

## Пусковые потери в асинхронном двигателе

если пренебречь постоянной составляющей потерь и влиянием тока х.х.

$$\Delta P_V = 3I_1^2 \cdot R_1 + 3(I_2')^2 \cdot R_2' = M\omega_0 s \left( 1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) \quad (I_2' \approx I_1)$$

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \Rightarrow \omega = \omega_0 - s\omega_0 \Rightarrow d\omega = -\omega_0 ds$$

$$\text{при } M_c = 0 \quad dt = -\left( \frac{J\omega_0}{M} \right) ds$$

Потери энергии

$$\Delta A_{\Pi 0} = \int_0^{t_{\Pi}} \Delta P_V(t) dt = \int_0^{t_{\Pi}} M\omega_0 s \left( 1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) dt$$

После преобразований получаем для АД с фазным ротором

$$\Delta A_{\Pi 0} = \int_{s_{\text{кон}}}^{s_{\text{нач}}} J\omega_0^2 s \left[ 1 + \frac{R_1}{R_2' + R_{2\text{доб}}'} \right] ds$$

Учитывая, что  $s_{\text{нач}}=1$ ,  $s_{\text{кон}}=0$

$$\Delta A_{\text{п0}} = \frac{J\omega_0^2}{2} \left( 1 + \frac{R_1}{R'_2 + R'_{2\text{доб}}} \right)$$

Потери при пуске состоят из:

- потерь в роторной цепи, определяемых запасом кинетической энергии к концу пуска;
- потерь в статорной цепи, зависящих от активных сопротивлений статора и ротора - чем больше сопротивление роторной цепи, тем меньше потери в статоре (т.к. пусковой ток уменьшается).

Для АД с к.з. ротором  $R'_{2\text{доб}} = 0$

$$\Delta A_{\text{п}0} = \frac{J\omega_0^2}{2} \left( 1 + \frac{R_1}{R'_2} \right)$$

Если  $R_1 \approx R'_2$  (АД к.з. ротором общего назначения), то составляющая потерь энергии в статоре равна запасу кинетической энергии, т.е. потерям в роторе

$$\Delta A_{\text{п}01} = \frac{J\omega_0^2}{2}$$

Потери энергии при пуске АД под нагрузкой

$$\Delta A_{\text{п}(M_c)} \approx \Delta A_{\text{п}0} \frac{M_{\text{п.ср}}}{M_{\text{п.ср}} - M_c}$$

$$M_{\text{п.ср}} = \frac{(\lambda + \lambda_{\text{п}})}{2} M_{\text{н}} \quad - \text{средний пусковой момент}$$

$$\lambda = \frac{M_{\text{к}}}{M_{\text{н}}} \qquad \lambda_{\text{п}} = \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{н}}}$$

# Нагрев и охлаждение двигателей

## Классы изоляции, применяемые в электродвигателях

Изоляция класса А (х/б ткани, пряжа, бумага, материалы из шелка и целлюлозы) – предельная допустимая температура нагрева  $-105^{\circ}$  – практически не выпускается.

Допустимые температуры нагрева при температуре окружающей среды  $40^{\circ}$  С

класс Е – до  $120^{\circ}$  (синтетические эмали, пленки);

класс В – до  $130^{\circ}$  (сланца, асбест, стеклянное волокно);

класс F – до  $155^{\circ}$  (материалы класса В, сочетающиеся с синтетически связующими и пропитывающими составами);

класс Н – до  $180^{\circ}$  (материалы класса В, сочетающиеся с кремнийорганическими связующими и пропитывающими составами).

Технологические перегрузки двигателей или колебания напряжения в питающей сети ведут за собой увеличение тока в обмотках машин и превышение температуры обмоток выше допустимых для данного класса, в результате срок службы машин быстро уменьшается.

Повышение температуры изоляции на 10 °С сокращает срок ее службы примерно в два раза. Так, для изоляции класса А повышение температуры с 95 до 105 °С сокращает срок ее службы с 15 до 8 лет, а нагрев до 120 °С – до двух лет.

Точное исследование процессов нагрева и охлаждения двигателей представляет собой сложную задачу, в ЭП его проводят с допущениями:

1. Двигатель рассматривается как однородное тело, имеющее бесконечно большую теплопроводность и одинаковую температуру во всех своих точках.
2. Теплоотдача во внешнюю среду пропорциональна первой степени разности температур двигателя и окружающей среды.
3. Окружающая среда обладает бесконечно большой теплоемкостью, т.е. температура ее не изменяется в процессе нагрева двигателя.
4. Теплоемкость двигателя и его коэффициент теплоотдачи не зависят от температуры двигателя.

## Уравнение теплового баланса двигателя

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

где  $\Delta P$  – потери мощности в двигателе (тепловые потери);  
 $A$  – теплоотдача двигателя (количество тепла, отдаваемого двигателем в окружающую среду за 1 с при разности температур двигателя и окружающей среды  $1^{\circ}\text{C}$ ) [Дж/с $\times^{\circ}\text{C}$ ];  
 $C$  – теплоемкость двигателя – количество тепла, необходимое для повышения температуры двигателя на  $1^{\circ}\text{C}$ ;

$\tau = \theta_{\text{дв}}^0 - \theta_{\text{о.с}}^0$  – превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды.

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

- тепловые процессы описываются линейным дифференциальным уравнением 1-го порядка.



## Решение уравнения при постоянных потерях

$$\tau = (\tau_{\text{нач.}} - \tau_{\text{уст.}}) e^{-t/T_{\text{H}}} + \tau_{\text{уст}}$$

$$\tau_{\text{уст.}} = \frac{\Delta P}{A} \text{ – установившееся превышение температуры двигателя;}$$

$$T_{\text{H}} = \frac{C}{A} \text{ – постоянная времени нагрева двигателя, равна времени нагрева двигателя до установившегося превышения температуры } \tau_{\text{уст}}, \text{ если бы отсутствовала отдача тепла окружающей среде.}$$

Ухудшение теплоотдачи характеризуется коэффициентом ухудшения теплоотдачи при неподвижном якоре (роторе)

$$\beta_0 = \frac{A_0}{A}$$

где  $A_0$ ,  $A$  - теплоотдача при неподвижном двигателе и номинальной скорости.

