

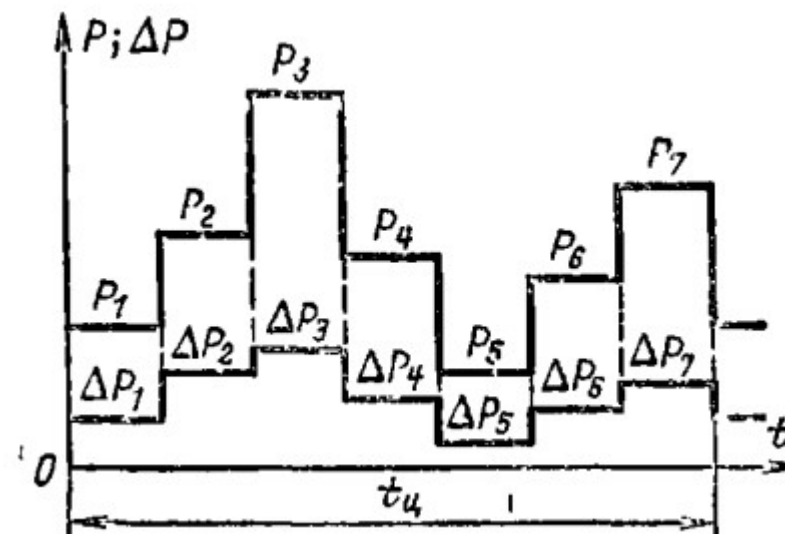
## Переменная нагрузка (S6)

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.



# Проверка двигателей по нагреву

- а) метод средних потерь;
- б) метод эквивалентного тока;
- в) метод эквивалентного момента;
- г) метод эквивалентной мощности.

Метод средних потерь является универсальным и пригоден для любых двигателей и графиков нагрузки.

## Алгоритм выбора мощности методом средних потерь

1. По нагрузочной диаграмме механизма определяют среднюю мощность на валу двигателя. Если двигатель с независимой вентиляцией или работает с постоянной угловой скоростью близкой к номинальной, то средняя мощность

$$P_{\text{ср}} = \frac{1}{t_{\text{ц}}} \cdot \sum_{i=1}^n P_i \cdot t_i$$

В случае самовентилируемого двигателя, работающего с различными скоростями

$$P_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot \frac{\omega_{\text{н}}}{\omega_i} \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n \beta_i \cdot t_i} .$$

$\beta_i = \beta_0 + (1 - \beta_0) \frac{\omega_i}{\omega_{\text{н}}}$  – коэффициент ухудшения теплоотдачи на  $i$ -м интервале цикла, а  $\beta_0$  – в неподвижном состоянии.

2. Выбирается по каталогу двигатель с номинальной мощностью

$$P_{\text{H}} = k_3 \cdot P_{\text{ср}}$$

3. Для каждого интервала постоянной нагрузки по кривым КПД или по справочной таблице каталога определяют потери мощности

$$\Delta P_i = \frac{P_i(1 - \eta_i)}{\eta_i}$$

если таких данных нет, то

$$\Delta P_i = \frac{\Delta P_{\text{H}}(\alpha + k_i^2)}{\alpha + 1}$$

$$\alpha = \frac{\Delta P_{\text{C}}}{\Delta P_{\text{VH}}}$$

$$k_i = \frac{I_i}{I_{\text{H}}}$$

$$\Delta P_{\text{H}} = \frac{P_{\text{H}}(1 - \eta_{\text{H}})}{\eta_{\text{H}}}$$

## Приблизительные значения $\alpha$ для различных двигателей:

АД общего назначения с КЗ ротором.....	0,5 - 0,7
АД крановые, с КЗ ротором.....	0,4-0,5
с фазным ротором.....	0,6-0,9
Двигатели постоянного тока	
Независимого возбуждения.....	0,5-0,9
ДПТ крановые.....	1,0-1,5

Большие значения  $\alpha$  соответствуют двигателям большей мощности.

4. Определяют средние потери в двигателе и сопоставляют их с номинальными

$$\Delta P_{\text{ср}} = \frac{1}{t_{\text{ц}}} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta P_i \cdot t_i$$

$$\Delta P_{\text{ср}} \leq \Delta P_{\text{н}}$$

Если средние потери в двигателе существенно отличаются от номинальных в ту или иную сторону, то выбирают ближайший по мощности двигатель и повторяют расчёт.

