

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Блинова Светлана Павловна

Должность: Заместитель директора учебно-воспитательной работы

Дата подписания: 13.12.2024 08:15:28

Уникальный программный ключ:

1cafd4e102a27ce11a89a2a7ceb20237f3ab5c65

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского»
Политехнический колледж

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по проведению лабораторно-практических работ междисциплинарного
курса
«Электрический привод»

для специальности:

13.02.11 Техническая эксплуатация и обслуживание электрического и
электромеханического оборудования

Методические указания по проведению лабораторно-практических работ междисциплинарного курса «Электрический привод» разработаны на основе Федерального государственного образовательного стандарта по специальности среднего профессионального образования 13.02.11 Техническая эксплуатация и обслуживание электрического и электромеханического оборудования (по отраслям).

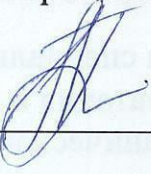
Организация-разработчик: Политехнический колледж ФГБОУ ВО «Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского»

Разработчик:

С.Л. Халивин, преподаватель высшей категории

С.И. Кудрявцев, преподаватель

Рассмотрена на заседании цикловой комиссии автоматизации технологических процессов и электромеханических дисциплин

Председатель комиссии _____  А.В. Петухова

Утверждены методическим советом Политехнического колледжа ФГБОУ ВО «Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского»

Протокол заседания методического совета № 4 от «31» 01 20 24 г.

Зам. директора по УР _____  С.П. Блинова

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания для проведения лабораторно-практических работ предназначены для студентов, обучающихся по специальности 13.02.11 Техническая эксплуатация и обслуживание электрического и электромеханического оборудования (в электроэнергетике).

Целью проведения лабораторно-практических работ является закрепление студентами теоретических знаний междисциплинарного курса.

В пособии рассматриваются следующие вопросы:

- механические характеристики и свойства электродвигателей;
- режимы работы электропривода;
- регулирование скорости электропривода;
- основы динамики и переходные процессы в электроприводе;
- выбор мощности и типа электропривода;
- основы автоматизации электропривода.

Методические указания разработаны с учетом применения практических навыков в будущей профессиональной деятельности.

Объем некоторых практических работ рассчитан на несколько занятий. Это позволяет более глубоко закрепить учебный материал.

По окончании работы студенты оформляют письменный отчет с ответами на контрольные вопросы и выполненными индивидуальными заданиями.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 1

Определение махового момента и момента инерции системы электропривода

Цель работы – расчет махового момента и момента инерции системы электропривода

Основные положения

Мощность, потребляемая электродвигателем из сети, расходуется при постоянной частоте вращения на преодоление только статической нагрузки F_c , а при изменении скорости - на преодоление как статической F_c , так и динамической нагрузок F_d во всех движущихся частях электропривода, т.е.

$$F = F_c + F_d$$

Статическая нагрузка F_c создается как моментом статического сопротивления на валу рабочего механизма, так и силами трения в передачах.

Динамическая нагрузка F_d возникает при изменении **скорости** в связи с изменением запаса кинетической энергии всех движущихся элементов механизма и привода.

Характер движения системы электропривода определяется соотношением движущего момента (силы) и момента (силы) сопротивления. Если под воздействием движущей силы F , создаваемой электродвигателем, производственный механизм, статическая сила которого равна F_c , движется поступательно, с постоянной скоростью, то силы F и F_c взаимно уравновешены, т.е. $F = F_c$.

Если же скорость движения механизма изменяется, то движущая сила расходуется на преодоление статических F_c и динамических сил F_d .

При поступательном движении уравнение равновесия сил будет иметь следующий вид:

$$F = F_c + F_d = F_c + m \cdot \frac{dv}{dt}$$

где F - движущая сила, Н;

m - масса движущего тела, кг;

v - линейная скорость движения, м/с;

t - время, с.

Электродвигатели и большинство механизмов машин совершают не поступательное, а вращательное движение, поэтому чаще используется уравнение равновесия моментов:

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

где M - движущий момент, Н·м;

M_c - статический момент, Н·м;

M_d - динамический момент, Н·м;

J - момент инерции, кг·м²;

ω - угловая скорость движения, рад/с;

t - время, с.

Момент инерции определяется как:

$$J = m \cdot \rho^2$$

где ρ - радиус инерции, м.

Зная, что $\omega = 2\pi \cdot n / 60 = n / 9,55$ рад/с, получим следующее выражение

$$M - M_c = \frac{J}{9,55} \cdot \frac{dn}{dt} = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

$$M - M_c = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (2)$$

где G - сила тяжести (вес), Н;

D - диаметр инерции, м.

Произведение $GD^2 = 4g \cdot J$, в Н·м², называется **маховым моментом**. Значение маховых моментов для роторов электродвигателей приводятся в каталогах в кгс·м². Для перехода к системе СИ величину GD^2 необходимо умножить на $g = 9,81$.

Уравнение (1) и (2) носит название **основного уравнения движения электропривода**.

При использовании уравнения движения следует всегда учитывать знаки моментов. В зависимости от соотношения величин M и M_c движение привода может быть **ускоренным, замедленным или равномерным**.

Если $M > M_c$ и $d\omega/dt > 0$ - движение **ускоренное**.

Если $M < M_c$ и $d\omega/dt < 0$ - движение **замедленное**.

Если $M = M_c$ и $d\omega/dt = 0$ - движение **равномерное**.

Момент M , развиваемый электродвигателем, считается положительным, когда он направлен в сторону движения (движущий момент) и отрицательным, когда он направлен встречно движению (тормозной момент).

Если статический момент M_c препятствует движению, т.е. является тормозным, то перед ним ставится знак $+$ (плюс), например момент, созданный поднимаемым грузом. Если же момент M_c является движущим (спуск груза), то перед ним ставится знак $-$ (минус). В связи с этим уравнения (1) и (2) можно записать в следующем виде:

$$\pm M \mp M_c = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

Уравнение движения электропривода справедливо при условии, что все элементы вращаются с одинаковой угловой скоростью ω . Однако при наличии редуктора угловые скорости отдельных элементов не будут равными. В этом случае при расчете переходных процессов пришлось бы

составлять уравнение движение для каждого отдельного элемента и решать эти уравнения совместно, что связано с большим объемом вычислений.

Для упрощения задачи реальный электропривод (рис.1.1,а) заменяют простейшей системой с одним вращающимся или поступательно движущимся элементом (рис. 1.1, б).

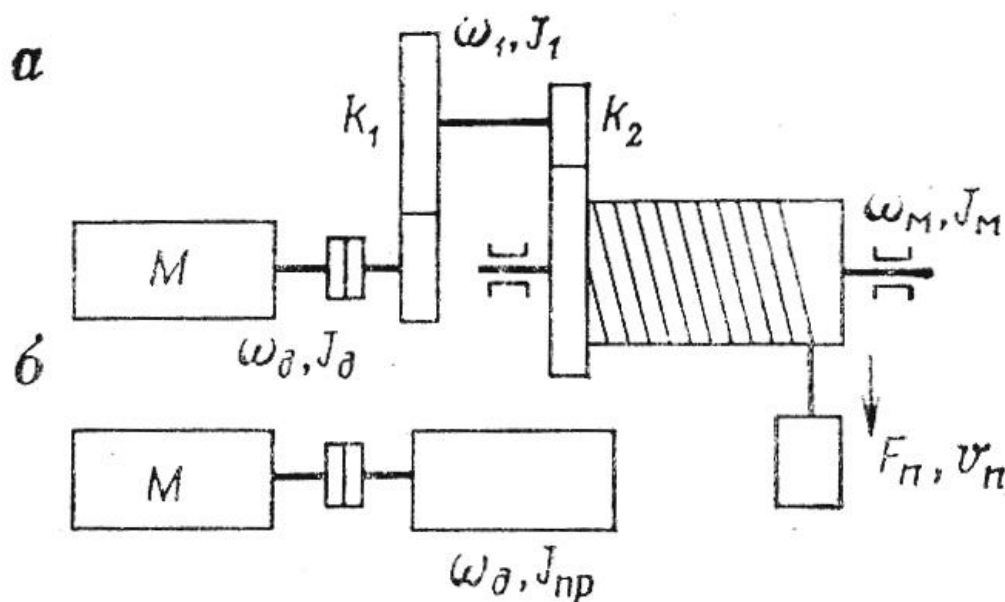


Рис. 1.1 Кинематическая схема электропривода лебедки

Такая замена производится на основании приведения всех и сил к одной частоте вращения (скорости), обычно к скорости электродвигателя. Приведение производится при соблюдении условия неизменного энергетического баланса реальной и приведенной систем.

Приведение статических моментов основано на том условии, что передаваемая мощность без потерь на любом валу механизма остается неизменной.

Мощность на валу механизма определяется как:

$$P_M = \frac{M_M \cdot \omega_M}{1000}$$

где M_M и ω_M - соответственно момент сопротивления и угловая скорость на валу механизма.

Мощность на валу электродвигателя определяется как:

$$P_d = \frac{M_c \cdot \omega_d}{1000}$$

где M_c - статический момент сопротивления механизма, приведенный к валу электродвигателя, Н·м;

ω_d - угловая скорость вала электродвигателя, рад/с.

На основании равенства мощностей с учетом КПД передачи $\eta_{пер}$ можно записать равенство мощностей

$$M_c \cdot \omega_d \cdot \eta_{пер} = M_M \cdot \omega_M$$

Приведенный статический момент равен

$$M_c = M_m \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{\eta_{\text{пер}}}$$

где $k = \omega_d / \omega_m \geq 1$ - передаточное число от механизма к машине.

