

Лекция 6

Переходные процессы в электроприводе

Переходные процессы в электроприводе

- 1. Переходные процессы в электроприводе при постоянном и избыточном моментах.**
- 2. Влияние параметров АД на переходные процессы пуска и торможения.**
- 3. Потери мощности и энергии при переходных процессах. Способы снижения потерь энергии.**
- 4. Уравнения нагрева и охлаждения электродвигателя. Переходные процессы при нагреве и охлаждении.**

5.1 Переходные процессы в электроприводе при постоянном и избыточном моментах.

Переходной процесс в ЭП – процесс перехода его параметров из одного устойчивого состояния в другое.

На п.п. в ЭП влияют различные виды инерции:

- 1) механическая инерция частей рабочей машины, промежуточных передач и двигателя. Степень влияния механической инерции на скорость протекания переходных процессов характеризуется электромеханической постоянной T_m ;

$$T_M = J \frac{\omega}{M}$$

J – момент инерции; ω – угловая скорость; M – момент.

2) электромагнитная инерция, обусловленная индуктивностью обмоток ЭД и аппаратуры управления. Характеризуется электромагнитной постоянной $T_{эм}$:

$$T_{эм} = \frac{L}{r}$$

L – индуктивность ЭД, r – сопротивление ЭД;

3) тепловая инерция, обусловленная теплоемкостью C и теплоотдачей ЭД A . Характеризуется постоянной времени нагрева T :

$$T = \frac{C}{A}$$

П.п. возникают при пуске, торможении, реверсе и изменении нагрузки на валу.

Время пуска и торможения

Из основного уравнения:

$$M_D - M_C = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

время пуска :

при $J = const$

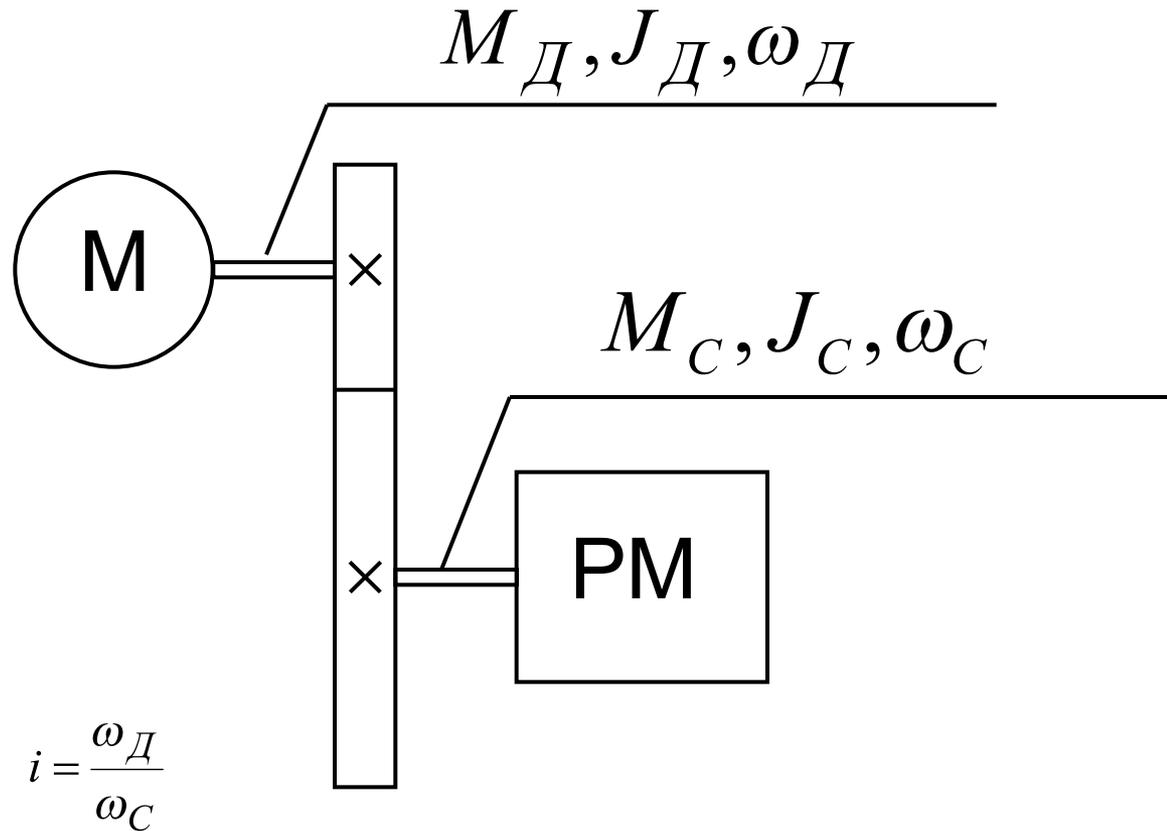
$$t = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{J}{M_D - M_C} d\omega$$

$$M_D = f(\omega)$$

$$M_C = f(\omega)$$

время торможения:

$$t = \int_{\omega_2}^{\omega_1} \frac{J}{M_D + M_C} d\omega$$



$$M_D \cdot i - M_C = \left(J_D \cdot i^2 \cdot \kappa + J_C \right) \frac{d\omega}{dt}$$

при $\eta=1$. Обычно $\kappa=1, 1 \dots 1, 3$.

Найдем:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_D \cdot i - M_C}{J_D \cdot i^2 \cdot k + J_C}$$

если приравнять к нулю, то получится оптимальное передаточное число:

$$i_{ОПТ} = \frac{M_C}{M_D} + \sqrt{\left(\frac{M_C}{M_D}\right)^2 + \frac{J_C}{J_D \cdot k}}$$