Окончательно выбранный двигатель следует проверить на величину начального пускового момента и перегрузочную способность.

Поскольку в принятом типоразмере средние потери не превышают величину номинальных потерь, проверки двигателя на нагрев не требуется.

Во многих случаях без существенно ущерба для результата можно пользоваться методами эквивалентного тока, эквивалентного момента и эквивалентной мощности, полученными на основе метода средних потерь.

## Метод эквивалентного тока

основан на том, что действительная протекающая в двигателе сила тока при различных нагрузках заменяется в расчетах эквивалентной силой тока неизменной величины, создающей в двигателе за рассматриваемый промежуток времени те же потери, что и реально протекающий ток.

$$I_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + \dots + I_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}$$

Применим, если **потери в стали и механические потери не зависят от нагрузки и величина сопротивления главной цепи двигателя остается постоянной на всех участках** заданного графика нагрузки.

**Условие проверки на нагрев:**

$$I_{\text{ЭКВ}} \leq I_{\text{НДВ}}$$

## Метод эквивалентного момента

Используется, если **момент двигателя пропорционален току (поток постоянен)**).

$$M_{\text{сЭКВ}} = \sqrt{\frac{M_{\text{с1}}^2 \cdot t_1 + M_{\text{с2}}^2 \cdot t_2 + \dots + M_{\text{сn}}^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}$$

**Эквивалентный момент** – это постоянный момент нагрузки, вызывающий такой же нагрев двигателя, как и реально изменяющийся момент в соответствии с графиком работы механизма.

Если  $M_{\text{сЭКВ}} \leq M_{\text{ндв}}$ , то двигатель удовлетворяет условиям нагрева.



Метод применим для проверки синхронных, асинхронных двигателей нормального исполнения и ДПТ независимого возбуждения при работе с постоянным магнитным потоком.

## Проверка перегрузочной способности

$$M_{с\max} \leq \lambda \cdot M_{\text{ндв}} \quad \lambda = \frac{M_{\text{мах дв}}}{M_{\text{ндв}}}$$

$$M_{\text{сп}} \leq \lambda_{\text{п}} \cdot M_{\text{ндв}} \quad \lambda_{\text{п}} = \frac{M_{\text{пдв}}}{M_{\text{ндв}}}$$

## Метод эквивалентной мощности

Применяется если между  $P$  и  $I$  существует прямая пропорциональность (работа двигателя с постоянным  $\Phi$  и  $n$ ).

$$P_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + \dots + P_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}$$

Если  $P_{\text{ЭКВ}} \leq P_{\text{НДВ}}$ , то двигатель выбран верно. Этот метод применим для проверки по нагреву СД, АД и ДПТ НВ с номинальным потоком и постоянной или мало меняющейся скоростью вращения.

$$P_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( P_i \cdot \frac{\omega_{\text{Н}}}{\omega_i} \right)^2 \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n \beta_i \cdot t_i}}$$

С учетом условий ухудшения охлаждения у двигателей с самовентиляцией во время пауз и при снижении скорости

$$P_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{\beta_1 t_1 + \beta_2 t_2 + \dots + \beta_n t_n + \beta_0 t_0}}$$

