



СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

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

Дисциплина:

«Автоматизированный электрический привод»

Лекция № 4:

**МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО
ТОКА В ДВИГАТЕЛЬНОМ И ТОРМОЗНЫХ
РЕЖИМАХ**

Доцент кафедры к. т. н.

ГОРПИНЧЕНКО Александр Владимирович

1. Уравнения электромеханической и механической характеристик ЭД независимого возбуждения в двигательном режиме.
2. Механические характеристики ЭД независимого возбуждения при уменьшении магнитного потока.
3. Механические характеристики ЭД независимого возбуждения при изменении напряжения питания.
4. Механические характеристики ЭД независимого возбуждения в тормозных режимах.

ЛИТЕРАТУРА

М.Г.Чиликин, А.С.Сандлер
«Общий курс электропривода», стр. 29...31, 58...65.

Якорь двигателя M и его обмотка возбуждения OB получают питание от разных, независимых друг от друга источников напряжения U и U_B , что позволяет отдельно регулировать напряжение на якоре двигателя и на обмотке возбуждения и выполнять их на разное номинальное напряжение.

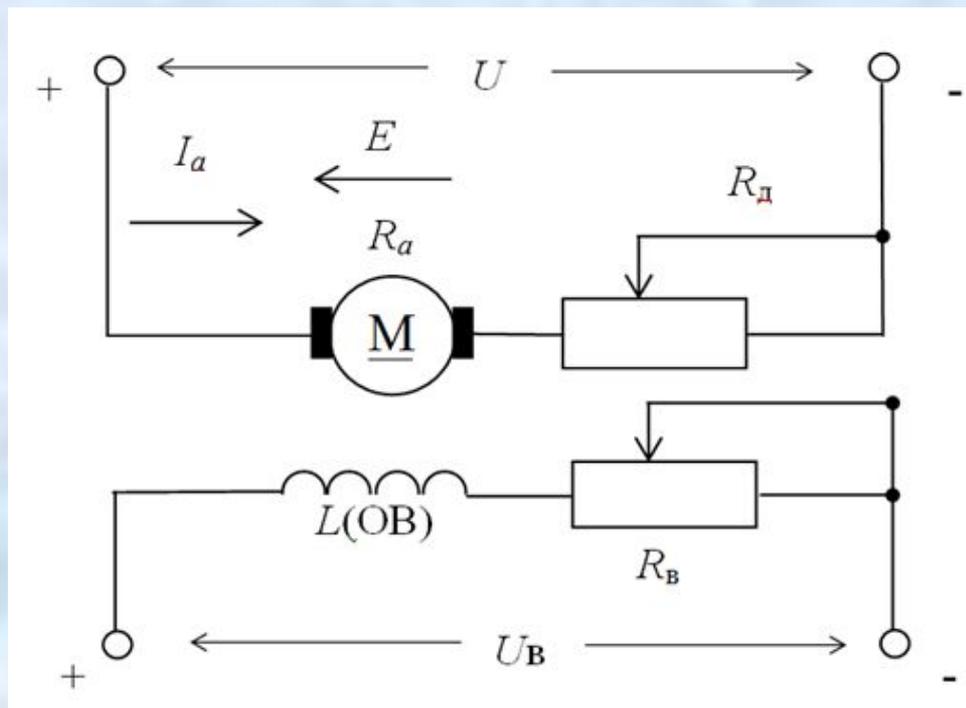


Рисунок 1. Схема включения двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Направления тока I и ЭДС вращения двигателя E , соответствуют двигательному режиму работы, когда электрическая энергия потребляется двигателем из сети и преобразуется в механическую энергию, мощность которой равна $P = M \cdot \Omega$.

Аналитическое выражение механической характеристики может быть получено из уравнения равновесия напряжений для цепи якоря ЭД (рис 1).

В установившемся режиме работы ЭД напряжение U уравнивается ЭДС (наведенной в якоре) E и падением напряжения на сопротивлениях цепи якоря.

$$U = E + I_a R, \quad (1)$$

где: I_a - ток в якорной цепи двигателя, А

$R = R_a + R_d$ - суммарное сопротивление якорной цепи, Ом.

ЭДС определяется: $E = k \cdot \Omega \cdot \Phi$, (2)

где: $k = \frac{p \cdot N}{2\pi \cdot a}$ – конструктивный коэффициент (p – число пар полюсов двигателя; N - число активных проводников обмотки якоря; a — число пар параллельных ветвей обмотки якоря);
 Φ — магнитный поток двигателя, Вб
 Ω — угловая скорость двигателя, рад/с.

Подставив (2) в (1) получим выражение для скорости двигателя:

$$\Omega = \frac{U - I_a \cdot R}{k \cdot \Phi} \quad (3)$$

Уравнение (3) представляет собой зависимость скорости двигателя от тока якоря. Такую зависимость $\Omega=f(I)$ называют *электромеханической характеристикой двигателя*.