Если между электродвигателем и механизмом имеется несколько передач, то приведенный статический момент определяется выражением:

$$M_c = M_m \cdot \frac{1}{k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n} \cdot \frac{1}{\eta_{\text{пер}1} \cdot \eta_{\text{пер}2} \cdot \dots \cdot \eta_{\text{пер}n}} = M_m \cdot \frac{1}{k_{\text{общ}} \cdot \eta_{\text{пер}к}} \quad (3)$$

где $k_1, k_2 \dots k_n$ - передаточные числа промежуточных передач;

$\eta_{\text{пер}1}, \eta_{\text{пер}2} \dots \eta_{\text{пер}n}$ - КПД соответствующих передач;

$k_{\text{общ}}$ и $\eta_{\text{пер}к}$ - общее передаточное отношение и КПД механизма.

Выражение (3) справедливо лишь тогда, когда электропривод работает в **двигательном** режиме и потери в передачах покрываются электродвигателем. В **тормозном** режиме, когда энергия передается от вала механизма к электродвигателю, величина $\eta_{\text{пер}}$ переходит из знаменателя в числитель. В этом случае уравнение (3) примет вид:

$$M_c = M_m \cdot \frac{\eta_{\text{пер}}}{k_{\text{общ}}}$$

При наличии в механизме **поступательно** движущихся элементов (например на рис. 1.1,а - это груз и подъемный канат лебедки) приведение сил к скорости электродвигателя производится аналогично. Тогда выражение (3) можно записать в следующем виде:

$$M_c = \frac{F_n \cdot v_n \cdot 30}{\eta_{\text{пер}} \cdot n_d \cdot \pi} = \frac{9,55 \cdot F_n \cdot v_n}{\eta_{\text{пер}} \cdot n_d}$$

где F_n - сила сопротивления механизма, Н;

v_n - линейная скорость поступательного движения, м/с.

Для приведения моментов инерции к одной оси вращения реальный электропривод также заменяют эквивалентным или приведенным с одной вращающейся массой, расположенной на валу электродвигателя. При этом исходят из того, что запас кинетической энергии в реальной и приведенной системах сохраняется неизменным.

Выражение для приведенного момента инерции будет иметь следующий вид:

$$J = J_d + J_1 \cdot \left(\frac{\omega_1}{\omega_d} \right)^2 + J_m \cdot \left(\frac{\omega_m}{\omega_d} \right)^2 = J_d + J_1 \cdot \frac{1}{k_1^2} + J_m \cdot \frac{1}{k_1^2 \cdot k_m^2}$$

где J_d, J_1, J_m - моменты инерции соответственно электродвигателя, промежуточной передачи, механизма, кг·м²;

ω_d - угловая скорость электродвигателя, рад/с;

ω_1 - угловая скорость промежуточной передачи, рад/с;

ω_m - угловая скорость механизма, рад/с.

Наиболее часто в практических расчетах вместо момента инерции пользуются понятием махового момента. Тогда для приведения маховых моментов системы можно записать выражение, аналогичное для выражения моментов инерции:

$$GD_{\text{пр}}^2 = G_{\text{д}} D_{\text{д}}^2 + G_1 D_1^2 \cdot \frac{1}{\kappa_1^2} + G_{\text{м}} D_{\text{м}}^2 \cdot \frac{1}{\kappa_1^2 \cdot \kappa_{\text{м}}^2}$$

где $GD_{\text{пр}}^2$ - приведенный маховый момент привода, $\text{Н} \cdot \text{м}^2$

Приведение масс, движущихся поступательно, осуществляется также на основании равенства запаса кинетической энергии до и после приведения.

Приведенный момент **инерции**, созданный на валу электродвигателя **поступательно** движущимся элементом (грузом)

$$J_{\text{п}} = m \cdot \left(\frac{v}{\omega_{\text{д}}} \right)^2$$

Приведенный **маховый** момент **поступательно** движущегося элемента составит:

$$GD_{\text{пр}}^2 = \frac{365 \cdot G \cdot v^2}{n_{\text{д}}^2}$$

В том случае, когда механизм имеет **вращающиеся** и **поступательно** движущие элементы, суммарный, приведенный к валу электродвигателя, момент инерции определяется выражением:

$$J_{\Sigma} = J + J_{\text{п}}$$

Аналогично определяется приведенный маховый момент системы, содержащей поступательно движущийся элемент:

$$GD_{\Sigma}^2 = GD^2 + GD_{\text{п}}^2$$

Пример 1. Определить частоту вращения и мощность электродвигателя; приведенный маховый момент груза и момент инерции системы электропривода подъемной лебедки, кинематическая схема которой приведена на рис.1.1,а.

Данные лебедки: диаметр барабана $D_6=0,8$ м; КПД передач и барабана $\eta_1=\eta_2=\eta_6=0,95$; передаточные числа $\kappa_1=\kappa_2=7$; вес груза $G_{\text{п}}=50$ кН; скорость движения груза $v=0,5$ м/с.

Маховые моменты: электродвигателя $G_{\text{д}} D_{\text{д}}^2 = 300 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$; промежуточной передачи $G_1 D_1^2 = 450 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$; барабана $G_6 D_6^2 = 3000 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$.

Решение.

1. Определяем вращающий момент барабана

$$M_6 = \frac{G_{\text{п}} \cdot r_6}{\eta_6} = \frac{50000 \cdot 0,4}{0,95} = 21053 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

где r_6 - радиус барабана, м

$$r_6 = D_6/2 = 0,8/2 = 0,4 \text{ м}$$

2. Определяем вращающий момент электродвигателя

$$M_d = \frac{M_6}{\eta_1 \cdot \eta_1 \cdot \kappa_1 \cdot \kappa_2} = \frac{21053}{0,95 \cdot 0,95 \cdot 7 \cdot 7} = 476 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

3. Частота вращения барабана

$$n_6 = \frac{60 \cdot v_n}{\pi \cdot D_6} = \frac{60 \cdot 0,5}{3,14 \cdot 0,8} = 12 \text{ об / мин} = 0,2 \text{ об/с}$$

4. Частота вращения двигателя

$$n_d = n_6 \cdot \kappa_1 \cdot \kappa_2 = 12 \cdot 7 \cdot 7 = 588 \text{ об/мин} = 9,8 \text{ об/с}$$

5. Мощность на валу электродвигателя

$$P_d = \frac{M_d \cdot n_d}{9,55 \cdot 10^3} = \frac{476 \cdot 588}{9,55 \cdot 10^3} = 29,3 \text{ кВт}$$

6. Приведенный к валу электродвигателя маховый момент при подъеме груза

$$GD_{np}^2 = G_d D_d^2 + \frac{G_1 D_1^2}{\kappa_1^2} + \frac{G_6 D_6^2}{\kappa_1^2 \cdot \kappa_2^2} + \frac{365 \cdot G_n \cdot v_n^2}{n_d^2} = 300 + \frac{450}{7^2} + \frac{3000}{7^2 \cdot 7^2} +$$

$$+ \frac{365 \cdot 50000 \cdot 0,5^2}{588^2} = 300 + 9,2 + 1,25 + 13,2 = 324,65 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$$

7. Приведенный к валу электродвигателя маховый момент при опускании груза

$$GD_{np}^2 = G_d D_d^2 + \frac{G_1 D_1^2}{\kappa_1^2} + \frac{G_6 D_6^2}{\kappa_1^2 \cdot \kappa_2^2} - \frac{365 \cdot G_n \cdot v_n^2}{n_d^2} = 300 + \frac{450}{7^2} + \frac{3000}{7^2 \cdot 7^2} +$$

$$+ \frac{365 \cdot 50000 \cdot 0,5^2}{588^2} = 300 + 9,2 + 1,25 - 13,2 = 297,25 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$$

8. Приведенный к валу электродвигателя момент инерции при подъеме груза

$$J_\Sigma = \frac{GD_{np}^2}{4 \cdot g} = \frac{324,65}{4 \cdot 9,81} = 8,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

9. Приведенный к валу электродвигателя момент инерции при опускании груза

$$J_\Sigma = \frac{GD_{np}^2}{4 \cdot g} = \frac{297,25}{4 \cdot 9,81} = 7,6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Пример 2. Определить приведенные значения статического момента, махового момента и момента инерции привода подъемного механизма (рис. 1.2) при подъеме и опускании груза G массой $m = 300$ кг. Параметры подъемного механизма: частота вращения вала электродвигателя $n_d = 600$ об/мин; маховый момент якоря двигателя и деталей на его валу $GD_d^2 = 31,4$ Н·м²; КПД передачи $\eta_{пер} = \eta_p \cdot \eta_6 = 0,85$; диаметр зубчатого колеса на оси барабана $D_k = 300$ мм, его масса $m_k = 7$ кг;

диаметр барабана $D_6=130$ мм, его масса $m_6=20$ кг; частота вращения барабана $n_6=100$ об/мин.

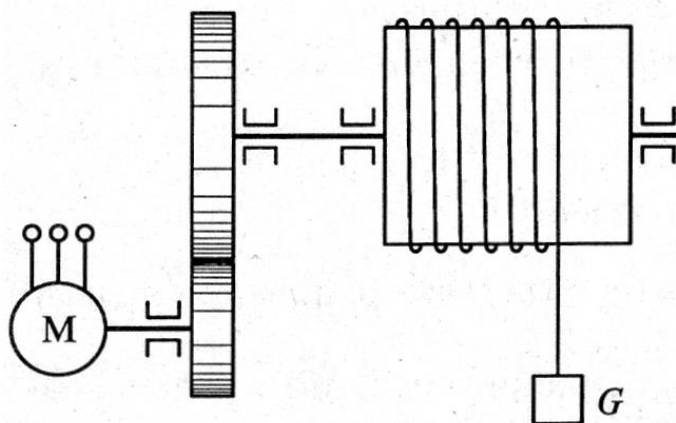


Рис. 1.2 Кинематическая схема подъемного механизма

Решение.

