

Лекция 7

*Расчет требуемой мощности
электродвигателя привода
при различных режимах
работы*

- 1. Режимы работы электроприводов и их характеристики.**
- 2. Расчет требуемой мощности двигателя для продолжительного режима.**
- 3. Расчет требуемой мощности двигателя электропривода для кратковременного и повторно-кратковременного режимов.**
- 4. Расчет требуемой мощности двигателя при перемежающихся режимах и в регулируемых электроприводах.**

6.1 Режимы работы электроприводов и их характеристики.

По ГОСТу режимы э.п. делятся на восемь групп и зависят от характера изменения нагрузки определяемой по нагрузочной диаграмме.

$$M_C = f(t)$$

$$P_C = f(t)$$

$$I = f(t)$$

В отношении характера изменения статического момента производственные механизмы могут быть разделены на следующие группы:

Первая группа. Механизмы, у которых статический момент остается постоянным, не зависящим от скорости. К этим механизмам относятся шахтный подъемник с уравновешенным канатом, прокатный стан, механизмы подъема мостового крана, лифт, механизмы, основная работа которых связана с преодолением сил трения.

$$M_C = \text{const}$$

Вторая группа. Механизмы, статический момент которых зависит от угловой скорости, например центробежный вентилятор, центрифуга, дымосос, центробежный насос и т. п.:

$$M_C = M_0 + k \cdot \omega^2$$

К этой же группе могут быть отнесены тяговые транспортные механизмы, главные приводы металлорежущих станков и т. п., для которых характерным является постоянство мощности нагрузки, т. е.

$$M \cdot \omega = const$$

Третья группа. Механизмы, у которых статический момент зависит от пути. Сюда относятся устройства с кривошипными передачами, где нагрузки изменяются в зависимости от угла поворота кривошипа φ ,—это ножницы для разрезания металла, прессы, поршневые компрессоры, шахтные подъемники с неуравновешенным канатом и т. п. Для этой группы механизмов справедливо при указании области (задания функции) уравнение

$$M_C = M_0 + M_A \cdot \sin \varphi$$

здесь M_0 , M_A — соответственно момент холостого хода механизма и максимальный момент.

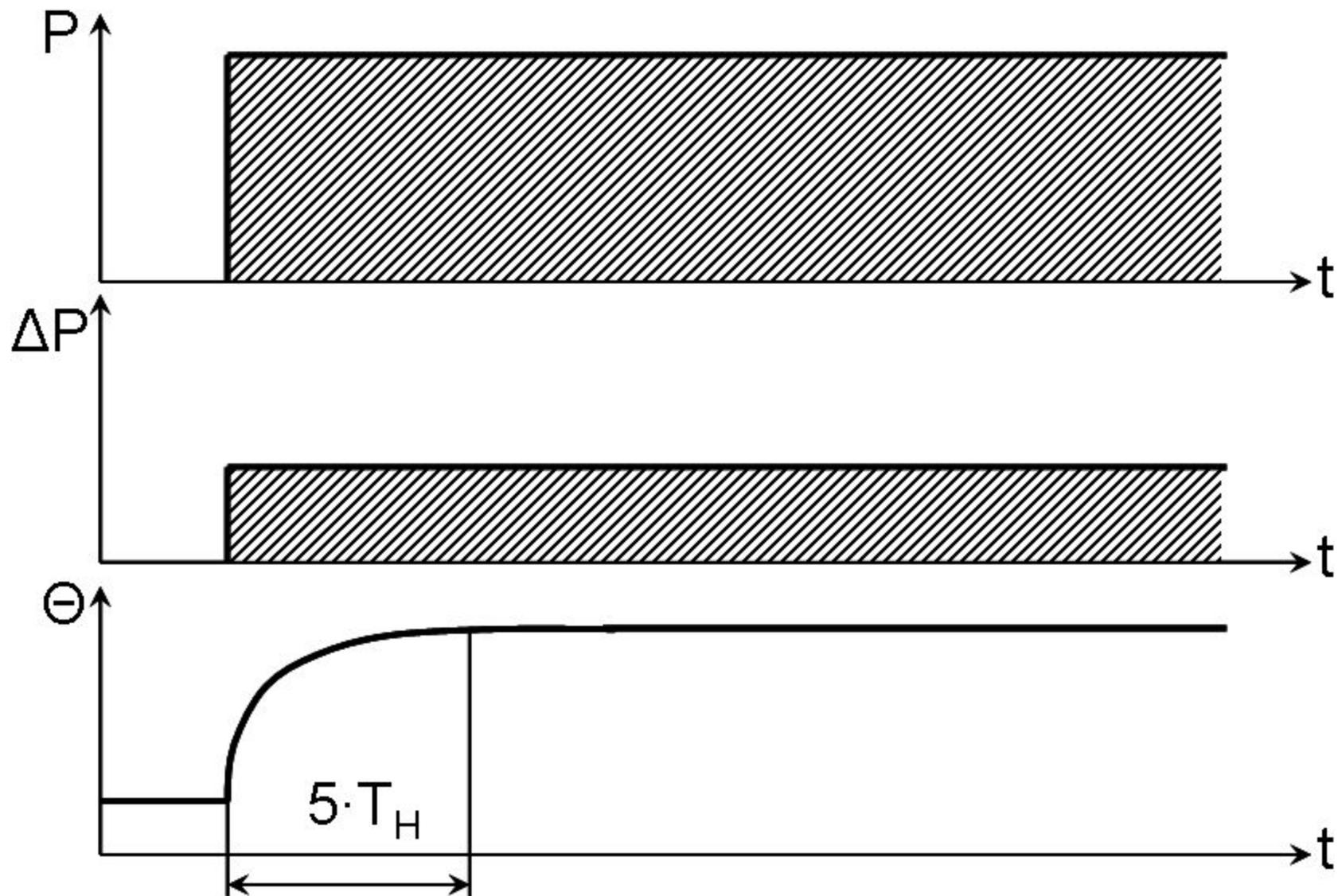
Четвертая группа. В эту группу входят механизмы, у которых статический момент зависит от скорости и пути. Здесь примером может служить гребной винт судовой установки.

Пятая группа. Сюда можно отнести механизмы, у которых статический момент характеризуется случайным изменением во времени. Это, например, камнедробилки, шаровые мельницы в цементной промышленности и т. п.

Различные условия работы производственных механизмов обуславливают различные режимы работы электроприводов, которые классифицируются на восемь групп с условными обозначениями от S1 до S8, что позволяет более точно рассчитывать мощность двигателя.

1. Продолжительным номинальным режимом работы (S1) электрической машины называется режим работы ее при неизменной нагрузке, продолжающийся столько времени, что превышения температуры всех частей ее достигают установившихся значений.

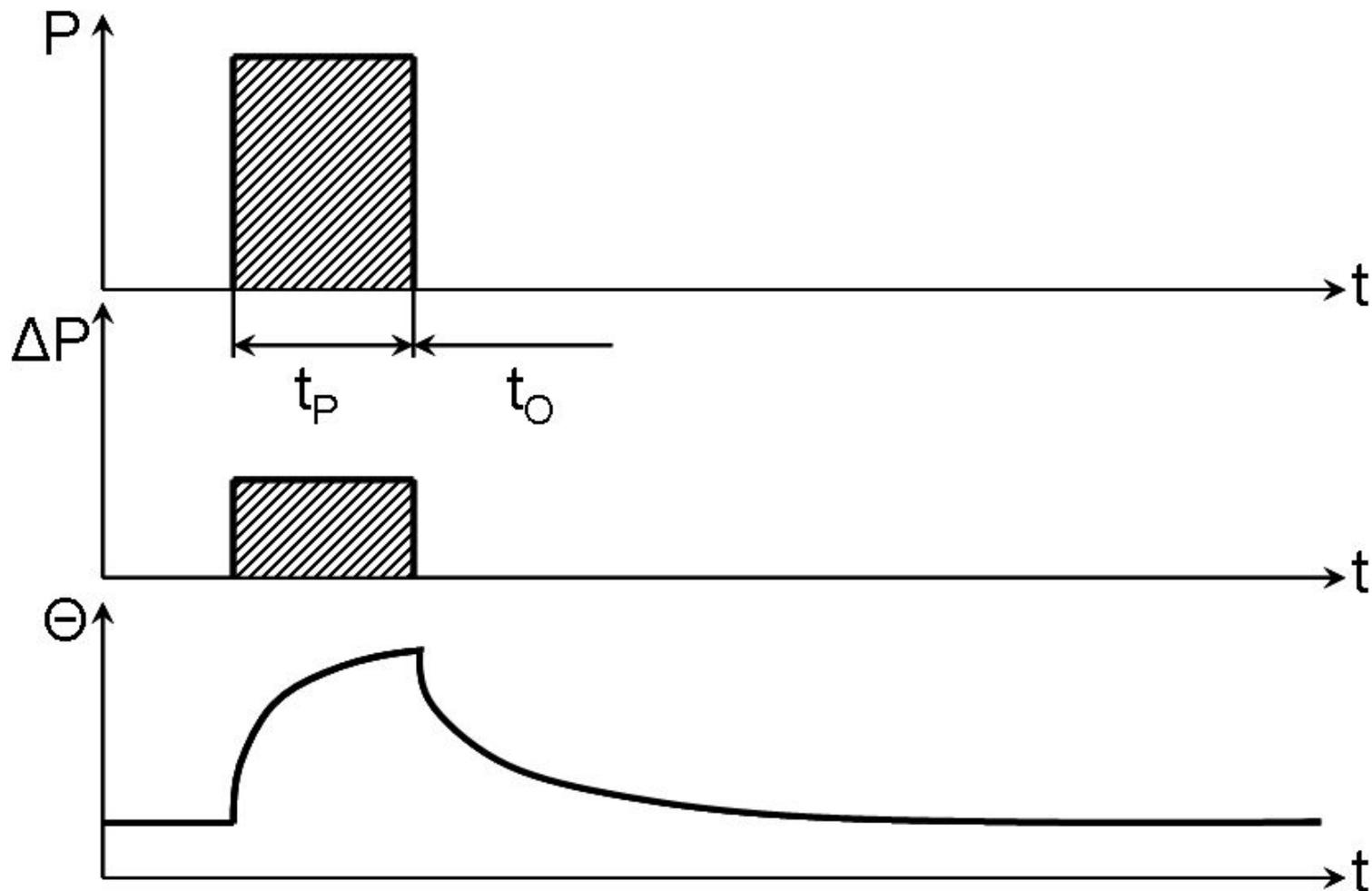
S1 – продолжительный режим работы: $t_p \geq 5 \cdot T_H$



2. Кратковременным номинальным режимом работы (S2) называется режим, при котором периоды неизменной номинальной нагрузки чередуются с периодами отключения машины; при этом периоды нагрузки не настолько длительны, чтобы превышения температуры машины могли достигнуть установившихся значений, а периоды остановки настолько длительны, что все части ее охлаждаются до температуры окружающей среды. В этом режиме рекомендуются продолжительности рабочего периода: 10, 30, 60 и 90 мин.

S2 – кратковременный режим работы: $t_p \leq 5 \cdot T_H$

$$t_0 \geq 5 \cdot T_0$$



3. Повторно-кратковременным номинальным режимом работы (S3) называется режим, при котором кратковременные периоды неизменной номинальной нагрузки (рабочие периоды) чередуются с периодами отключения машины (паузами), причем как рабочие периоды, так и паузы не настолько длительны, чтобы превышения температуры могли достигнуть установившихся значений.