Для получения уравнения механической характеристики необходимо найти зависимость скорости от момента двигателя.

Момент, развиваемый двигателем, связан с током якоря и магнитным потоком простой зависимостью, а именно:

$$M = k \cdot \Phi \cdot I_a \quad (4)$$

Откуда $I_a = \frac{M}{k \cdot \Phi}$, подставив его в уравнение (3) получим выражение

для механической характеристики:

$$\Omega = \frac{U}{k \cdot \Phi} - \frac{R}{(k \cdot \Phi)^2} \cdot M \quad (5)$$

При неизменных значениях U , R и Φ (пренебрегаем реакцией якоря) уравнение (5) представляет собой уравнение прямой линии в координатах Ω и M (рис. 2).

$$\Omega = a - vM \quad (6)$$

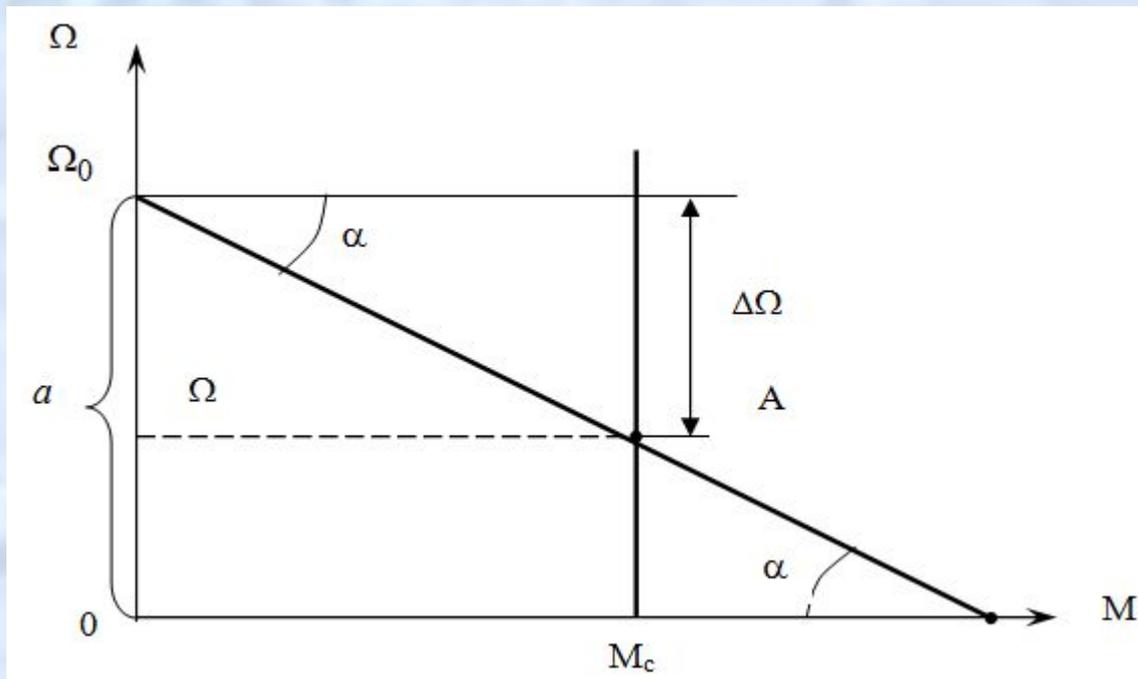


Рисунок 2

При $M = 0$ имеем холостой ход ЭД и соответственно скорость

$$\Omega = \Omega_0 = \frac{U}{k \cdot \Phi} = a \quad \text{— скорость идеального холостого хода.}$$

Поскольку $I_a = 0$, приложенное напряжение уравнивается только Э.Д.С., $U = E_0 = k \cdot \Omega_0 \cdot \Phi$.

Второй член выражения (5) характеризует перепад скорости Ω относительно скорости идеального холостого хода $\Omega_0 - \Delta\Omega$

$$\Delta\Omega = M \cdot \frac{R}{(k \cdot \Phi)^2} \quad (7)$$

Коэффициент крутизны $-\epsilon = -\frac{R}{(k \cdot \Phi)^2} = \frac{-\Delta\Omega}{M} = -\text{tg}\alpha$ характеризует

механической характеристики, т.е. определяют её жесткость.

Таким образом $\Omega = \Omega_0 - \Delta\Omega = \Omega_0 - \text{tg}\alpha \cdot M$ (8)

Из выражения $\Delta\Omega = M \cdot \frac{R_a + R_d}{(k \cdot \Phi)^2}$ видно, что при неизменных

Φ и R_a крутизна, а значит и жесткость характеристик зависит только от величины R_d .

Характеристики, получаемые при $R_d > 0$ называются *искусственными (реостатными) характеристиками*.