1. Определяем передаточное отношение частот вращения электродвигателя и барабана

$$i_1 = n_d/n_6 = 600/100 = 6$$

2. Определяем маховый момент зубчатого колеса на оси барабана

$$(GD^2_k)' = g \cdot m_k \cdot D_k^2 = 9,81 \cdot 7 \cdot 0,3^2 = 6,18 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$$

3. Определяем маховый момент барабана

$$(GD^2_6)' = g \cdot m_6 \cdot D_6^2 = 9,81 \cdot 20 \cdot 0,13^2 = 3,32 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$$

4. Определяем сумму маховых моментов на оси барабана

$$(\Sigma GD^2)' = (GD^2_k)' + (GD^2_6)' = 6,18 + 3,32 = 9,5 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$$

5. Приведенное значение махового момента на оси барабана

$$\Sigma GD^2_6 = (\Sigma GD^2)'/i_1 = 9,5/6 = 1,58 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$$

6. Линейная скорость подъема груза G при частоте вращения барабана $n_6=100$ об/мин:

$$V_{\pi} = \pi \cdot D_6 \cdot n_6/60 = 3,14 \cdot 0,13 \cdot 100/60 = 0,68 \text{ м/с}$$

7. Приведенный маховый момент поступательно движущегося груза при его подъеме

$$GD^2_{\text{пост}} = \frac{4g \cdot m \cdot v_{\pi}^2}{\omega_d^2 \cdot \eta_p \cdot \eta_6} = \frac{4 \cdot 9,81 \cdot 300 \cdot 0,68^2}{63^2 \cdot 0,85} = 1,61 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

где $\omega_d = 0,105 \cdot n_d = 0,105 \cdot 600 = 63 \text{ рад/с}$

8. Маховый момент электропривода

$$GD^2 = GD^2_d + \Sigma GD^2_6 + GD^2_{\text{пост}} = 31,4 + 1,58 + 1,61 = 34,6 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$$

9. Момент инерции электропривода

$$J = (GD^2)/(4g) = 34,6/(4 \cdot 9,81) = 0,88 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

10. Приведенное значение статического нагрузочного момента электродвигателя при подъеме груза

$$M_{c,п} = \frac{9,55 \cdot g \cdot m \cdot v_{п}}{n_{д} \cdot \eta_{пер}} = \frac{9,55 \cdot 9,81 \cdot 300 \cdot 0,68}{600 \cdot 0,85} = 37,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

11. Приведенное значение статического момента при опускании груза со скоростью его подъема $v_o = v_{п} = 0,68 \text{ м/с}$

$$M_{c,o} = \frac{9,55 \cdot g \cdot m \cdot v_o \cdot \eta_{пер}}{n_{д}} = \frac{9,55 \cdot 9,81 \cdot 300 \cdot 0,68 \cdot 0,85}{600} = 27 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Порядок выполнения работы

1. Изучить основные положения и ознакомиться с порядком определения махового момента и момента инерции механизма.
2. Составить отчет о работе с ответами на контрольные вопросы.
3. Выполнить расчет махового момента и момента инерции механизма по индивидуальному заданию.

Контрольные вопросы

1. Куда расходуется потребляемая электродвигателем энергия из сети ?
2. Чем создается статическая нагрузка?
3. Чем создается динамическая нагрузка?
4. Запишите уравнение равновесия сил при поступательном движении ?
5. Запишите уравнение равновесия сил при вращательном движении ?
6. Что называется маховым моментом?
7. Какое движение электропривода будет считаться ускоренным, замедленным и равномерным?
8. Когда статический момент считается положительным, а когда отрицательным ?
9. Для чего производится приведение моментов ?
10. Запишите формулы для приведенного момента инерции и махового момента ?

Контрольные задания

Задание 1.1 Определить частоту вращения $n_{д}$ и мощность электродвигателя $P_{д}$; приведенный маховый момент груза $GD^2_{пр}$ и момент инерции системы электропривода подъем-ной лебедки J_{Σ} ; кинематическая схема которой приведена на рис.1.1, а.

Данные лебедки по вариантам приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1.

№ варианта	$D_6,$ м	η_6	η_1	η_2	κ_1	κ_2	$G_{п},$ кН	$v_{п},$ м/с	$GD^2_{д},$ Н·м ²	$GD^2_1,$ Н·м ²	$GD^2_6,$ Н·м ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0,5	0,9	0,8	0,94	4	4	52	0,3	200	160	2000
2	0,6	0,91	0,81	0,95	4	3	53	0,4	250	120	2400
3	0,7	0,92	0,82	0,96	3	4	54	0,5	280	130	2800
4	0,8	0,93	0,83	0,97	5	5	55	0,6	320	250	3000
5	0,9	0,94	0,84	0,8	5	6	56	0,7	350	300	3600

6	1,0	0,95	0,85	0,81	6	5	57	0,8	400	310	4000
7	1,1	0,96	0,86	0,82	6	6	58	0,9	450	360	4400
8	1,2	0,97	0,87	0,83	7	7	59	1,0	500	490	4800
9	1,3	0,8	0,88	0,84	7	8	60	1,1	600	560	5200
10	1,4	0,81	0,9	0,85	8	7	65	1,2	650	570	5600
11	1,5	0,82	0,91	0,86	8	8	70	1,3	700	640	6000
12	1,6	0,83	0,92	0,87	8	9	75	1,4	750	720	6400
13	1,7	0,84	0,93	0,88	9	8	80	1,5	800	730	6800
14	1,8	0,85	0,94	0,9	9	9	85	1,6	850	810	7200
15	1,9	0,86	0,95	0,91	2	2	90	1,7	900	50	7600
16	2,0	0,87	0,96	0,92	2	3	92	0,3	950	60	8000
17	2,1	0,88	0,97	0,93	3	2	96	0,4	1000	70	8400
18	2,2	0,9	0,8	0,94	2	2	98	0,5	1100	65	8800
19	2,3	0,91	0,81	0,9	3	5	82	0,6	1200	150	8900

Окончание таблицы 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
20	2,4	0,92	0,82	0,91	4	5	84	0,7	1300	200	9000
21	2,5	0,93	0,83	0,92	5	6	86	0,8	1400	300	9500
22	2,6	0,94	0,84	0,93	7	8	88	0,9	1500	560	9800
23	2,7	0,95	0,9	0,94	9	10	91	1,0	1600	900	9900
24	2,8	0,96	0,91	0,95	8	6	93	1,1	1700	480	9700
25	2,9	0,97	0,92	0,96	7	9	97	1,2	1800	630	9600
26	3,0	0,8	0,93	0,97	5	8	99	1,3	1900	400	9400
27	3,1	0,81	0,94	0,8	6	5	72	1,4	2000	300	9300
28	3,2	0,82	0,95	0,81	4	7	74	1,5	2100	280	9950
29	3,3	0,83	0,96	0,82	3	9	76	1,6	2200	270	9450
30	3,4	0,84	0,97	0,83	5	7	78	1,7	2300	350	9550

Кинематическую схему лебедки вычертить и нанести на нее все исходные и расчетные данные.

Задание 1.2 Определить приведенные значения статического момента, махового момента и момента инерции привода подъемного механизма (рис. 1.2) при подъеме и опускании груза **G** массой **m**, кг. Параметры подъемного механизма: частота вращения вала электродвигателя **n_д**, об/мин; маховый момент якоря двигателя и деталей на его валу **GD_д²**, Н·м²; КПД передачи **η_{пер}=η_р·η_б**; диаметр зубчатого колеса на оси барабана **D_к**, мм, его масса **m_к**, кг; диаметр барабана **D_б**, мм, его масса **m_б**, кг; частота вращения барабана **n_б**, об/мин.

Данные подъемного механизма по вариантам приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2

№ вариант а	m, кг	η_d , об/мин	GD_d^2 , Н·м ²	$\eta_{пер}$	D _к , мм	m _к , кг	D _б , мм	m _б , кг	η_b , об/мин
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	500	300	28,6	0,8	220	4,2	125	15	80
2	550	350	36,2	0,82	230	4,8	135	18	92
3	600	385	41,3	0,83	240	5,1	145	21	98
4	630	400	43,8	0,84	255	5,8	152	23	100
5	820	450	46,8	0,85	260	6,7	158	24	120
6	920	465	48,2	0,86	274	7,1	162	26	125
7	950	475	50,1	0,87	280	8,5	175	29	128
8	980	500	53,7	0,88	285	9,6	180	31	130
9	990	520	55,4	0,89	290	10,1	190	34	135
10	1020	550	58,6	0,9	300	12,6	194	36	138
11	1080	560	59,8	0,91	310	15,8	198	38	140
12	1100	575	62,9	0,92	315	16,9	200	40	142

Окончание таблицы 1.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
13	1150	590	68,5	0,93	320	18,4	205	42	140
14	1200	600	70,1	0,94	330	19,5	210	44	144
15	1300	630	73,5	0,8	345	20,8	215	46	150
16	1350	650	75,8	0,81	350	21,2	220	49	152
17	1400	675	78,2	0,82	365	24,3	225	51	154
18	1450	695	80,1	0,83	370	25,5	230	53	156
19	1500	720	84,4	0,84	375	26,7	235	54	160
20	1600	735	90,2	0,85	380	27,1	240	55	162
21	1650	740	92,4	0,86	385	28,7	245	56	164
22	1700	750	98,5	0,87	392	29,2	250	58	165
23	1750	765	99,8	0,88	394	30,5	255	59	168
24	1800	775	100,5	0,89	396	31,3	258	60	170
25	1900	800	105,4	0,9	400	31,8	260	61	172
26	1950	850	115,5	0,91	405	31,9	265	63	175
27	2000	900	129,1	0,92	405	31,9	265	64	178
28	2100	930	149,8	0,93	400	31,8	270	65	180
29	2200	950	197,5	0,94	450	33,2	270	65	185
30	2500	970	208,6	0,94	450	33,2	275	67	190

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 2

Расчет и построение механических характеристик асинхронных электродвигателей с фазным ротором. Выбор регулировочных резисторов.