ИЛИ

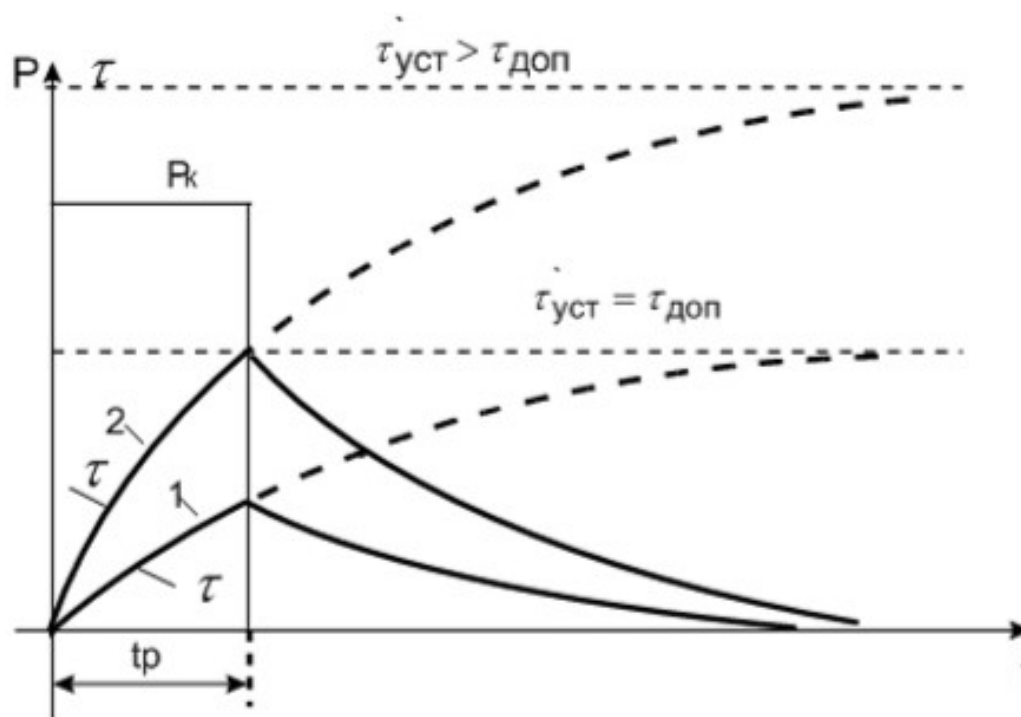
$$I_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{\beta_1 t_1 + \beta_2 t_2 + \dots + \beta_n t_n + \beta_0 t_0}}$$

где  $\beta_1=0,5$  - коэф-т, учитывающий ухудшение условий охлаждения при разгоне и торможении;  $\beta_2= 0,8\div 1$  - коэф-т, учитывающий ухудшение условий охлаждения при работе с постоянной скоростью;  $\beta_0= 0,3$  - коэф-т, учитывающий ухудшение условий охлаждения при стоянке двигателя за время  $t_0$ .

## Выбор двигателя при кратковременном режиме S2

Могут быть выбраны:

- двигатели из серии продолжительного режима работы S1;
- специальные двигатели из серии кратковременного режима S2.



Если двигатель предназначен для режима S1 (1), то при работе в режиме S2 он будет недоиспользован и его можно перегружать (2). 12

Чтобы определить, насколько можно перегружать двигатель используют:

### коэффициент термической перегрузки

$$P_{\tau} = \frac{\Delta P_{\text{к}}}{\Delta P_{\text{н}}} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_p}{T_{\text{н}}}}}$$

- отношение потерь мощности кратковременной нагрузки к номинальным потерям в режиме S1 при условии одинакового допустимого значения превышения температуры

### коэффициент механической перегрузки

$$P_{\text{м}} = \frac{P_{\text{к}}}{P_{\text{н}}}$$

- отношение мощности при кратковременной нагрузке к номинальной мощности двигателя при длительной нагрузке

## Коэффициент механической перегрузки

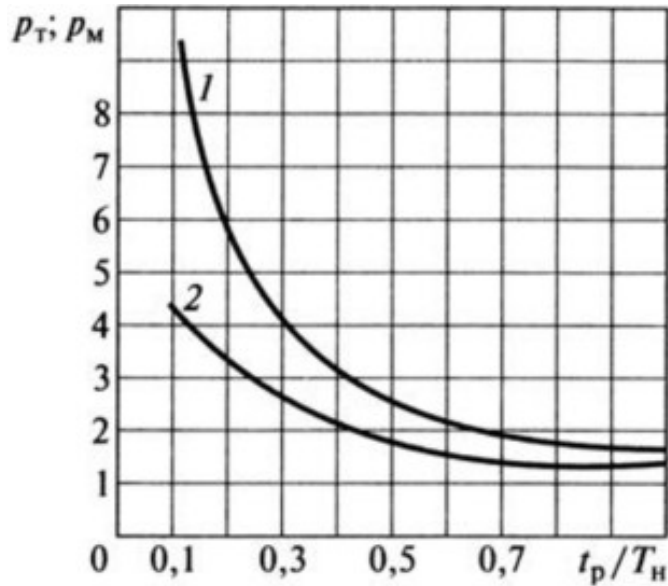
$$p_M = \sqrt{p_\tau (\alpha + 1) - \alpha}$$