Исполнение двигателя	$\beta_0$
1. Закрытый с независимой вентиляцией	1
2. Закрытый без принудительного охлаждения	0,95 ÷ 0,98
3. Закрытый самовентилируемый	0,45 ÷ 0,55
4. Защищенный самовентилируемый	0,25 ÷ 0,35

Постоянная времени охлаждения при неподвижном двигателе

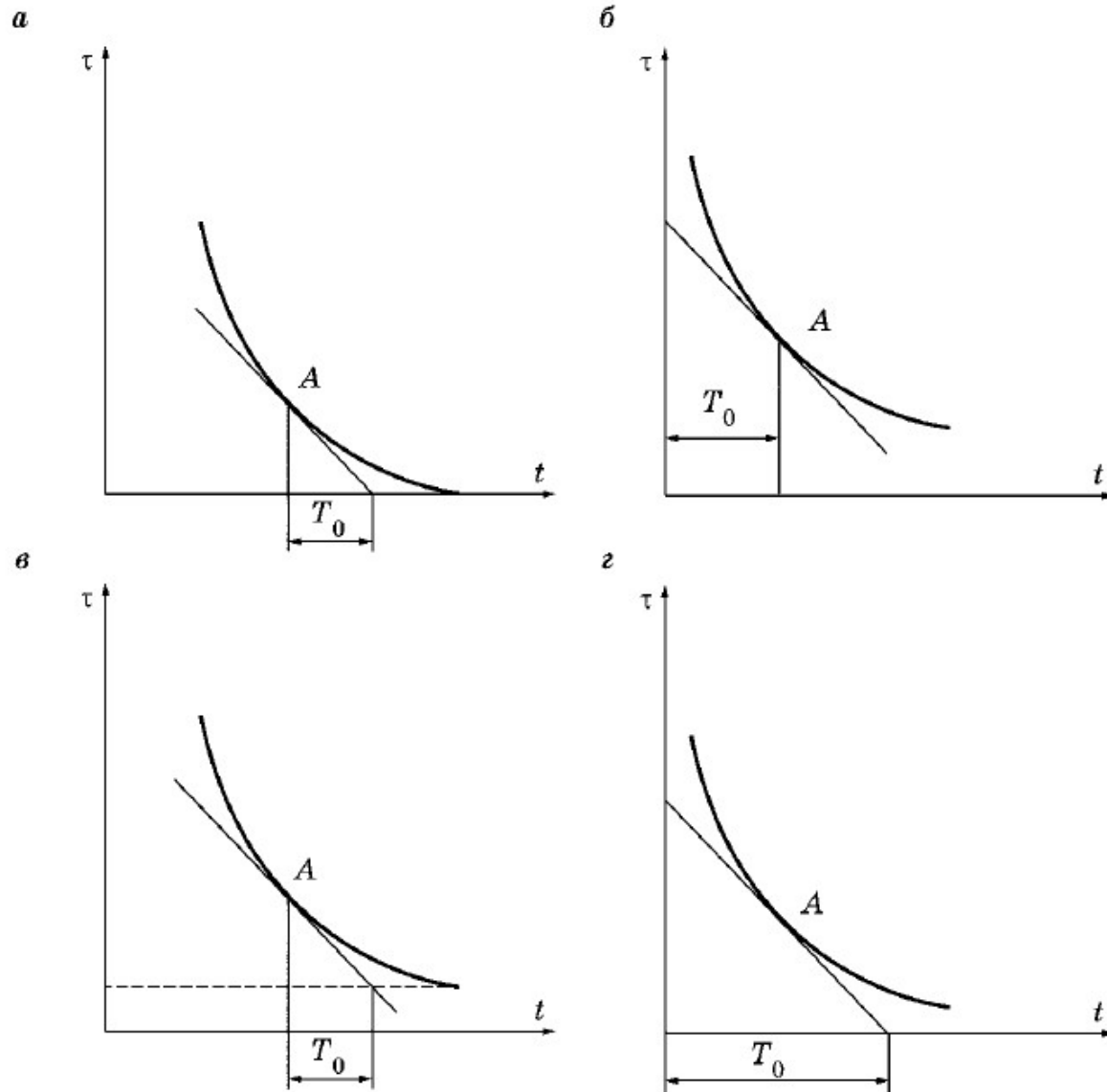
$$T_0 = \frac{C}{A_0} = \frac{C}{A \cdot \beta_0} = \frac{T_H}{\beta_0}$$

Т.к.  $\beta_0 \leq 1$ , то  $T_0 \geq T_H$

- охлаждение неподвижного двигателя происходит медленнее, чем нагрев. Обычно постоянная времени нагрева двигателей находится в пределах от нескольких минут до нескольких часов.

Различные условия работы производственных механизмов обуславливают различные режимы работы ЭП, которые классифицируются на 8 режимов. Все режимы связаны с тепловыми процессами, протекающими в электродвигателях. Промышленностью выпускаются электродвигатели общего применения на 3 режима - от S1 до S3.

В каком случае на рисунке в точке  $A$  постоянная времени охлаждения определена правильно?