В этом режиме работы продолжительность цикла не превышает 10 мин, и режим характеризуется относительной продолжительностью включения, %, ПВ = 15, 25, 40 и 60 %, которая определяется по формуле

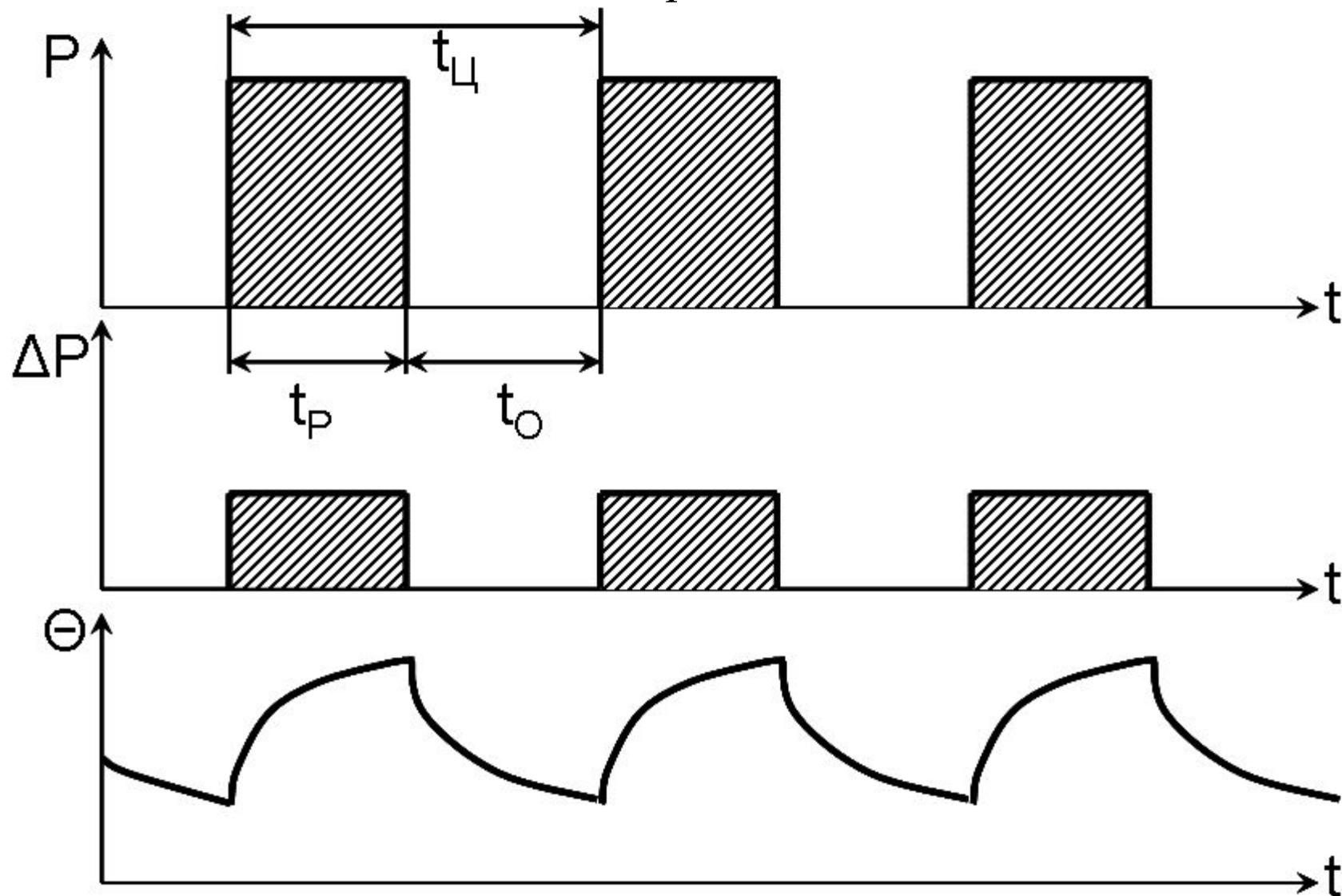
$$ПВ = \frac{t_P}{t_P + t_0} \cdot 100 = \frac{t_P}{t_{Ц}} \cdot 100$$

где t_P — время работы; t_0 — время паузы; $t_{Ц}$ — время цикла.

Пусковые потери в этом режиме практически не оказывают влияния на превышение температуры частей машины.

S3 – повторно-кратковременный режим работы:

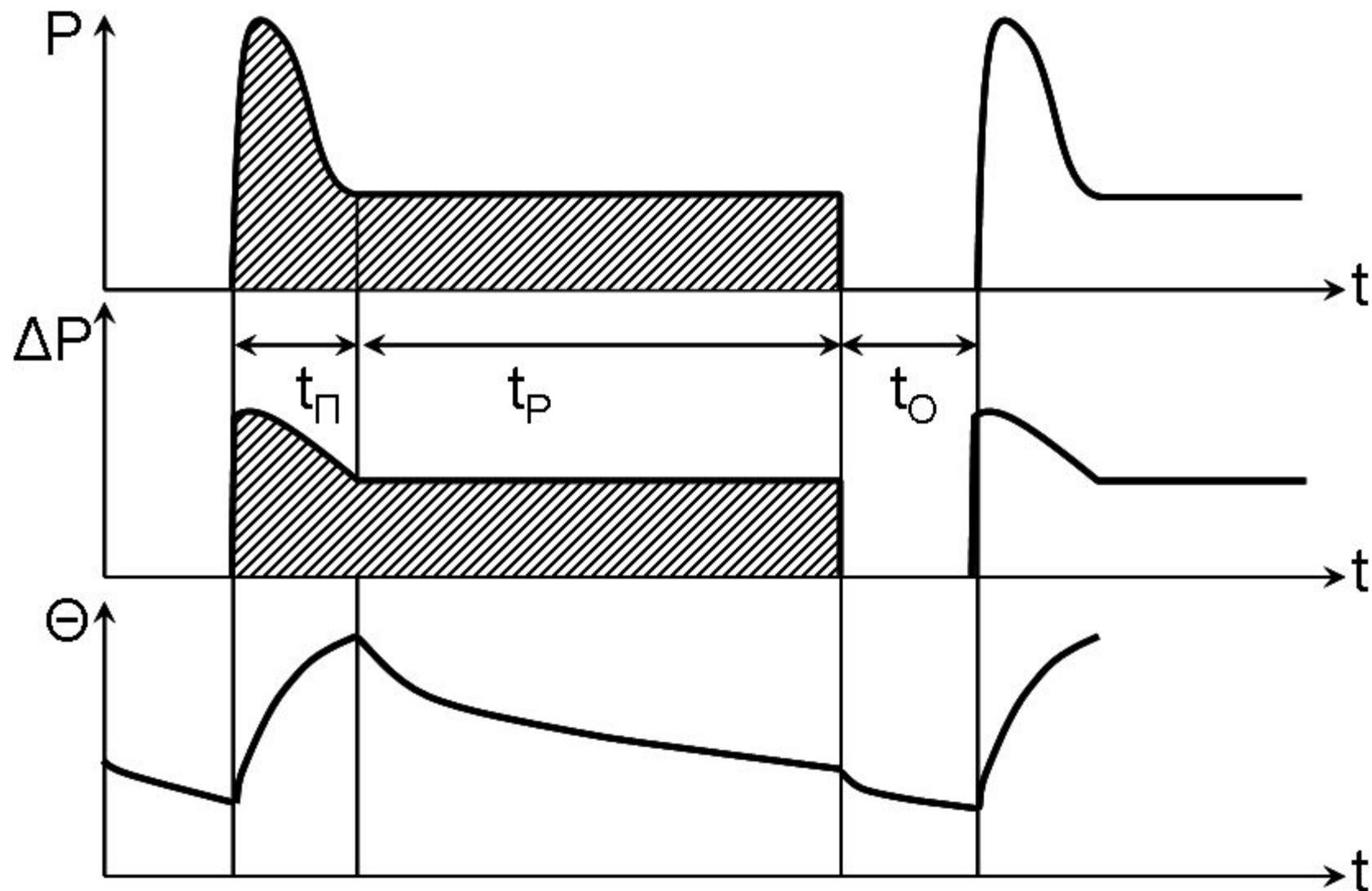
$$t_p \leq 5 \cdot T_H, \quad t_0 \leq 5 \cdot T_0$$



4. *Повторно-кратковременным номинальным режимом работы с частыми пусками (S4)*

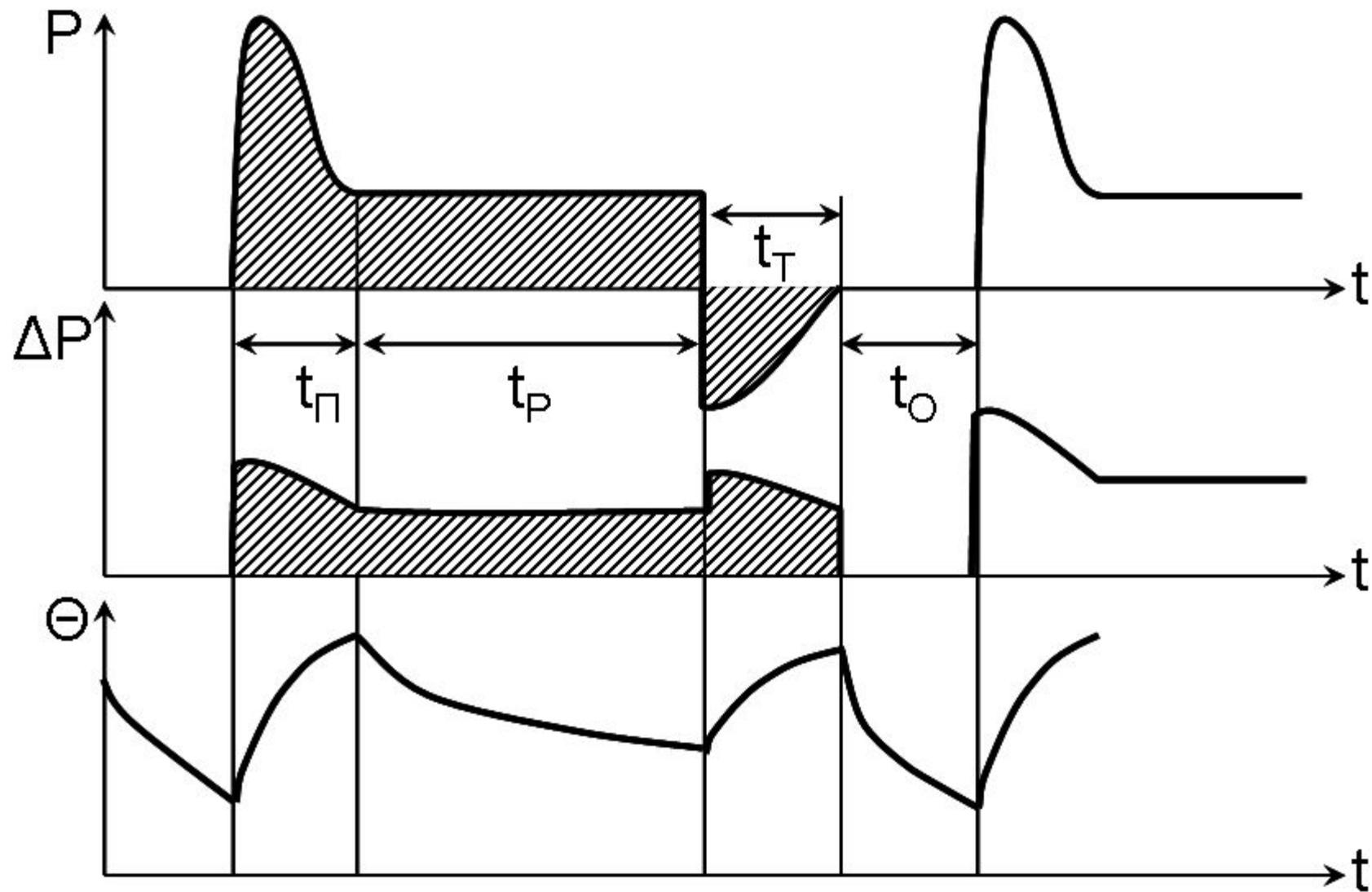
называется режим, при котором периоды пуска и кратковременной неизменной номинальной нагрузки чередуются с периодами отключения машины, причем как рабочие периоды, так и паузы не настолько длительны, чтобы превышения температуры частей машины могли достигнуть установившихся значений. В этом режиме *пусковые потери* оказывают существенное влияние на превышение температуры частей машины. Данный режим характеризуется числом пусков в час.

S4 – повторно-кратковременный номинальный режим работы с частыми пусками:



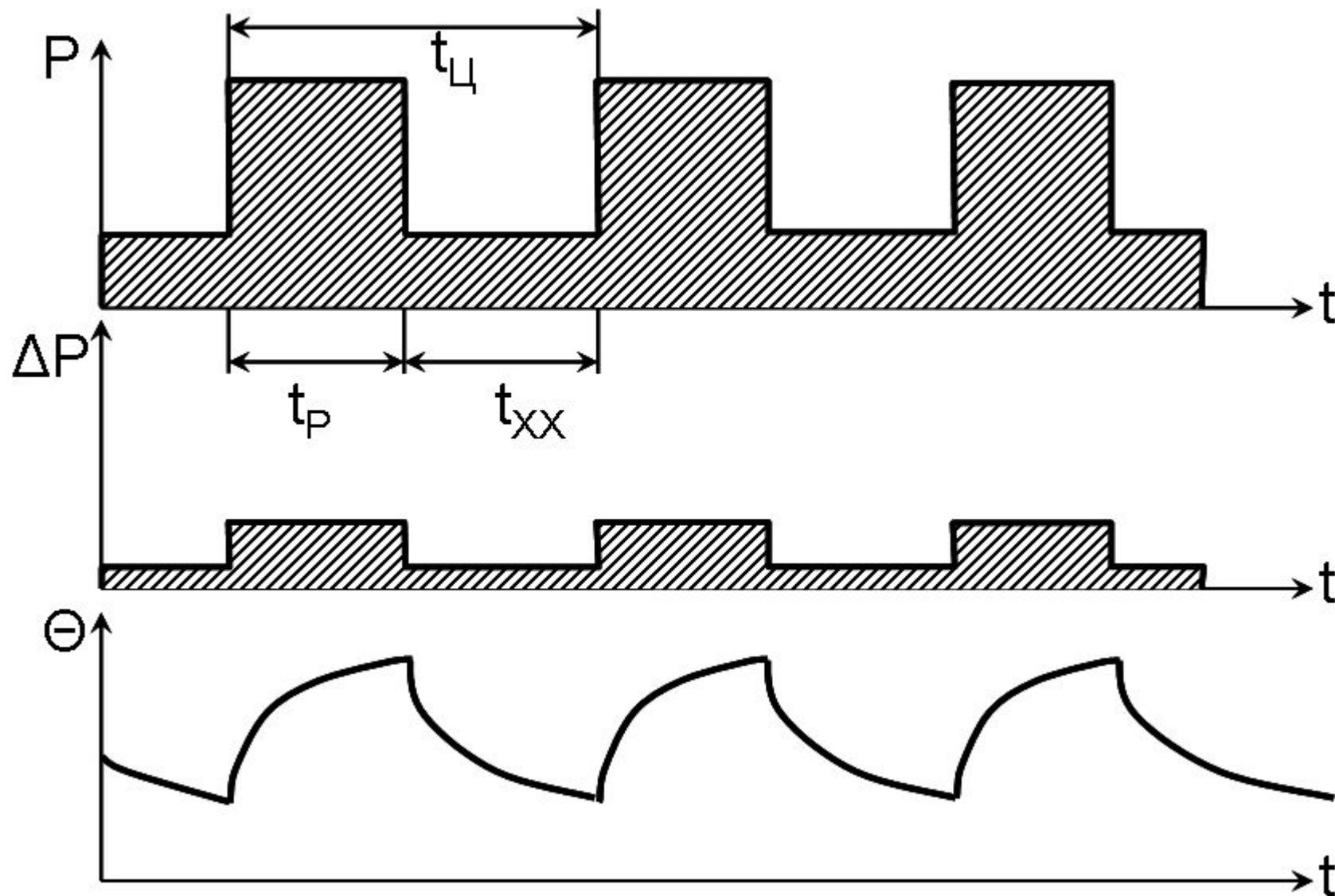
5. Повторно-кратковременным номинальным режимом работы с частыми пусками и электрическим торможением (S5) называется режим, при котором периоды пуска, кратковременной неизменной номинальной нагрузки и электрического торможения чередуются с периодами отключения машины, причем как рабочие периоды, так и паузы не настолько длительны, чтобы превышения температуры частей машины могли достигнуть установившихся значений. В этом режиме *потери пусковые и при электрическом торможении* оказывают существенное влияние на превышение температуры частей машины.

S5 – повторно-кратковременный номинальный режим работы с частыми пусками и электрическим торможением:



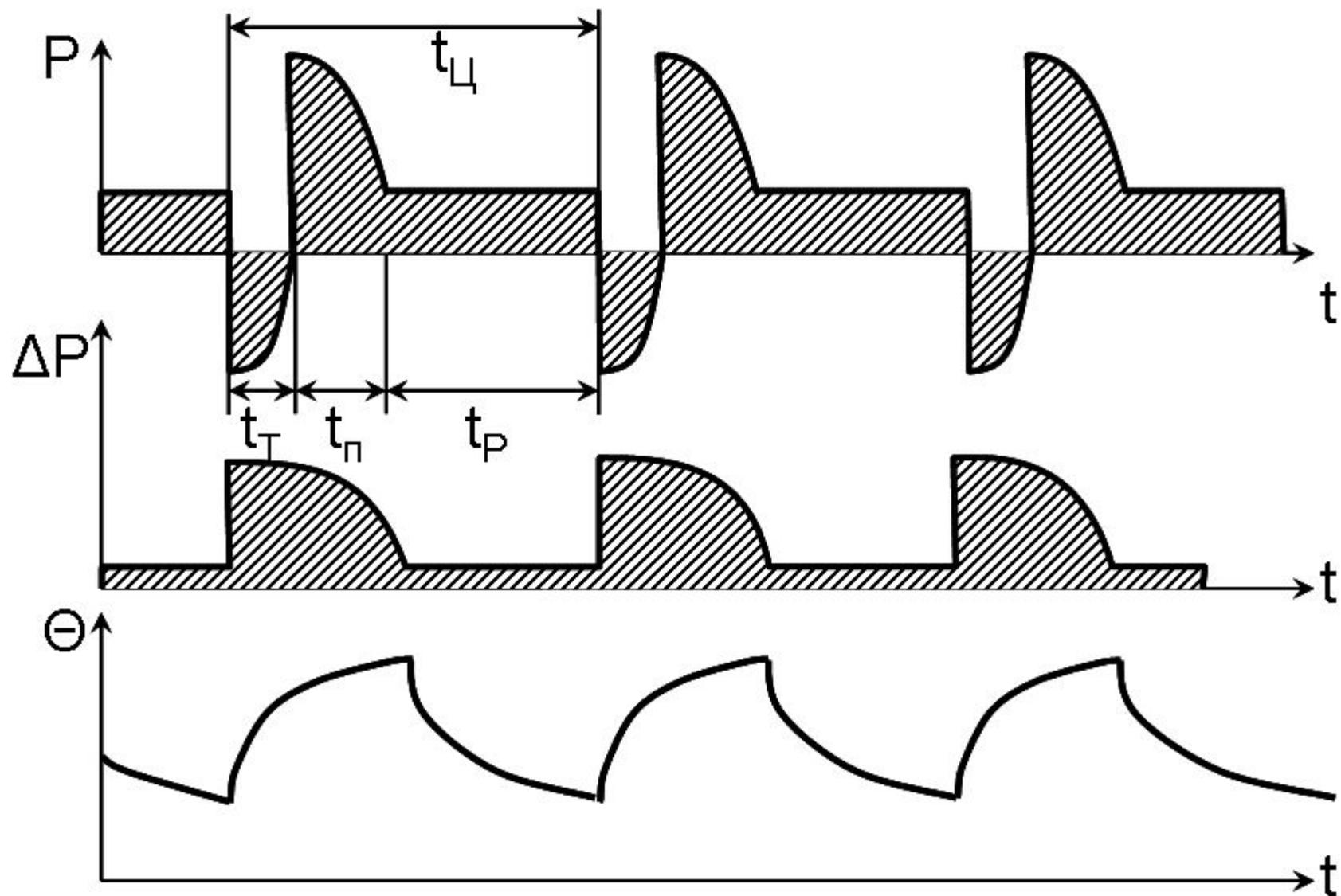
6. Переменяющимся номинальным режимом работы (S6) называется режим, при котором кратковременные периоды неизменной номинальной нагрузки чередуются с периодами холостого хода, во время которых двигатель не отключается, причем как рабочие периоды, так и периоды холостого хода не настолько длительны, чтобы превышения температуры частей машины могли достигнуть установившихся значений. Продолжительность одного цикла не должна превышать 10 мин.

S6 – перемежающийся номинальный режим работы:



7. Переключающимся номинальным режимом работы с частыми реверсами (S7) называется режим, при котором периоды реверса чередуются с периодами неизменной номинальной нагрузки, причем периоды последней не настолько длительны, чтобы превышения температуры частей машины могли достигнуть установившихся значений. В этом режиме потери при реверсировании оказывают существенное влияние на превышение температуры частей машины, которая работает без остановки, находясь постоянно под напряжением. Данный режим характеризуется числом реверсов в час (30, 60, 120 и 240).

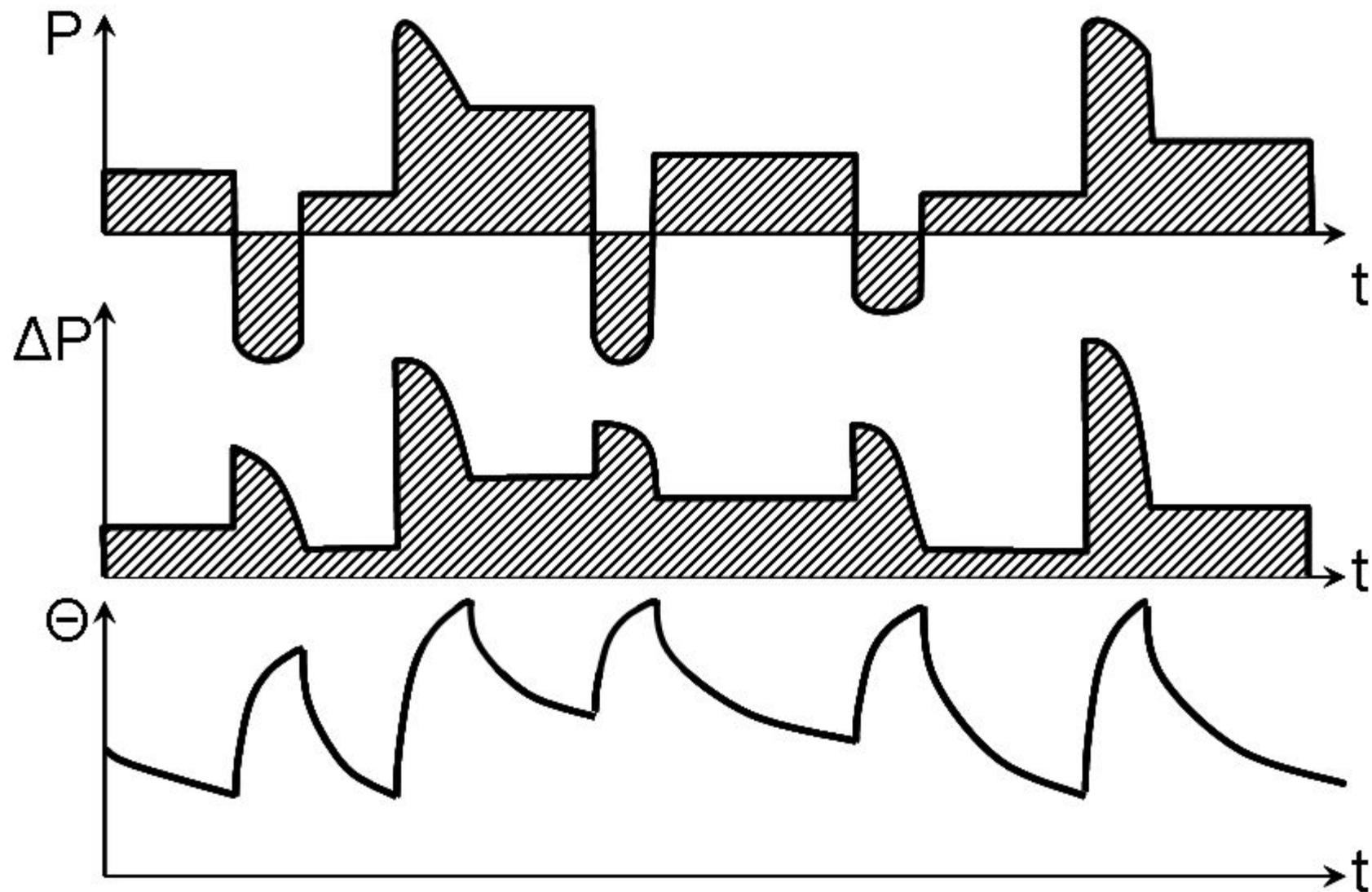
S7 – перемежающийся номинальный режим работы с частыми реверсами:



8. Перемежающимся номинальным режимом работы с двумя или более угловыми скоростями (S8)