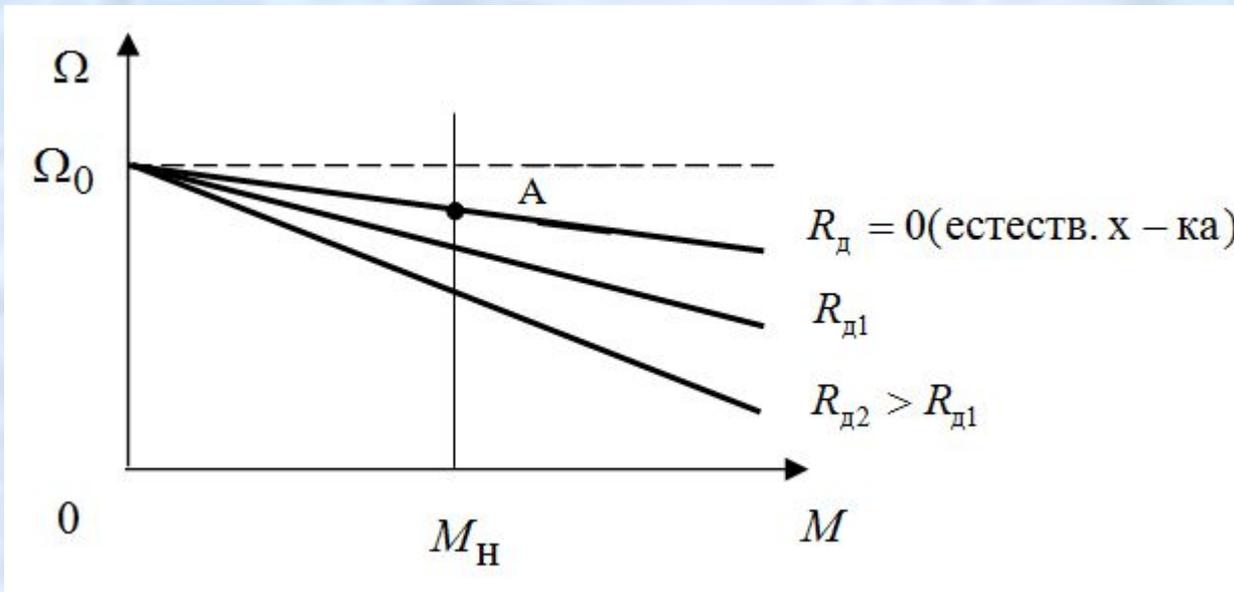


Рисунок 3.

Естественной характеристикой называется такая характеристика двигателя, которая получается при отсутствии внешних резисторов в якорной цепи и номинальных значениях напряжения и магнитного потока двигателя.

Все характеристики будут иметь одну общую точку $\Omega_0 = \frac{U}{k \cdot \Phi}$ (скорость идеального холостого хода) при $M = 0$.

Наклон же характеристик будет зависеть от R_d (чем больше значение R_d , тем мягче характеристика).

ЭД параллельного возбуждения имеет аналогичные электромеханические и механические характеристики если ЭД получает питание от мощной сети ($U = \text{const}$) и при пренебрежении реакцией якоря ($\Phi = \text{const}$).

2. Механические характеристики ЭД независимого возбуждения при уменьшении магнитного потока.

Будем считать, что $U = \text{const}$, $R = \text{const}$.

Из выражения механической характеристики следует, что при

уменьшении потока Φ скорость идеального хх возрастает $\Omega_0 \uparrow = \frac{U}{k \cdot \Phi \downarrow}$