Цель работы – расчет и построение механических характеристик асинхронных электродвигателей с фазным ротором. Выбор регулировочных резисторов в цепи ротора.

Основные положения

Вопрос о регулировании частоты вращения трехфазных асинхронных двигателей весьма актуален, так как является одним из основных признаков, по которым асинхронные двигатели могут успешно заменить двигатели постоянного тока, превосходя их по многим технико-экономическим показателям. Из выражения частоты вращения асинхронного двигателя

$$n_2 = n_1 \cdot (1 - s) = \frac{f_1 \cdot 60}{p} \cdot (1 - s)$$

следует, что при постоянном статическом моменте M_c на валу двигателя частота вращения ротора n_2 зависит от частоты переменного тока в питающей сети f_1 , числа пар полюсов в обмотке статора p и скольжения s . Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей возможно изменением любого из перечисленных параметров.

Реостатное регулирование асинхронных двигателей с фазным ротором позволяет регулировать частоту вращения введением в цепь ротора добавочного резистора сопротивлением $r_{доб}$ в виде регулировочного реостата РР (рис. 2.1, а).

При полностью введенном РР ($r_{доб1}=0$) двигатель работает в режиме *естественной* механической характеристики $n=f(M)$ (рис. 2.1, б, график при $r_{доб1}=0$). При этом частота вращения максимальна и при номинальной нагрузке $M_c=M_{ном}$ она равна $n_{ном1}$.

При увеличении сопротивления реостата возрастает критическое скольжение $s_{кр}$, при этом максимальный момент M_{max} , а следовательно, и перегрузочная способность двигателя остаются неизменными и двигатель переходит в режим *искусственной* механической характеристики (график при $r_{доб2}>0$), а его частота вращения при заданной нагрузке $M_{ном}$ уменьшается до значения $n_{ном2}$. При дальнейшем увеличении

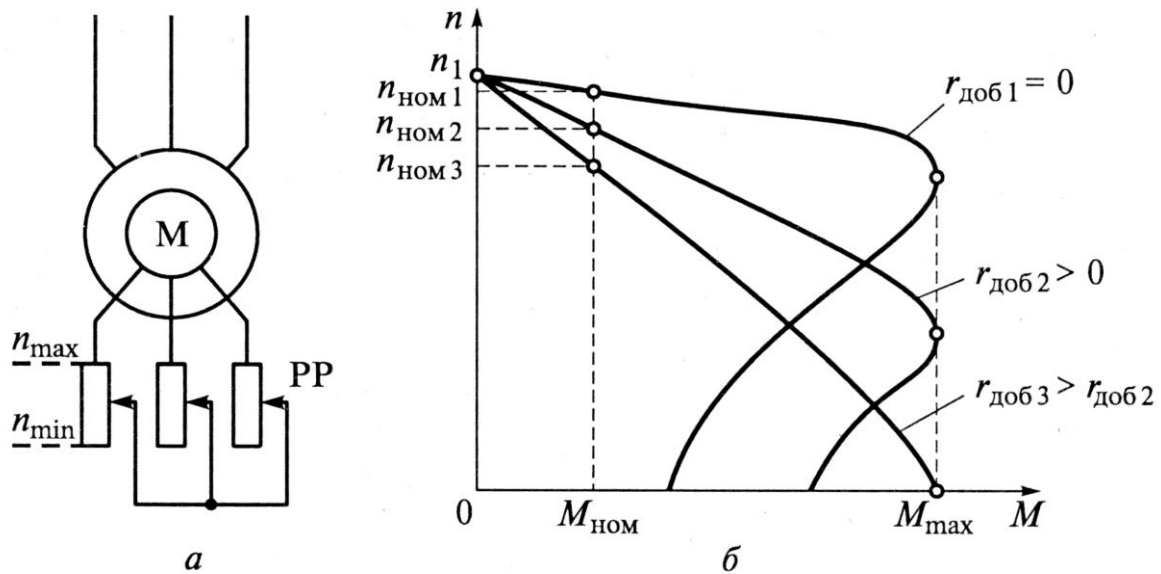


Рис. 2.1 Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя посредством РР в цепи ротора

сопротивления РР до значения $r_{доб3} > r_{доб2}$, двигатель переходит в режим другой, более мягкой искусственной характеристики и частота вращения ротора уменьшается до значения $n_{ном3}$.

Зависимость скольжения [(частоты вращения $n_2 = n_1(1-s)$] от активного сопротивления цепи ротора ($r_2 + r_{доб}$) определяется выражением

$$s = \frac{9,55 \cdot P_{\text{э2}}}{M \cdot n_1} = \frac{9,55 \cdot p \cdot m_1 \cdot I_2^2 \cdot (r_2 + r_{доб})}{60 \cdot f_1 \cdot M}$$

Диапазон регулирования получается широким, но изменение частоты вращения можно только в сторону уменьшения от синхронной. Одновременно со снижением частоты вращения меняется жесткость механических характеристик - они становятся более мягкими. Однако следует помнить, что при увеличении сопротивления РР $r_{доб}$ растут потери в цепи ротора, при этом КПД и полезная мощность двигателя уменьшаются. С увеличением числа ступеней РР возрастает плавность регулирования, но удорожаются коммутирующие устройства.

Пусковая диаграмма представляет собой совокупность нескольких искусственных механических характеристик асинхронного двигателя, которые используются как при его пуске, так при регулировании частоты вращения. Пусковая диаграмма строится в предположении, что рабочий участок механических характеристик асинхронных двигателей близок к линейному. Для расчета резисторов РР используется метод отрезков (уточненный графический). Построение пусковой диаграммы заключается в следующем.

1 Строят механическую естественную характеристику двигателя $\omega=f(M)$ или $s=f(M)$ или $n=f(M)$ (рис. 2.2).

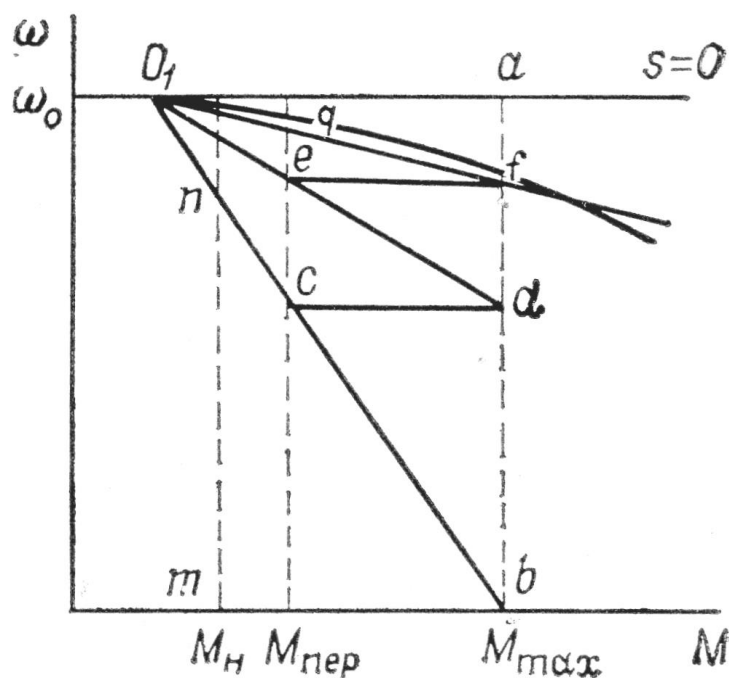


Рис. 2.2 Пусковая диаграмма асинхронного двигателя

2 Задаются максимальным моментом $M_{\max}$ и моментом переключений $M_{\text{пер}}$. Обычно принимают $M_{\max}=(0,8-0,9)M_{\text{кр}}$, а $M_{\text{пер}}=(1,1-1,2)M_{\text{ном}}$. Из точек $M_{\max}$ и $M_{\text{пер}}$ проводят вертикальные прямые до пересечения с естественной характеристикой в точках **f** и **q**. Если число пусковых ступеней известно и равно z , то момент переключения можно определить из выражения

$$M_{\text{пер}} = M \cdot z \sqrt{\frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}} \cdot s_{\text{ном}}}$$

Если число ступеней неизвестно, то значения моментов $M_{\max}$ и $M_{\text{пер}}$ связаны между собой следующим соотношением:

$$Z = \frac{\lg \left(\frac{1}{s_{\text{ном}} \cdot M_{\max}} \right)}{\lg \left(\frac{M_{\max}}{M_{\text{пер}}} \right)}$$

3 Через точки **f** и **q** проводят прямую до пересечения с прямой $s=0$ в точке **О1**. Далее строят пусковую диаграмму при помощи лучей, проведенных из точки **О1**, соблюдая при этом равенство моментов во всех ступенях.