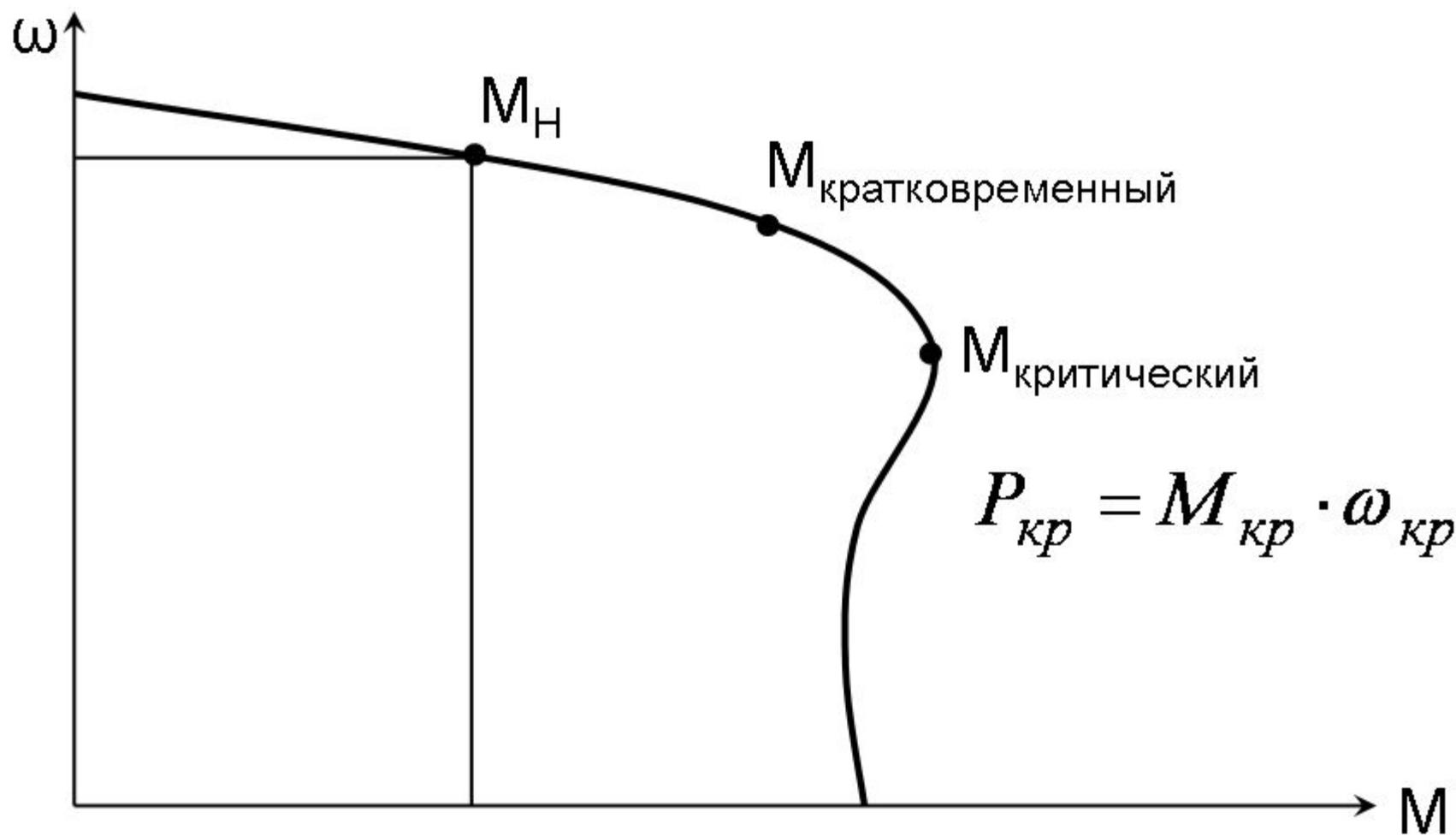
называется режим, при котором периоды с одной нагрузкой на одной угловой скорости чередуются с периодами работы на другой -угловой скорости при соответствующей, этой угловой скорости нагрузке. Периоды нагрузки на каждой из угловых скоростей не настолько длительны, чтобы превышения температуры частей машины могли достигнуть установившихся значений.

S8 – перемежающийся номинальный режим работы с двумя или более угловыми скоростями:

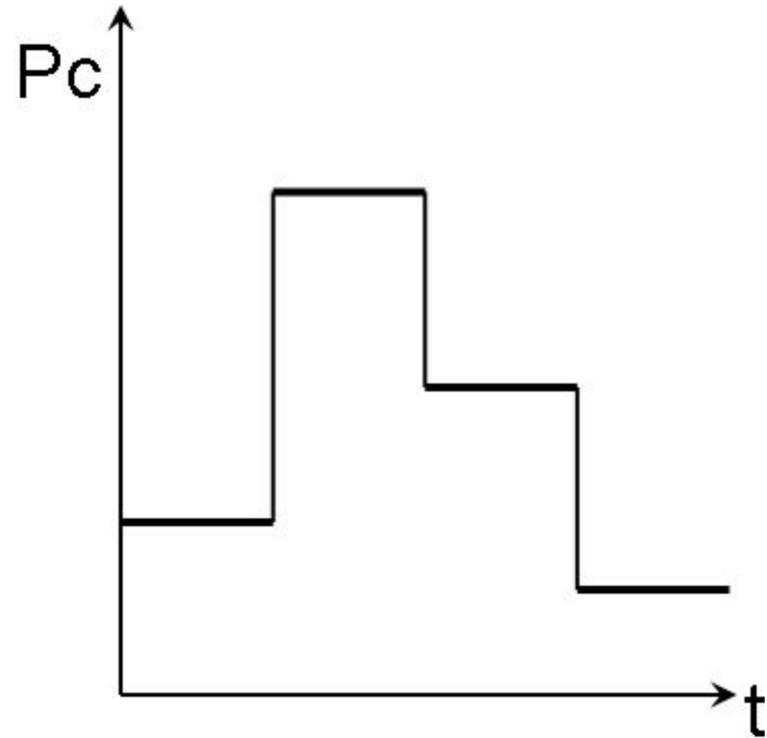
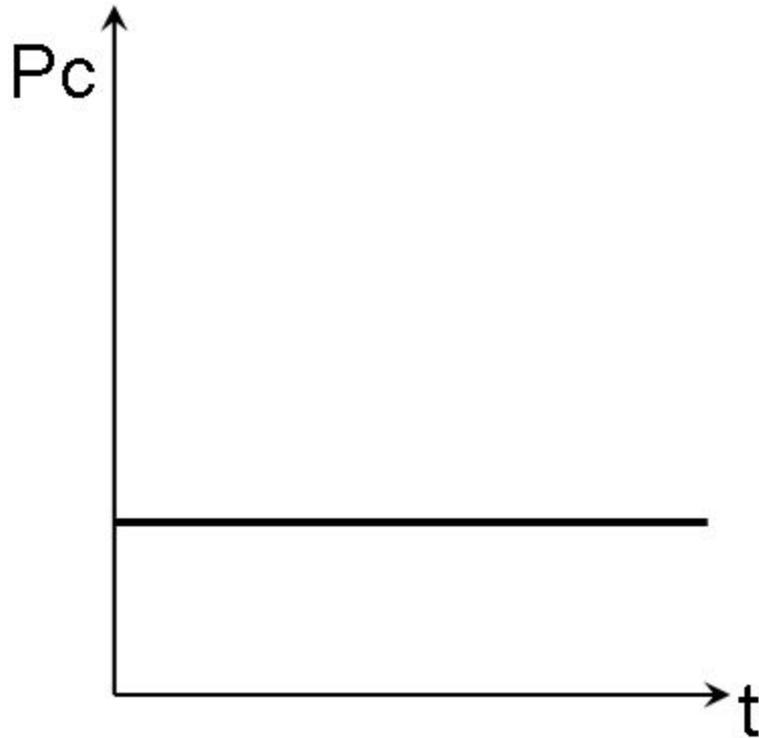


6.2 Расчет требуемой мощности двигателя для продолжительного режима.

По режиму работы двигателя выпускаются трех серий – продолжительного, кратковременного и повторно-кратковременного. В зависимости от того, из какой серии предполагается выбрать двигатель, производится преобразование реальной нагрузочной диаграммы к соответствующей стандартной, для работы при которой спроектирован и предназначен двигатель. Конечно, двигатель нужно выбирать той серии, которая больше соответствует реальному режиму работы привода.



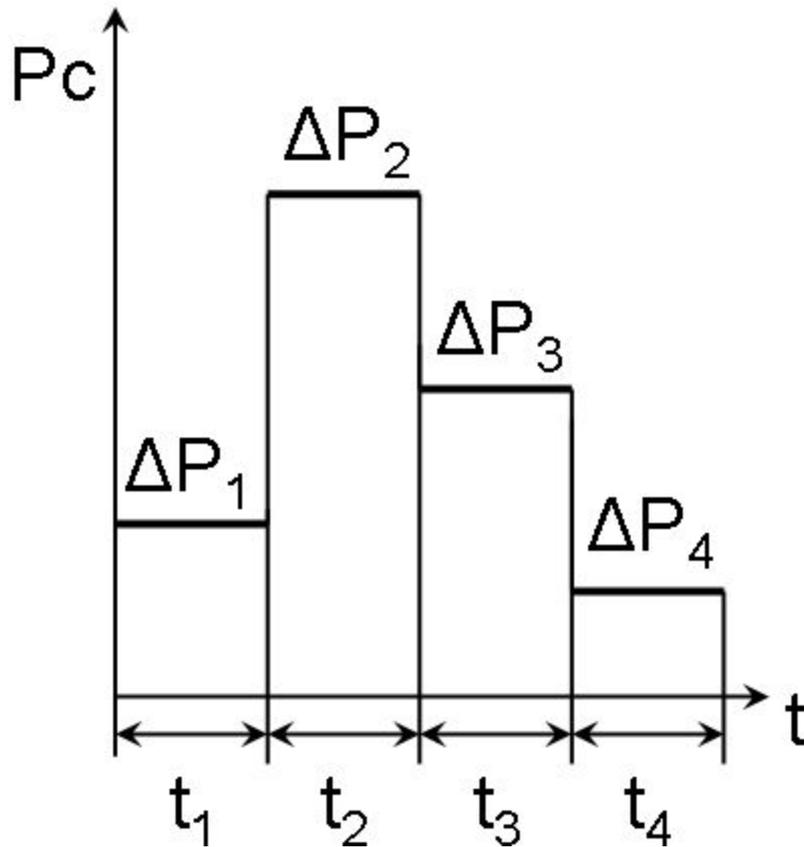
Выбор ЭД для режима S1



Для выбора мощности при номинальной нагрузке используют два метода:

1. средних потерь;
2. эквивалентных величин.

Метод средних потерь



Имеет место критерий:

$$\Delta P_H \geq \Delta P_{CP}$$

Определяются потери на каждом участке в соответствии с КПД.

Выбирается двигатель для которого:

$$P_H \geq P_{CP} = \frac{P_1 \cdot t_1 + P_2 \cdot t_2 + P_3 \cdot t_3 + P_4 \cdot t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}$$

По P_H , η_H и v_H – данного выбранного двигателя.

Определяем потери:

$$\Delta P_H = P_H \cdot \left(\frac{1 - \eta_H}{\eta_H} \right)$$

Находим потери от каждой нагрузки:

$$\Delta P_1 = P_1 \cdot \left(\frac{1 - \eta_1}{\eta_1} \right)$$

Где η_1 – определяется двумя путями:

1. по справочным данным;

2. из расчета:

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{1 + \eta_H}{\eta_H} \right) \cdot \left(\frac{\alpha / \kappa_H + \kappa_H}{\alpha + 1} \right)}$$

Для АД $\alpha=0,5\dots0,7$

По η_1 определяем P_1 . По P_1 определяем ΔP_1 . И так по каждому участку. Затем определяем средние потери:

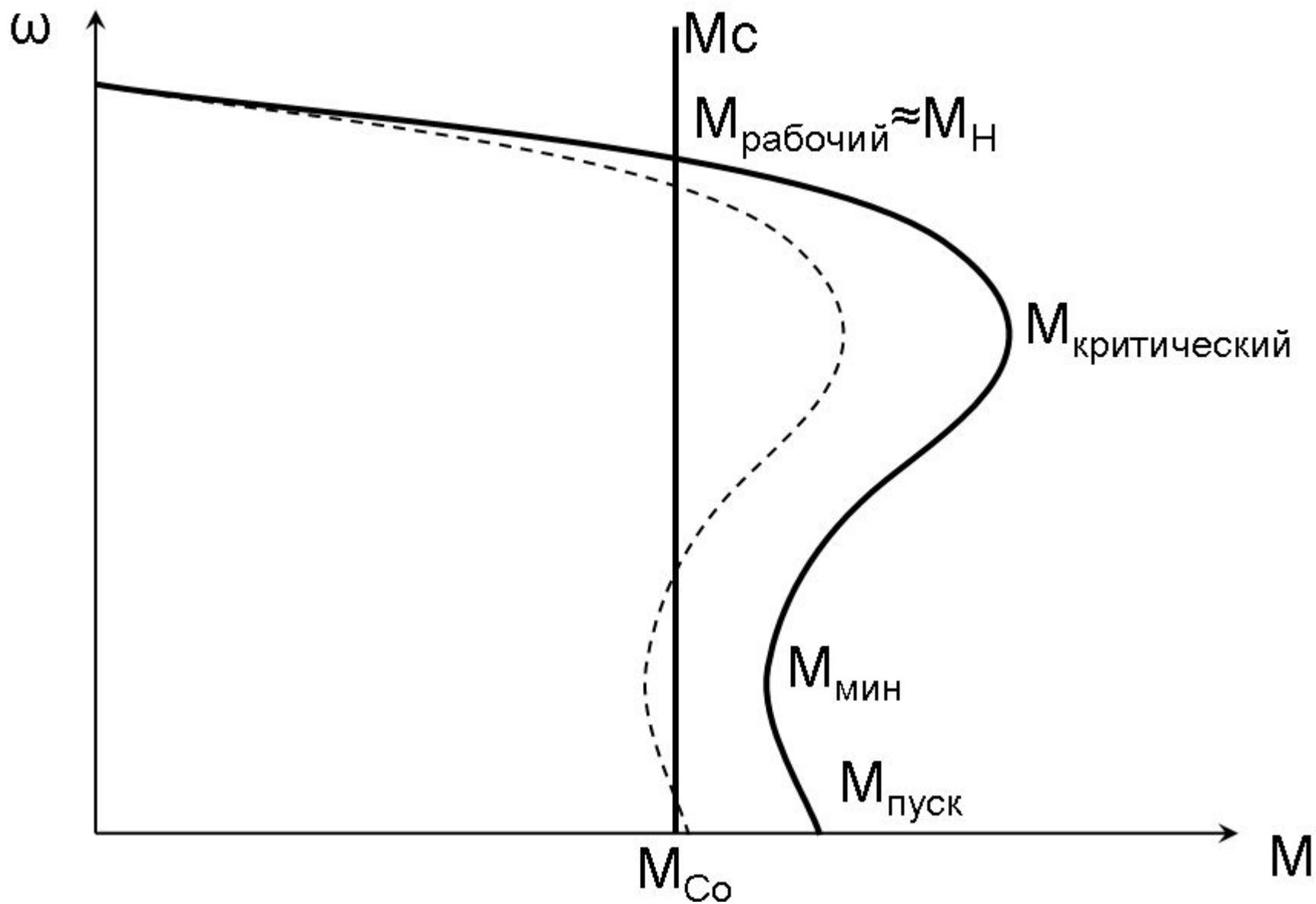
$$\Delta P_{CP} = \frac{\Delta P_1 \cdot t_1 + \Delta P_2 \cdot t_2 + \Delta P_3 \cdot t_3 + \Delta P_4 \cdot t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}$$