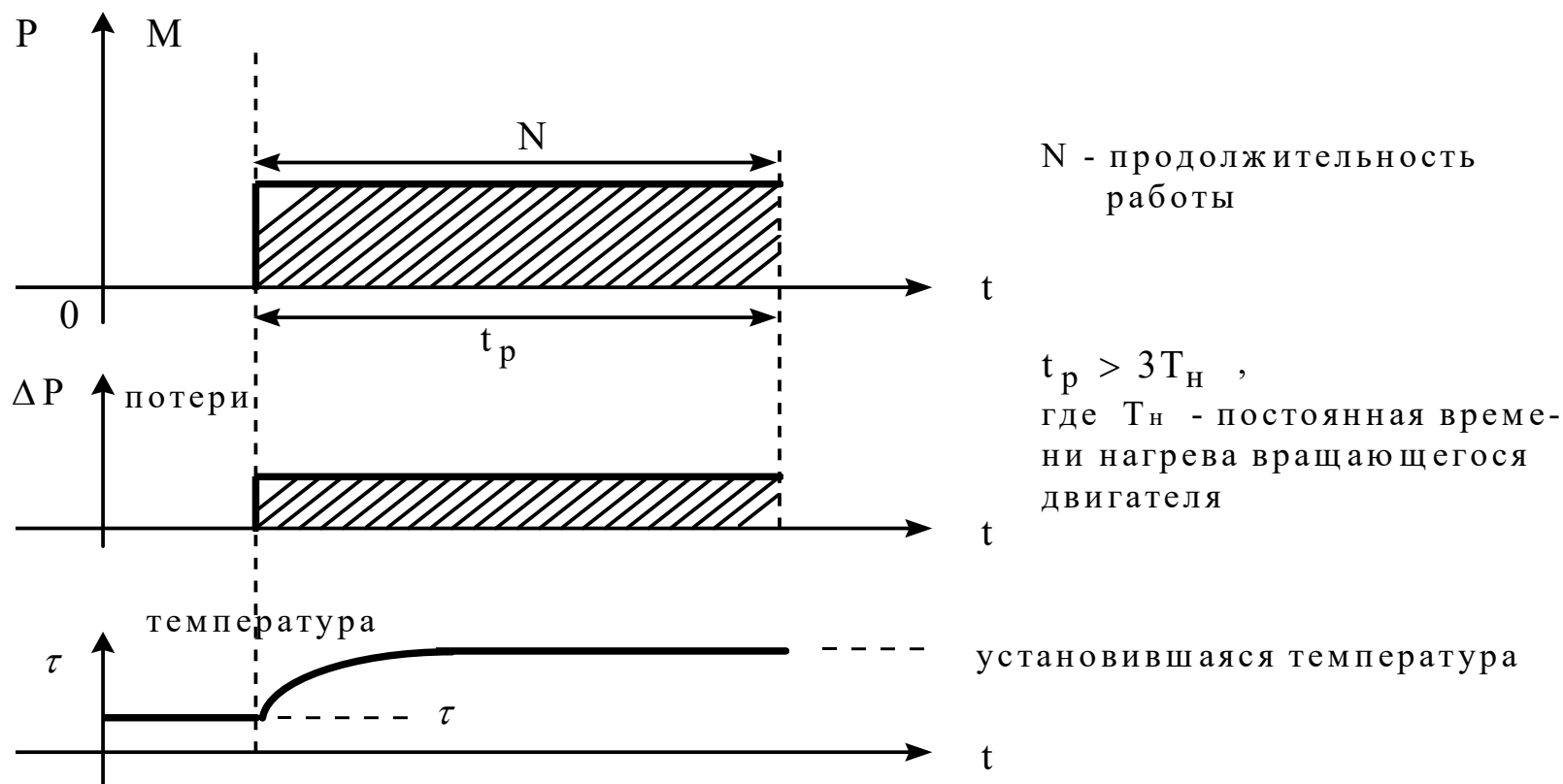


## Режимы работы электроприёмников

- продолжительный S1;
- кратковременный S2;
- повторно-кратковременный S3;
- повторно-кратковременный с частыми пусками S4;
- повторно-кратковременный с частыми пусками и электрическим торможением S5;
- перемежающийся S6;
- перемежающийся с частыми реверсами S7;
- перемежающийся с двумя или более частотами вращения S8.

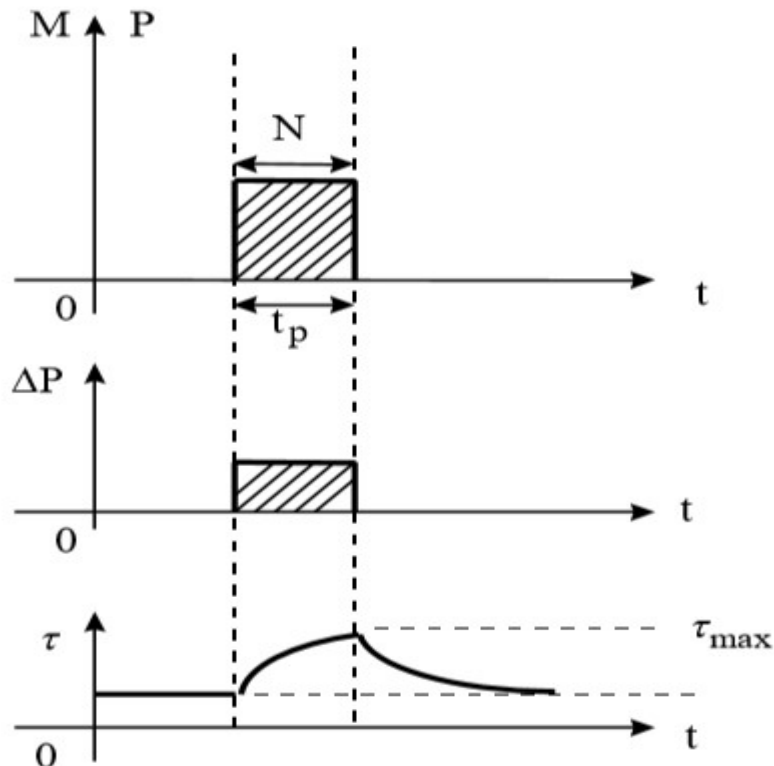
## Продолжительный номинальный режим работы (S1)

- это режим при неизменной номинальной нагрузке, продолжающийся столько времени, что превышение температуры всех частей двигателя, при неизменной температуре окружающей среды, достигают практически установившихся значений (насосы, вентиляторы, компрессоры).



