. У АД ротор при этом будет вращаться в направлении, обратном направлению вращающегося поля.



$$s = \frac{\Omega_0 - \Omega}{\Omega_0}$$

Торможение противовключением можно получить, изменением очередности чередования фаз статора у вращающегося двигателя. При этом изменяется направление момента двигателя, т.к. меняется направление вращения поля (рис. 10). При этом скольжение  $s > 1$ , а ток достигает значений  $I_1 \geq (6 \div 8) I_{1H}$ .

Для ограничения величины тока и увеличения тормозного момента в АД с фазным ротором при противовключении в цепь ротора включают добавочные активные сопротивления (рис.9).



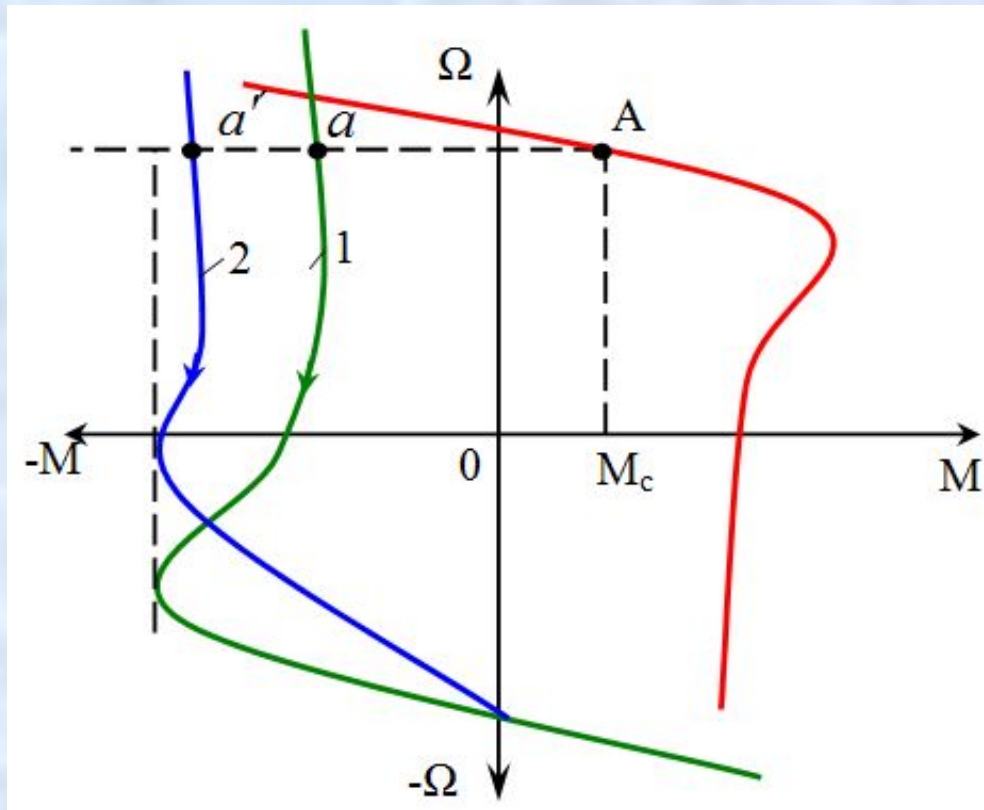


Рисунок 9 – Механические характеристики АД при его реверсе.

Кривая (1) – короткозамкнутый АД,

(2) – АД с фазным ротором с включенным  $R_d$ .

Короткозамкнутые АД с двойной клеткой и глубокопазные, у которых при больших скольжениях существенно повышается, имеют более благоприятные условия торможения.

Если в цепь фазного ротора двигателя при подъеме груза включить большое сопротивление, то при  $M_c > M$  получим также режим противовключения.