Сравниваем:

$$\Delta P_H \geq \Delta P_{CP}$$

Выбранный двигатель проверяем по условиям пуска:

$$M_{II} \cdot (1 - \Delta u)^2 \geq (1,25..1,3) \cdot M_{CO}$$



Метод эквивалентных величин

$$I_H \geq I_{\exists} = \sqrt{\frac{I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + I_3^2 \cdot t_3}{t_1 + t_2 + t_3}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2 \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}};$$

$$M \equiv I;$$

$$M_H \geq M_{\exists} = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + M_3^2 \cdot t_3}{t_1 + t_2 + t_3}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_i^2 \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}}.$$

$$\omega \approx \text{const}$$

$$P = M \cdot \omega$$

$$P_H \geq P_{\ominus} = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + P_3^2 \cdot t_3}{t_1 + t_2 + t_3}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i^2 \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}}$$

$$P_{\exists i} = P_i \cdot \frac{\omega_H}{\omega_i}$$

$$P_H \geq P_{\exists} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(P_i \cdot \frac{\omega_H}{\omega_i} \right)^2 \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}}$$

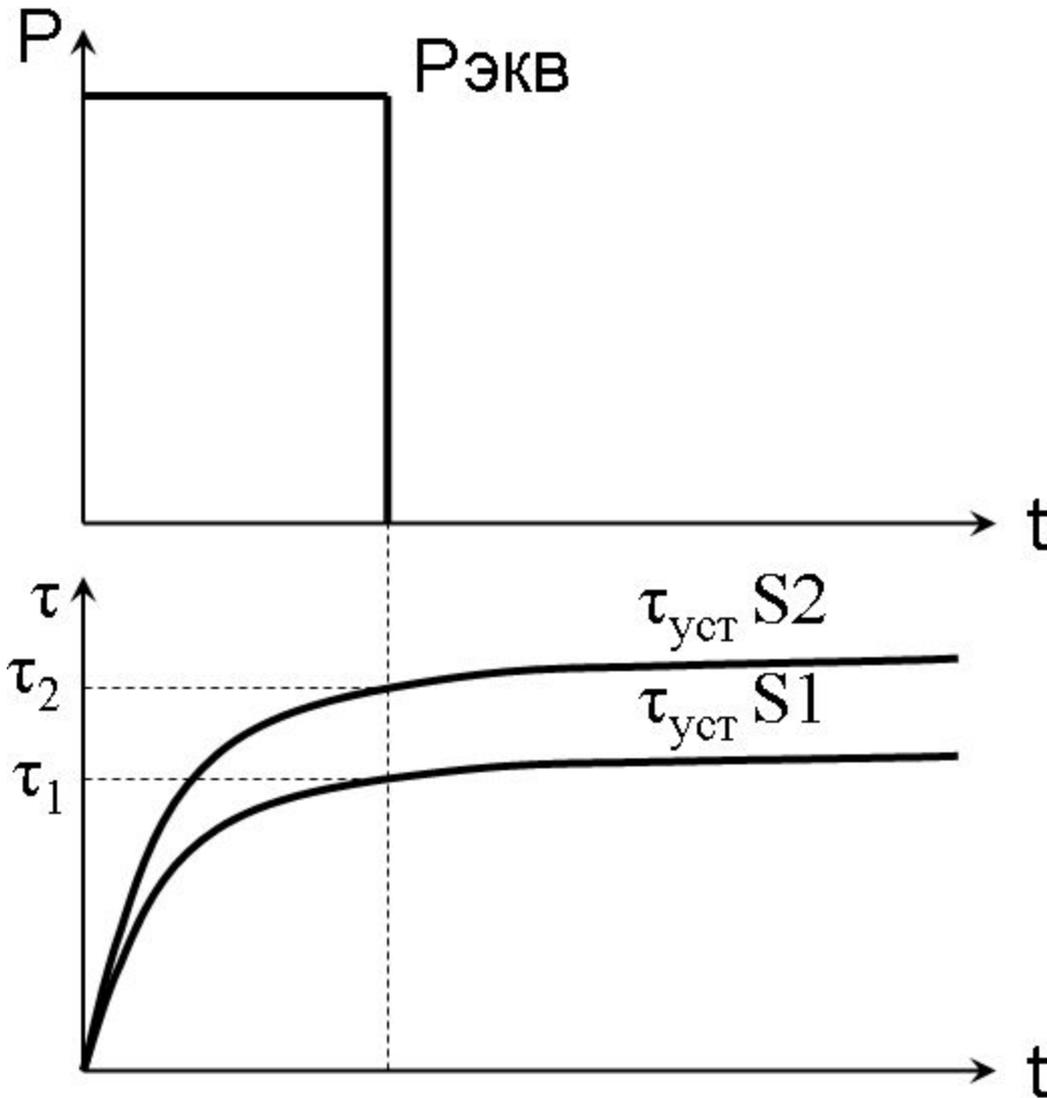
6.3 Расчет требуемой мощности двигателя электропривода для кратковременного и повторно-кратковременного режимов.

Паспортные данные

$$P_{кр} = \dots \text{кВт} \quad 9, 12, 15,$$
$$t_{кр} \quad 30, 60, 90$$

1. Определяем на нагрузочной диаграмме P_{Σ}
2. Выбираем $t_{кр}$
3. Пересчитываем $P_{кр} \geq P_{\Sigma} \cdot \sqrt{\frac{t_p}{t_{кр}}}$
4. Проверяем по условиям пуска
5. Проверяем по условиям M_{\max}

Выбор ЭД для режима S2



$$t_p < 4 \cdot T_H$$

$$t_0 > 4 \cdot T_0$$

$$1). P_H \geq P_{ЭКВ}$$

$$2). P_H < P_{ЭКВ}$$

Коэффициент термической перегрузки:

$$K_t = \frac{\tau_{уст} S_2}{\tau_{уст} S_1} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_p}{T_H}}}$$

Коэффициент механической перегрузки:

$$K_M = \sqrt{K_t (1 + \alpha) - \alpha}$$

Мощность выбираемого двигателя:

$$P_H \geq \frac{P_{экв}}{K_M}$$

Алгоритм решения:

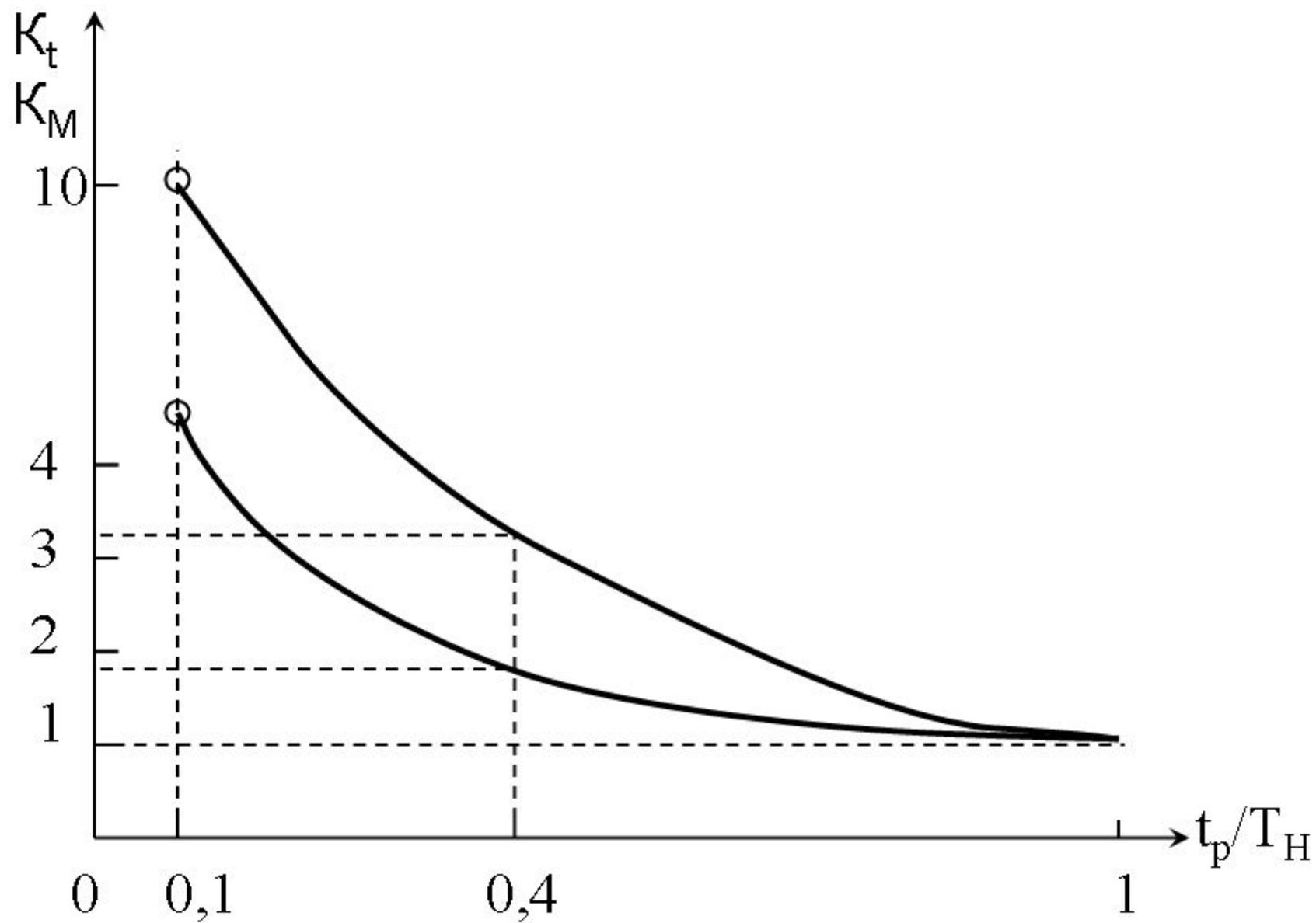
1. Определяем $P_{\text{ЭКВ}}$ и t_P
2. Предварительно выбираем двигатель $P_H < P_{\text{ЭКВ}}$

3. Определяем

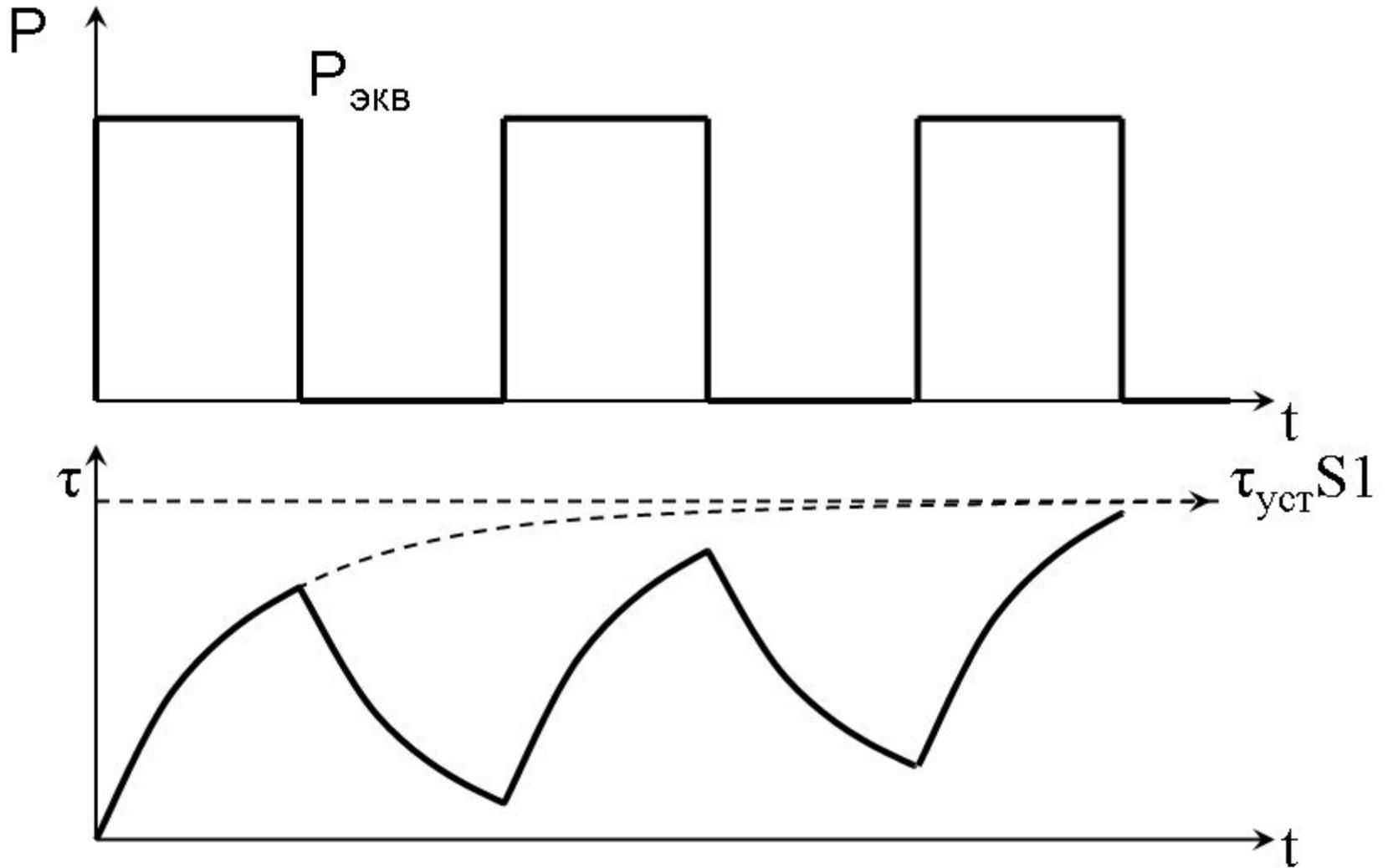
$$T_H = \frac{C}{A} = \frac{C_0 \cdot m}{\Delta P_H}$$