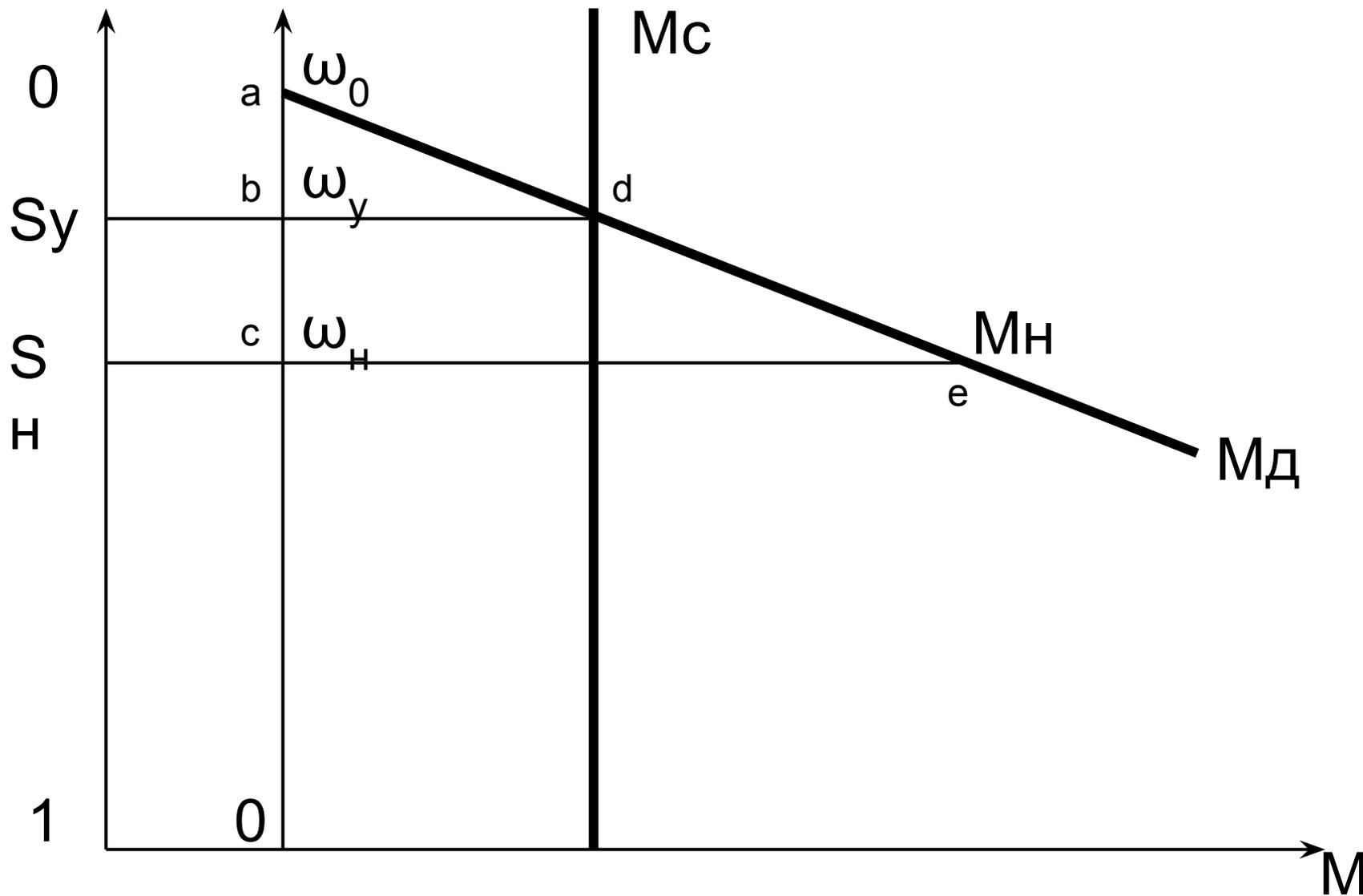
при

$$M_C = 0$$

$$i_{ОПТ} = \sqrt{\frac{J_C}{J_D \cdot k}}$$

П.п. при линейных характеристиках ЭД и РМ

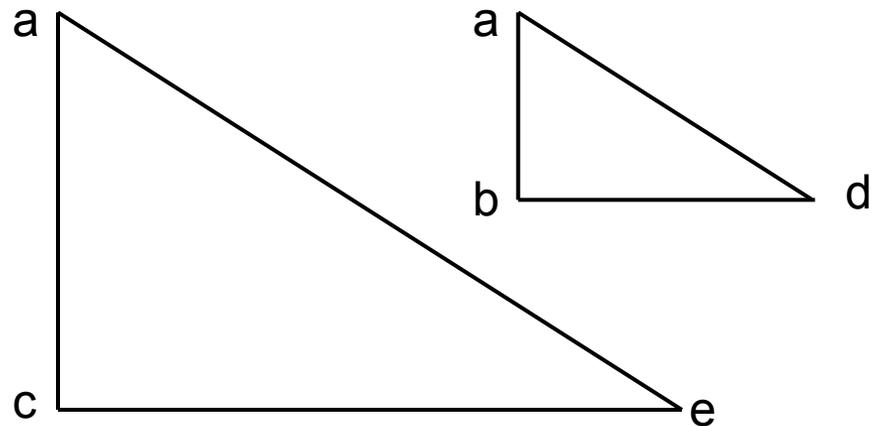
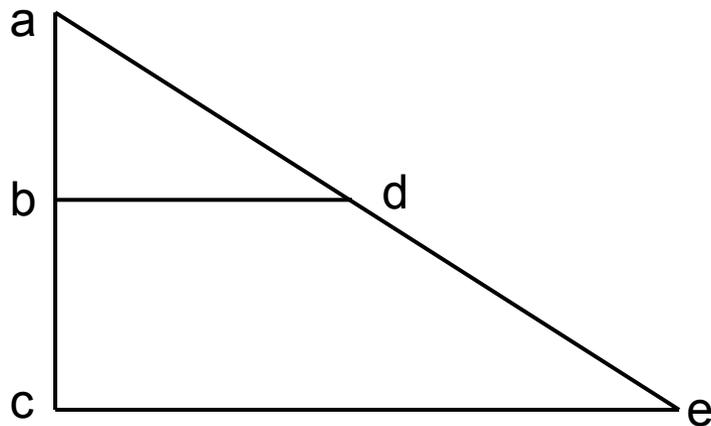
Для $M_c = \text{const}$



$$M_D - M_C = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - s) = \omega_0 - \omega_0 \cdot s$$

$$d\omega = 0 - \omega_0 \cdot ds$$



из подобия треугольников

$$\frac{s_H}{M_H} = \frac{s_y}{M_C}$$

$$M_C = M_H \cdot \frac{s_y}{s_H}$$

для двигателя

$$M_D = M_H \cdot \frac{s}{s_H}$$

все подставим в (1)

$$\frac{M_H}{s_H} \cdot s - \frac{M_H}{s_H} \cdot s_y = -J \cdot \omega_0 \cdot \frac{ds}{dt}$$

$$s - s_y = -\frac{J \cdot \omega_0 \cdot s_H}{M_H} \cdot \frac{ds}{dt}$$

$$T_M = \frac{J \cdot \omega_0 \cdot s_H}{M_H}$$

тогда

$$\frac{ds}{s - s_y} = \frac{dt}{-T_m}$$

Решение этого ДУ 1-ой степени

$$s - s_y = C_0 \cdot e^{-\frac{t}{T_m}}$$

при

$t=0$

$$s = s_{нач}$$

$$C_0 = s_{нач} - s_y$$

$$s - s_y = (s_{нач} - s_y) \cdot e^{-\frac{t}{T_m}}$$

найдем

s

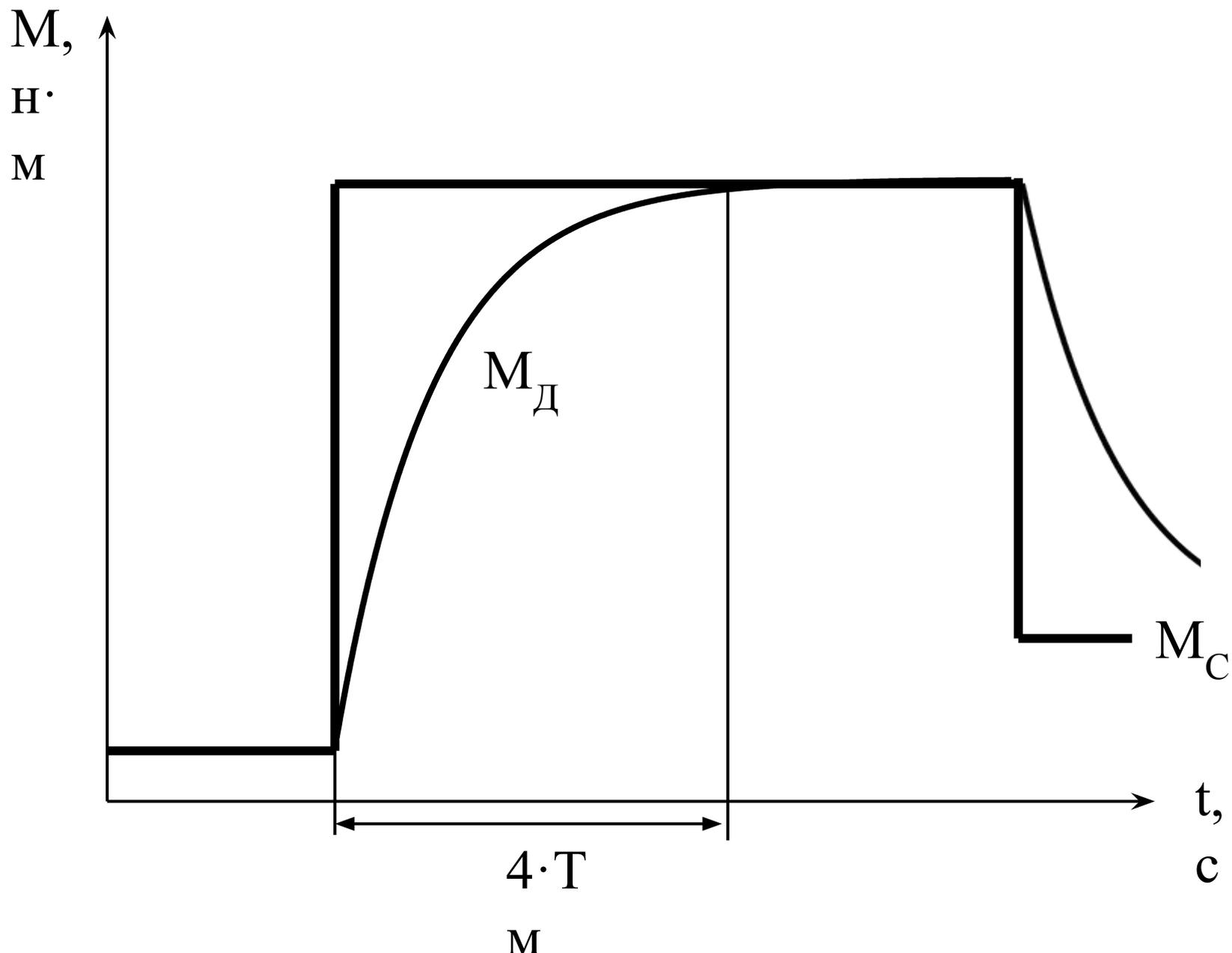
$$s = s_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right) + s_{нач} \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}$$