## Кратковременный режим работы S2

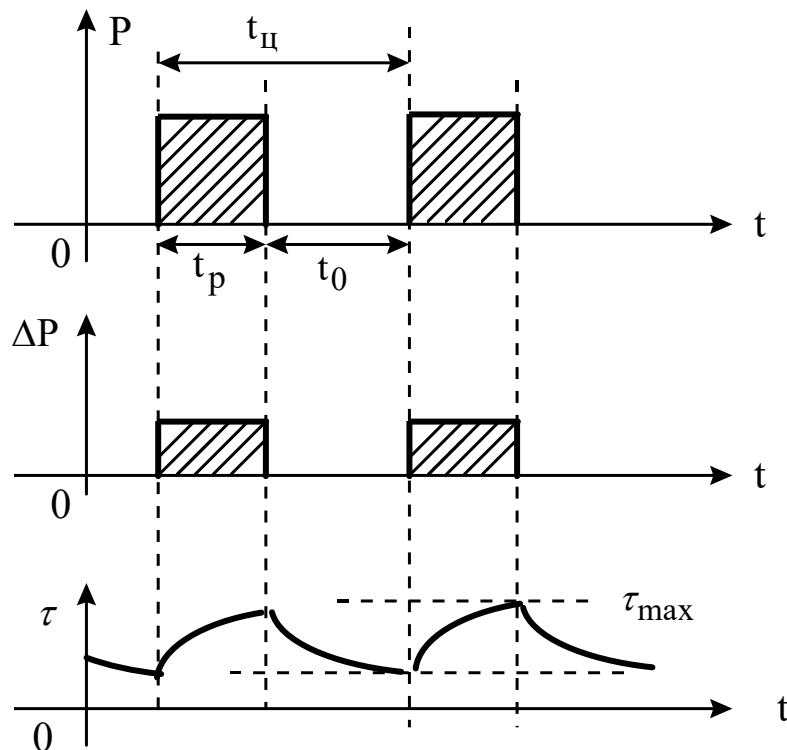
- режим, при котором периоды неизменной номинальной нагрузки чередуются с периодами отключения машины; за время нагрузки превышение температуры не достигает практически установившихся значений, а во время паузы двигатель успевает охладиться до температуры окружающей среды (зажимные приспособления металлорежущих станков, шлюзовые устройства, разводные мосты).



Рекомендуются продолжительности рабочего периода 10, 30, 60 и 90 мин.

## Повторно-кратковременный режим работы S3

- режим, при котором кратковременные периоды неизменной номинальной нагрузки чередуются с периодами отключения машины, при этом нагрев не превышает длительно допустимой температуры, а охлаждение не достигает температуры окружающей среды (электродвигатели мостовых кранов, подъемников, сварочные установки).



$$t_p \ll 3T_H$$
$$t_0 \ll 3T_0$$

$t_{\text{ц}} \leq 10$  мин., иначе – продолжительный режим



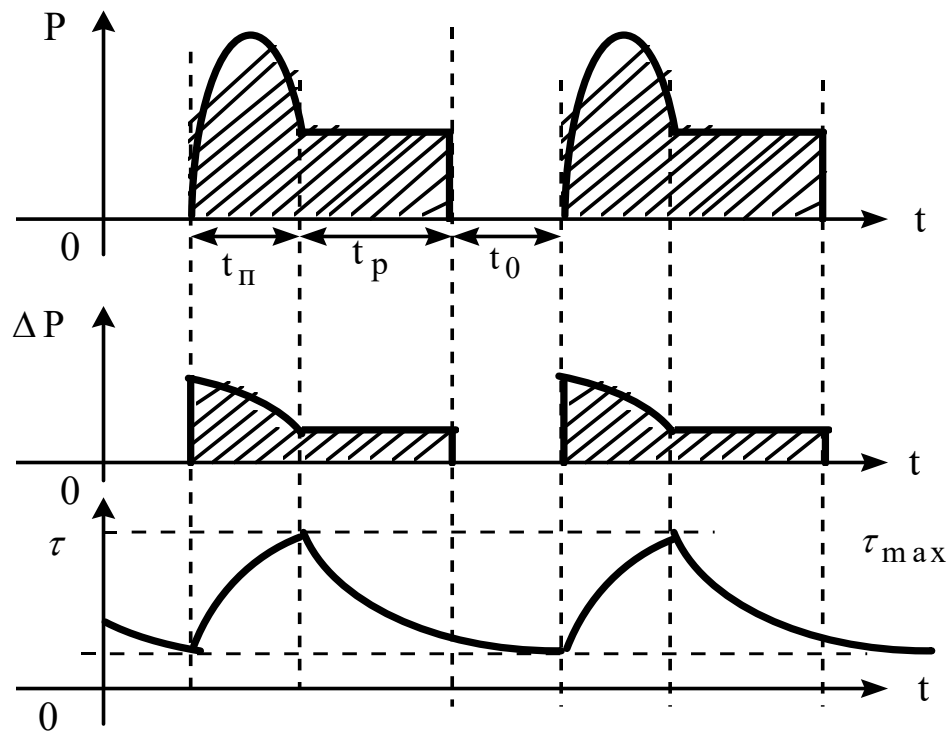
Режим характеризуется относительной продолжительностью включения ПВ = 15, 25, 40, 60 %, которая определяется по формуле

$$\text{ПВ} = \frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100\% = \frac{t_p}{t_{\text{Ц}}} \cdot 100\%$$

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

## Повторно-кратковременный номинальный режим с частыми пусками S4

- 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.



Характеризуется ПВ, числом пусков в час и коэффициентом инерции привода.

$$\text{ПВ} = \frac{t_{\text{п}} + t_{\text{р}}}{t_{\text{п}} + t_{\text{р}} + t_0} \cdot 100\%;$$

Стандартные ПВ - 15, 25, 40, 60 %.

Число пусков в час: N=30, 60, 120, 240.