4 Проводят прямую **O₁b** (точка **b** соответствует $M_{\max}$) и получают точку **c**. Далее проводят горизонтальную линию **cd**. Проводят прямую **O₁d** и горизонтальную линию **ef**, которая должна попасть в точку, где естественная характеристика пересекается с вертикальной линией **ba**. Если такого попадания нет, то все построение следует выполнить сначала, несколько изменив величину $M_{\text{пер}}$.

Величины сопротивлений отдельных ступеней (см. рис. 2.2) определяют графически с учетом масштаба.

Сопротивления пусковых ступеней

$$R_1 = \frac{ab}{af} \cdot r_2 \quad R_2 = \frac{ad}{af} \cdot r_2$$

Активное сопротивление фазы обмотки ротора определяют по формуле

$$r_2 = \frac{s_{\text{ном}} \cdot E_2}{1,73 \cdot I_{2\text{ном}}}$$

где E_2 - ЭДС неподвижного ротора при разокнутой его обмотке, В;

$I_{2\text{ном}}$ - ток ротора при номинальной нагрузке, А.

Пример 1 Асинхронный двигатель с фазным ротором с номинальной мощностью $P_{\text{ном}}=90$ кВт, номинальной частотой вращения ротора $n_{2\text{ном}}=985$ об/мин, ЭДС роторной обмотки $E_{2\text{н}}=500$ В, номинальным током роторной обмотки $I_{2\text{ном}}=108$ А, с перегрузочной способностью $\lambda=M_{\max}/M_{\text{ном}}=3,5$ подключен к сети с линейным напряжением $U_{\text{н}}=380$ В. Требуется построить пусковую диаграмму и рассчитать сопротивления резисторов регулировочного реостата РР в цепи ротора.

Решение.

1 Определяем номинальное скольжение

$$s_{\text{н}} = \frac{n_1 - n_{2\text{но}}}{n_1} = \frac{1000 - 985}{1000} = 0,015$$

2 Критическое скольжение на естественной характеристике

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{н}} \cdot (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0,015 \cdot (3,5 + \sqrt{3,5^2 - 1}) = 0,1$$

2 Определяем номинальный момент двигателя

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \cdot P_{\text{ном}} / n_{2\text{ном}} = 9,55 \cdot 90 \cdot 10^3 / 985 = 870 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

3 Критический момент

$$M_{\text{кр}} = \lambda \cdot M_{\text{ном}} = 3,5 \cdot 870 = 3060 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

4 Рассчитываем параметры естественной механической характеристики по упрощенной формуле

$$M = \frac{2 \cdot M_{\text{кр}}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}} = \frac{2 \cdot 3060}{\frac{s}{0,1} + \frac{0,1}{s}}$$

Задаваясь различными значениями s , определяем соответствующие им значения моментов. Данные сводим в таблицу 2.1 и по ней строим естественную механическую характеристику (рис. 2.3).

Таблица 2.1

s	0,03	0,05	0,08	0,10	0,20	0,30	0,40	0,60	0,80	1,0
$M, \text{Н} \cdot \text{м}$	1700	2460	3010	3060	2460	1670	1450	1000	760	610

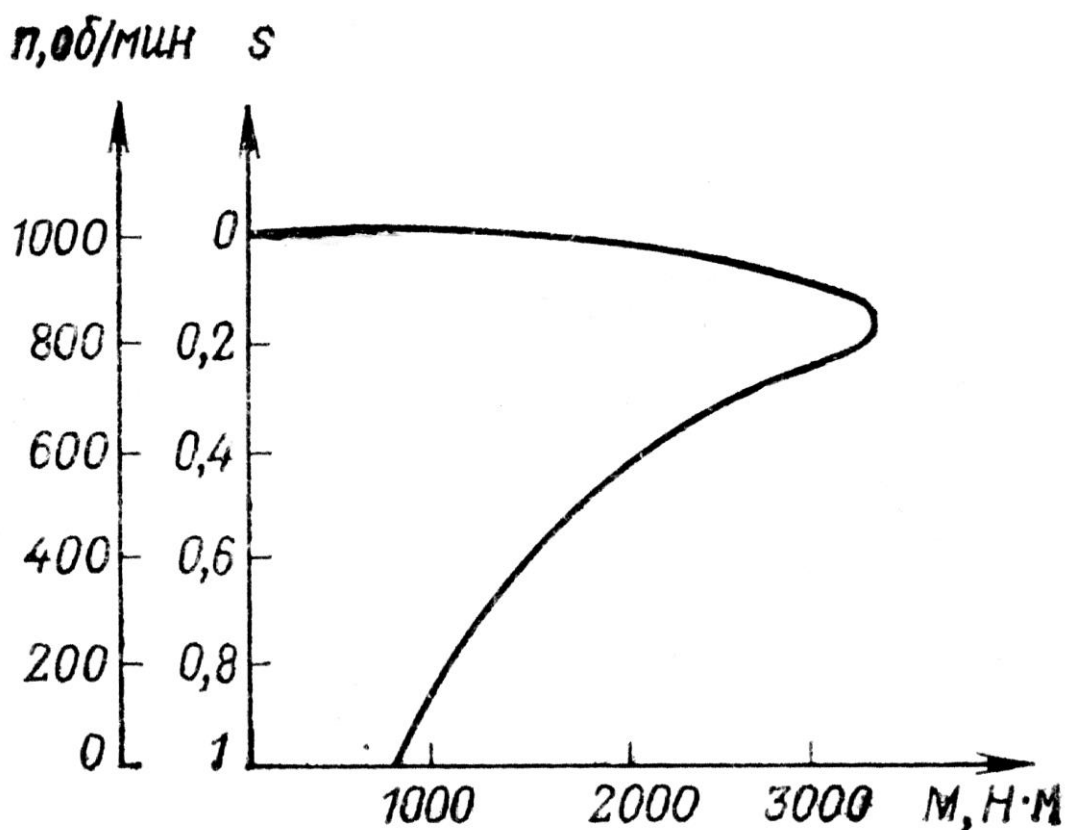


Рис. 2.3 Естественная механическая характеристика

5. Максимальный пусковой момент

$$M_{\max} = 0,85 \cdot M_{\text{кр}} = 0,85 \cdot 3060 = 2600 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

6. Момент переключения

$$M_{\text{пер}} = 1,2 \cdot M_{\text{ном}} = 1,2 \cdot 870 = 1004 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

7. Определяем **максимальное** число ступеней РР

$$Z = \frac{\lg \left(\frac{1}{s_{\text{ном}} \cdot M_{\max}} \right)}{\lg \left(\frac{M_{\max}}{M_{\text{пер}}} \right)} = \frac{\lg \left(\frac{1}{0,015 \cdot 2600} \right)}{\lg \left(\frac{2600}{1004} \right)} = \frac{\lg 0,02564}{\lg 2,5896} = 3,85$$

7 Построим пусковую диаграмму на две ступени РР т.е. построим две искусственные механические характеристики при разных значениях активного сопротивления регулировочного реостата R_1 и R_2 , а третьей

характеристикой (ступенью) будет естественная механическая характеристика.

Для этого из точек $M_{\max}=2600$ Н·м и $M_{\text{пер}}=1004$ Н·м проводим вертикальные прямые до пересечения с естественной характеристикой в точках **f** и **q** (рис. 2.4). Проводим прямую через точки **f** и **q**, получаем точку **О**. Из точки **О** проводим прямую **Ob** (точка **b** соответствует $M_{\max}$) и получаем точку **c**.

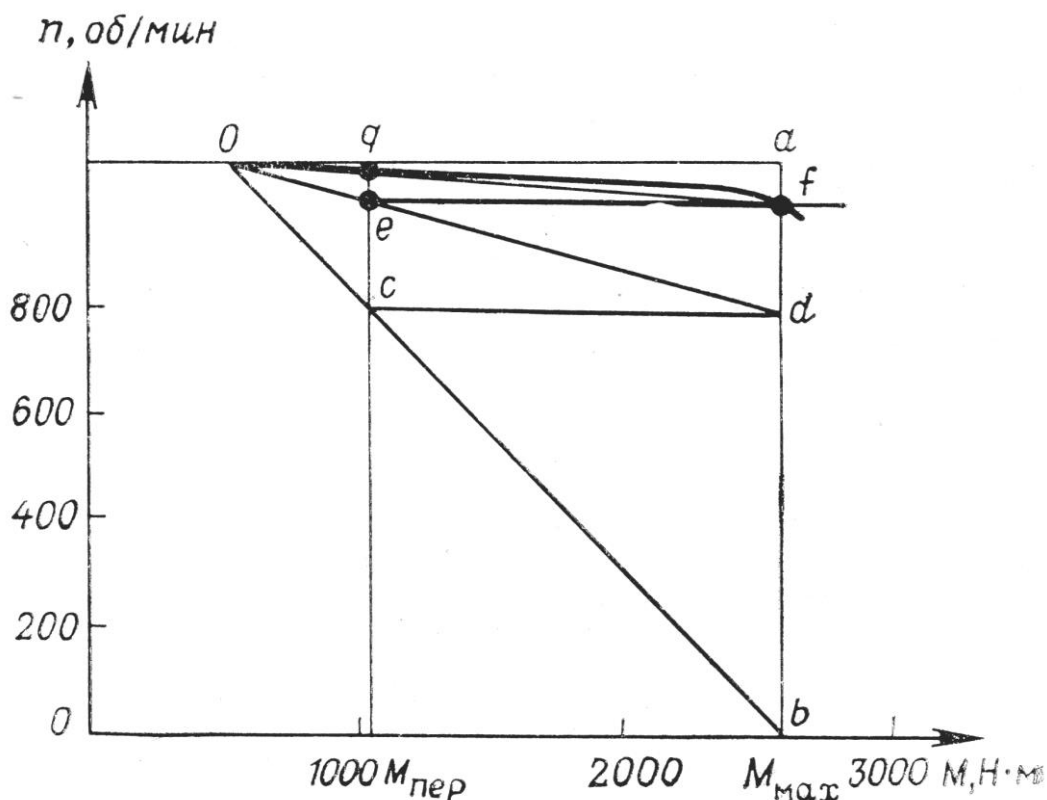


Рис. 2.4 Построение пусковой диаграммы

Далее проводят горизонтальную линию **cd**. Проводят прямую **Od** и горизонтальную линию **ef**, которая должна попасть в точку, где естественная характеристика пересекается с вертикальной линией **ba**. Если такого попадания нет, то все построение следует выполнить сначала, несколько изменив величину $M_{\text{пер}}$.