аналогично

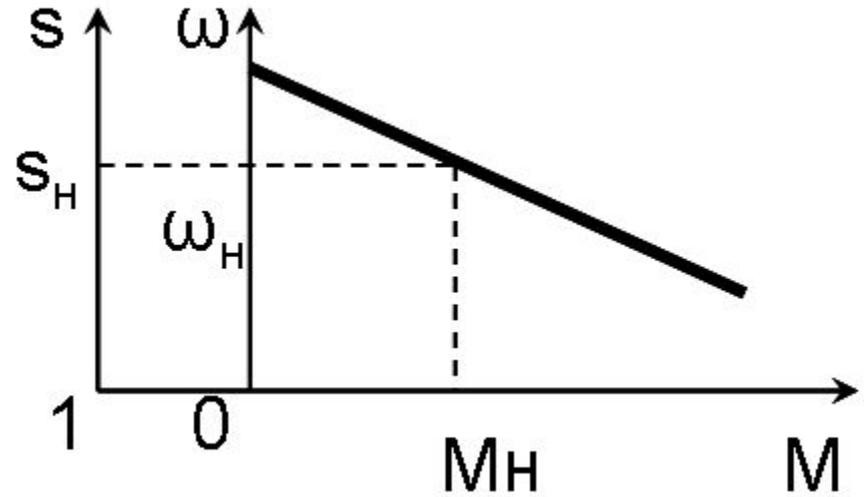
$$\omega = \omega_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right) + \omega_{нач} \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}$$

$$M = M_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right) + M_{нач} \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}$$

$$I = I_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right) + I_{нач} \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}$$



$$T_M = \frac{J \cdot \omega_0 \cdot s_H}{M_H}$$

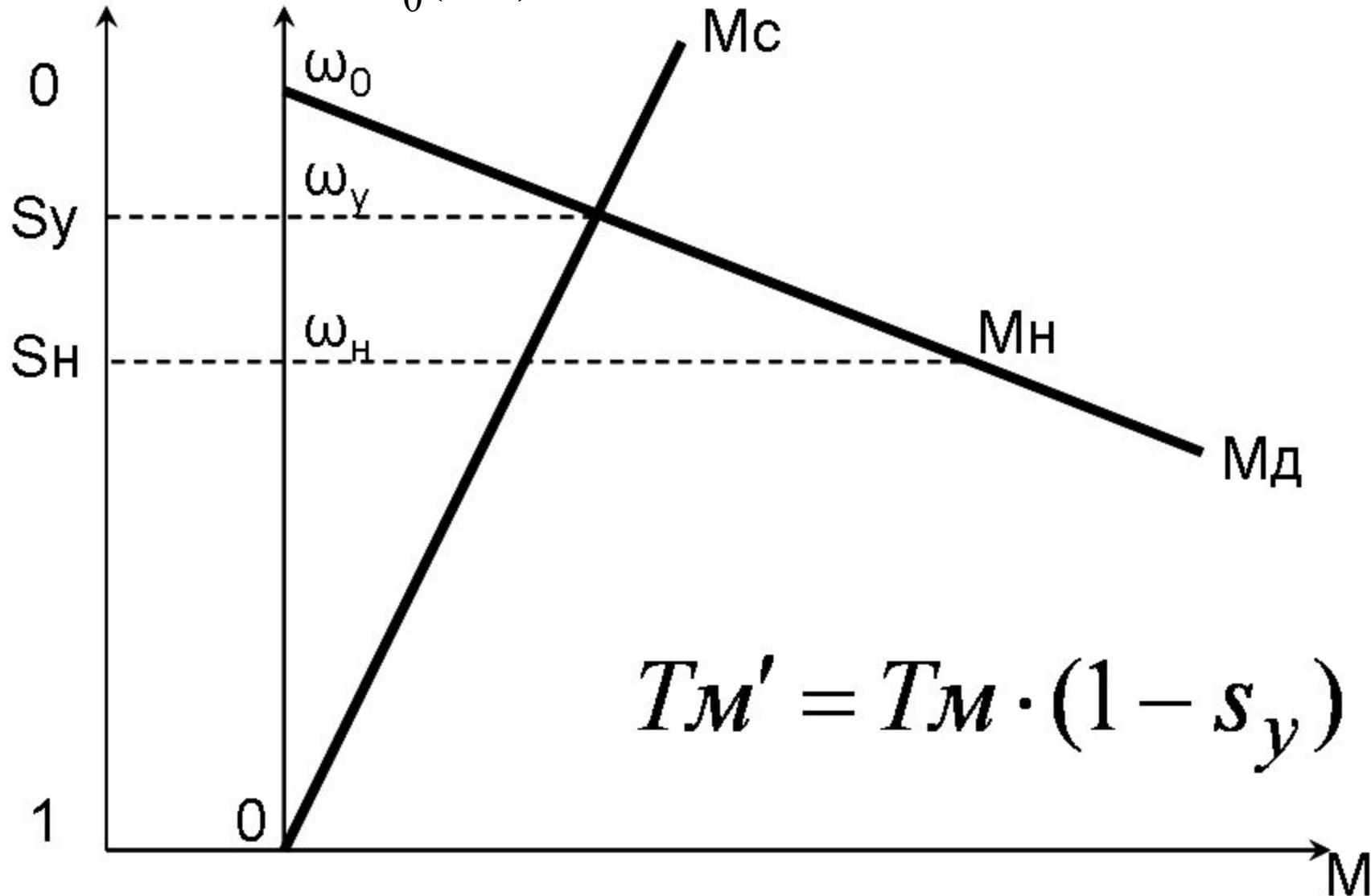


$$\frac{s_H}{M_H} = \frac{s_n}{M_{II}} = \frac{1}{M_{II}}$$

$$T_M = \frac{J \cdot \omega_0}{M_{II}}$$

$M_c \neq \text{const}$

Для
 $M_c = k \cdot \omega = k \cdot \omega_0 (1-s)$



Для решения используется графоаналитический метод основанный на записи основного уравнения в приращениях

$$M_{Д} - M_{С} = J \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad (1)$$

и допуске, что на участке $\Delta\omega$ моменты неизменны

$$\Delta t_i = \frac{J}{M_{Д_i} - M_{С_i}} \Delta\omega_i \quad (2)$$

$$\frac{M_{D_i} - M_{C_i}}{J} = \frac{\Delta\omega_i}{\Delta t_i} \quad (3)$$

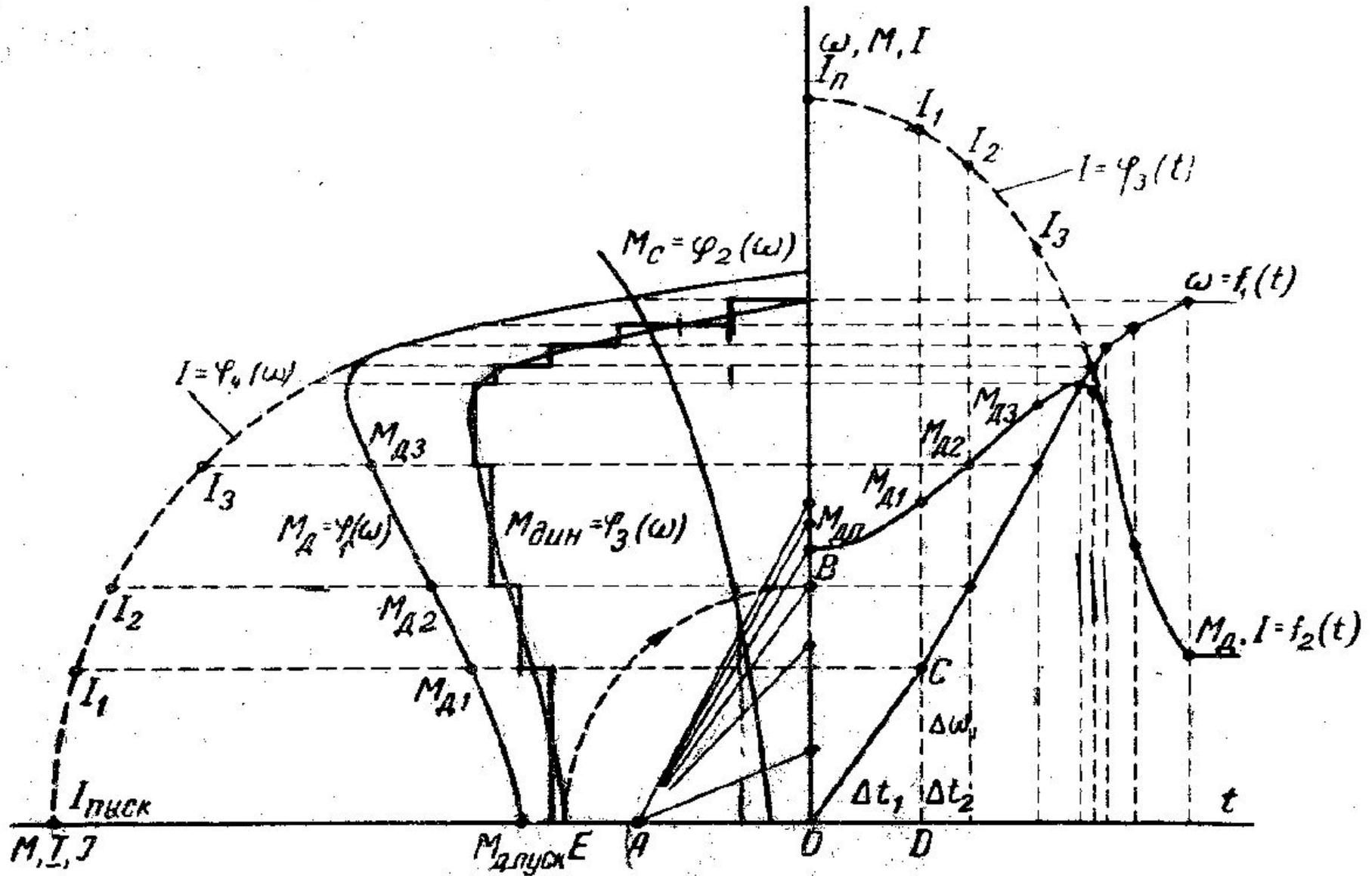
$$\frac{M_{D_i} - M_{C_i}}{\mu_M} = \frac{\Delta\omega_i}{\Delta t_i} \quad (4)$$