также возрастает и крутизна механической характеристики

$$\Delta\Omega \uparrow = \frac{R}{(k \cdot \Phi)^2 \downarrow} \cdot M$$

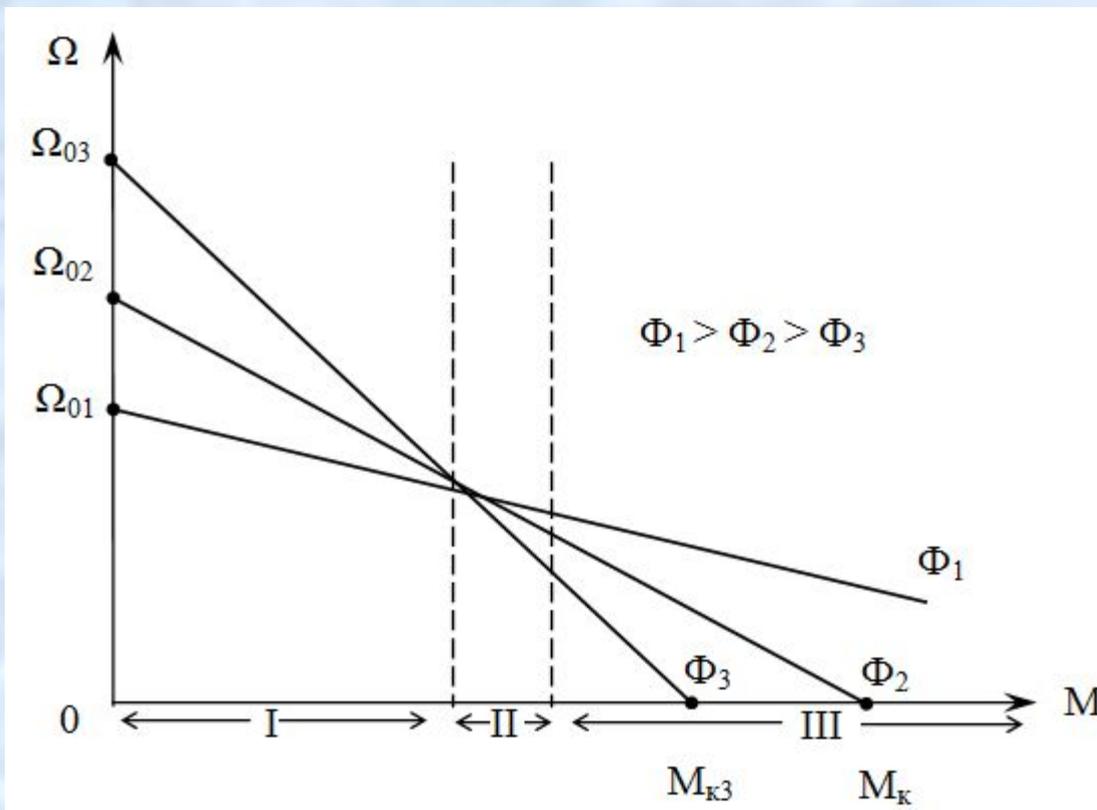


Рисунок 4.

Ток стоянки $I_k = \frac{U}{R}$ (т.к. $\Omega = 0$ и $E = k \cdot \Phi \cdot \Omega = 0$) и не зависит от Φ ,

поэтому момент стоянки $M_k = k \cdot \Phi \cdot I_k$ пропорционален Φ .

Уменьшение Φ можно использовать для регулирования Ω . По оси моментов всё семейство механических характеристик может быть разбито на 3-и зоны:

- **I-я зона.** При $\Phi \downarrow \Omega \uparrow$ возможно регулирование Ω ослаблением потока Φ .
- **II-я зона.** $\Phi = \text{var}$ не приводит к существенным изменению Ω .
- **III-я зона.** В ней лежат значения моментов, при которых $\Phi \downarrow$ и вызывает $\Omega \downarrow$ (зона опрокидывания регулирования).

3. Механические характеристики ЭД независимого возбуждения при изменении напряжения питания.