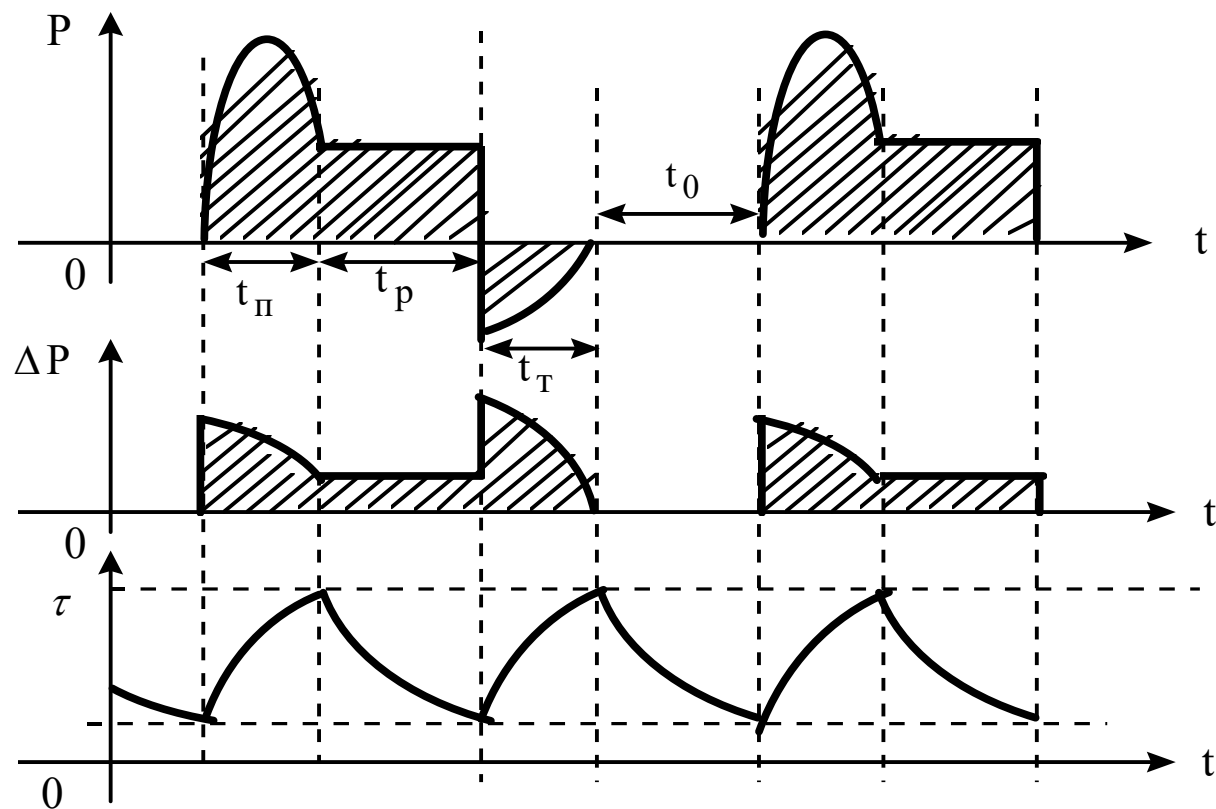
$F_J$  - коэффициент инерции - это отношение суммарного момента инерции привода к моменту инерции якоря (ротора) двигателя:

$$F_J = \frac{J_{\Sigma}}{J_p}$$

Стандартные значения: 1,2; 1,6; 2,5; 4; 6,3; 10.

## Повторно-кратковременный с частыми пусками и электрическим торможением S5

- периоды пуска, кратковременной неизменной номинальной нагрузки и электрического торможения чередуются с периодами отключения машины. Рабочие периоды, как и паузы не настолько длительны, чтобы превышение температуры частей машины могли достигнуть установившихся значений.



Потери пусковые и при электрическом торможении оказывают существенное влияние на превышение температуры частей машины.

Режим характеризуется ПВ, числом пусков в час, коэффициентом инерции.

$$\text{ПВ} = \frac{t_{\text{П}} + t_{\text{р}} + t_{\text{Т}}}{t_{\text{П}} + t_{\text{р}} + t_{\text{Т}} + t_0} \cdot 100\%;$$

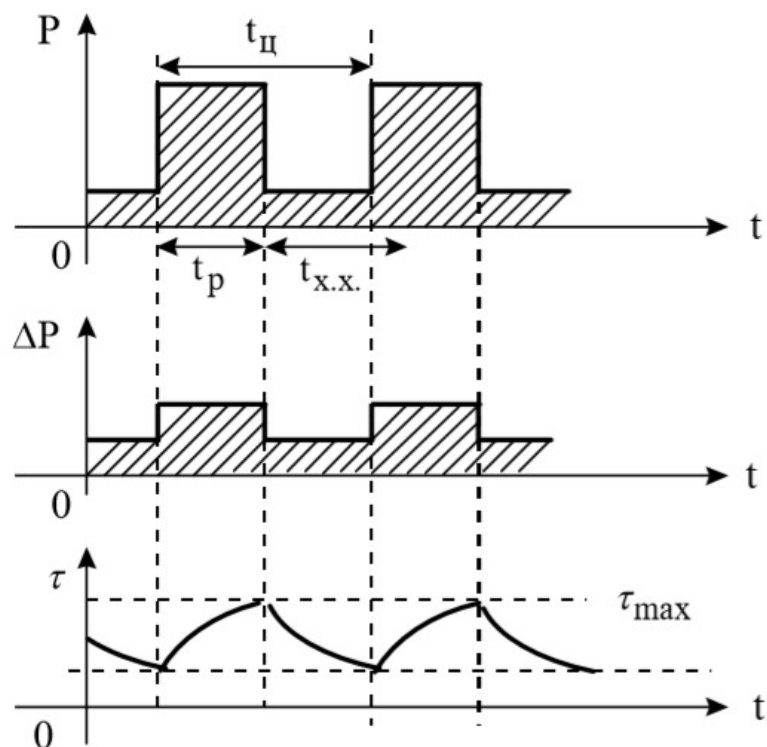
Стандартные ПВ - 15, 25, 40, 60 %.

