

## Расчёт сопротивлений пускового реостата (построение пусковой диаграммы)

Графический метод:

$$\omega = \frac{U_H}{k\Phi_H} - \frac{Mr}{(k\Phi_H)^2} \quad (1)$$

Перепишем уравнение (1):  $\omega_0 - \omega = \frac{Mr}{(k\Phi_H)^2} / \omega_0$  (2)

$$\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{Mr}{(k\Phi_H)^2 \cdot \omega_0} \quad (3)$$

$s$  – скольжение для двигателя переменного тока или относительный перепад скорости для ДПТ независимого возбуждения:

$$s = \frac{Mr \cdot k\Phi_H}{(k\Phi_H)^2 \cdot U_H} \quad (4)$$

$$U_H = I_H \cdot R_H \quad (5)$$

$$s = \frac{Mr}{k\Phi_H \cdot I_H \cdot R_H}; \quad k\Phi_H I_H = M_H$$

$$s = \frac{M}{M_H} \cdot \frac{r}{R_H} = \mu\rho$$

При  $M = M_H$   $\mu = 1 \Rightarrow s = \rho$ , т.е. в относительных единицах перепад скорости равен сопротивлению в относительных единицах.

$$\mu_r = \frac{r_{\text{я}}}{\text{аб}} \quad [\text{Ом/мм}]$$

$$\mu_r \cdot \overline{aa_1} = r_{\text{я}} + r_n$$

$$r_n = r_{\Sigma} + r_n - r_{\text{я}}, \quad r_{\text{я}} + r_n = r_{\Sigma}$$

Этот метод положен в основу расчёта пусковых и тормозных сопротивлений, а также построения пусковой диаграммы.

## Построение пусковой диаграммы графическим методом

$$\begin{aligned} I_c &= \frac{M_c}{k\Phi_H}; & r_n &= \frac{U_H}{2,5I_H} & m_r &= \frac{r_{я}}{a_m a_n}; & \overline{a_m a_n} \cdot m_r &= r_n \\ I_a &= I_1 > I_c & (M > M_c) & & r_n - r_{я} &= r_{p1}; & \overline{a_1 a_3} \cdot m_r &= r_{12} \\ M - M_c &= J \frac{d\omega}{dt} & & & (\overline{a_m a_1} - \overline{a_m a_3}) \cdot m_r &= r_{12} \\ & & & & \overline{a_3 a_5} \cdot m_r &= r_{23} & \text{и т.д.} \end{aligned}$$

При разгоне при достижении тока  $I_2$ , т.е. точки переключения, мы выводим часть сопротивления именно такую, чтобы бросок тока вновь был  $I_1$ . Опять строим характеристику через точку  $a_2$ , по которой привод будет разгоняться и т.д. Диаграмма считается построенной правильно, если скорость на предпоследней характеристике ( $a_3$ ) при переключении равна скорости на естественной характеристике ( $a_4$ ) и бросок тока в  $a_4$  равен  $I_1$ . Если этого не произошло, то изменяют  $I_2$  (ток переключения) и производят повторное построение.

Можно автоматизировать процесс пуска тремя способами:

1) Осуществлять вывод сопротивления при достижении тока переключения  $I_2$  с помощью токового реле. Такой принцип называется «по принципу тока».

2) Можно параллельно двигателю включить реле напряжения, по количеству равное числу ступеней, и соответствующим образом их настроить:

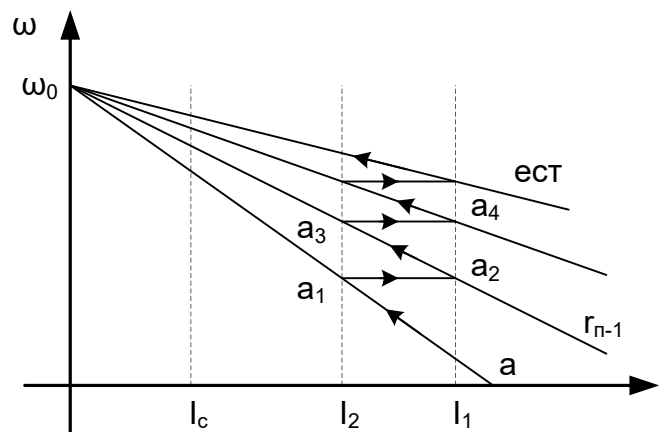
$$U_{ср.1} = c\omega_a + I_2 r_{я}; \quad U_{ср.2} = c\omega_{a3} + I_2 r_{я}. \quad \text{«По принципу ЭДС»}.$$

3) За время достижения двигателем скорости точки переключения  $a_1$  проходит какое-то время. Если в схеме использовать реле времени, то такой способ называется управление «по принципу времени».