$$\alpha = \frac{\Delta P_C}{\Delta P_{\text{ВН}}}$$

Если пренебречь постоянными потерями ( $\alpha=0$ )

$$p_M = \sqrt{p_\tau} = \sqrt{\frac{1}{(1 - e^{-\frac{t_p}{T_H}})}}$$

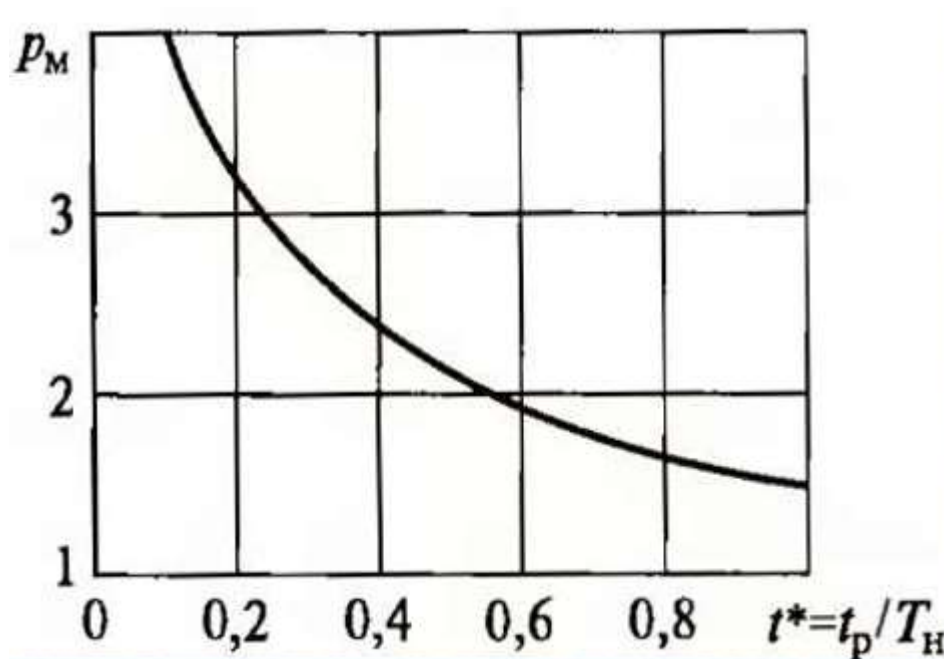
Коэффициенты можно посмотреть в таблицах, каталогах  
для двигателей



1 - график коэффициента  
термической перегрузки;  
2 - график коэффициента  
механической перегрузки

Тогда, мощность двигателя при кратковременном режиме  
работы

$$P_K = P_H \cdot p_M$$

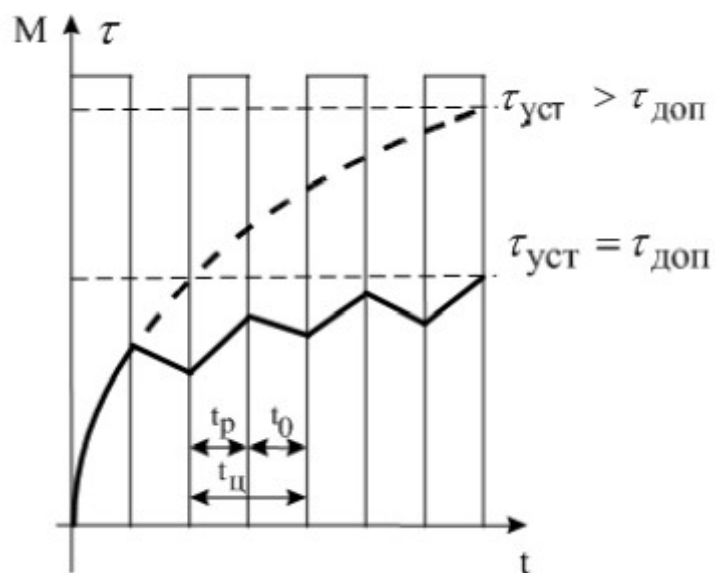


При  $t_p / T_H = 0,3 \div 0,4$   $p_M \approx 2,5$ , что соответствует перегрузочной способности двигателей. При меньших  $t_p / T_H$  полное использование таких двигателей по нагреву ограничивается их перегрузочной способностью - при малых отношениях  $t_p / T_H$  двигатели недоиспользуются по нагреву, поэтому можно не производить проверку двигателя по нагреву, а ограничиться его проверкой по условиям перегрузки.