Число пусков в час: N=30, 60, 120, 240.

Коэффициент инерции: 1,2; 1,6; 2; 2,5; 4.

## Переключающийся номинальный режим S6

- кратковременные периоды неизменной номинальной нагрузки чередуются с периодами холостого хода, во время которых двигатель не отключается от сети. За рабочие периоды и периоды хх превышение температуры не достигает установившихся значений. Продолжительность одного цикла  $t_{\text{ц}} \leq 10$  мин.



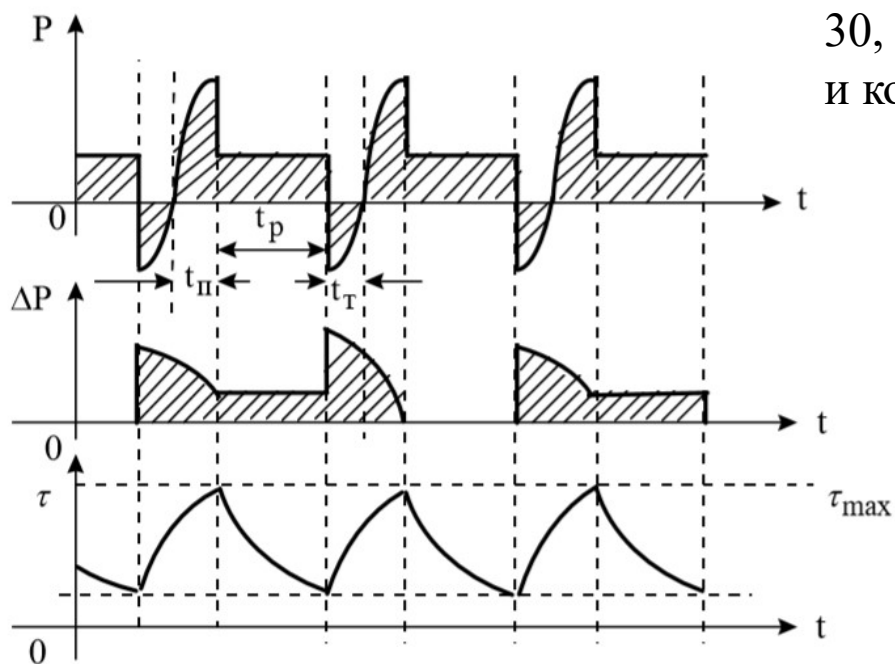
Относительная продолжительность нагрузки

$$\text{ПН} = \frac{t_p}{t_p + t_{\text{хх}}} \cdot 100\%,$$

Стандартные ПН - 15, 25, 40, 60 %.

## Переключающийся номинальный режим работы с частыми реверсами S7

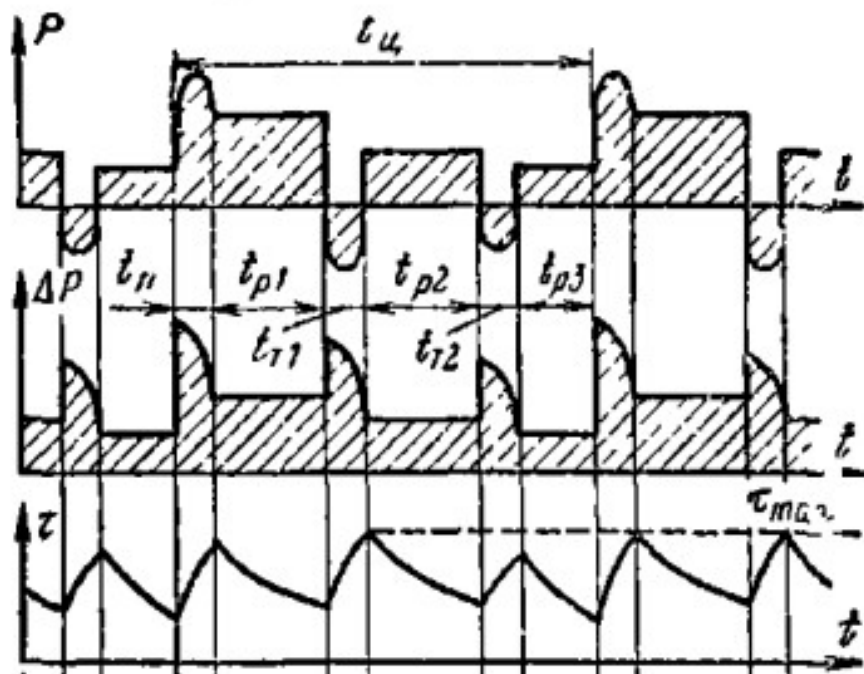
– периоды реверса при торможении чередуются с периодами неизменной номинальной нагрузки. Потери при реверсировании оказывают существенное влияние на превышение температуры частей машины, которая работает без остановки, находясь постоянно под напряжением.



Характеризуется числом реверсов в час:  
30, 60, 120, 240  
и коэффициентом инерции  $F_J$  как и для S5.

## Перебегающий режим работы с двумя или более угловыми скоростями S8

- периоды с одной нагрузкой на одной угловой скорости чередуются с периодами работы на другой угловой скорости при соответствующей этой скорости нагрузке. Потери при переходе с одной угловой скорости на другую оказывают существенное влияние на превышения температуры частей машины.