При редком пуске и двигательном режиме работы следует делать минимальное количество ступеней, следовательно, и минимальную стоимость пуска аппаратуры. Для этого ток  $I_2$  уменьшают до  $I_{ст}$ , соблюдая  $I_2 \geq 1,2I_c$ . Для соблюдения плавности пуска, уменьшения бросков тока и момента при выводе ступеней необходимо  $I_2$  устремлять к  $I_1$ . В этом случае обеспечивается не только минимум нагрузок при возмущении, но и наибольшая производительность, т.е. наименьшее время пуска. Если время пуска не лимитируется, а к плавности пуска предъявляются те же требования, то  $I_1$  устремляют к  $I_2$ .

$$M_{cp} = \frac{(I_1 + I_2) \cdot C}{2}$$

Аналитический метод расчёта диаграммы



$$a_1) U_H = c\omega_{a1} + I_2 r_n \quad (1); \quad I_2 = \frac{U_H - c\omega_{a1}}{r_n} \quad (2)$$

$$a_2) U_H = c\omega_{a2} + I_1 r_{n-1} \quad (3); \quad I_1 = \frac{U_H - c\omega_{a2}}{r_{n-1}} \quad (4)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_H - c\omega_{a2}}{r_{n-1}} \cdot \frac{r_n}{U_H - c\omega_{a1}} \quad (5)$$

Поскольку  $\omega_{a1} = \omega_{a2}$ , то:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_n}{r_{n-1}} = \frac{r_{n-1}}{r_{n-2}} = \dots = \frac{r_2}{r_1} = \frac{r_1}{r_\lambda} = \lambda \quad (6)$$

$$\text{Отсюда: } r_1 = r_\lambda \lambda; \quad r_2 = r_1 \lambda = r_\lambda \lambda^2; \quad r_3 = r_2 \lambda^3; \quad r_n = r_\lambda \lambda^n \quad (7)$$

$$\lambda = \sqrt[n]{\frac{r_n}{r_я}} \quad (8); \quad n = \frac{\ln \frac{r_n}{r_я}}{\ln \lambda} \quad (9)$$

В приводе решаются две задачи:

- 1) число ступеней известно (n);
- 2) n не известно.

Если 1), то зная ток  $I_1$  ( $I_1 = 2,5I_H$ ) находим  $r_n = \frac{U_H}{2,5I_H} = \frac{U_H}{I_1}$ . Далее по (8)  $\rightarrow \lambda = \frac{I_1}{I_2}$  (по (6)), следовательно из (6) находим  $I_2$ . Сопротивление из (7)  $r_{12} = r_1 - r_я$ ;  $r_{23} = r_2 - r_1$ ;  $r_n - r_{n-1} = \dots$

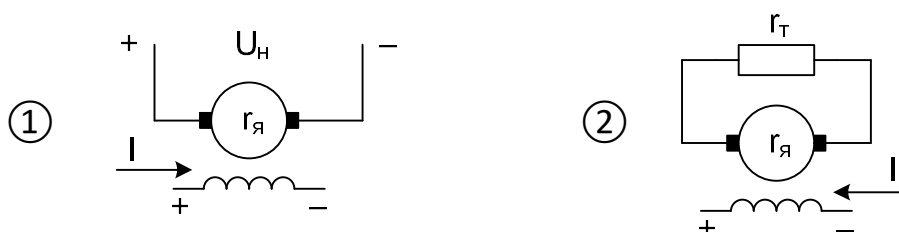
Если 2), то задаются  $I_1, I_2$ ;  $I_2 = 1,2I_c$ . По (6) находят  $\lambda$ . По (9) находят приблизительное n. Если целое, то расчёт закончен. Если нет, то округляют к ближайшему целому и по (8) уточняют  $\lambda$ . Затем по (6) уточняют  $I_2$ , а далее определяют сопротивления.