## Выбор мощности двигателя при повторно-кратковременном режиме работы.

Относительная продолжительность включения за цикл

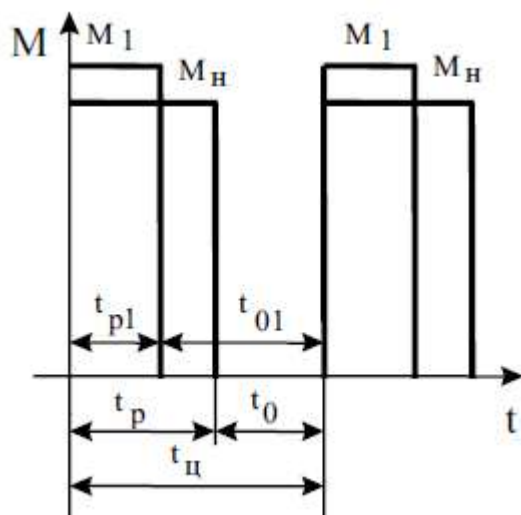


$$ПВ = \frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100\% \quad t_{ц} \leq 10 \text{ мин}$$

Выпускаются специальные серии двигателей для ПК режима с указанием  $P_H$  при нормативной продолжительности включения  $ПВ_H \% = 15, 25, 40, 60, 100 \%$ .

Если мощность и ПВ соответствуют каталожным, можно не проводить проверку на нагрев.

Если в реальном случае  $PВ_1$  отличается от  $PВ_H$ , то  $PВ_1$  соответствует  $M_1$ , а  $PВ_H$  соответствует  $M_H$



Чтобы не было перегрева, необходимо выполнить условие:

$$\Delta P_H \geq \Delta P_1 \frac{PВ_1}{PВ_H}$$

Заменяя потери мощности через постоянные и переменные потери

$$I_H \geq I_1 \cdot \sqrt{\frac{PВ_1}{\left[ \alpha \cdot (PВ_H - PВ_1) + PВ_H \right]}}$$

При условии постоянства магнитного потока за цикл работы

$$M_H \geq M_1 \cdot \sqrt{\frac{PВ_1}{\left[ \alpha \cdot (PВ_H - PВ_1) + PВ_H \right]}}$$

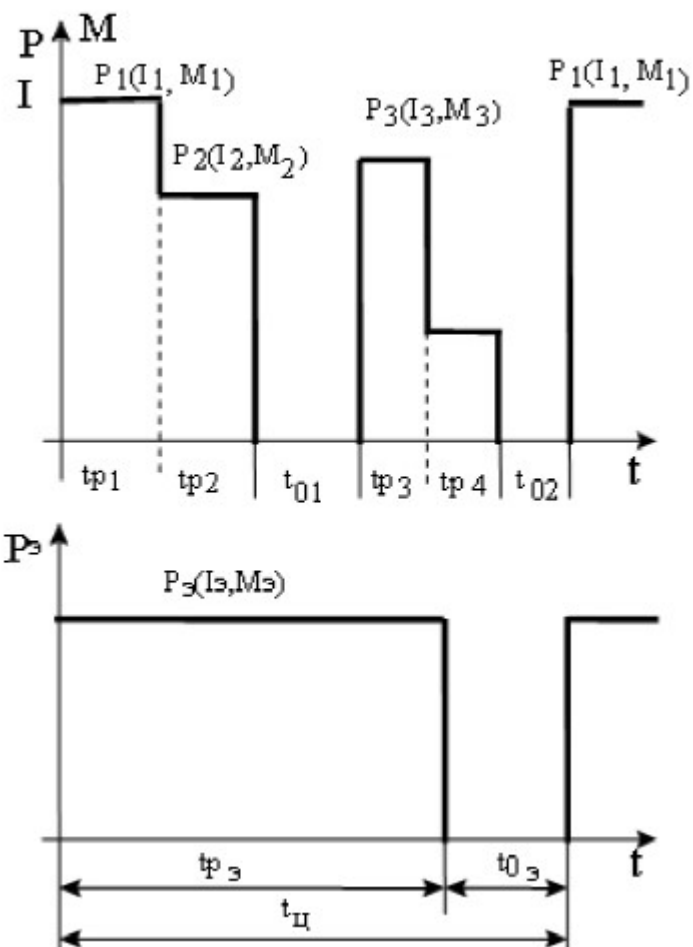
При условии неизменности скорости двигателя