$$\frac{\mu_M}{J} = \frac{\mu_\omega}{\mu_t}$$

(4) справедлива если

$$\frac{\mu_M}{\mu_J} = \frac{\mu_\omega}{\mu_t} \quad (5)$$

$$\mu_M = \left[\frac{H \cdot M}{MM} \right] \quad \mu_J = \left[\frac{KZ \cdot M^2}{MM} \right]$$
$$\mu_\omega = \left[\frac{рад/c}{MM} \right] \quad \mu_t = \left[\frac{c}{MM} \right]$$



5.2 Влияние параметров АД на переходные процессы пуска и торможения.

Определим, от каких параметров в АД зависит время переходного процесса. Примем $M_C=0$ (пуск в холостую).

$$M_D - 0 = J \frac{d\omega}{dt}$$

$$\omega = \omega_0(1 - s) \quad d\omega = -\omega_0 ds$$

$$\frac{2M_K}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}} = -J \cdot \omega_0 \frac{ds}{dt}$$

Выражаем время:

$$dt = \left(\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s} \right) \left(-\frac{J \cdot \omega_0}{2M_K} \right) ds$$
$$dt = -\frac{J \cdot \omega_0 \cdot s_K}{2M_K} \left(\frac{s}{s_K^2} + \frac{1}{s} \right) ds$$

Обозначим:

$$T'' = \frac{J \cdot \omega_0 \cdot s_K}{M_K}$$

$$t = \int_{s_{\text{нач}}}^{s_{\text{кон}}} -\frac{T''}{2} \left(\frac{s}{s_K^2} + \frac{1}{s} \right) ds$$

$$t = \int_{s_{\text{кон}}}^{s_{\text{нач}}} \frac{T''}{2} \left(\frac{s}{s_K^2} + \frac{1}{s} \right) ds$$

$$t = \frac{T''}{2} \left[\frac{-s_{\text{кон}}^2 + s_{\text{нач}}^2}{2s_k^2} + \ln \left(\frac{s_{\text{нач}}}{s_{\text{кон}}} \right) \right]$$

Из этого выражения следует что время переходного процесса зависит от

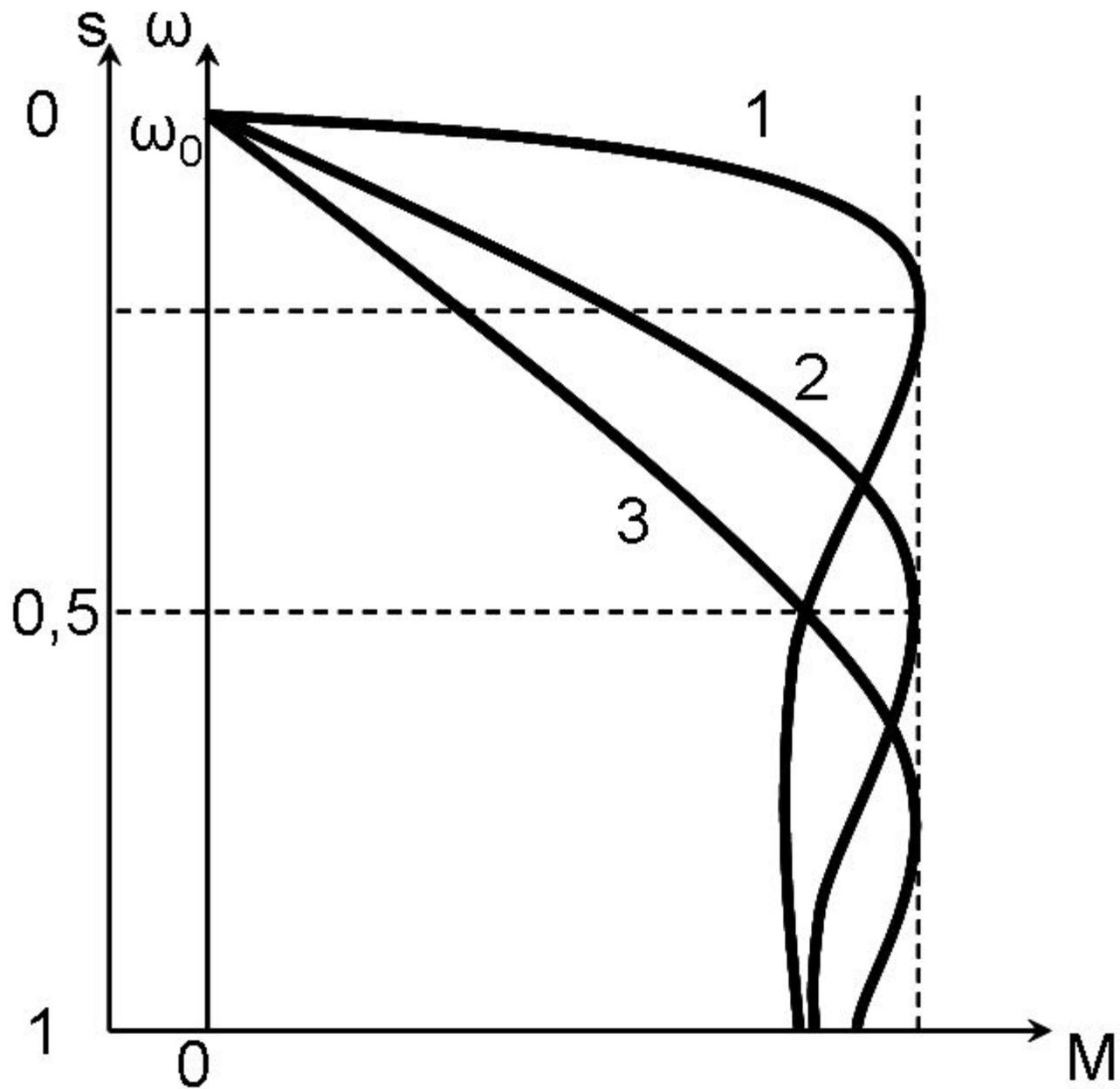
$$T'', s_k, s_{\text{нач}} \text{ и } s_{\text{кон}}$$

$$\frac{dt}{ds_K} = 0, \text{ то } S_{\text{крит}} = \sqrt{\frac{S_{\text{нач}}^2 - S_{\text{кон}}^2}{2 \ln\left(\frac{S_{\text{нач}}}{S_{\text{кон}}}\right)}}$$

1) Пуск

$$S_{\text{нач}} = 1, \quad S_{\text{кон}} \approx 0,05$$

$$S_{\text{крит}}^{\text{пуск}} = \sqrt{\frac{1^2 - 0,05^2}{2 \ln\left(\frac{1}{0,05}\right)}} = 0,408$$