### Тормозные режимы двигателя независимого возбуждения

Для данного двигателя имеют место три типа торможения:

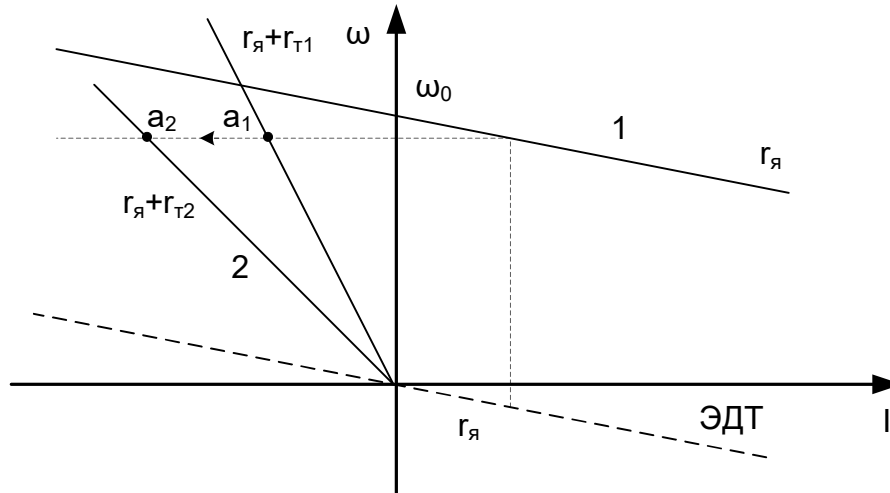
- 1) Динамическое торможение (или ЭДТ – электродинамическое торможение), независимое от сети;
- 2) Режим рекуперации (отдачи) энергии в сеть (режим параллельной сети);
- 3) Режим противовключения (последовательные сети).

#### 1) Динамическое торможение



$$\omega = \frac{U_H}{k\Phi_H} - \frac{Ir_{\text{я}}}{k\Phi_H} \quad (1)$$

$$\omega = -\frac{Ir}{k\Phi_H} \quad \text{при } U_H = 0 \quad (2)$$



Чтобы получить режим динамического торможения необходимо в схеме, работающей в двигательном режиме (1), двигатель отключить от сети и замкнуть на тормозное сопротивление (2).

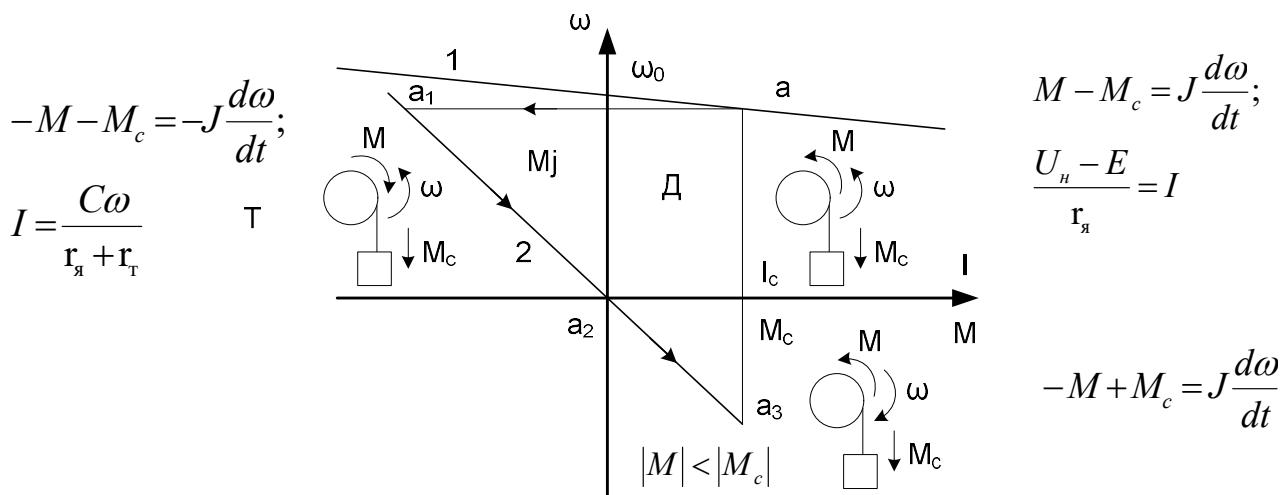
На естественной характеристике напряжение и ЭДС отличаются только на величину падения напряжения на якорной цепи ( $E = U_H - Ir_{\text{я}}$ );  $Ir_{\text{я}} = 1 \dots 10\text{В}$ , т.е.  $E \approx U_H$ . Поскольку ЭДС и напряжение на естественной характеристике близки, и если в схеме 2 не ввести добавочное сопротивление, то из-за того, что сопротивление якоря мало, ток будет достигать 15...20 кратного значения от номинального. Поэтому для ограничения тока так же, как и при пуске, вводится добавочное сопротивление и (2) тогда станет:

$$\omega = -\frac{I(r_{\text{я}} + r_{\text{T}})}{k\Phi_H} \quad (3)$$

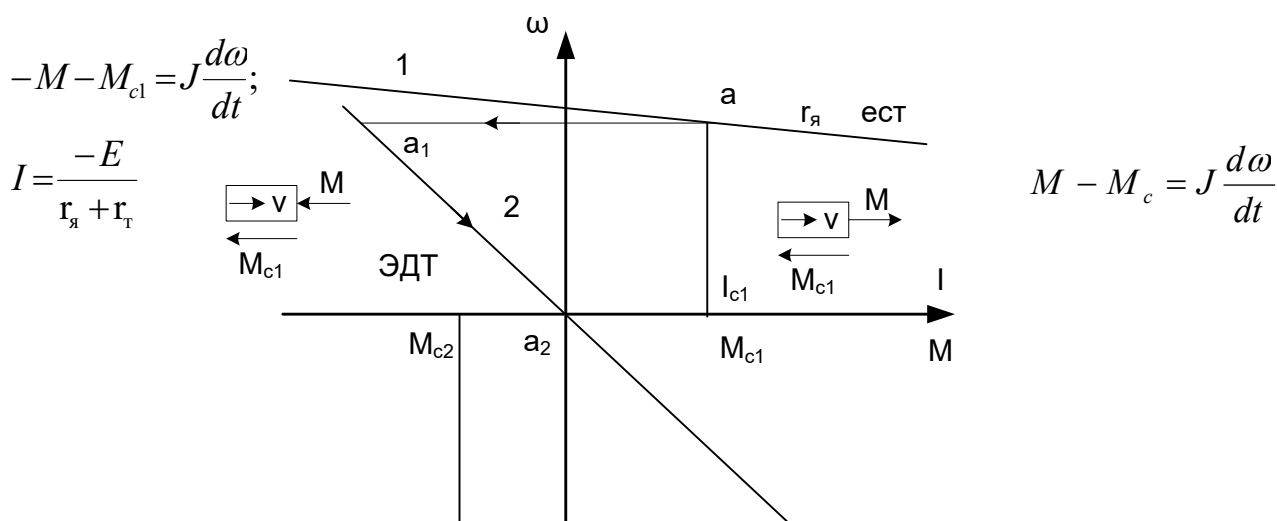
При  $I = \frac{M}{k\Phi_H}$ :

$$\omega = -\frac{M(r_{\text{я}} + r_{\text{T}})}{(k\Phi_H)^2} \quad (4)$$

### Работа двигателя в режиме ЭДТ, момент активный



### Момент реактивный



В отличие от активного момента, движение закончится в точке  $a_2$ , и он не развернется в обратную сторону ввиду того, что отсутствуют потенциальные силы.

$$E_a = E_{a1}; \quad C\omega_a = E_a = U_H - Ir_\alpha; \quad I = I_1;$$

$$\frac{C\omega_a}{I_1} = r_\alpha + r_\tau = r_\Sigma$$

Если при торможении не накладываеься никаких ограничений, то стоит строить характеристику, чтобы бросок тока был предельно максимальный. Если при торможении ограничивается ускорение, то расчёт добавочного сопротивления в режиме ЭДТ ведётся следующим образом: записывается уравнение движения:

$$-M - M_{c1} = -J\varepsilon_{\text{доп}} \quad (1)$$

$$M_{\text{треб}} + M_c = J\varepsilon_{\text{доп}} \quad \Rightarrow \quad M_{\text{треб}} = J\varepsilon_{\text{доп}} - M_c$$