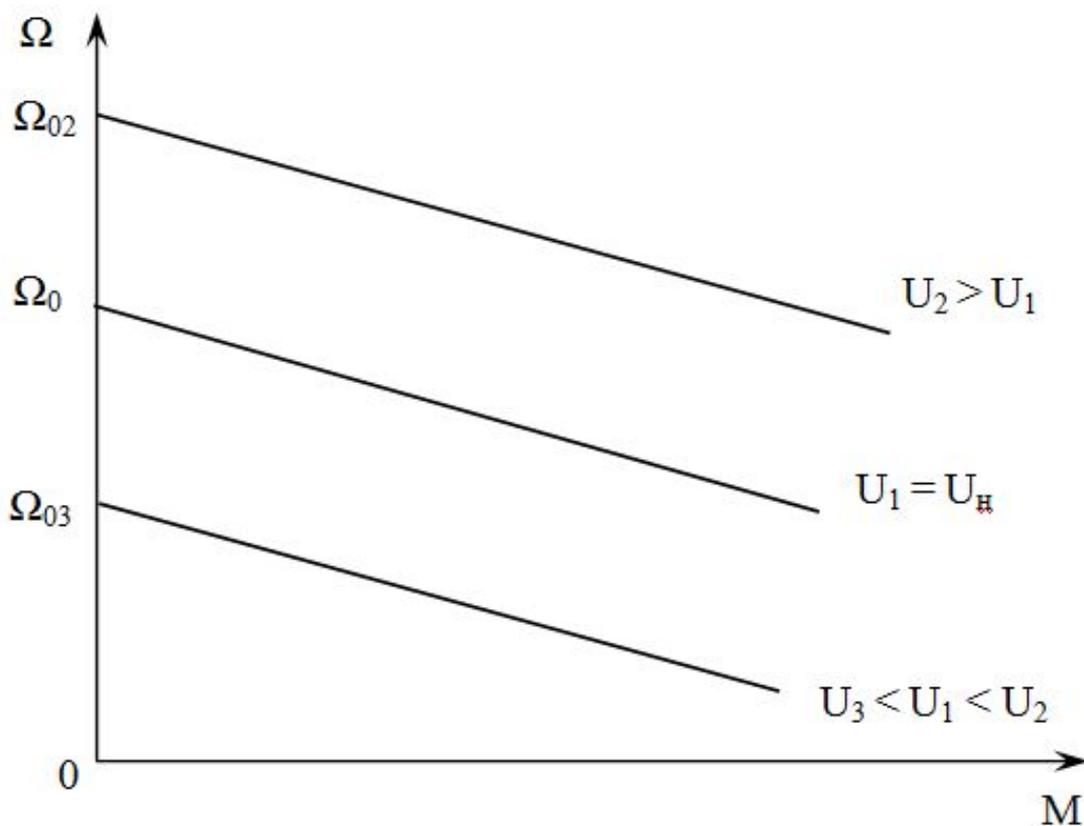
1
1

Будем считать, что $R=\text{const}$; $\Phi=\text{const}$, а U можно регулировать. При этом скорость будет изменяться пропорционально U :

$\Omega_0 = \frac{U}{k \cdot \Phi}$, а крутизна характеристик будет неизменна, так как

не зависит от U
$$\Delta\Omega = \frac{R}{(k \cdot \Phi)^2} M$$

, Ω .



4. Механические характеристики ЭД независимого возбуждения в тормозных режимах.

1
2

Во время торможения или реверса ЭД работает в одном из тормозных режимов с соответствующей механической характеристикой.

Различают следующие тормозные режимы:

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

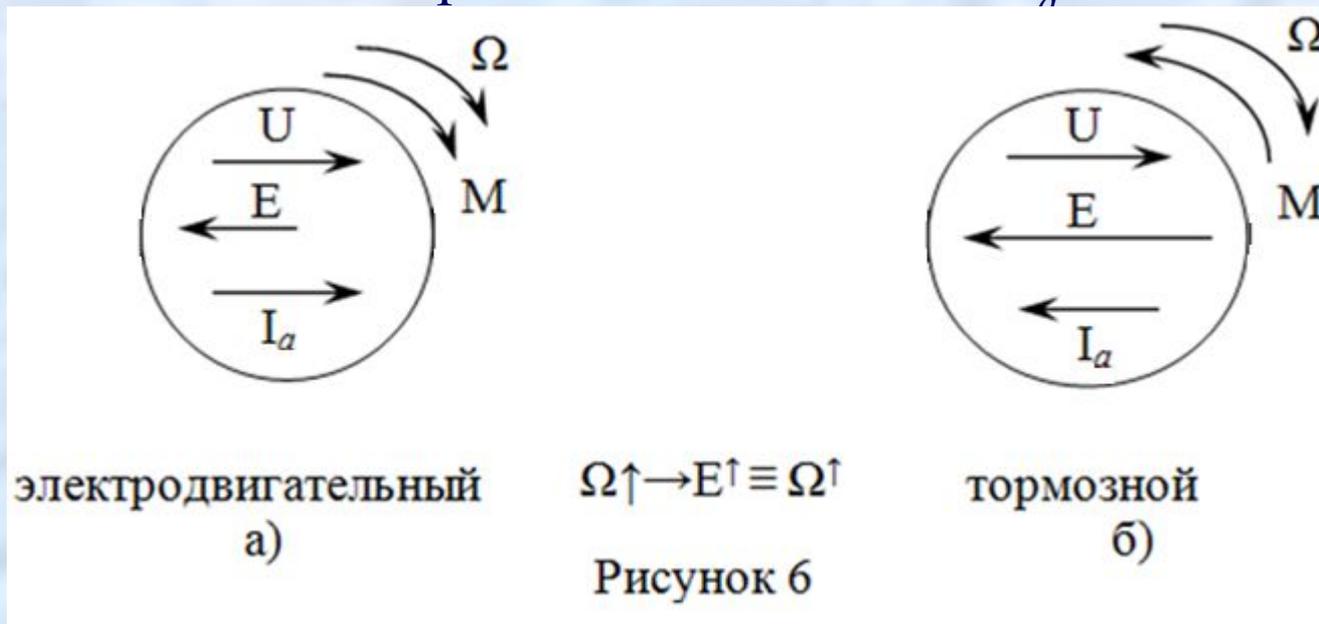
Рассмотрим механические характеристики ЭД независимого возбуждения в тормозных режимах.

Рекуперативное торможение имеет место тогда, когда скорость двигателя оказывается выше скорости идеального холостого хода: $\Omega > \Omega_0$.

В этом случае двигатель начинает работать в режиме генератора, преобразовывая механическую энергию со стороны рабочего механизма в электрическую и отдавая её в сеть.

Ток изменяет своё направление, так как при $\Omega > \Omega_0$ $E > U$.

$I_a = \frac{U - E}{R} = -\frac{E - U}{R}$, следовательно, изменяется знак и момент ЭД, т.е. он становится тормозным: $M = -k \cdot \Phi \cdot I_a$.