$$P_H \geq P_1 \cdot \sqrt{\frac{PВ_1}{\left[ \alpha \cdot (PВ_H - PВ_1) + PВ_H \right]}}$$

При выполнении данных условий температура двигателя не будет превосходить допустимого значения.

Если двигатели предназначены для режима S1, то в формулах  $P_{ВН}=100\%$ . При  $\alpha \cdot (P_{ВН} - P_{В1}) \approx 0$

$$M_{Н} \geq M_1 \cdot \sqrt{\frac{P_{В1}}{P_{ВН}}} \quad I_{Н} \geq I_1 \cdot \sqrt{\frac{P_{В1}}{P_{ВН}}} \quad P_{Н} \geq P_1 \cdot \sqrt{\frac{P_{В1}}{P_{ВН}}}$$



Если нагрузка за цикл непостоянна, то нагрузочные диаграммы должны быть заменены эквивалентными нагрузочными диаграммами

$$P_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_{p1} + P_2^2 \cdot t_{p2} + \dots + P_m^2 \cdot t_{pm}}{t_{p1} + t_{p2} + \dots + t_{pm}}}$$

$$M_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_{p1} + M_2^2 \cdot t_{p2} + \dots + M_m^2 \cdot t_{pm}}{t_{p1} + t_{p2} + \dots + t_{pm}}}$$

$$\text{ПВ}_{\text{ЭКВ}} = \frac{t_{\text{рэ}}}{t_{\text{рэ}} + t_{0э}} \cdot 100\%$$

$$t_{\text{рэ}} = \sum_{i=1}^m t_{\text{р}_i} \quad t_{0э} = \sum_{q=1}^n t_{0_q}$$

$m$  – число рабочих участков,  $n$  – число пауз в цикле.

Затем проверка по формулам на слайде 18.

## Основные системы регулируемого электропривода

Регулируемый ЭП – это электропривод, в котором скорость движения исполнительного органа изменяется в соответствии с требованиями технологического процесса. Регулируемый электропривод (РЭП) – это комплекс из двигателя и преобразовательно-регулирующего устройства.

## Основные требования

- регулирование скорости в необходимом диапазоне;
- ускорение-замедление с заданным темпом при переходе от любого начального состояния привода к заданному состоянию;
- необходимость ограничения момента, мощности, токов;
- минимизация потерь энергии в электроприводе;
- электромагнитная совместимость с системой электроснабжения.

# Системы регулируемого электропривода

1. «Генератор – двигатель»
2. Системы импульсных электроприводов
3. «Управляемый выпрямитель – двигатель»
4. «Преобразователь частоты – АД»
5. Система каскадных электроприводов
6. Асинхронный электропривод двойного питания

## *Система «Генератор – двигатель постоянного тока»*

Устарела морально и технически, не используется в новых разработках, но продолжает эксплуатироваться в установках большой мощности, например, в электроприводах клеток прокатных станов и экскаваторах.

Достоинства:

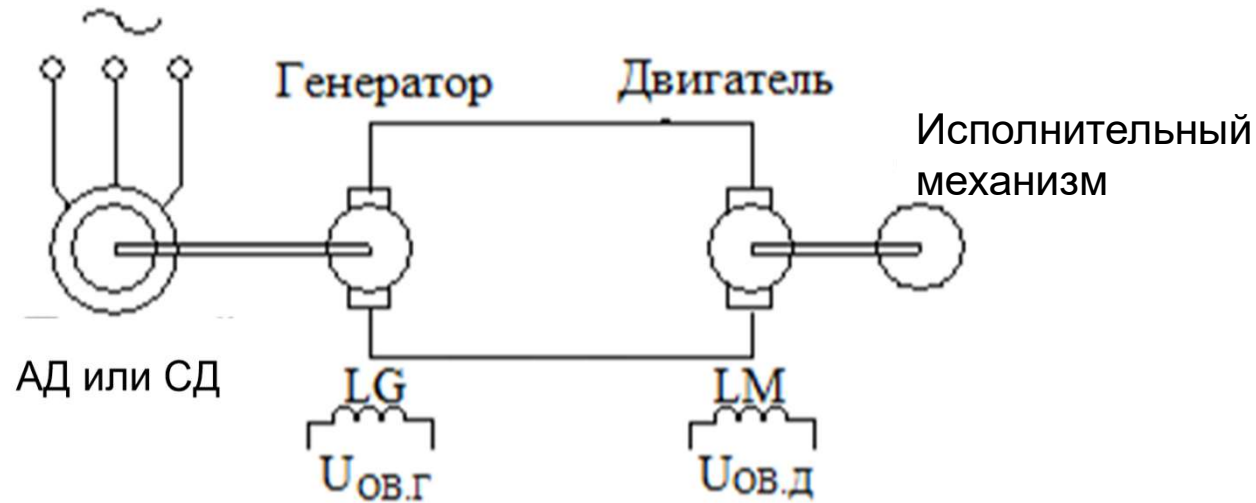
1. Отсутствуют громоздкие пусковые реостаты и потери в них.
2. Управление процессами перенесено в цепи возбуждения, имеющие небольшие токи, что облегчает и удешевляет аппаратуру.
3. Сравнительно высокий диапазон регулирования.

Недостатки:

1. Два вращающихся агрегата - высокая установленная мощность, превышающая в 3 раза мощность приводного двигателя.
2. Сравнительно низкий КПД.
3. Повышенная крутизна механических характеристик.
4. Высокая первоначальная стоимость машинного оборудования.



ДПТ приводит в движение рабочий орган ИМ. ОВГ и ОВД питаются от возбuditеля. Изменяя сопротивление ОВ генератора, меняют напряжение, подводимое к якорю двигателя, регулируя частоту вращения двигателя. Двигатель при этом работает с полным и неизменным потоком.