Далее находим требуемый ток:

$$I_{\text{треб}} = \frac{M_{\text{треб}}}{k\Phi_n}; \quad \frac{E_a}{I_{\text{треб}}} = r_{\Sigma}; \quad r_{\Sigma} - r_{\text{я}} = r_{\text{треб}}$$

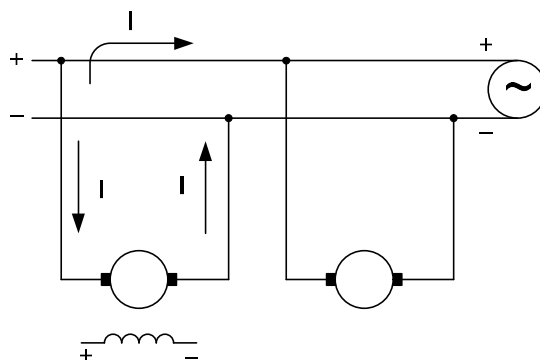
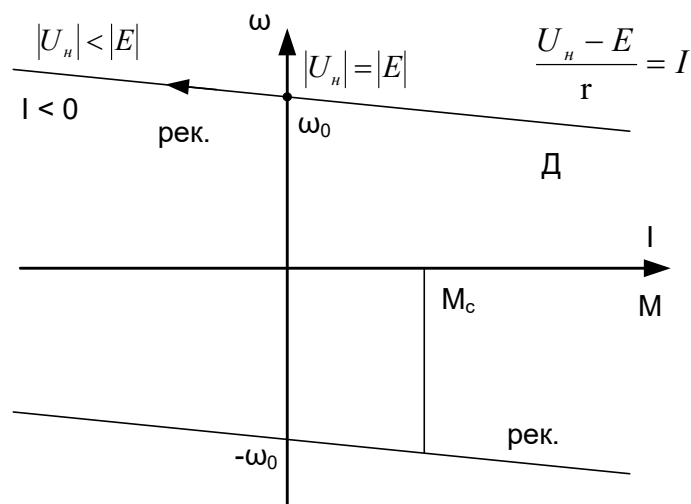
Недостатки режима ЭДТ:

- тормозной момент существенно уменьшается по мере уменьшения скорости и вообще отсутствует при  $\omega = 0$ ;
- энергия, запасённая в кинетических частях идёт на нагрев якорной обмотки и добавочного сопротивления;

Достоинства:

- простота; нашёл широкое применение в виде дополнительного аварийного торможения.

## 2) Режим рекуперации энергии в сеть



Сам вид торможения является энергосберегающим.

Режимом рекуперации называется режим, когда энергия возвращается в сеть или другим потребителям. Признаки рекуперации:

- ЭДС и напряжение направлены противоположно;
- ЭДС по абсолютному значению больше напряжения;
- скорость больше, чем скорость идеального холостого хода;
- ток относительно двигательного режима меняет знак на противоположный.

Недостатки:

- торможение возможно при скорости больше скорости идеального холостого хода, но он легко устраняется в замкнутых системах, где скорость х.х. можно регулировать в любых пределах.

Достоинства:

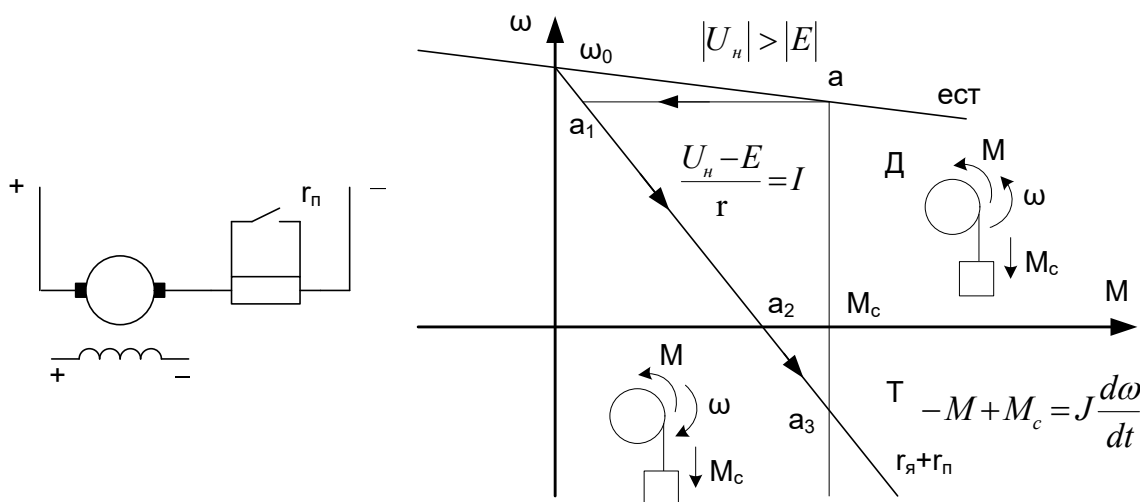
- возврат энергии в сеть, экономичность;
- автоматический переход из двигательного режима в режим рекуперации.