8 Активное сопротивление фазы обмотки ротора

$$r_2 = \frac{s_{\text{ном}} \cdot E_2}{1,73 \cdot I_{2\text{ном}}} = \frac{0,015 \cdot 500}{1,73 \cdot 108} = 0,04 \text{ Ом}$$

9 Сопротивление пусковых ступеней:

$$R_1 = \frac{ab}{af} \cdot r_2 = \frac{45}{3} \cdot 0,04 = 0,6 \text{ Ом} \quad R_2 = \frac{ad}{af} \cdot r_2 = \frac{9}{3} \cdot 0,04 = 0,12 \text{ Ом}$$

10 Для построения первой искусственной характеристики при сопротивлении реостата $R_1=0,6$ Ом скольжение определяем по следующей формуле:

$$s' = \frac{r_2 + R_1}{r_2} \cdot s_e = \frac{0,04 + 0,6}{0,04} = 16 s_e$$

Рассчитываем параметры первой искусственной механической характеристики по упрощенной формуле

$$M = \frac{2 \cdot M_{кр}}{\frac{s'}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s'}} = \frac{2 \cdot 3060}{\frac{s'}{0,1} + \frac{0,1}{s'}}$$

Задаваясь различными значениями s' , определяем соответствующие им значения моментов. Данные сводим в таблицу 2.2 и по ней строим первую искусственную механическую характеристику.

Таблица 2.2

s'	0,08	0,14	0,16	0,32	0,48	0,64	0,8	0,96	1,12
$M, Н \cdot м$	2985	2900	2751	1742	1222	933	753	631	542

11 Для построения второй искусственной характеристики при сопротивлении реостата $R_2=0,12$ Ом скольжение определяем по следующей формуле:

$$s'' = \frac{r_2 + R_1}{r_2} \cdot s_e = \frac{0,04 + 0,12}{0,04} = 4 s_e$$

Рассчитываем параметры второй искусственной механической характеристики по упрощенной формуле

$$M = \frac{2 \cdot M_{кр}}{\frac{s''}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s''}} = \frac{2 \cdot 3060}{\frac{s''}{0,1} + \frac{0,1}{s''}}$$

Задаваясь различными значениями s'' , определяем соответствующие им значения моментов. Данные сводим в таблицу 2.3 и по ней строим вторую искусственную механическую характеристику.

Таблица 2.3

s''	0,28	0,32	0,36	0,4	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2
$M, Н \cdot м$	1939	1742	1578	1440	992	857	753	672	606	506

Порядок выполнения работы

1 Изучить основные положения и ознакомиться с порядком расчета параметров регулировочного реостата и построения пусковой диаграммы.

2 Составить отчет о работе с ответами на контрольные вопросы.

3 Выполнить расчет регулировочного реостата и построить пусковую диаграмму двигателя по индивидуальному заданию на миллиметровой бумаге.

Контрольные вопросы

1 От каких параметров зависит частота вращения ротора асинхронного двигателя с фазным ротором?

2 Как осуществляется реостатное регулирование асинхронных двигателей с фазным ротором?

3 Что называется естественной механической характеристикой асинхронного двигателя ?

4 Чем отличается искусственная механическая характеристика асинхронного двигателя?

5 В чем недостаток реостатного регулирования частоты вращения двигателя ?

6 Что дает увеличение числа ступеней регулировочного реостата РР ?

7 Что такое пусковая диаграмма асинхронного двигателя ?

8 Какой метод используется при расчете регулировочного реостата ?

Контрольные задания

Задание 2.1 Асинхронный двигатель с фазным ротором с номинальной мощностью $P_{ном}$, номинальным скольжением $s_{ном}$, ЭДС роторной обмотки $E_{2н}$, номинальным током ротор-ной обмотки $I_{2ном}$, перегрузочной способностью $\lambda = M_{max}/M_{ном}$, подключен к сети с линейным напряжением $U_{1л} = 380$ В. Требуется построить пусковую диаграмму и рассчитать сопротивления резисторов регулировочного реостата РР в цепи ротора. Значения параметров двигателей приведены в таблицах 2.4 и 2.5.

Таблица 2.4

Номер вариан- та	Тип двигателя	$P_{ном},$ кВт	$n_{ном},$ об/мин	$s_{ном},$ %	$E_2,$ В	$I_{2ном},$ А	$M_{max},$ Н·м
1	МТФ311-6	9	960	-	172	34	314
2	МТФ411-6	18	970	-	235	49	638
3	МТФ312-8	8,2	720	-	186	31	422
4	МТФ411-8	13	715	-	206	42	569
5	МТФ412-6	25	975	-	255	61	932
6	МТФ211-6	6	945	-	256	15,5	191
7	МТН713-10	100	590	-	408	148	7308
8	МТН612-10	35	580	-	248	88	3139
9	МТН613-6	70	975	-	473	95	4905
10	МТН611-6	45	970	-	270	108	2315
11	МТН511-8	18	725	-	281	41	1000
12	МТН411-8	10	720	-	206	31,5	569

Таблица 2.5

Номер вариан- та	Тип двигателя	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$s_{\text{ном}}$, %	E_2 , В	$I_{2\text{ном}}$, А	$M_{\text{мах}}/M_{\text{ном}}$
1	2	3	4	5	6	7	8
13	4AK180M4Y3	18	-	3,5	295	38	4,0
14	4AK200L4Y3	30	-	2,5	350	55	4,0
15	4AK225M4Y3	37	-	3,5	160	160	3,0
16	4AK250M4Y3	71	-	3,5	250	170	3,0
17	4AK160S6Y3	7,5	-	5,0	300	18	3,5
18	4АНК280S4Y3	132	-	2,9	251	330	2,0
19	4АНК315S4Y3	200	-	2,5	312	396	2,0
20	4АНК355M4Y3	400	-	2,0	505	485	2,0
21	4АНК180S6Y3	13	-	7,0	42	205	3,0
22	4АНК200M4Y3	22	-	3,5	37	380	3,0
23	4АНК280SA6Y3	45	-	4,0	200	155	2,3
24	4АНК280M8Y3	90	-	4,0	267	214	1,9
25	4АНК355S8Y3	160	-	2,7	253	285	1,7

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 3

Расчет и построение механических характеристик электродвигателей постоянного тока в различных режимах. Выбор пусковых резисторов.

Цель работы – расчет и построение механических характеристик электродвигателей постоянного тока в различных режимах. Выбор пусковых резисторов.

Основные положения

1 Электродвигатели с независимым и параллельным возбуждением

Электродвигатели постоянного тока с независимым и параллельным возбуждением (рис. 3.1) широко применяются в приводах различных машин, где требуется широкое и плавное регулирование скорости при жесткой механической характеристике.

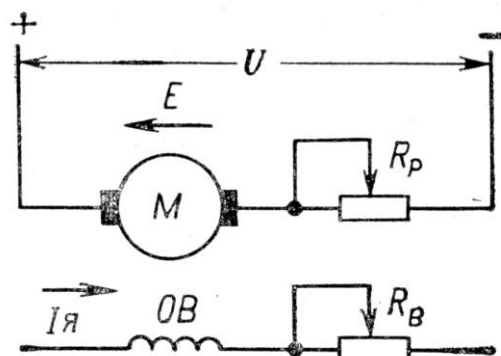


Рис. 3.1 Схема электродвигателя постоянного тока независимым возбуждением

с

Механическая характеристика представляет зависимость вращающего момента двигателя от его угловой скорости $M=f(\omega)$ или частоты вращения $M=f(n)$. Механические характеристики электродвигателей с независимым и параллельным возбуждением (рис. 3.2) практически одинаковы, что позволяет рассматривать их совместно.

Уравнение скоростной характеристики имеет вид:

$$\omega = \frac{U - I(R_{\text{я}} + R_{\text{р}})}{c_{\text{д}} \cdot \Phi}$$

где U - подводимое к двигателю напряжение, В;

I - ток в цепи якоря, А;

$R_{\text{я}}$ - сопротивление обмотки якоря, Ом;

$R_{\text{р}}$ - сопротивление реостата в цепи якоря, Ом;

$c_{\text{д}}$ - коэффициент, зависящий от конструкции электродвигателя;

Φ - магнитный поток возбуждения двигателя, Вб.