$$E_{\Gamma} = k_{\Gamma} \cdot \Phi_{\Gamma} \cdot \omega_{\Gamma}$$

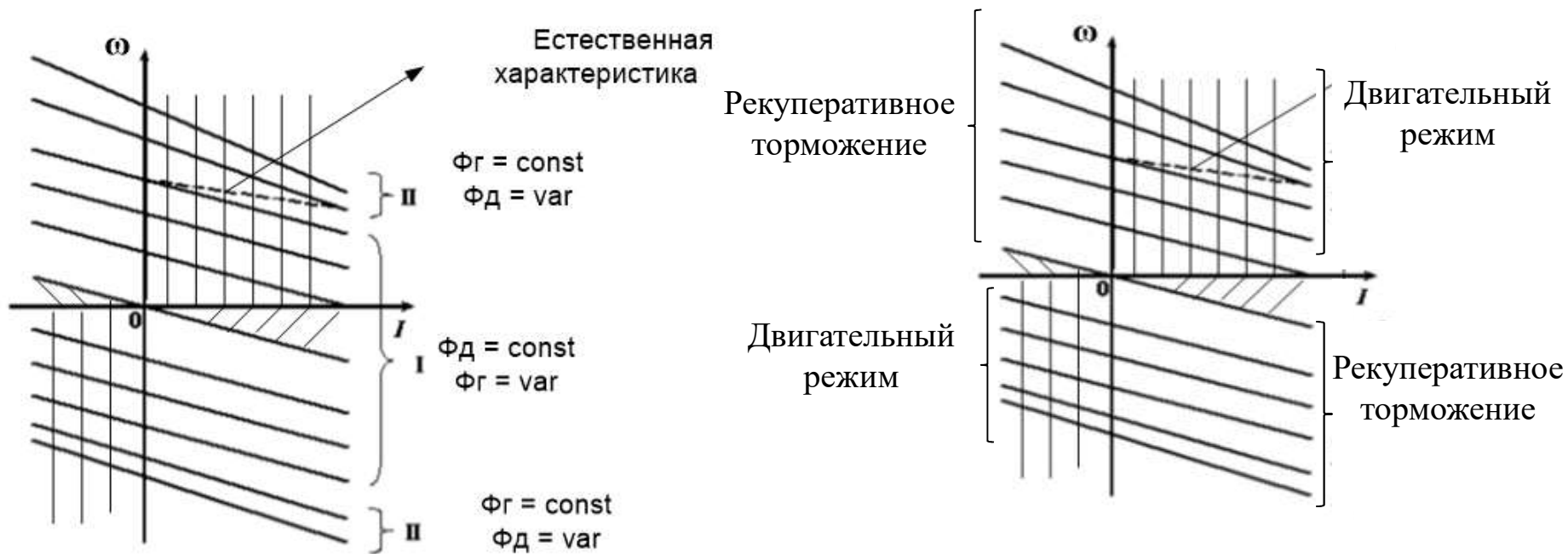
$$M = k\Phi_{\text{Д}} I_{\text{я}}$$

$$I_{\text{я}} = \frac{E_{\Gamma} - E_{\text{ДВ}}}{R_{\text{яДВ}} + R_{\text{яГ}}}$$

## Уравнения электромеханической и механической характеристик

$$\omega = \frac{E_{\Gamma}}{k \cdot \Phi_{\text{д}}} - I_{\text{я}} \frac{R_{\text{ядв}} + R_{\text{яг}}}{k \cdot \Phi_{\text{д}}}$$

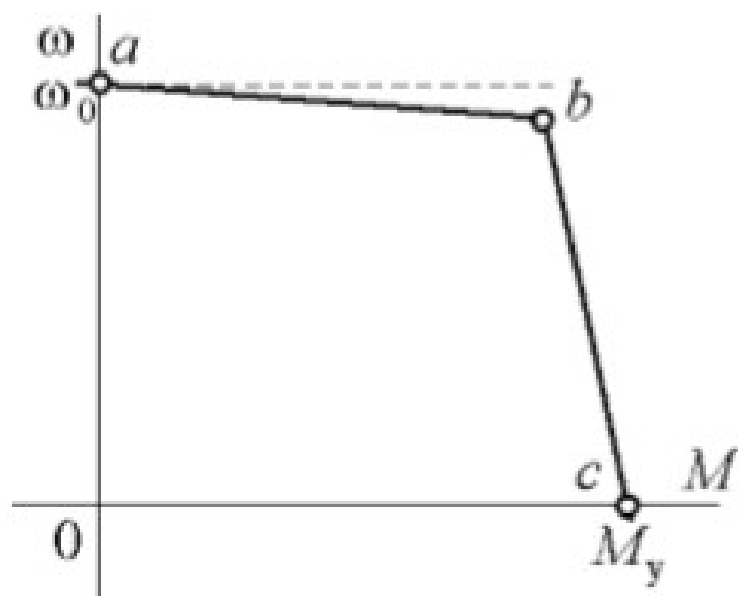
$$\omega = \frac{E_{\Gamma}}{k \cdot \Phi_{\text{д}}} - M \frac{R_{\text{ядв}} + R_{\text{яг}}}{(k \cdot \Phi_{\text{д}})^2}$$



Диапазон регулирования 1:30

Ряд машин и механизмов работают с частыми и большими перегрузками, в широком диапазоне скоростей вращения вплоть до полной остановки (одноковшовые экскаваторы, винты ледоколов, ножницы прокатных станков, нажимные винты и др.) Особенность технологических циклов - наличие режимов работы на упор, т.е. создания усилия в неподвижном состоянии, чередующихся с режимами движения с нормальной скоростью.

Необходим ЭП, который при остановке Д из-за перегрузки имел бы ограниченный ток и развивал момент, допустимый с точки зрения прочности механизма и двигателя и называемый **моментом упора**.



**Экскаваторная характеристика** имеет участок  $ab$  с высокой жёсткостью, на котором привод работает до нагрузки близкой к моменту упора  $M_y$ , после чего на участке  $bc$  скорость снижается до нуля с практически постоянным моментом.

Для получения характеристики можно использовать систему Г-Д с задержанной обратной связью.