Уравнение механической характеристики в режиме рекуперативного торможения имеет вид

$$\Omega = \frac{U}{k \cdot \Phi} + \frac{R}{k^2 \cdot \Phi^2} \cdot M = (\Omega)_0 + \Delta\Omega$$

Характеристика является продолжением характеристики двигательного режима во 2-м квадранте.

Генераторное торможение возможно в подъёмных механизмах при спуске груза и является весьма экономичным, так как сопровождается отдачей энергии в сеть.

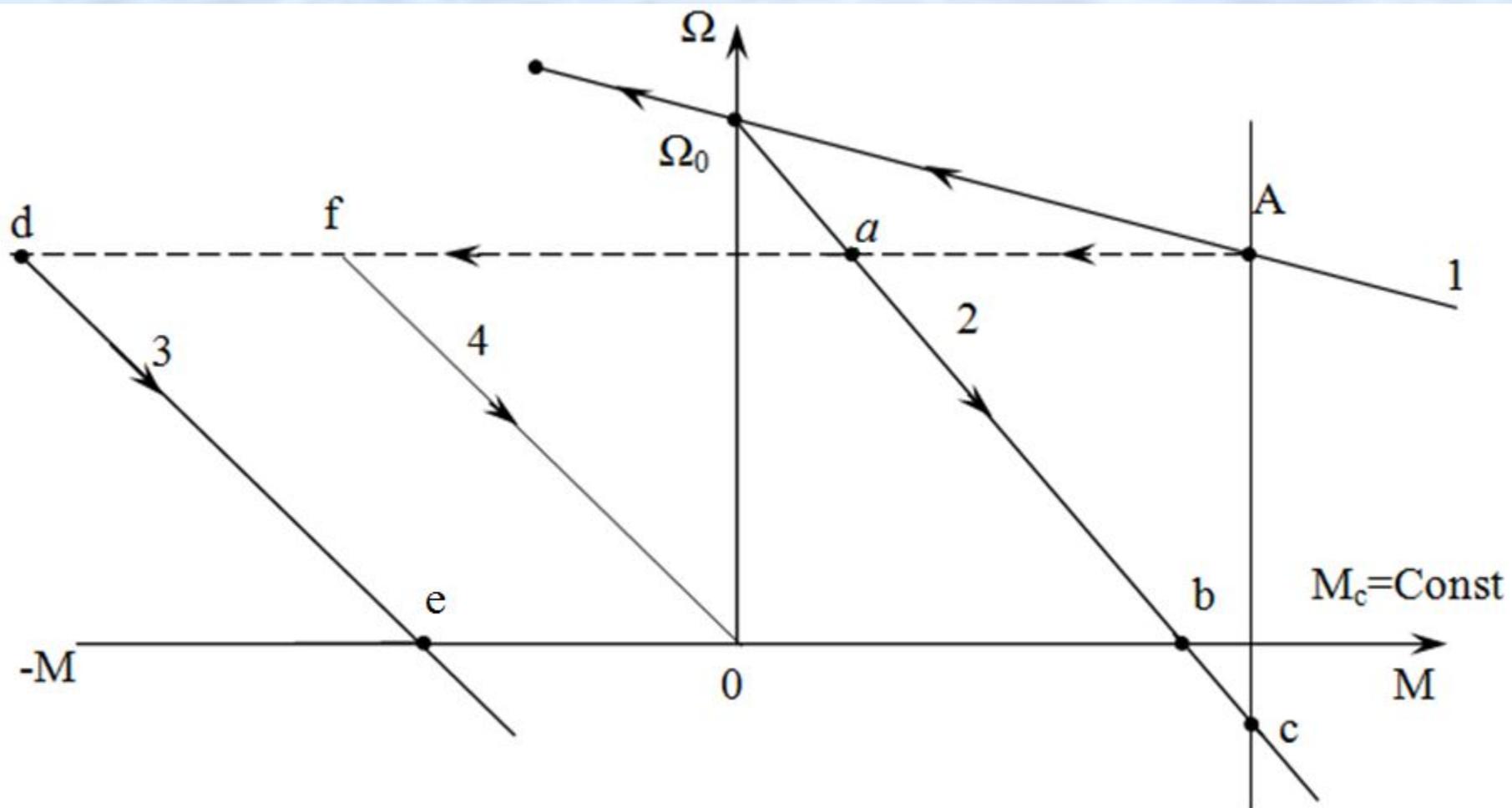


Рисунок 7

Торможение *противовключением* осуществляется в том случае, если под действием внешнего момента или сил инерции двигатель вращается в сторону противоположную действию электромагнитного момента.

Это может происходить, в приводе подъемника. Когда двигатель включен на подъем, а момент развиваемый грузом заставляет привод вращаться в сторону спуска груза.

Такой же режим получается и при переключении обмотки двигателя для быстрой остановки на противоположное направление вращения.