Режим характеризуется числом циклов в час, коэффициентом инерции, относительной продолжительностью нагрузки в % на отдельных ступенях:

$$\text{ПН}_1 = \frac{t_{\text{П}} + t_{\text{p1}}}{t_{\text{П}} + t_{\text{p1}} + t_{\text{T1}} + t_{\text{p2}} + t_{\text{T2}} + t_{\text{p3}}} \cdot 100\%;$$

$$\text{ПН}_2 = \frac{t_{\text{T1}} + t_{\text{p1}}}{t_{\text{П}} + t_{\text{p1}} + t_{\text{T1}} + t_{\text{p2}} + t_{\text{T2}} + t_{\text{p3}}} \cdot 100\%;$$

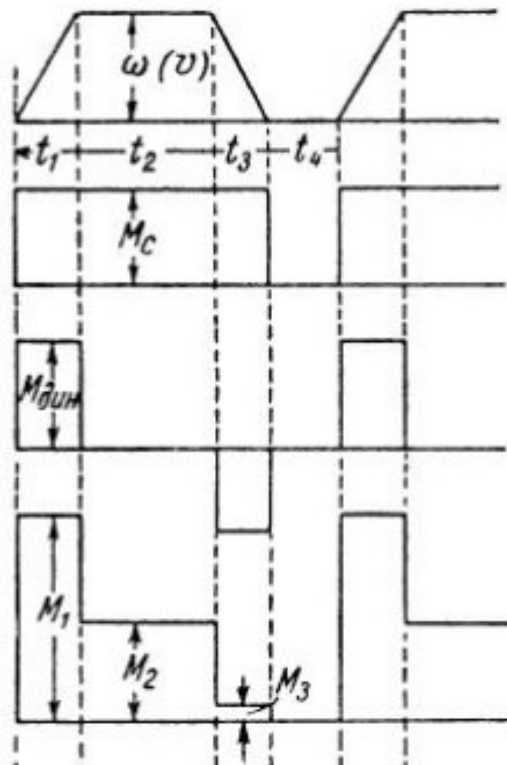
$$\text{ПН}_3 = \frac{t_{\text{T2}} + t_{\text{p2}}}{t_{\text{П}} + t_{\text{p1}} + t_{\text{T1}} + t_{\text{p2}} + t_{\text{T2}} + t_{\text{p3}}} \cdot 100\%;$$

где  $t_{\text{p1}}, t_{\text{p2}}, t_{\text{p3}}$  – время работы на каждой угловой скорости;  
 $t_{\text{T1}}, t_{\text{T2}}$  - время электрического торможения,  $t_{\text{П}}$  – время пуска.  
Стандартные значения числа циклов в час: 30, 60, 120, 240.  
 $F_J = 1,2; 1,6; 2; 2,5; 4.$

# Нагрузочные диаграммы ЭП и методы их построения

Нагрузочная диаграмма ЭП характеризует зависимость вращающегося момента или мощности, развиваемой двигателем от времени.

Построение  $M(t)$  сводится к решению уравнения движения аналитическими классическим или операторным методами.

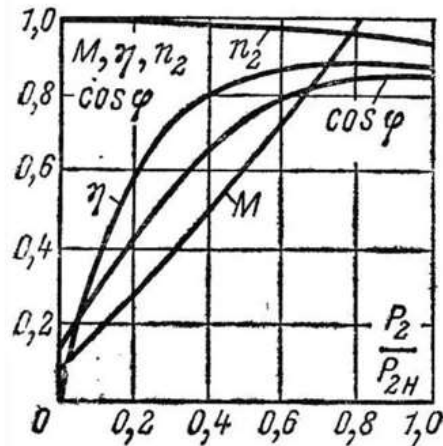


$$M = M_c + J \frac{d\omega}{dt}$$

Нагрузочная диаграмма и тахограмма шахтного подъемника с уравновешенным канатом

# От правильного выбора ЭД по мощности зависят его надежность и КПД

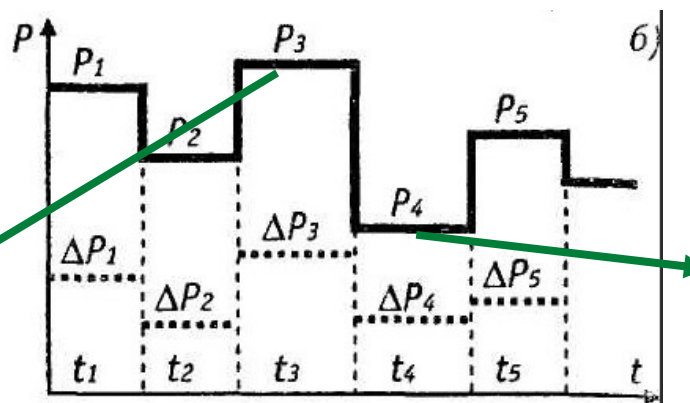
Если нагрузка превышает номинальную, это приводит к увеличению токов и потерь мощности выше номинальных значений, вследствие этого превышение температуры может превысить допустимые значения.



Когда нагрузка ЭД существенно меньше номинальной, он недоиспользуется по мощности, что свидетельствует об излишних капитальных вложениях, его КПД и коэффициент мощности заметно снижаются