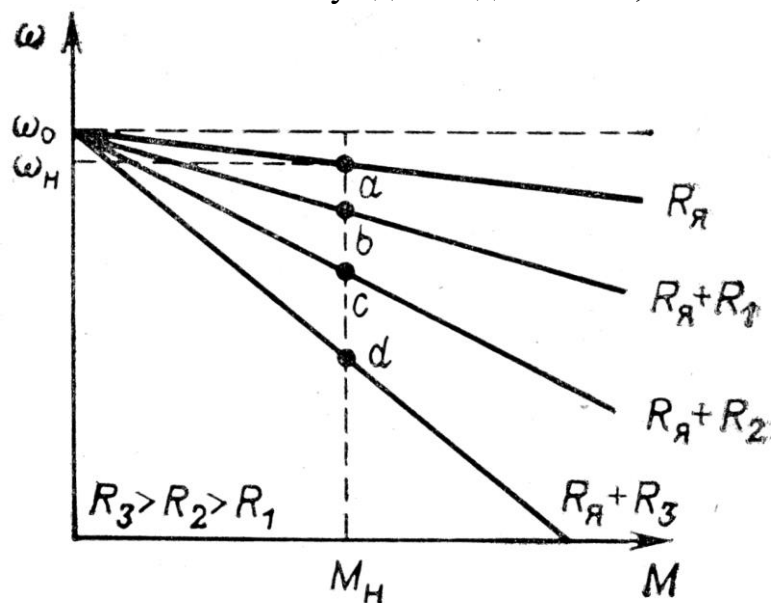


Рис.3.2 Естественная и искусственные (реостатные) характеристики электродвигателя постоянного тока с параллельным возбуждением

Вращающий момент двигателя

$$M = c_d \cdot \Phi \cdot I, \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Уравнение механической характеристики имеет вид:

$$\omega = \frac{U}{c_d \cdot \Phi} - M \cdot \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{р}}}{c_d \cdot \Phi^2}$$

Это уравнение имеет в правой части два слагаемых. Первое слагаемое не зависит от момента, развиваемого двигателем, и представляет собой угловую скорость *идеального холостого хода* (точка ω_0 на рис. 3.2).

Уравнение механической характеристики представляет собой прямую линию, наклон которой к оси абсцисс (M) определяется вторым слагаемым. В случае, когда $R_{\text{р}}=0$, этот наклон определяется лишь сопротивлением якоря (естественная характеристика). Сопротивление якоря $R_{\text{я}}$ двигателя с параллельным возбуждением невелико, а магнитный поток от нагрузки не зависит. Поэтому естественная механическая характеристика такого двигателя будет *жесткой*. По мере увеличения сопротивления реостата $R_{\text{р}}$, вводимого в цепь якоря, наклон механических характеристик возрастает (рис. 3.2).

Для расчета механических характеристик необходимо знать величину сопротивления якоря $R_{\text{я}}$, которая задается в каталогах. При отсутствии заводских данных величину $R_{\text{я}}$ двигателя независимого и параллельного возбуждения можно найти ориентировочно по формуле:

$$R_{\text{я}} = 0,5 \cdot (1 - \eta_{\text{н}}) \cdot \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}}}$$

где $\eta_{\text{н}}$ - КПД двигателя при номинальной нагрузке, равный в среднем 0,87-0,9;

$U_{\text{н}}$ - номинальное напряжение, В;

$I_{\text{н}}$ - номинальный ток, А.

Поскольку механические характеристики двигателей с независимым и параллельным возбуждением прямолинейны, то для их построения достаточно иметь две точки. В качестве первой точки принимают ω_0 при $M=0$, а второй служит точка **а** естественной характеристики, соответствующая номинальному моменту при заданном сопротивлении реостата R_1, R_2, R_3 (рис. 3.2).

Для двигателей с независимым и параллельным возбуждением возможны все три режима торможения: рекуперативное торможение с отдачей энергии в сеть, торможение противовключением и динамическое торможение.

Рекуперативное торможение возможно в том случае, когда скорость двигателя, вращающегося в том же направлении, что в двигательном режиме, станет больше скорости холостого хода, например при спуске груза или при движении под уклон. Схема включения двигателя в этом режиме остается такой же, как и в двигательном, но поскольку угловая скорость якоря стала $\omega > \omega_0$, то ЭДС становится выше напряжения

в сети, т.е. двигатель переходит в режим генератора с отдачей тока в сеть. Механические характеристики этого режима начинаются в точке идеального холостого хода ω_0 и являются продолжением соответствующих характеристик двигательного режима во II–IV (после реверса) квадрантах (рис. 2.3, линии с засечками). Кинетическая энергия опускающегося груза преобразуется в электроэнергию. Знак момента меняется на отрицательный и уравнение механической характеристики при этом режиме имеет вид:

$$\omega_{p.t} = \frac{U}{c_d \cdot \Phi} + M \cdot \frac{R_{я} + R_p}{c_d^2 \cdot \Phi^2}$$

С увеличением сопротивления реостата в цепи якоря жесткость механических характеристик уменьшается, и интенсивность торможения снижается. Этот вид торможения является наиболее экономичным. Недостатком его является то, что такой режим возможен лишь при высоких скоростях.

Динамическое торможение осуществляется включением обмоток якоря на специальный реостат $R_{д.т.}$, а обмотки возбуждения ОВ - в сеть (рис.3.4).

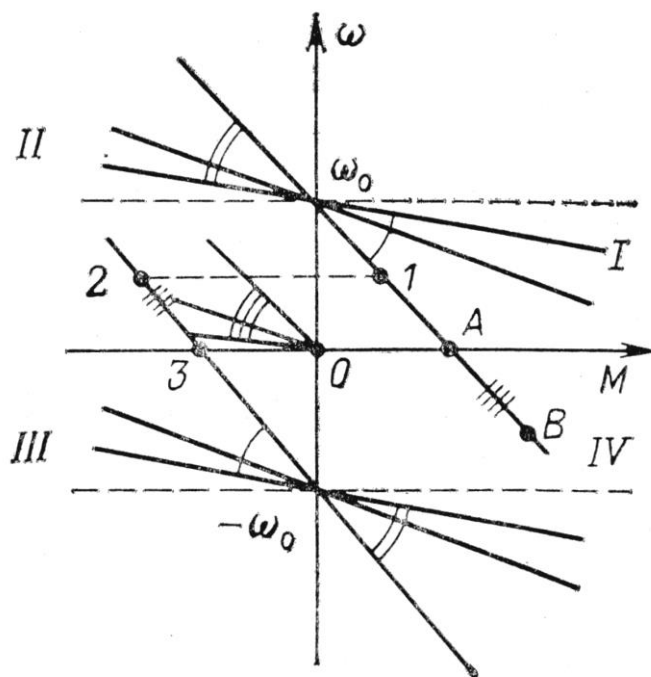


Рис. 3.3 Механические характеристики электродвигателя с параллельным возбуждением при различных режимах работы

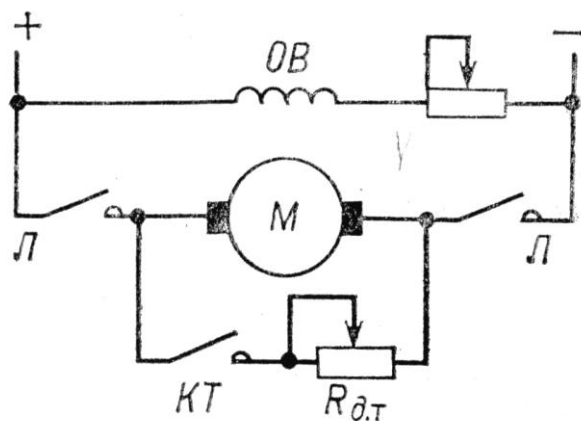


Рис. 3.4 Схема динамического торможения электродвигателя постоянного тока с параллельным возбуждением

Механические характеристики этого режима (рис. 3.3) представляют собой линии, проходящие через начало координат в квадранте II. С увеличением сопротивления реостата $R_{д.т}$ снижается жесткость характеристик и уменьшается интенсивность торможения. Такой режим торможения отличается плавностью.

Торможение **противовключением** осуществляется переменной полярности обмотки якоря на ходу. ЭДС двигателя будет направлена согласно с напряжением сети, момент якоря будет направлен встречно направлению вращения якоря и обеспечит торможение. При переключении полярности обмотки якоря знак момента изменится. Двигатель, работавший до переключения в точке 1 (рис. 3.3), при переключении обмотки якоря перейдет в точку 2 в квадранте II. При остановке (точка 3) двигатель должен быть отключен, иначе он может разогнаться в обратном направлении и работать в двигательном режиме (линия 3- $-\omega_0$).

2 Электродвигатели с последовательным и смешанным возбуждением

Электродвигатели постоянного тока с последовательным и смешанным возбуждением (рис. 3.5) широко применяются в приводах различных машин, где требуется высокий пусковой момент и плавное регулирование скорости при мягкой механической характеристике.