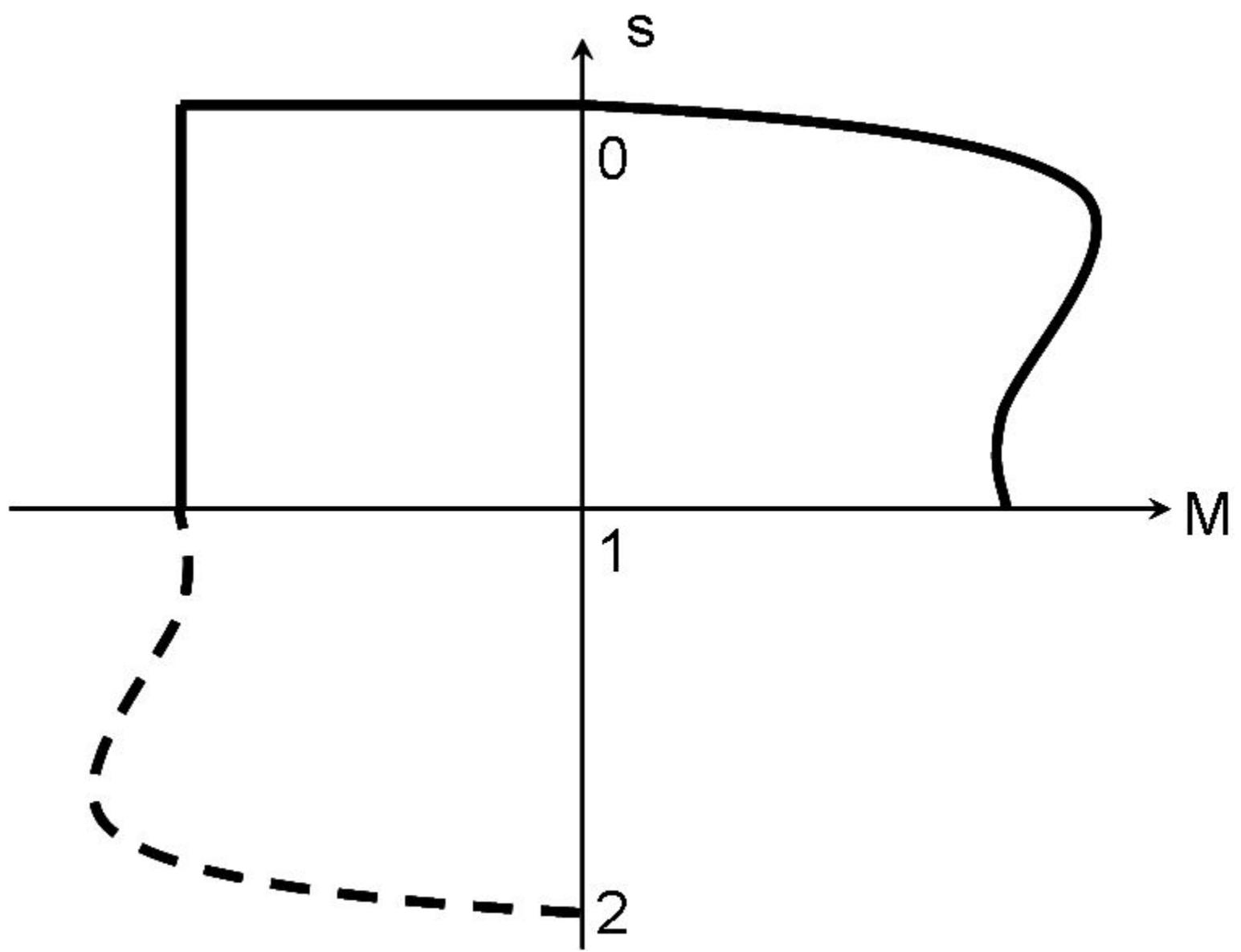


Чем больше $s_{\text{кон}}$,
тем больше время
разгона

2) Торможение противовключением:

$$S_{нач} = 2, \quad S_{кон} = 1$$

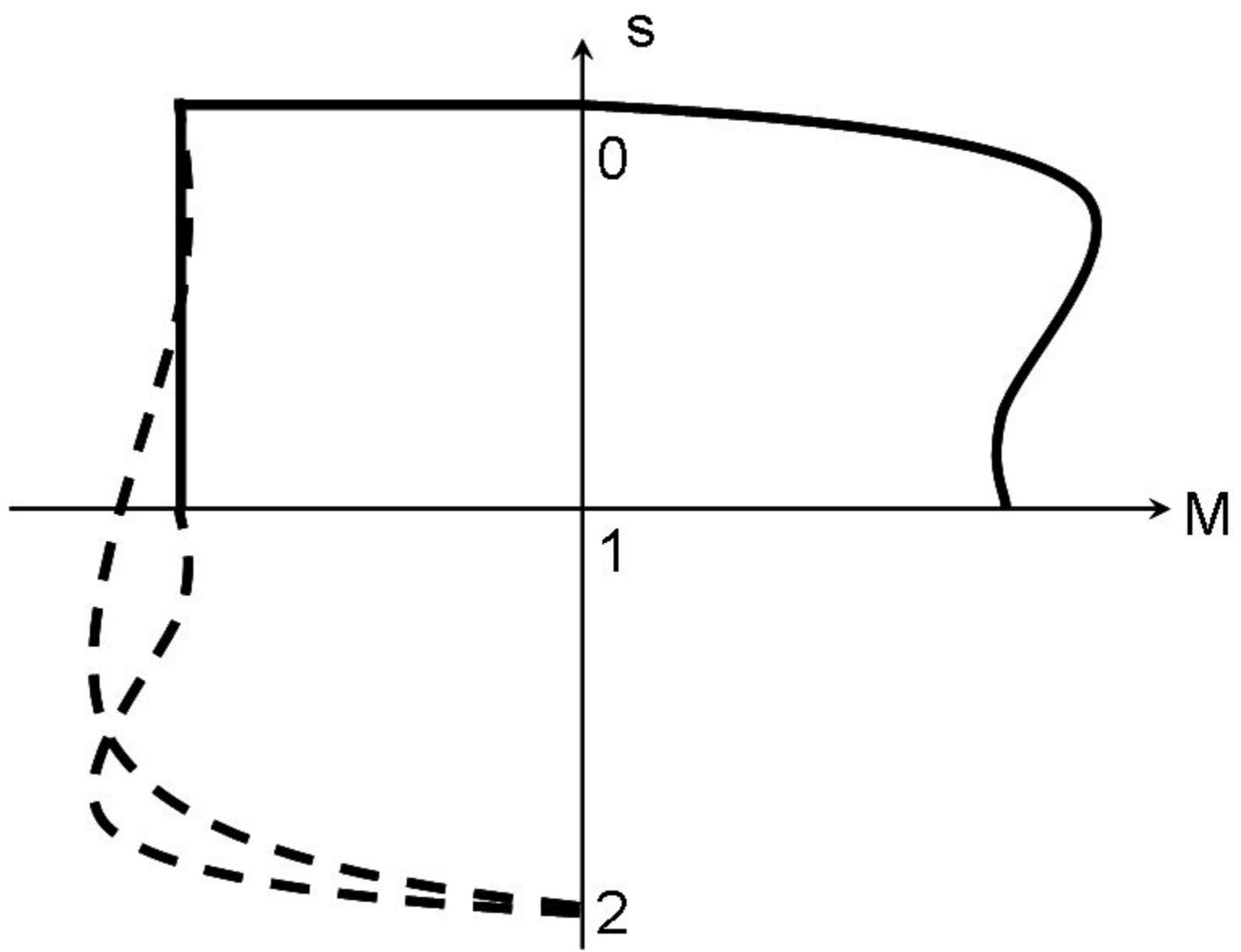
$$S_{кр\text{ опт торм}} = \sqrt{\frac{2^2 - 1^2}{2 \ln\left(\frac{2}{1}\right)}} = 1,471$$



3) Реверс:

$$S_{нач} = 2, \quad S_{кон} = 0,05$$

$$S_{\substack{кр\text{онт} \\ ревр.}} = \sqrt{\frac{2^2 - 0,05^2}{2 \ln\left(\frac{2}{0,05}\right)}} = 0,736$$



Вывод:

Наименьшее время пуска у двигателя с повышенным скольжением и у асинхронного двигателя с фазным ротором при включенных резисторах.

5.3 Потери мощности и энергии при переходных процессах. Способы снижения потерь энергии.