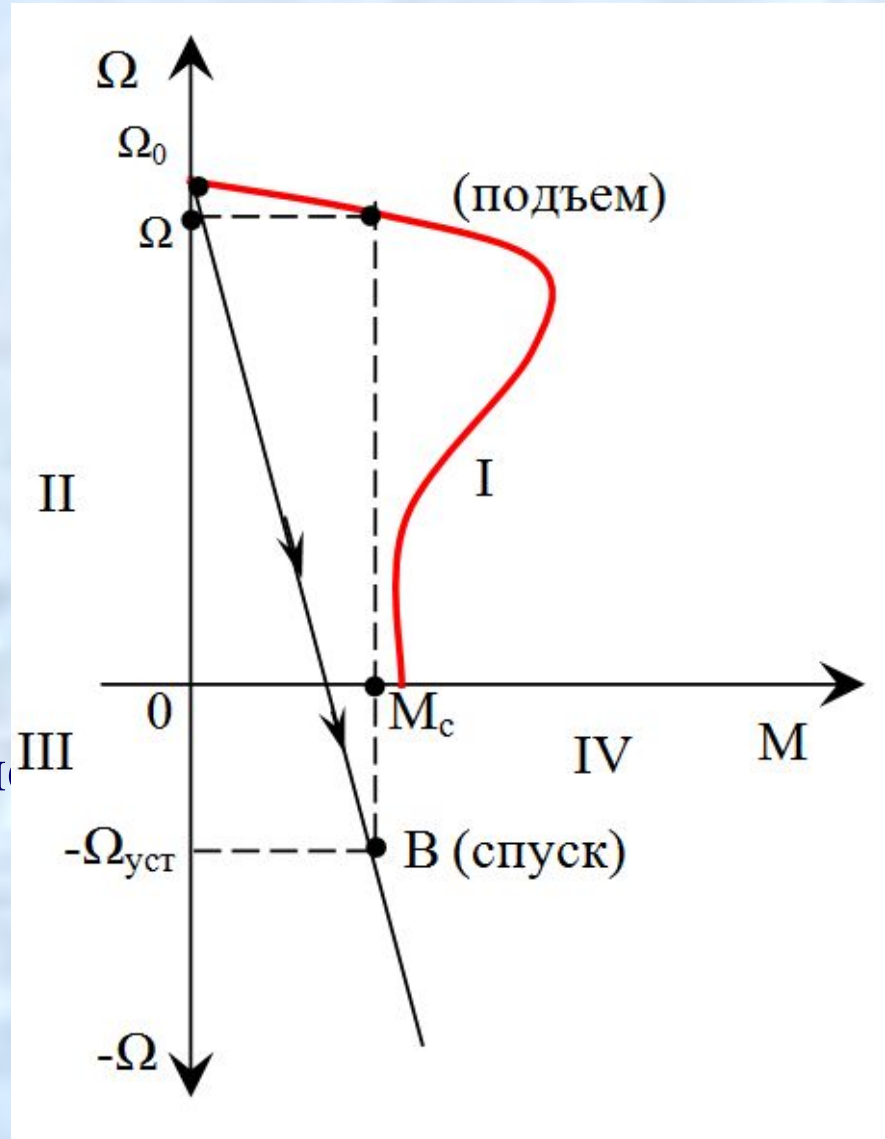


Рисунок 10 – Механические характеристики АД с фазным ротором при торможении противовключением.

### в) динамическое торможение

При динамическом торможении АД работает генератором, нагрузкой которого является сопротивление цепи обмотки ротора.

При этом может быть применено независимое возбуждение или самовозбуждение.

Поскольку, при тормозном режиме работы отсутствует вращающееся магнитное поле  $\Omega_0 = 0$  и  $-\Omega / \Omega_0 = v$ , где:  $v$  – относительная скорость вращения ротора.

Величина момента определяется по аналогичной для АД формуле

$$M_{\text{эм}} = \frac{3I_2^2 \cdot R_2 / \gamma}{\Omega_0} \quad (9)$$

Анализ работы АД в режиме динамического торможения целесообразно провести считая, что обмотка статора питается не постоянным, а эквивалентным трёхфазным током  $I_{\text{экв}}$ . Такая замена предполагает равенство намагничивающих сил.  $F_{\text{экв}} = F_{\text{пост}}$

При соединении обмотки статора звездой и включении на постоянное напряжение 2-х фаз результирующий намагничивающий ток определим при помощи векторной диаграммы намагничивающих сил 2-х фаз (рисунок 11).