В первом случае (если при подъеме груза включить в цепь якоря резистор R) торможение осуществляется по стрелке

$A \rightarrow a \rightarrow b \rightarrow c$ (рис.7) до установившейся скорости спуска в точку c , где $M_T = M_c$ (прямая 2). Уравнение механической характеристики при этом имеет вид, как и для двигательного режима

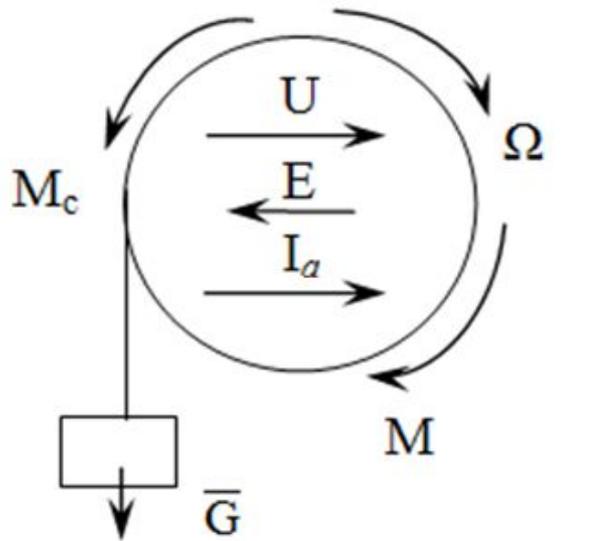
$$\Omega = \frac{U}{k \cdot \Phi} - \frac{R_a + R_T}{k^2 \cdot \Phi^2} \cdot M = \Omega_0(\theta) \Delta \Omega$$

Нужно учитывать, что $\Delta \Omega > \Omega_0$ поэтому скорость отрицательна.

1
7

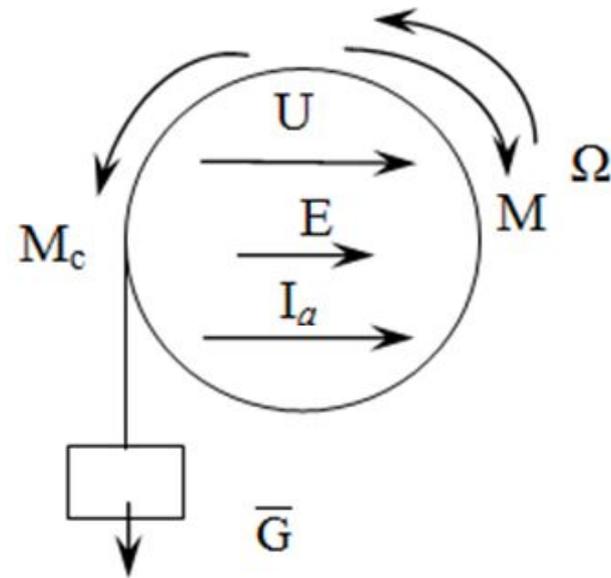
$$I_a = \frac{U + E}{R_a + R_T}, \text{ т.е. увеличится по сравнению с двигательным режимом.}$$

На рис. 8 (а, б) схематически показаны физические величины, характеризующие этот тормозной режим.



$$M = M_c$$

а) подъем



$$M_T = M_c$$

б) спуск

Рисунок 8

Если торможение осуществляется изменением полярности на зажимах якоря с одновременным включением резистора R_T , то характеристика изображается прямой (3) на рис. 7.

Торможение осуществляется по стрелке $A \rightarrow a \rightarrow d \rightarrow e$.

В точке «e» ЭД необходимо отключить от сети, иначе произойдёт реверс.

Для этого случая уравнение механической характеристики будет

$$\Omega = -\frac{U}{k \cdot \Phi} + \frac{R_a + R_T}{k^2 \cdot \Phi^2} \cdot M_T \quad (\Omega_0 + \Delta\Omega)$$

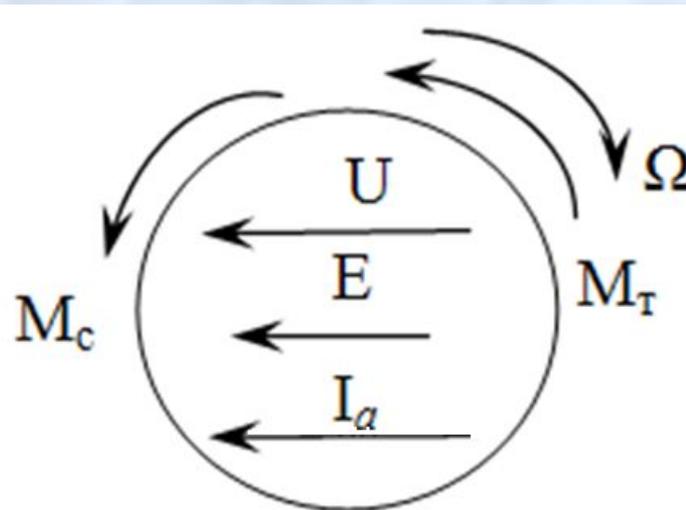


Рисунок 9

Динамическое торможение можно выполнить путём отключения обмотки якоря от сети и включением её на тормозной резистор R_T .