Предположим: $\Delta P_{\text{пост}} = 0$ и $I_0 = 0$

тогда: $\Delta W = \Delta W_{\text{ст}} + \Delta W_{\text{ром}}$

$$\Delta W = \int_0^{t_{\Pi}} \left(3 \cdot I_1^2 \cdot R_1 \right) dt +$$

$$+ \int_0^{t_{\Pi}} \left(3 \cdot I_2'^2 \cdot R_2' \right) dt$$

$$\Delta W = 3 \int_0^{t_{\Pi}} I_2'^2 \cdot (R_1 + R_2') dt$$

$$\Delta W = \int_0^{t_{\Pi}} \Delta P_2' \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) dt$$

$$\Delta P_2' = M \cdot \omega_0 \cdot s$$

Основное уравнение электропривода:

$$M_{\text{Д}} - M_{\text{С}} = J \frac{d\omega}{dt}$$

при

$$M_{\text{С}} = 0 \quad M_{\text{Д}} = J \frac{d\omega}{dt}$$

$$M_{\text{Д}} = -J\omega_0 \frac{ds}{dt}$$

$$dt = -\frac{J\omega_0}{M_{\text{Д}}} ds$$

Предположим: $\Delta P_{\text{пост}} = 0$ и $I_0 = 0$

$$\Delta W = \int_{s_{\text{нач}}}^{s_{\text{кон}}} \left[-M \cdot \omega_0 \cdot s \left(1 + \frac{R_1}{R'_2} \right) \frac{J \cdot \omega_0}{M_{\text{Д}}} \right] ds$$

при $M = M_{\text{Д}}$

$$\Delta W = \int_{s_{\text{кон}}}^{s_{\text{нач}}} \left[J \cdot \omega_0^2 \cdot s \left(1 + \frac{R_1}{R'_2} \right) \right] ds$$

$$\Delta W = J \cdot \omega_0^2 \left(1 + \frac{R_1}{R'_2} \right) \frac{s_{нач}^2 - s_{кон}^2}{2}$$

$$\Delta W = f \left(J, \omega_0, \frac{R_1}{R'_2}, s_{нач}, s_{кон} \right)$$

Потери энергии при пуске:

$$s_{нач} = 1, \quad s_{кон} = 0$$

$$\Delta W_{II} = \frac{J \cdot \omega_0^2}{2} + \frac{J \cdot \omega_0^2}{2} \cdot \frac{R_1}{R'_2}$$

Потери энергии в роторе не зависят от параметров двигателя, в статоре – зависят.

Торможение противовключением:

$$s_{нач} = 2, \quad s_{кон} = 1$$

$$\Delta W_{торм} = \frac{J \cdot \omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R'_2} \right) (2^2 - 1^2)$$

$$\Delta W_{торм} = 3 \Delta W_{\Pi}$$

Реверс:

$$s_{нач} = 2, \quad s_{кон} = 0$$

$$\Delta W_{ревр.} = \frac{J \cdot \omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R'_2} \right) (2^2 - 0^2)$$

$$\Delta W_{ревр.} = 4 \Delta W_{II}$$

для уменьшения потерь энергии при пуске необходимо обеспечивать плавный пуск.

5.4 Уравнения нагревания и охлаждения электродвигателя. Переходные процессы при нагревании и охлаждении.

Уравнение потерь:

$$\Delta P dt = A \cdot \tau dt + C d\tau$$

$$\Delta P = P \left(\frac{1 - \eta}{\eta} \right)$$

где **P** – нагрузка на валу;

A – теплоотдача двигателя $A = A_0 \cdot F$;

F – площадь поверхности двигателя;

A₀ – удельная теплоотдача двигателя.

$$A = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{C} \cdot \text{с}} \right] \quad A_0 = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{C} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^2} \right]$$

τ – превышение температуры;

$$\tau = \Theta_{дв} - \Theta_{окр.ср}$$

$\Theta_{дв}$ – температура обмотки эл.д.;

$\Theta_{окр.ср}$ – температура окружающей среды;

$$A = \frac{\Delta P}{\tau_{доп}}$$

где $\tau_{доп}$ определяется классом изоляции обмотки.

класс	$\tau_{доп}$	$\Theta_{дв}$
E	80°C	120°C
B	90°C	130°C
F	115°C	155°C

C – теплоемкость двигателя, Дж/°С;

$$C = C_{уд} \cdot m$$

$C_{уд}$ – удельная теплоемкость, Дж/°С·кг.

Теплоемкость двигателя состоит из теплоемкостей обмотки, стали и корпуса.

Для корпуса из алюминия $C=480$ Дж/°С·кг.

Для чугуна $C=560$ Дж/°С·кг.

Предположим теплоотдача $A=0$. Это соответствует первому мгновению пуска двигателя.

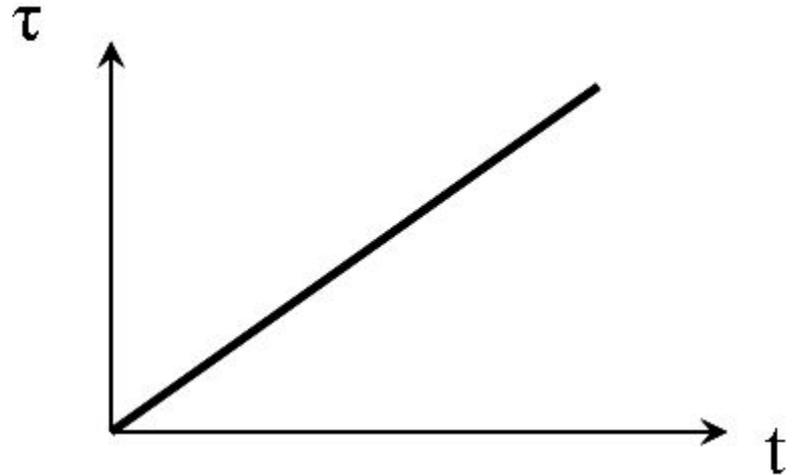
$$\Delta P dt = C d\tau$$

$$d\tau = \frac{\Delta P dt}{C}$$

$$\tau = \frac{\Delta P}{C} (t_2 - t_1)$$

при $t_1=0$

$$\tau = \frac{\Delta P}{C} t_2$$



Предположим $A \neq 0$. Разделим уравнение на $A dt$

$$\frac{\Delta P dt}{A dt} = \tau + \frac{C}{A} \cdot \frac{d\tau}{dt}$$

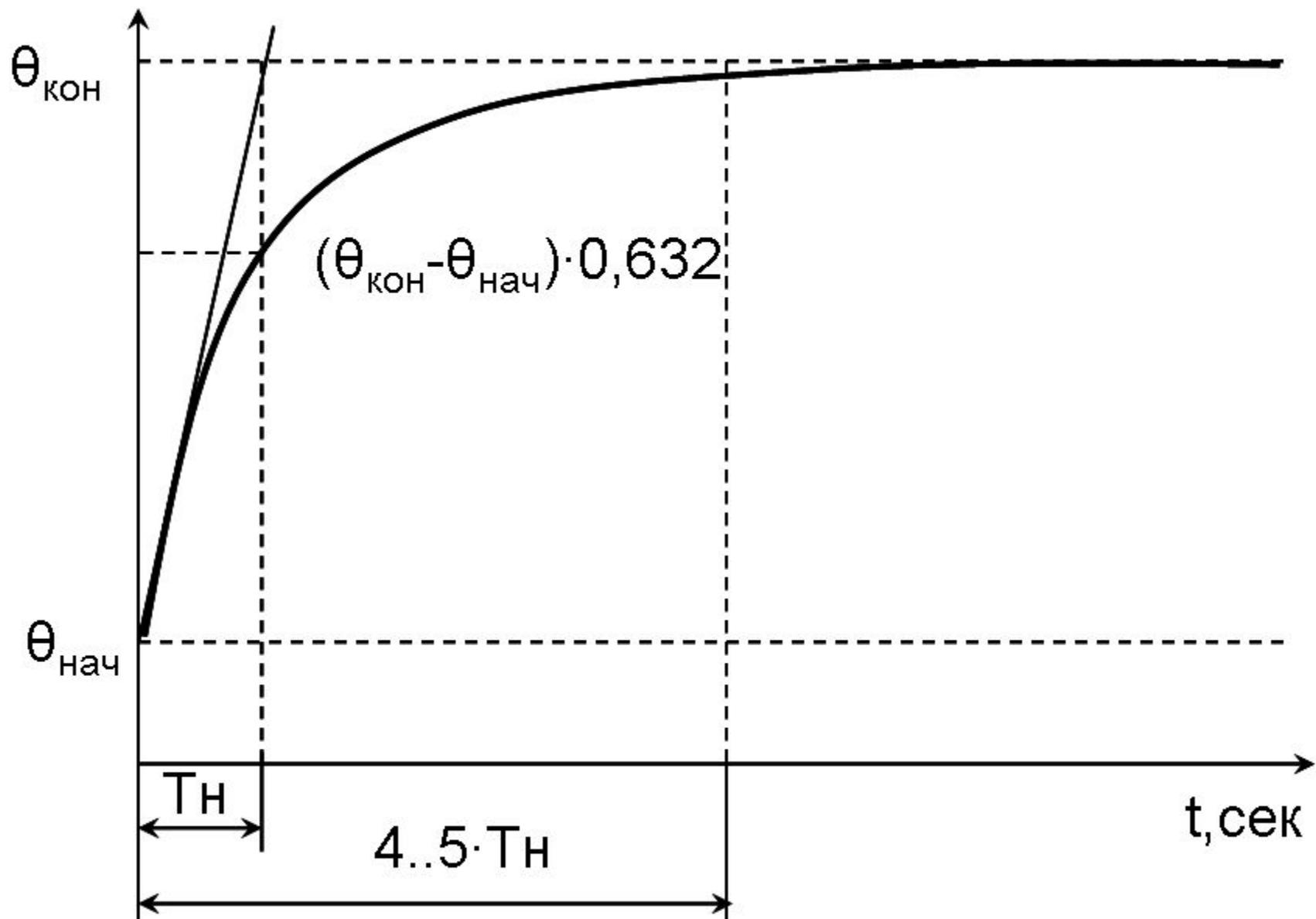
$$\tau_{уст} = \frac{\Delta \mathcal{E}}{A} \quad \text{---} = T_H$$