### 3) Режим противовключения

Получить его можно двумя способами:

1. введением большого сопротивления;
2. за счёт реверсирования двигателя.

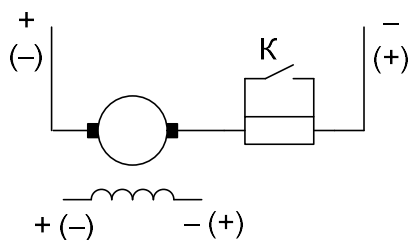
1)



Если напряжение и ЭДС направлены согласно, то это основной признак режима противовключения.



2)

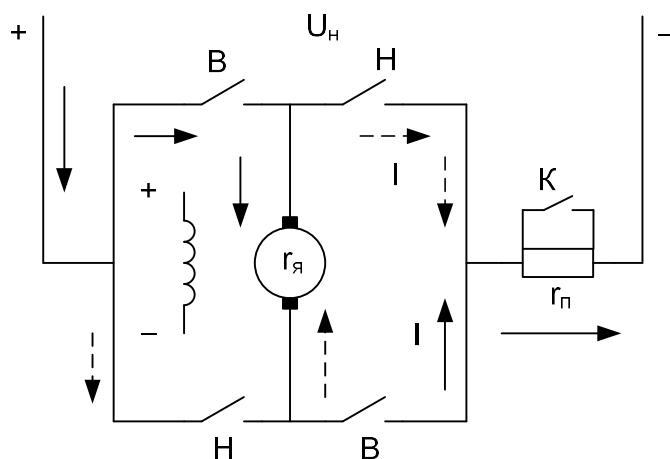


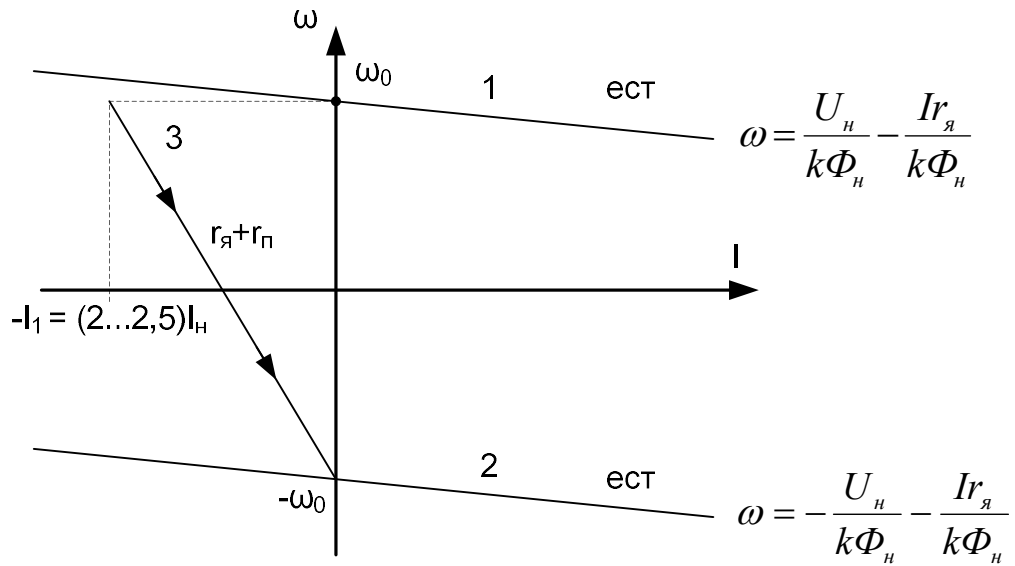
$$M = k\Phi I \quad (1)$$

Уравнение (1) показывает, что знак момента можно изменить изменением направления тока якоря, т.