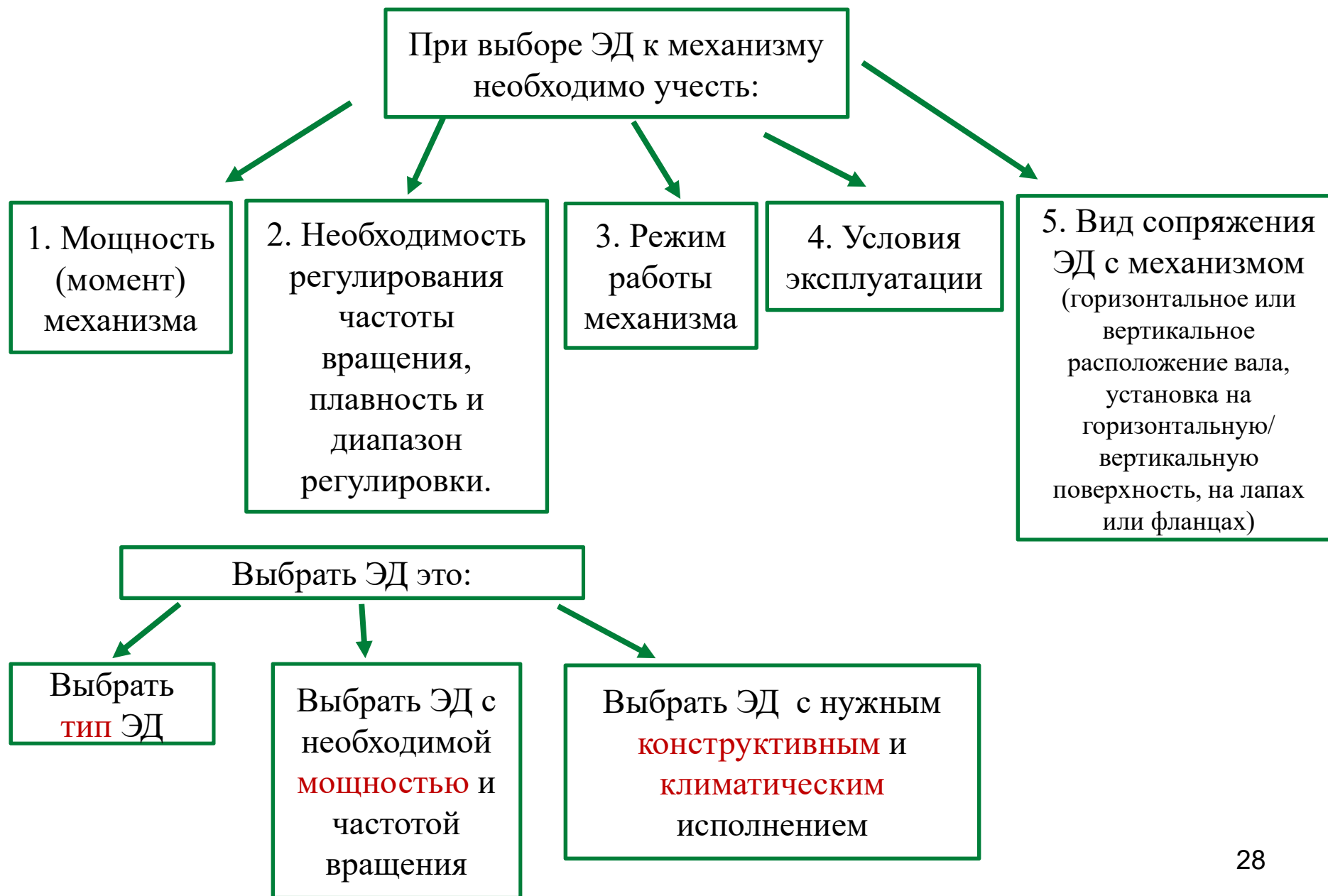
Задача выбора ЭД осложняется тем, что нагрузка на его валу изменяется во времени, вследствие чего изменяются потери мощности и температура двигателя.

Если выбрать ЭД с номинальной мощностью, равной наибольшей мощности нагрузки, он будет недоиспользован по мощности.



Недопустимо выбирать номинальную мощность ЭД равной минимальной мощности нагрузки.

# Выбор электродвигателя



## Выбор мощности двигателя при режиме S1

Правильно выбранный двигатель должен работать сколь угодно долго, не перегреваясь, сверх допустимого значения температуры.

По каталогу выбирается двигатель с мощностью  $P_H$ , больше чем расчетная

$$P_H \geq k_3 P_{\text{расч}}$$

$k_3 = 1,05 \dots 1,3$  - большие значения коэффициента запаса выбирают при наличии значительных динамических нагрузок.

Проверка по нагреву не проводится, т.к. при соблюдении данного условия двигатель работает в режиме, близком номинальному.

Для тяжелых условий пуска дополнительно осуществляется проверка величины пускового момента двигателя так, чтобы он превышал момент сопротивления механизма.

Для многих механизмов существуют эмпирические выражения для расчёта мощности двигателя.

Расчетная мощность двигателя  $P$  (кВт), требуемая для ЭП, определяется  $M_c$  и требуемой частотой вращения вала двигателя  $n$  (об/мин):

$$P = 0,105 \frac{M_c \cdot n \cdot 10^{-3}}{\eta_{\text{мех}}} = \frac{M_c \cdot \omega \cdot 10^{-3}}{\eta_{\text{мех}}}$$

где  $\eta_{\text{мех}}$  — КПД механизма с учетом редуктора.

## Расчетная мощность двигателя центробежного насоса, кВт

$$P = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H \cdot g \cdot 10^{-3}}{\eta_{\text{нас.}} \cdot \eta_{\text{пер.}}}$$

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение силы тяжести;  $\gamma$  – плотность перекачиваемой жидкости,  $\text{кг/м}^3$ ;  $Q$  – подача насоса,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $H$  – высота подачи,  $\text{м}$ ;  $\eta_{\text{нас.}}$  – КПД насоса;  $\eta_{\text{пер.}}$  – КПД передаточного устройства.

## Расчетная мощность двигателя для вентилятора, кВт

$$P = \frac{k \cdot Q \cdot p \cdot 10^{-3}}{\eta_{\text{в}} \cdot \eta_{\text{пер.}}}$$

где  $k$  – коэффициент запаса

( $k = 1,1 \div 1,2$  при  $P > 5$  кВт,  $k = 1,5$  при  $P < 5$  кВт);

$Q$  – количество нагнетаемого воздуха,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $p$  – давление вентилятора на выходе,  $\text{Па}$ ;  $\eta_{\text{в}}$  – КПД вентилятора.

## Переменная нагрузка (S6)

Необходимо проверить выбранный двигатель продолжительного режима по нагреву, определив  $\tau_{\max}$ . Прямой метод проверки предусматривает построение

$$\tau(t) = (\tau_{\text{нач.}} - \tau_{\text{уст.}}) e^{-t/T_H} + \tau_{\text{уст.}}$$

определение по ней  $\tau_{\max}$  и проверку условия  $\tau_{\max} \leq \tau_{\text{доп.}}$ .

Значения  $A$ ,  $C$ ,  $T_H$  не приводятся в каталоге на двигатели, расчет их трудоемков и приближителен, т.о. на практике задача проверки двигателей по нагреву решается с помощью косвенных методов.