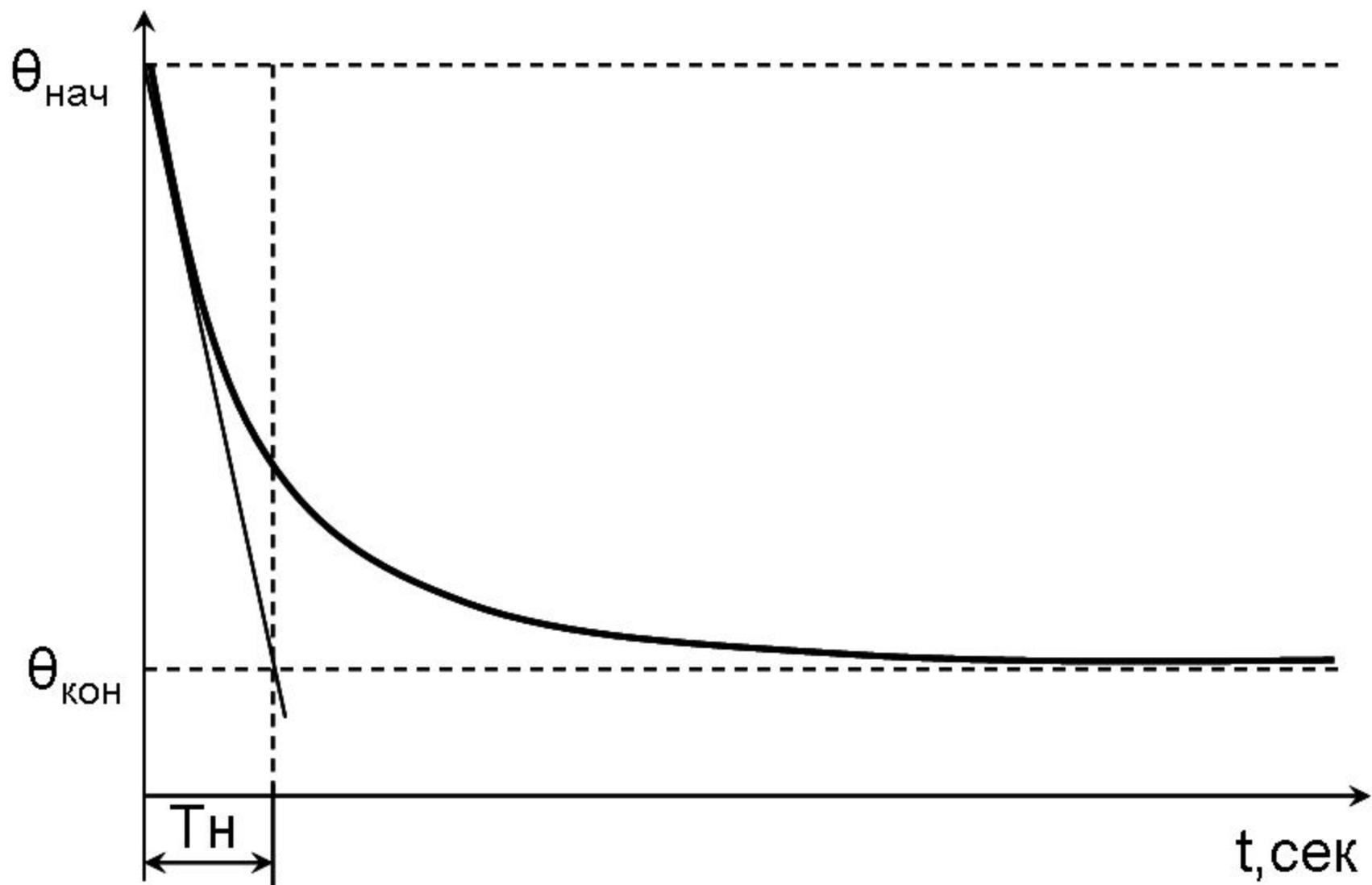
$$\tau_{уст} = \tau + T_H \cdot \frac{d\tau}{dt}$$

T_H – постоянная нагрева эл.д.

$$T_H \frac{d\tau}{dt} + \tau - \tau_{уст} = 0$$

$$\tau = \tau_{уст} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_H}} \right) + \tau_{нач} \cdot e^{-\frac{t}{T_H}}$$