$\tau_{\text{ДОП}}$

4. Определяем K_t
5. Определяем K_M
6. Определяем $P_H \geq \frac{P_{\text{ЭКВ}}}{K_M}$
7. Проверка по M_{max}
8. Проверка по условию пуска



Выбор ЭД для режима S3

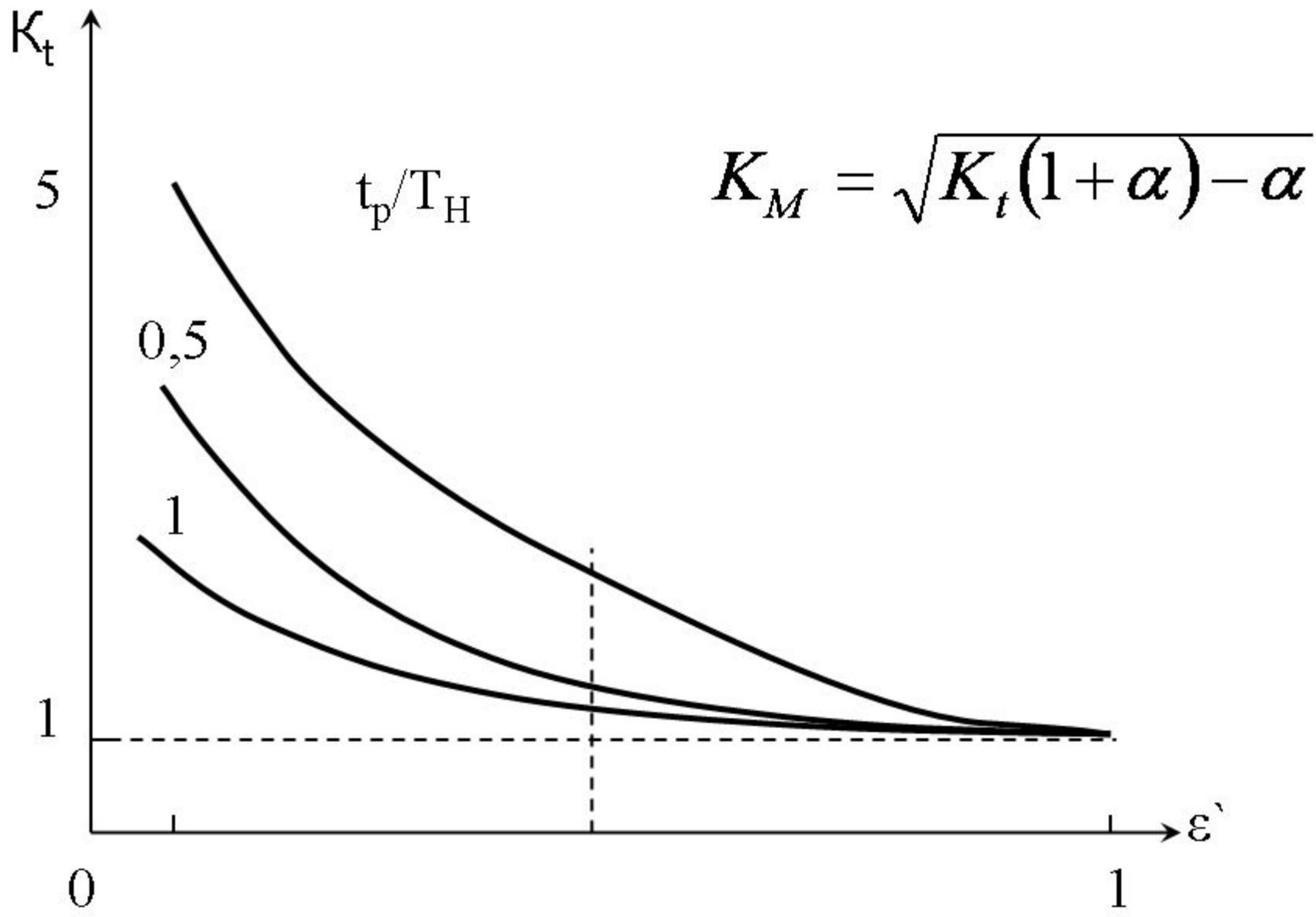


$$K_t = \frac{\tau_{уст} S1}{\tau_{уст} S3} = \frac{1 - e^{-\frac{t_p}{T_H} + \frac{t_0}{T_0}}}{1 - e^{-\frac{t_p}{T_H}}}$$

ε' с условием охлаждения

$$\varepsilon' = \frac{t_p}{t_p + t_0 \cdot \beta}$$

$$K_t = \frac{1 - e^{-\frac{t_p \cdot \varepsilon'}{T_H}}}{1 - e^{-\frac{t_p}{T_H}}}$$



Алгоритм решения:

1. Определяем по графику $P_{\text{ЭКВ}}$ за время работы

$$2. P_H < P_{\text{ЭКВ}}$$

3. Определяем T_H и T_0

4. Определяем ε'

5. Определяем K_t

6. Определяем K_M

7. Определяем $P_H \geq \frac{P_{\text{ЭКВ}}}{K_M}$

8. Проверка по M_{max}

$$M_{KP} (1 - \Delta U)^2 \geq 1,2 M_{\text{МАКС}}$$

9. Проверка по условию пуска

$$M_{II} (1 - \Delta U)^2 \geq (1,25..1,3) M_{CO}$$

$$\varepsilon_{\text{станд}} = 0,4 \quad \varepsilon = \frac{t_p}{t_{\text{ц}}}$$

$$\Delta W_{0,4} = \Delta W \varepsilon_x$$

$$0,4 \cdot t_{\text{ц}} (\Delta P_{\text{пост}} + \Delta P_{\text{пер}_{0,4}}) = \left[\Delta P_{\text{пост}} + \Delta P_{\text{пер}_{0,4}} \cdot \frac{P_{\varepsilon_x}^2}{P_{0,4}^2} \right] \cdot \varepsilon_x \cdot t_{\text{ц}}$$

$$\frac{0,4}{\varepsilon_x} \cdot (\alpha + 1) - \alpha = \frac{P_{\varepsilon_x}^2}{P_{0,4}^2}$$

$$\alpha = \frac{\Delta P_{\text{пост}}}{\Delta P_{\text{пер}}}$$

$$P_{\varepsilon_x} = P_{0,4} \cdot \sqrt{\frac{0,4 \cdot (\alpha + 1) - \alpha \cdot \varepsilon_x}{\varepsilon_x}}$$

1. Определяем по нагрузочной диаграмме $\varepsilon_{\text{действ}}$

$$\varepsilon_{\text{действ}} = t_p / t_u$$

2. Определяем $P_{\text{ЭКВ}}$ за время работы

3. Пересчитываем мощность на стандартное ПВ=40%

$$P_{0,4} = P_{\text{ЭКВ}} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{действ}}}{0,4(1 + \alpha) - \alpha \cdot \varepsilon_{\text{действ}}}}$$

4. Проверяем по $M_{\text{пуск}}$

$$M_{\text{пуск}} \cdot (1 - \Delta u)^2 \geq 1,2 \cdot M_{Co}$$

5. Проверяем по $M_{\text{макс}}$

$$M_{кр} \cdot (1 - \Delta u)^2 > 1,2 \cdot M_{\text{макс}}$$

6. Число включений в час

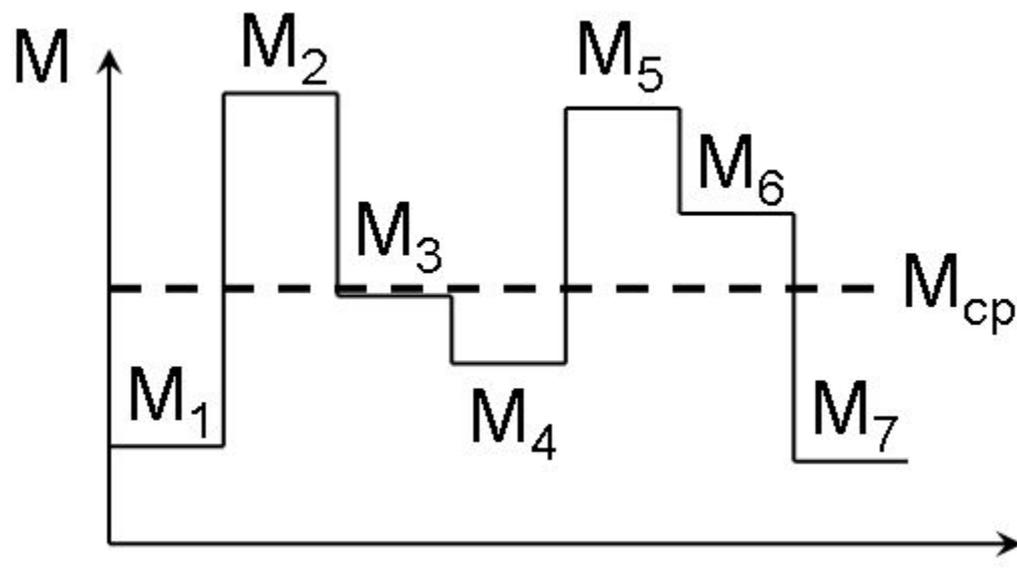
$$z_{gr} = 3600 \frac{1}{t_{ц}}$$

$$z_{gr} > z_{дон} = \frac{(\Delta P_H - \Delta P_\varepsilon) \cdot \varepsilon + \Delta P_H (1 - \varepsilon) \beta_0}{0,93(W_{II} + W_T)}$$

Для режимов S5 и S6 рекомендуется выбирать двигатель режима S3, а в нагрузочной диаграмме учесть мощность тормозных и пусковых потерь

6.4 Расчет требуемой мощности двигателя при перемежающихся режимах и в регулируемых электроприводах.

Определяется M_{cp}



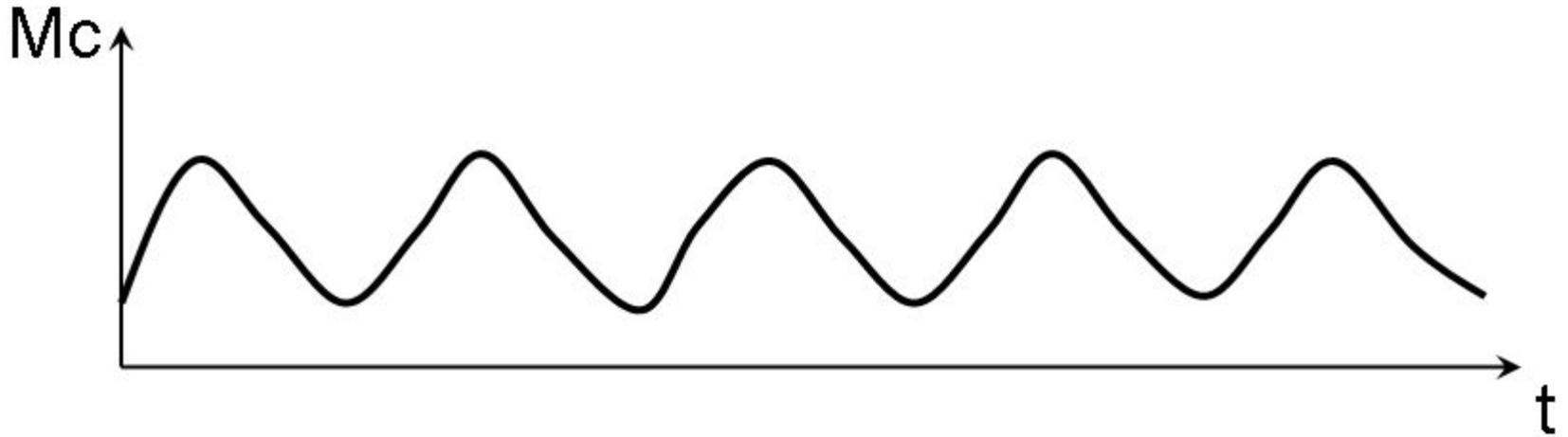
$$M_{cp} = \frac{M_1 \cdot t_1 + M_2 \cdot t_2 + \dots}{t_1 + t_2 + \dots} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}$$

1. Если $M_{\text{ср}}/M_{\text{макс}} > 1,4$ – нагрузка на валу средне переменная. Выбор мощности по методике режима S1.
2. Если $1,4 < M_{\text{ср}}/M_{\text{макс}} < 2$ – нагрузка на валу ярко выраженная переменная.
3. Если $M_{\text{ср}}/M_{\text{макс}} > 2$ – нагрузка на валу резко переменная.