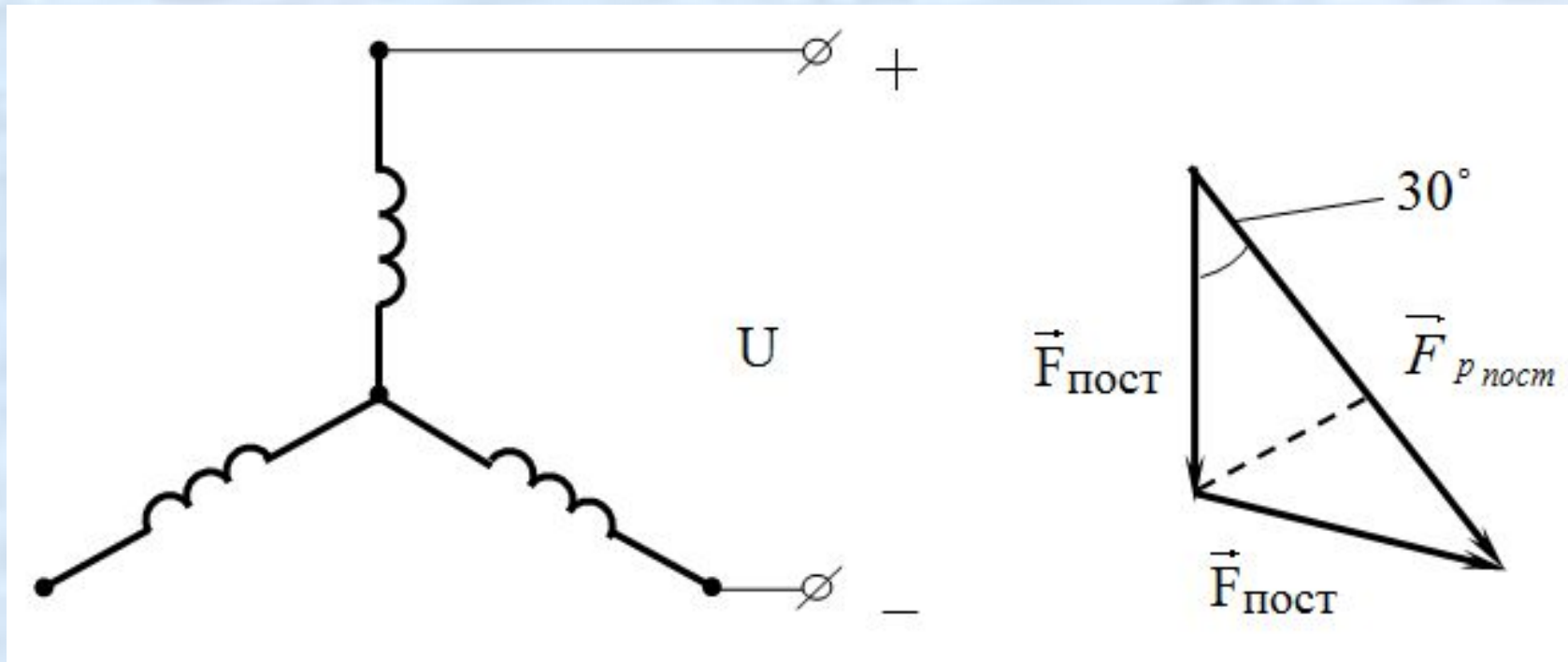


Рисунок 11– Векторная диаграмма намагничивающих сил 2-х фаз АД при динамическом торможении.

$$F_{p \text{ пост}} = \sqrt{3} \cdot I_{\Pi} w_1 \quad F_{p \text{ пост}} = F_{\text{ЭКВ}} \quad F_{\text{ЭКВ}} = \frac{3}{2} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{ЭКВ}} \cdot w_1$$

отсюда 
$$I_{\text{ЭКВ}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot I_{\Pi} \approx 0,817 \cdot I_{\Pi}$$

Значение тока  $I'_2$ , которое необходимо подставить в (9), удобнее выразить через величину эквивалентного тока  $I_{\text{ЭКВ}}$ , воспользовавшись упрощённой векторной диаграммой (рис. 12), где  $I_{\text{ЭКВ}}$  – эквивалентный ток обмотки статора,  $I'_2$  – приведённый ток ротора,  $E_1$  и  $E'_2$  – Э.Д.С. статора и приведённая Э.Д.С. ротора,  $I_{\mu}$  – намагничивающий ток двигателя.



При остановке ЭД  $I_{\mu} = I_{\text{ЭКВ}}$  ( $I'_2 = 0$ ), так как с  $\Omega \downarrow \rightarrow E'_2 \downarrow \rightarrow I'_2 \downarrow \rightarrow 0$ .

Для упрощения расчётов полагаем  $x_{\mu}$  и  $R'_2$  постоянными.

Из T-образной схемы замещения

$$I'_2 = \frac{E'_2}{\sqrt{(R'_2 / \nu)^2 + x'^2_2}}, \quad I_{\mu} = \frac{E'_2}{x_{\mu}} \quad (11)$$

Если исключить из последних 2-х уравнений (11)  $E'_2$ : определить его из первого и подставить во второе, определить и подставить значение  $I_{\mu}$  в выражении (10) для  $I^2_{\text{ЭКВ}}$  и разрешить последнее относительно  $I'_2$ , то получим:

$$I'_2 = \frac{I_{\text{ЭКВ}} \cdot x_{\mu}}{\sqrt{(R'_2 / \nu)^2 + (x'_2 + x_{\mu})^2}}. \quad (12)$$

Для величины тормозного момента (9)

$$M_{\text{эм}} = \frac{3I_{\text{экв}}^2 \cdot x_{\mu}^2 \cdot R'_2 / v}{\Omega_0 [(R'_2 / v)^2 + (x'_2 + x_{\mu})^2]} \quad (13)$$

Отсюда видно, что тормозной момент, если считать  $x_{\mu} = \text{const}$  и  $R'_2 = \text{const}$  определяется величиной тока  $I_{\text{экв}}$  и относительной скоростью  $v$ .