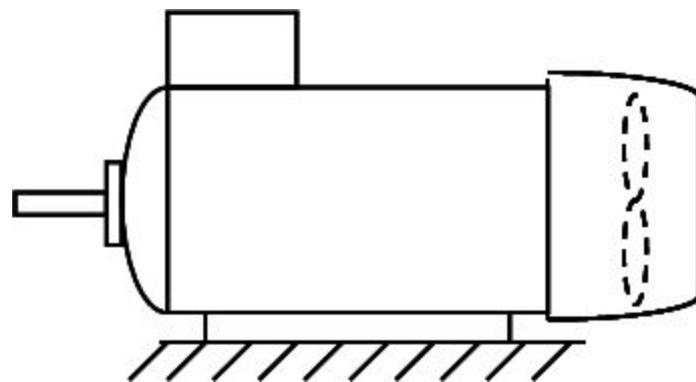




закрытые обдуваемые
двигатели, степень
защиты IP54

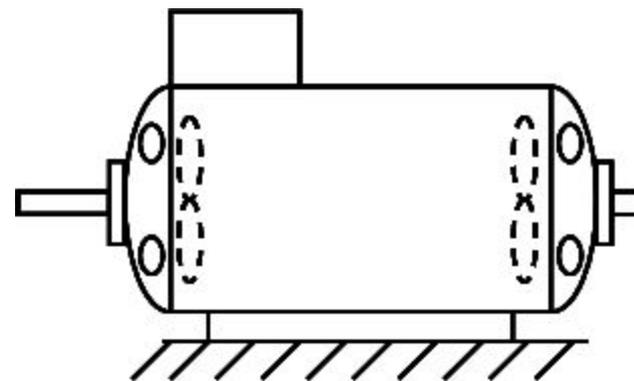
β_0 – коэффициент
ухудшения теплоотдачи

$\beta_0 = 0,45 \dots 0,55$

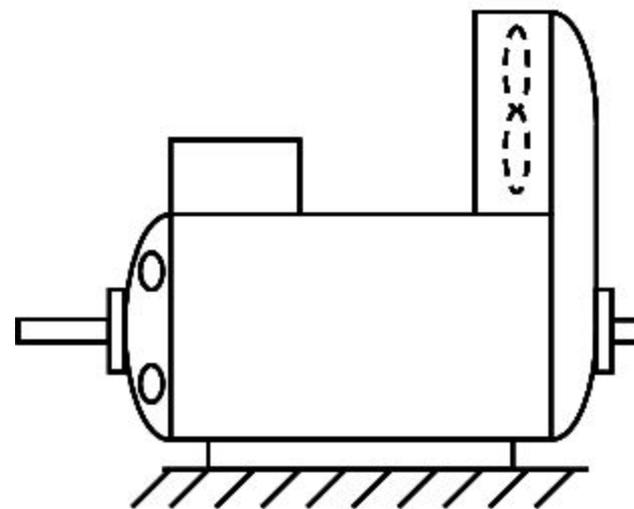


$$\frac{T_H}{\beta_0} = T_0$$

защищенные
двигатели, степень
защиты IP23
 $\beta_0 = 0,3 \dots 0,35$



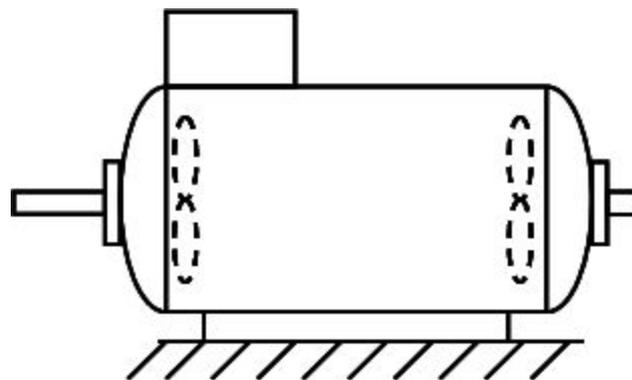
двигатель с наездником
 $\beta_0 = 1$



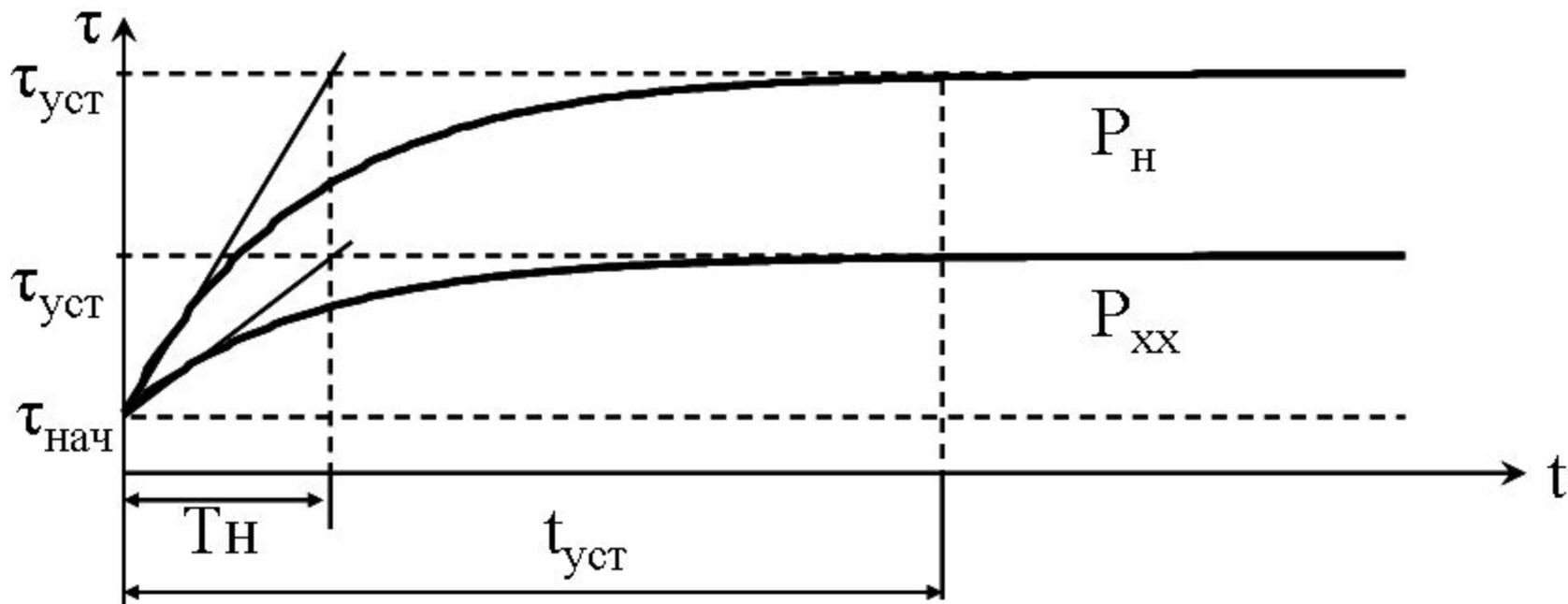
замкнутые не обдуваемые, степень

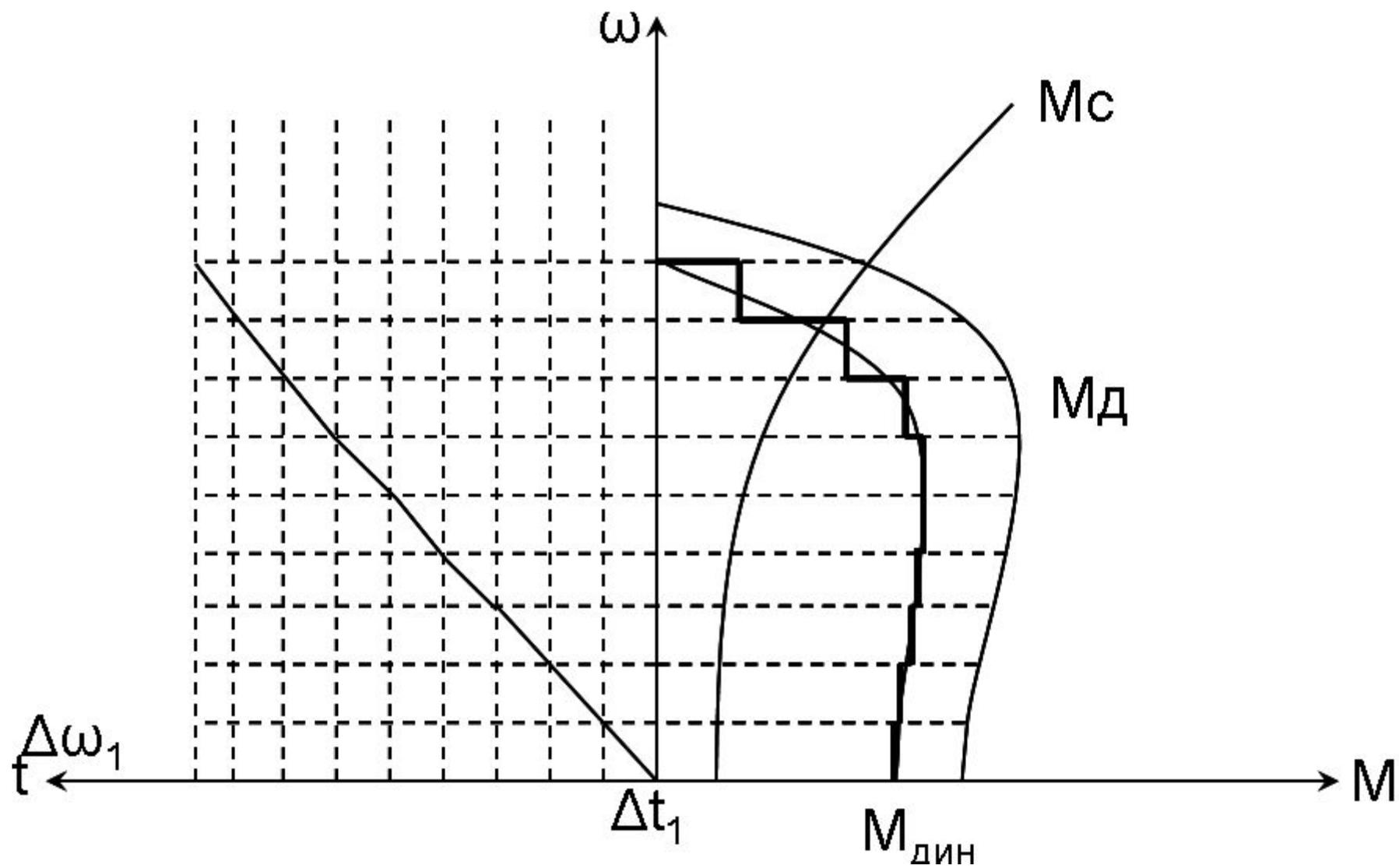
защиты IP64

$\beta_0 = 0,98$



Нагревание двигателя при разных нагрузках





$$\frac{M}{M_{\text{макс}}} = \frac{2}{\frac{S_{\text{кр}}}{S} + \frac{S}{S_{\text{кр}}}}$$

$$\Delta t_i = J \frac{\Delta \omega_i}{M_{\text{дин}}}$$