Для второго и третьего случая применяют маховик.

По виду нагрузочной диаграммы (по характеру момента сопротивления) различают:

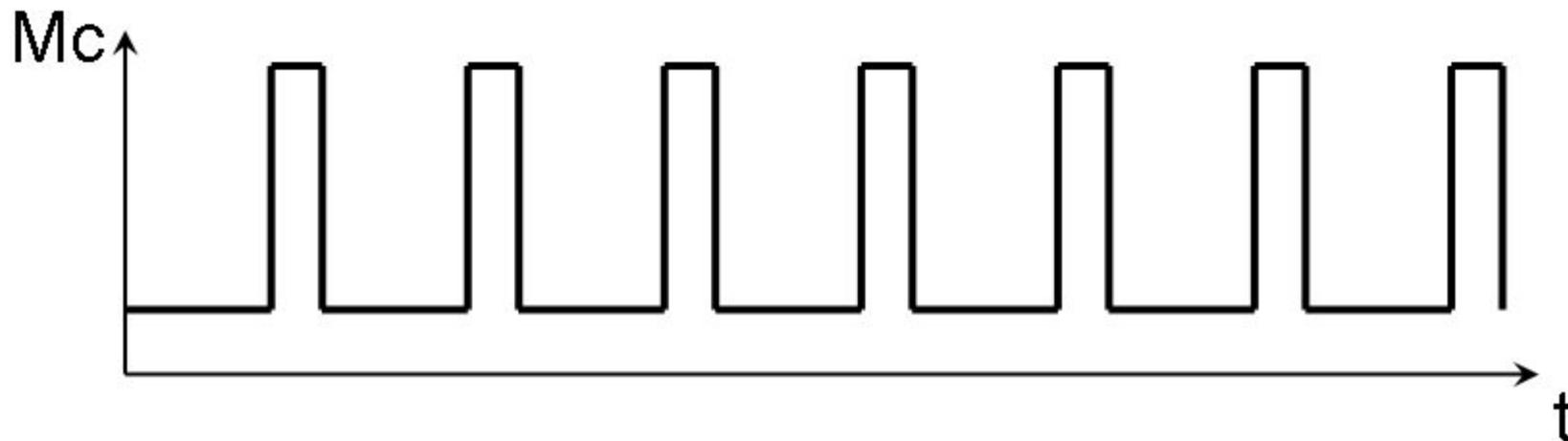
симметричную пульсирующую нагрузку



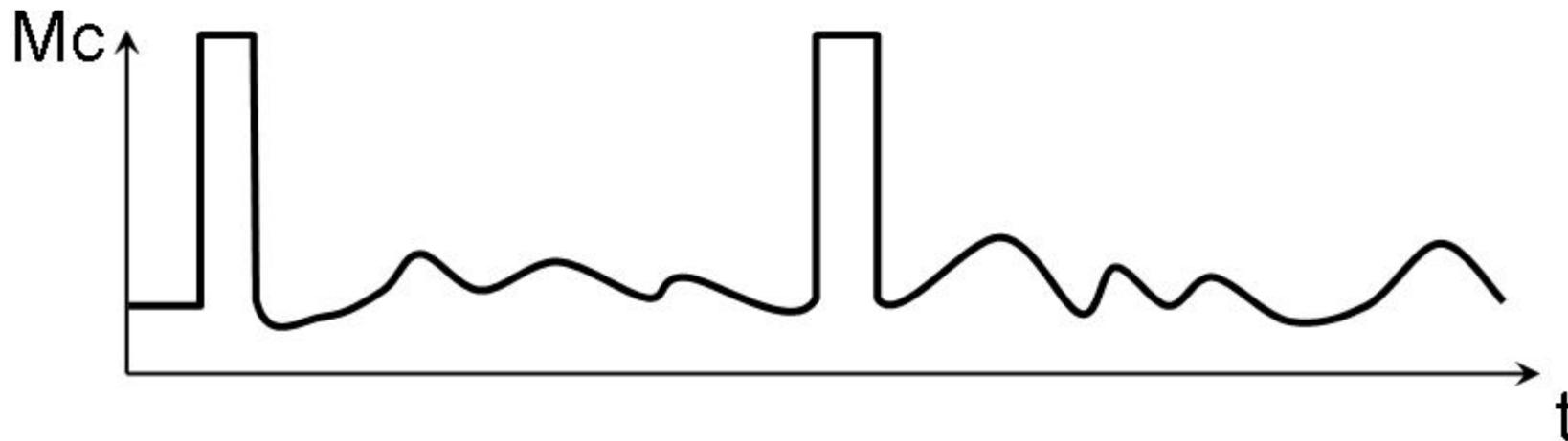
несимметричную пульсирующую нагрузку



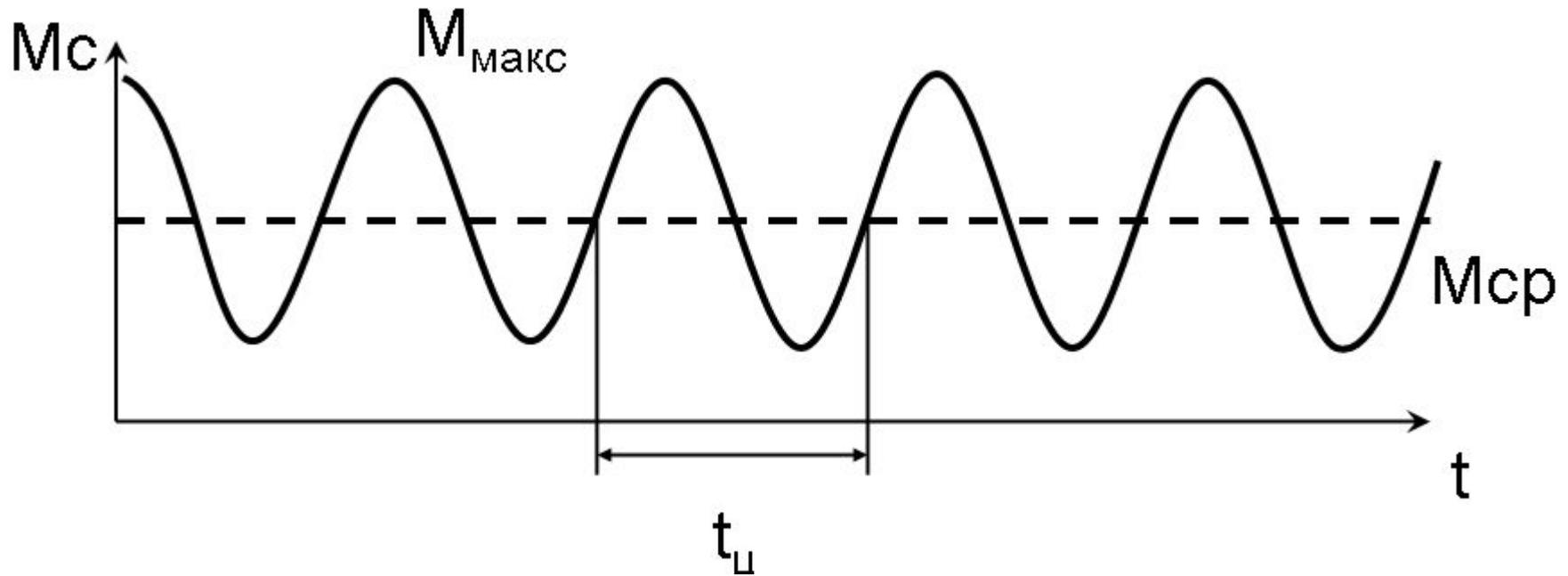
ударно чередующуюся нагрузку



ударно не чередующуюся нагрузку



Симметричная пульсирующая нагрузка



Момент сопротивления

$$M_C = M_{cp}(1 + d \cdot \sin(\omega \cdot t))$$

$$d = \frac{M_{\max} - M_{cp}}{M_{cp}} \quad \omega = \frac{2\pi}{t_u}$$

Несимметричная пульсирующая нагрузка

$$M_H = (1,1..1,3)M_{cp}$$

$$P_H = M_H \cdot \omega_H$$

для выбранного э.д.

$$T_{M1} = 0,159 \cdot t_{ц} \sqrt{\frac{d^2}{(1,02\mu_{кр} - 1)^2} - 1}$$

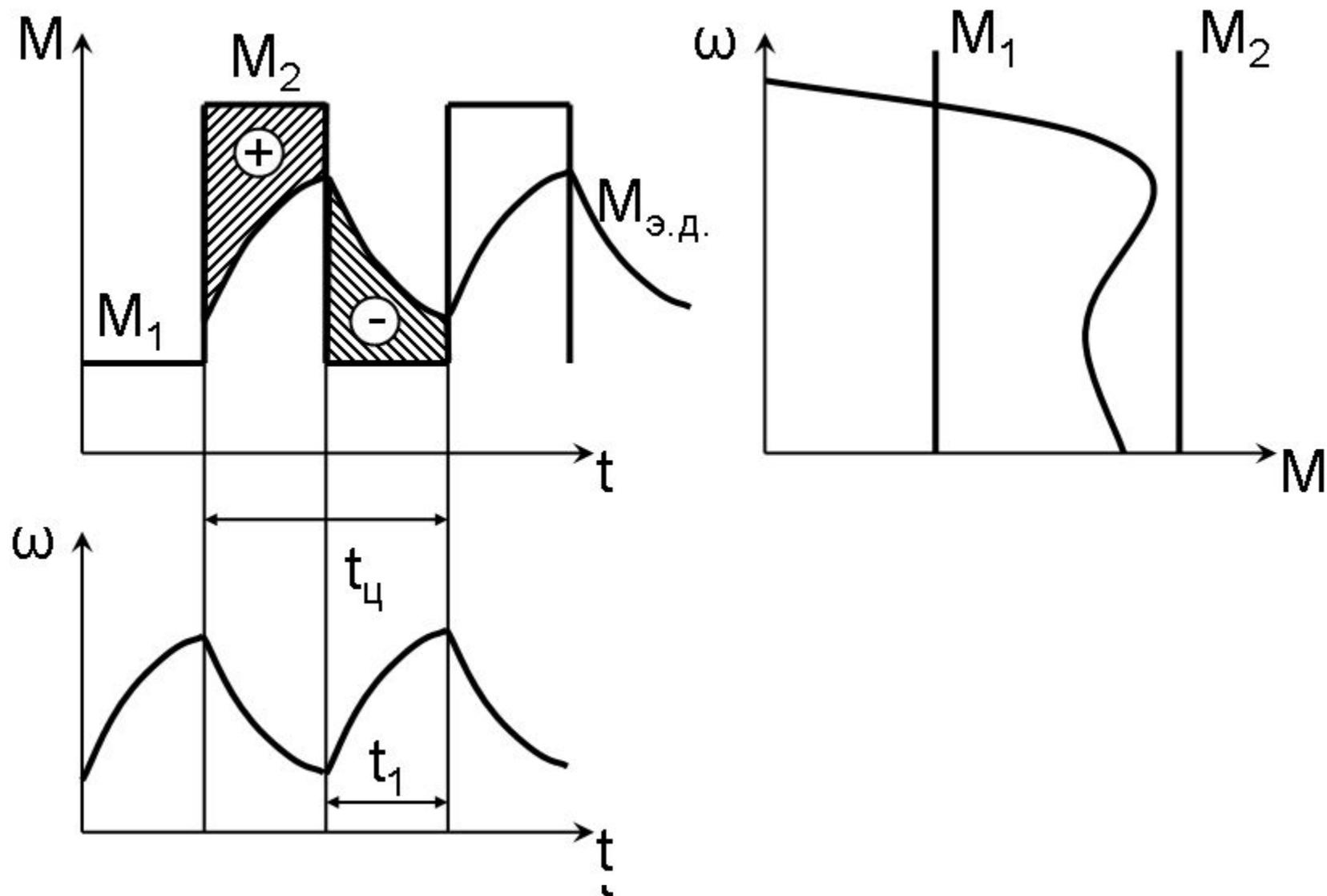
$\mu_{кр}$ – для выбранного э.д.