Значение  $v_{\text{к}}$ , при котором момент  $M_{\text{эм}}$  имеет максимум:

$$v_{\text{к}} = \frac{R'_2}{x'_2 + x_{\mu}} \quad ; \quad (14)$$

$$M_{\text{к}} = \frac{3I_{\text{экв}}^2 \cdot x_{\mu}^2}{2\Omega_0 (x'_2 + x_{\mu})} \quad (15)$$



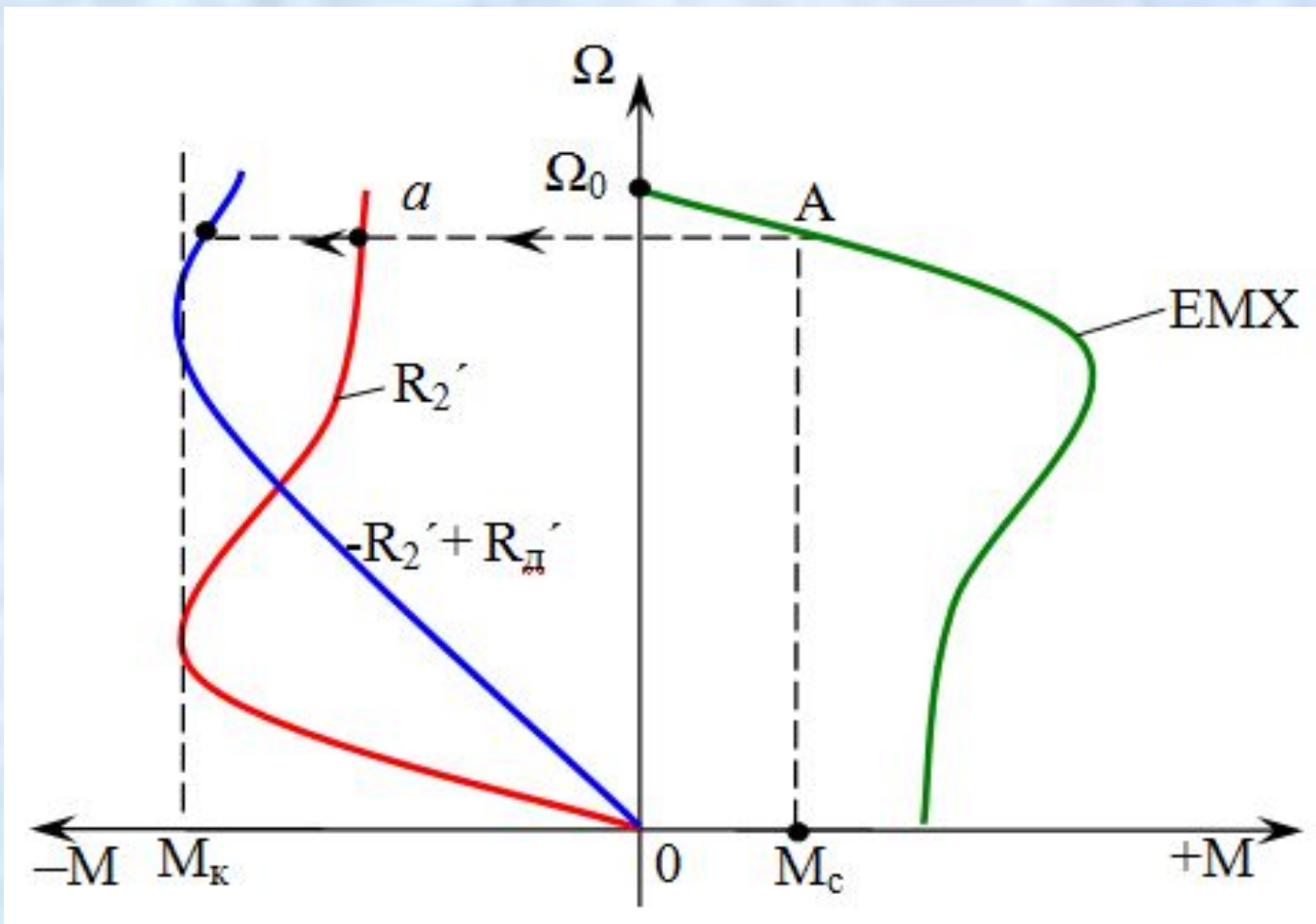


Рисунок 13 – Механические характеристики АД при динамическом торможении