е. изменяя полярность на якорной цепи. С другой стороны, (1) показывает, что можно менять знак момента изменением знака потока, т.е. меняя полярность в обмотке возбуждения. Ток якоря намного больше (в 50 раз), чем ток возбуждения, и экономически целесообразно реверсировать, управляя направлением тока в обмотке возбуждения. Однако при дискретном изменении полярности на обмотке возбуждения из-за быстрого изменения тока резко увеличивается ЭДС самоиндукции:

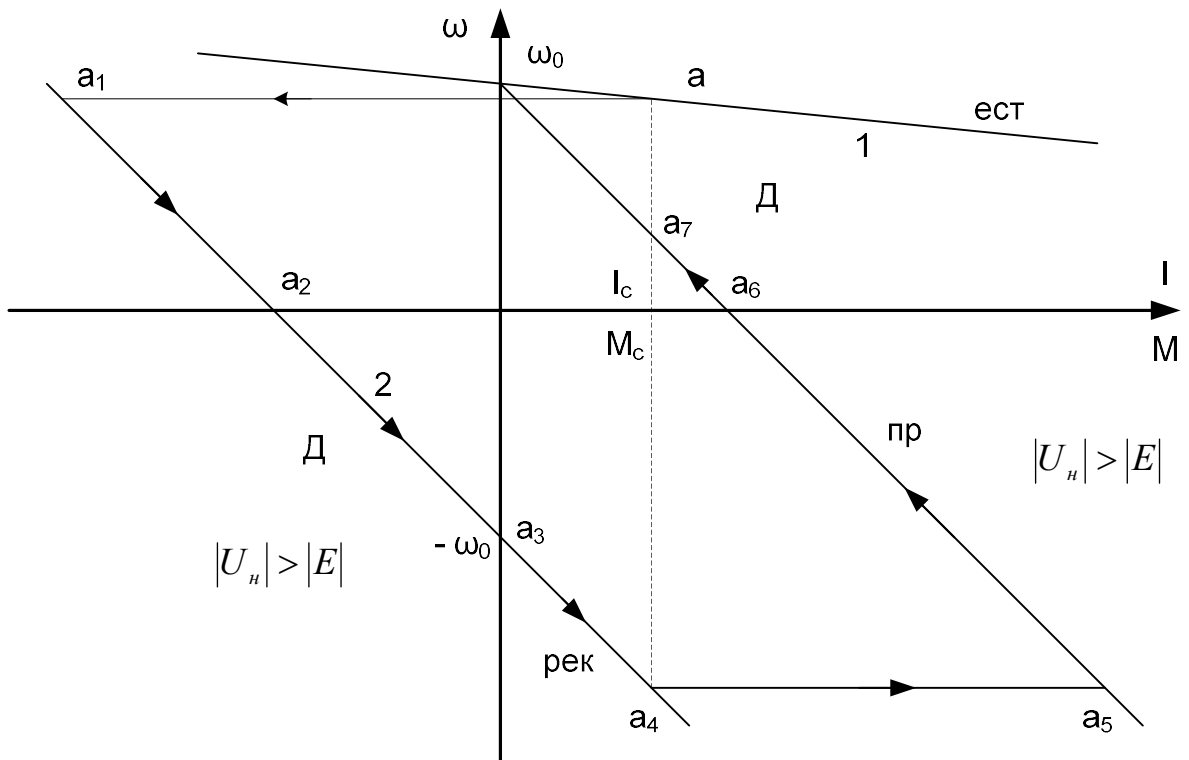
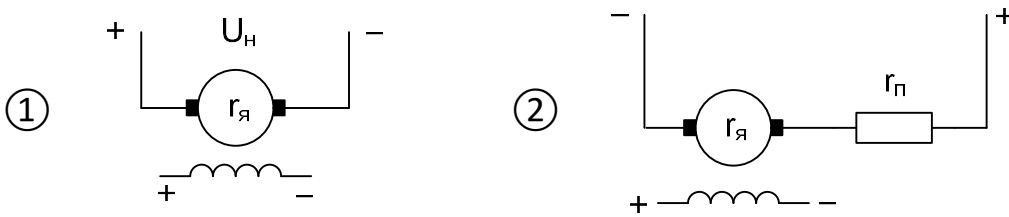
$$L_B \frac{di}{dt} = L_B \frac{\Delta i_B}{\Delta t}.$$