Двигатель начинает работать в режиме генератора независимого возбуждения, преобразовывая запасённую кинетическую энергию в электрическую, которая расходуется на нагрев обмотки якоря и резистора R_T . (рис.10).

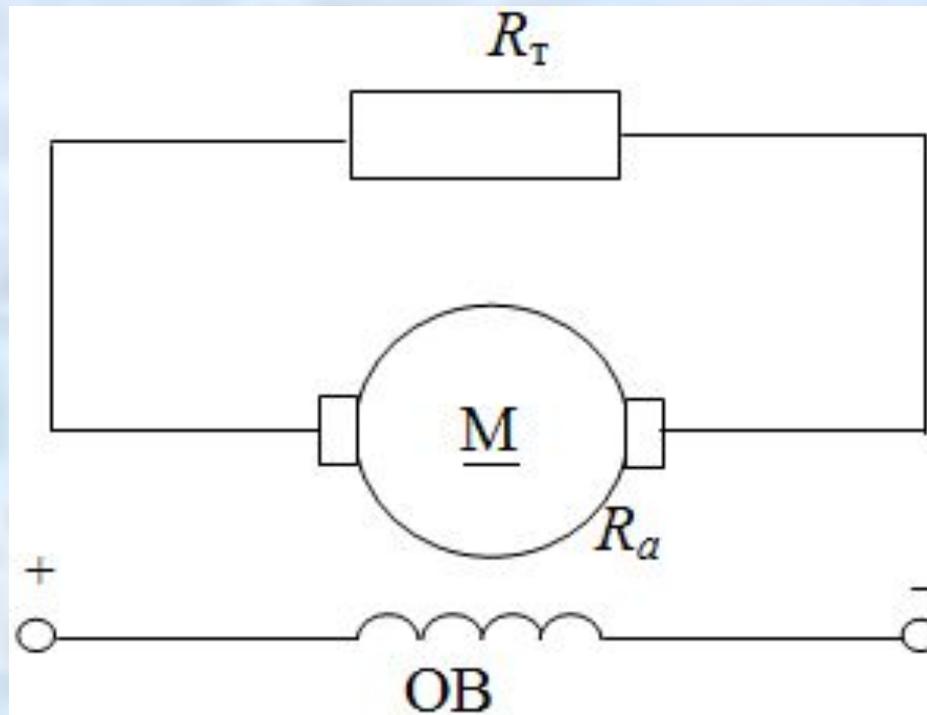


Рисунок 10

Так как $U=0$, то уравнение механической характеристики – (прямая 4) на рис.7.

$$\Omega = \frac{R_a + R_T}{k^2 \Phi^2} \cdot M_T$$

Ток якоря определяется по формуле $I_a = -\frac{E}{R_a + R_T}$

при этом $M_T = -k \cdot \Phi \cdot I_a$.

Торможение осуществляется по стрелке $\Lambda \rightarrow f \rightarrow 0$ (рис.7)

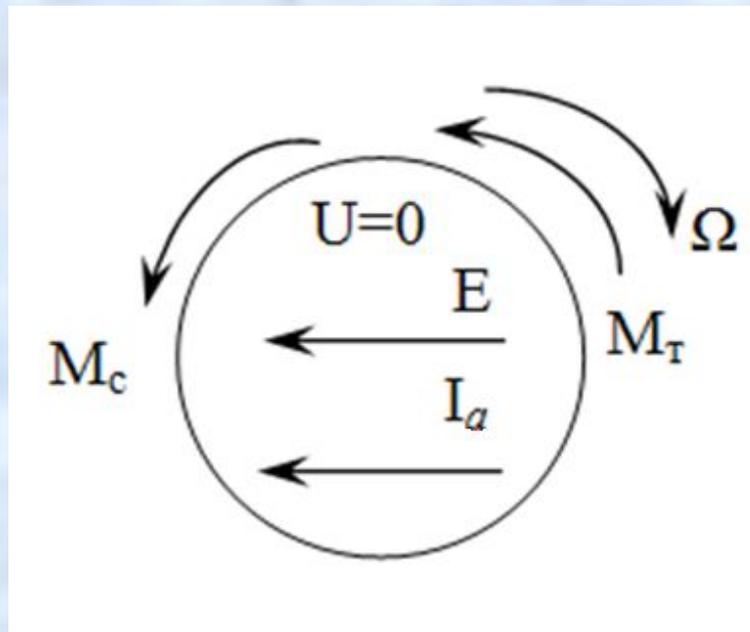


Рисунок 11