$$T_{M1} = 0,159 \cdot t_{ц} \sqrt{1,44 \cdot d^2 - 1}$$

Выбирается большее значение. Требуемый момент инерции

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

Ударная чередующаяся нагрузка



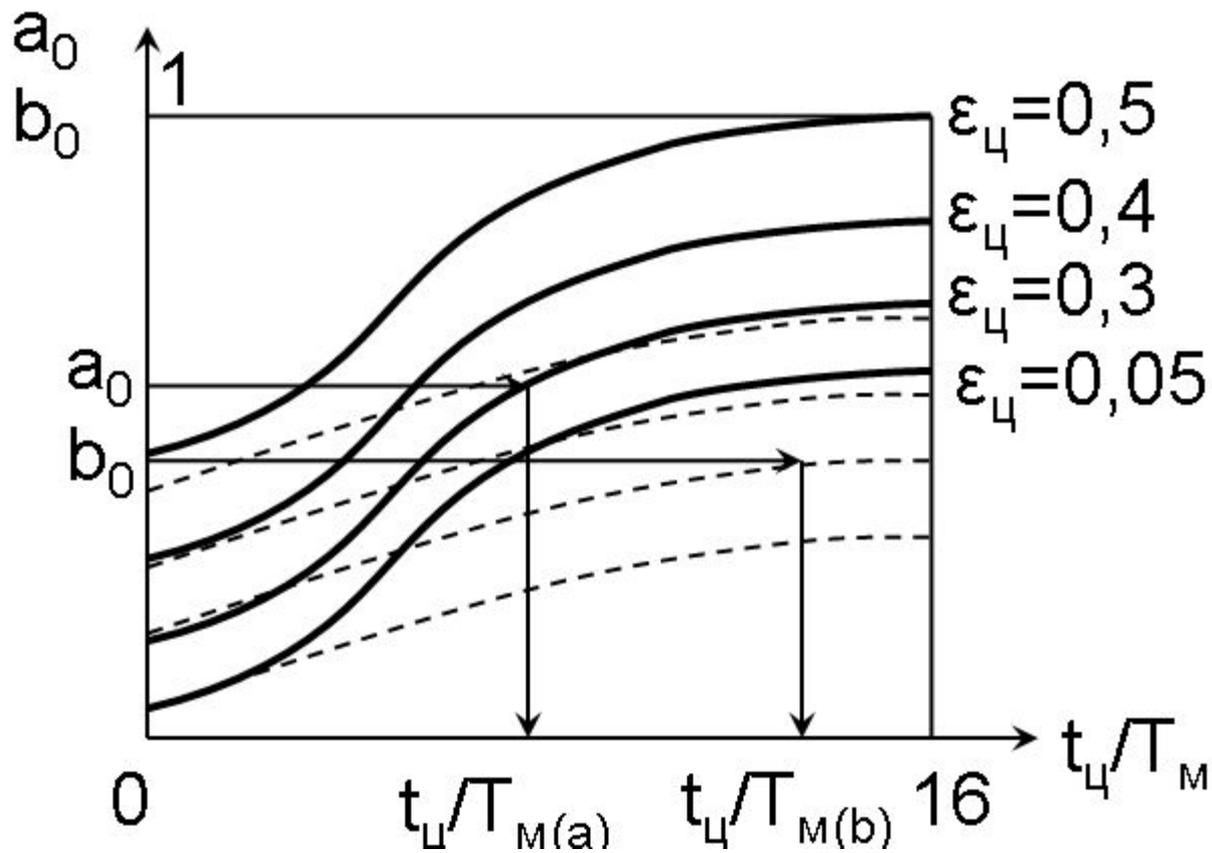
1. Расчет коэффициента для выбранного ЭД по графику

$$M_H = (1,3..1,5) \cdot M_{cp}$$

$$a = \frac{M_{кр}}{M_1}, \quad b = \frac{M_H}{M_1},$$

$$a_0 = \frac{a - k_{зр}}{1 - k_{зр}}, \quad k_{зр} = \frac{M_1}{M_2}, \quad \varepsilon_{\psi} = \frac{t_1}{t_{\psi}},$$

$$b_0 = \frac{1}{1 - k_{зр}} \sqrt{b^2 - k_{зр}^2 - 2 \cdot k_{зр} \cdot (1 - k_{зр}) \cdot \varepsilon_{\psi}}$$



Берется меньшее значение t_u/T_M

$$J = \frac{M_H \cdot t_u}{\frac{t_u}{T_M} \cdot \omega_0 \cdot S_H}$$

2. Расчет коэффициента для выбранного ЭД аналитически

$$M_H = (1,3..1,5) \cdot M_{cp} \quad P_H = M_H \cdot \omega_H$$

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

$$M_{\partial_{кон}} = M_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_1}{T_M}} \right) + M_{нач} \cdot e^{-\frac{t_1}{T_M}}$$

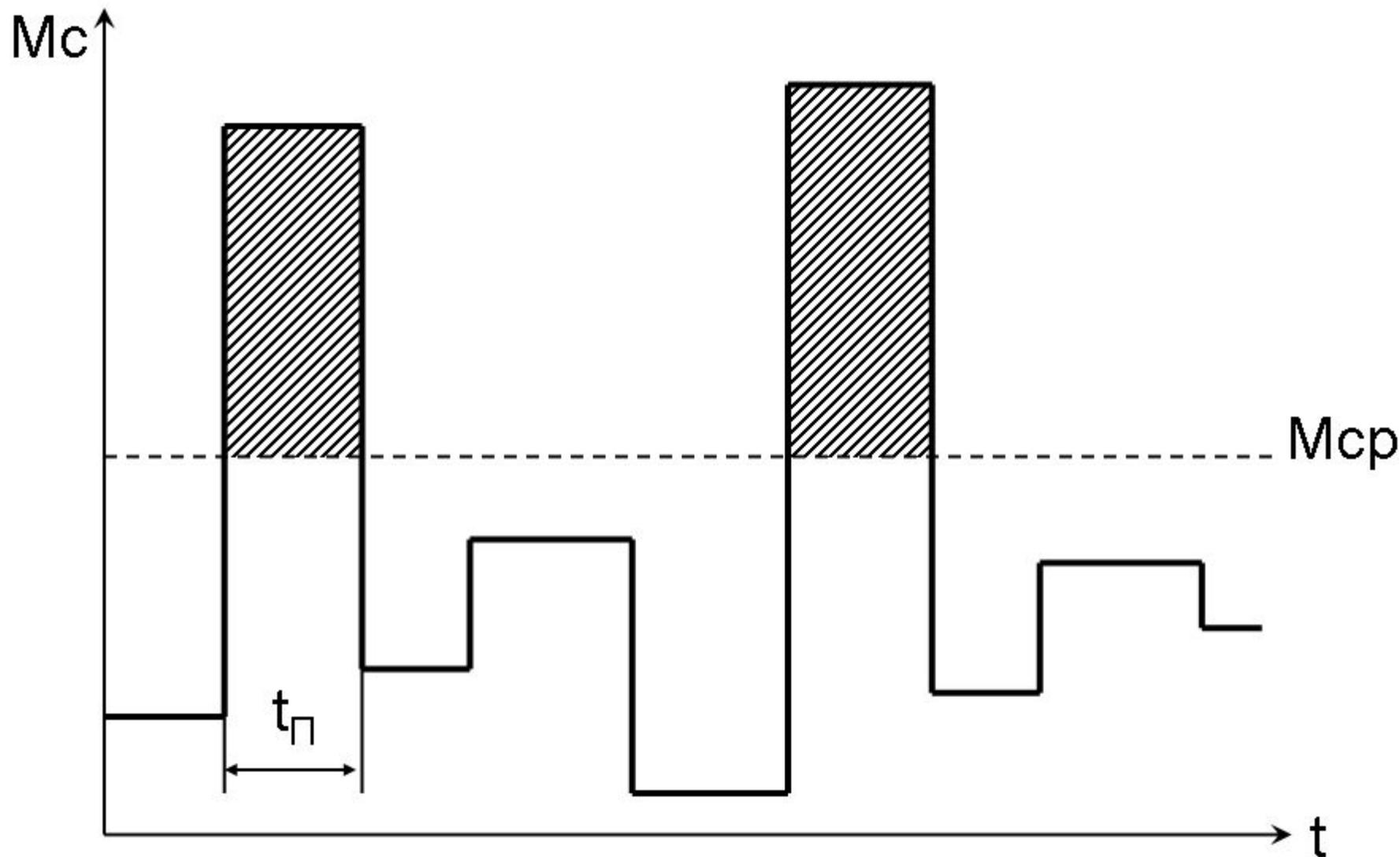
$$M_{нач} \approx 1,1 \cdot M_2$$

$$M_{\partial_{\text{кон}}} < M_{\partial_{\text{кр}}} \cdot (1 - \Delta U)^2$$

$$J = \frac{T_M \cdot M_H}{\omega_0 \cdot S_H} = \frac{M_H}{\omega_0 \cdot S_H} \cdot \left(\frac{t_p}{\ln \left(\frac{M_1 - M_{\partial_{\text{нач}}}}{M_1 - M_{\partial_{\text{кон}}}} \right)} \right)$$

Ударная не чередующаяся нагрузка

$$F_{изб} = (M_{макс} - M_{ср}) \cdot t_{\Pi}$$



Задаемся неравномерностью хода э.д.

$$\Delta = 0,05..0,2$$

Рекомендуется

$$\Delta \leq \frac{0,8 \cdot S_{кр}}{1 - \frac{S_{кр}}{2}} \quad \text{где } S_{кр} \text{ для } M_H \geq (1,3..1,4)M_{ср}$$

Требуемый момент инерции

$$J = \frac{F_{изб}}{\Delta \cdot \omega}$$

По J определяется T_M

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

$$M_{\partial_{\text{кон}}} = M_{\text{макс}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{\Pi}}{T_M}} \right) + M_{\text{ср}} \cdot e^{-\frac{t_{\Pi}}{T_M}}$$

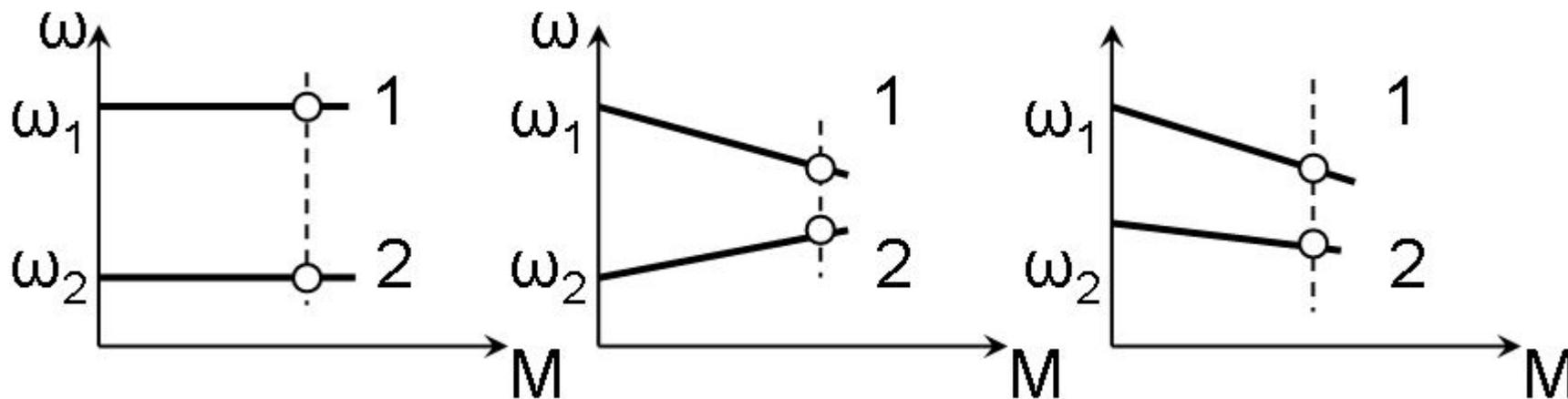
Выбор ЭД для режимов S8

Методика выбора основана на методике определения эффективного момента или мощности с учетом ухудшения теплоотдачи.

$$P_{CP} = \frac{P_1 \cdot t_1 + P_2 \cdot t_2 + \dots}{t_1 \cdot \beta_1 + t_2 \cdot \beta_2 + \dots} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n t_i \cdot \beta_i}$$

$$\beta = \beta_0 + (\beta_H - \beta_0) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^\xi, \text{ где } \xi = 0,7..1$$

Кроме выбора по потерям ,надо чтобы допустимый момент при регулировании соответствовал механической характеристике рабочей машины



Если $U \neq const$, то $P_H > P_{макс} = M_c \cdot \omega_1$