По этой причине нередко возникает межвитковый пробой изоляции, в дальнейшем перерастающий в межвитковое короткое замыкание. С другой стороны, число витков обмотки возбуждения намного больше числа витков якорной обмотки, поэтому электромагнитная постоянная времени обмотки возбуждения  $T_B = L_B/r_B$  для больших машин достигает 4 секунд, а, как известно, переходный процесс  $t_{\text{пн}} = 4T_B = 4 \cdot 4 = 16$  сек. Из-за этих двух причин реверсирование двигателя осуществляется изменением направления тока якоря по схеме 2:





*Режим противовключения при реверсе, нагрузка активная*



① в 1-ом квадранте	$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}$ $I = \frac{U_H - E}{r_{я}}$	
② $\overline{a_1 a_2}$	$-M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}$ $I = \frac{-U_H - E}{r_{я} + r_{п}}$	режим противовключения
② $\overline{a_2 a_3}$	$M + M_c = J \frac{d\omega}{dt}$ $I = \frac{-U_H + E}{r_{я} + r_{п}} = \frac{-U_H - (C(-\omega))}{r_{я} + r_{п}}; \quad  U_H  >  E $	
② $\overline{a_3 a_4}$	$-M + M_c = J \frac{d\omega}{dt}; \quad  M  >  M_c $ $I = \frac{U_H + E}{r_{я} + r_{п}}; \quad  U_H  <  E $ $ \omega  >  \omega_0 ; \quad I < 0$	рекуперация
① $\overline{a_5 a_6}$	$-M + M_c = J \frac{d\omega}{dt}; \quad  M  >  M_c $ $I = \frac{U_H + E}{r_{я} + r_{п}}$	противовключение
① $\overline{a_6 a_7}$	$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}$ $I = \frac{U_H - E}{r_{я} + r_{п}}$	двигательный режим

Достоинства данного вида торможения:

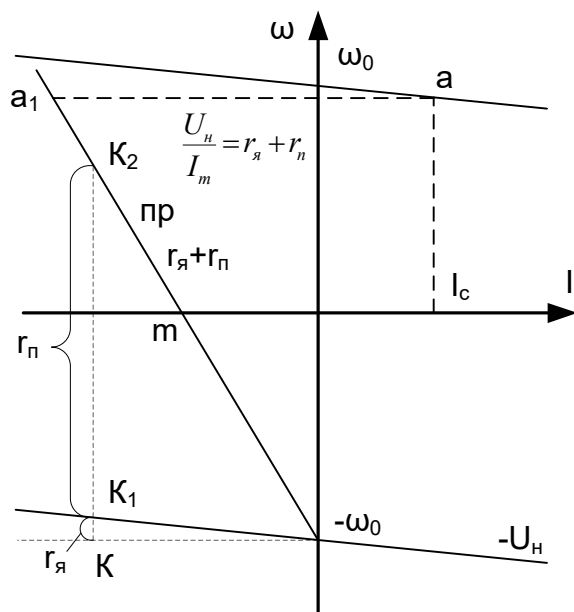
- при  $\omega = 0$  двигатель создаёт тормозной момент;
- момент тормозной в процессе торможения меняется незначительно (15-20%).

Недостатки:

- потери электрической энергии в 3 раза больше, чем при ЭДТ, но благодаря своим характеристикам, особенно в режиме силового опускания груза, этот вид торможения получил широкое распространение в качестве основного.

## Определение сопротивления противовключения

### 1) Графически



### 2) Аналитически

$$I_a = \frac{U_H + C\omega_{a1}}{r_я + r_п} \Rightarrow r_п = \frac{U_H + C\omega_{a1}}{I_a} - r_я$$