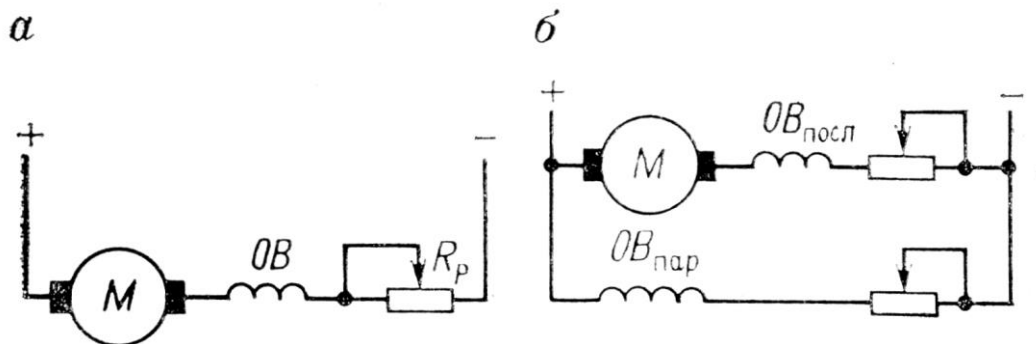


Рис. 3.5 Схема электродвигателя постоянного тока с последовательным (а) и смешанным (б) возбуждением

В двигателях с последовательным возбуждением (рис. 3.5, а) ток якоря является одновременно и током возбуждения. Вследствие этого поток возбуждения двигателя Φ зависит от тока якоря, т.е. от нагрузки на валу. С увеличением момента нагрузки скорость двигателя значительно снижается, так как возрастает поток возбуждения Φ .

Аналитического выражения механической характеристики нет ввиду нелинейности кривой намагничивания. Магнитный поток можно считать пропорциональным току якоря только при токах ниже 0,8 номинального, когда магнитная система двигателя не насыщена и характеристика двигателя представляет собой прямую линию, соответствующую прямолинейной части кривой намагничивания. После насыщения магнитной системы механическая характеристика становится нелинейной кривой, приближающейся к оси ординат (ω) (рис. 3.6). Характеристика имеет большую крутизну при малых значениях момента, что объясняется значительным снижением магнитного потока при малой нагрузке. При большой нагрузке магнитная система насыщается, и поток уже не зависит от нагрузки.

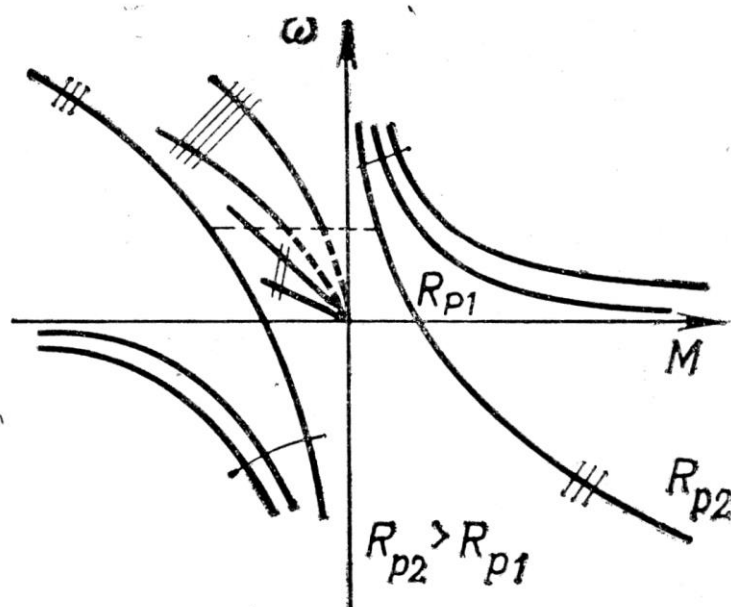


Рис.3.6 Механические характеристики электродвигателя с последовательным возбуждением при различных режимах работы

Механическая характеристика из гиперболической в начальной части превращается в почти прямолинейную. При нагрузках менее 15-20% номинальной скорость вследствие снижения магнитного потока недопустимо возрастает, а при холостом ходе, когда $\Phi \approx 0$, скорость может достигнуть величины, при которой произойдет авария (разнос двигателя).

Поэтому двигатель с последовательным возбуждением нельзя запускать вхолостую.

Поскольку уравнение механической характеристики двигателя с последовательным возбуждением практически отсутствует, то для построения механических характеристик пользуются полученными экспериментальными характеристиками $\omega=f(I)$ и $M=f(I)$, которые приводятся в каталогах. Для уменьшения числа характеристик, используемых при расчетах, пользуются так называемыми **универсальными характеристиками**, в которых по оси абсцисс отложены относительные значения тока, а по оси ординат - относительные значения скорости и момента.

На рис. 3.7 приведены универсальные характеристики двигателей с последовательным возбуждением. Заменяя на универсальной характеристике относительные значения момента M^* , скорости ω^* и тока I^* их абсолютными значениями, можно легко построить естественную механическую характеристику двигателя.

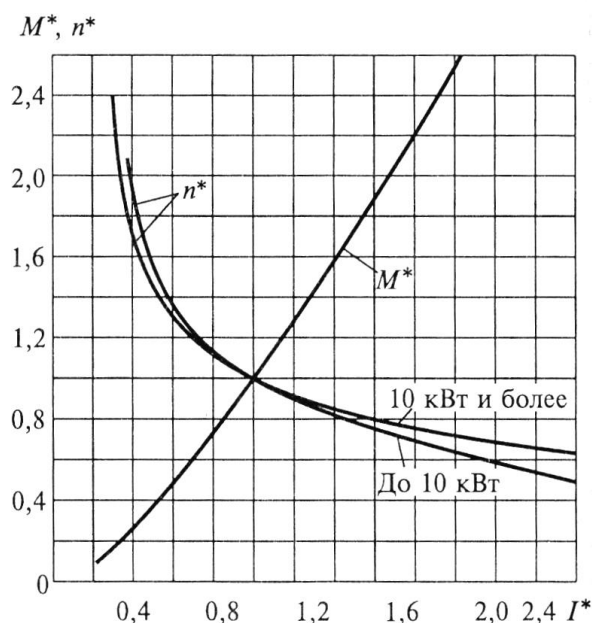


Рис. 3.7 Универсальные характеристики электродвигателей с последовательным возбуждением

Механические характеристики двигателя с последовательным возбуждением значительно смягчаются при введении в цепь якоря реостата (см. рис. 3.6).

Для построения искусственных (реостатных) характеристик можно пользоваться уравнением:

$$\omega_p = \omega_e \cdot \frac{U_n - I_n (R_d + R_p)}{U_n - I_n \cdot R_d}$$

где ω_p и ω_e - угловая скорость соответственно на реостатной и естественной характеристике;

$R_d = R_{\text{я}} + R_{\text{ов}}$ - сопротивление двигателя.

Порядок построения искусственной характеристики сводится к тому, что, задаваясь точками естественной характеристики, находят соответствующие им точки на реостатной характеристики.

Для двигателя последовательного возбуждения возможны только два режима электрического торможения: **противовключение и динамического торможения**. Режим рекуперативного торможения у таких двигателей отсутствует, поскольку нет точки идеального холостого хода.

Торможение противовключением осуществляется, как и у двигателей параллельного возбуждения - изменением полярности обмотки якоря. Характеристика располагается по II квадранте (см. рис. 3.6) (линии с тремя засечками).

Динамическое торможение может быть осуществлено двумя способами: с самовозбуждением (рис. 3.8, а) и с независимым возбуждением (рис. 3.8, б).

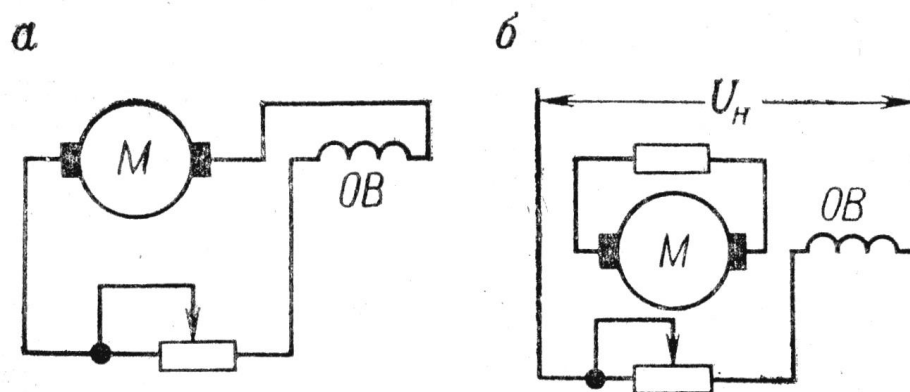


Рис. 3.8 Схемы динамического торможения электродвигателя с последовательным возбуждением

При торможении с самовозбуждением необходимо обеспечить сохранение направления тока возбуждения таким же, как при нормальной работе двигателя. Без этого двигатель размагнитится и никакого тормозного эффекта не будет. Механические характеристики этого режима торможения показаны на рис. 3.6 (четыре засечки). Характеристики эти нелинейны вследствие непостоянного магнитного потока. В области пунктирных линий торможение практически отсутствует. Рассмотренный режим используется редко, в основном как аварийный при исчезновении напряжения сети.

Механические характеристики динамического торможения с независимым возбуждением аналогичны соответствующим

характеристикам двигателя параллельного возбуждения (рис. 3.6, две засечки). Этот режим нашел применение в электровозах.

Механические характеристики двигателя со смешанным возбуждением имеют промежуточную форму между характеристиками двигателей с последовательным и параллельным возбуждением, поскольку двигатель имеет две обмотки возбуждения - последовательную $ОВ_{\text{посл}}$ и параллельную $ОВ_{\text{пар}}$ (см. рис. 3.5, б), которые совместно создают поток возбуждения. Механические характеристики смягчаются при увеличении сопротивления в цепи якоря (рис. 3.9). Механические характеристики рассчитывают и строят так же, как и характеристики двигателя с последовательным возбуждением.

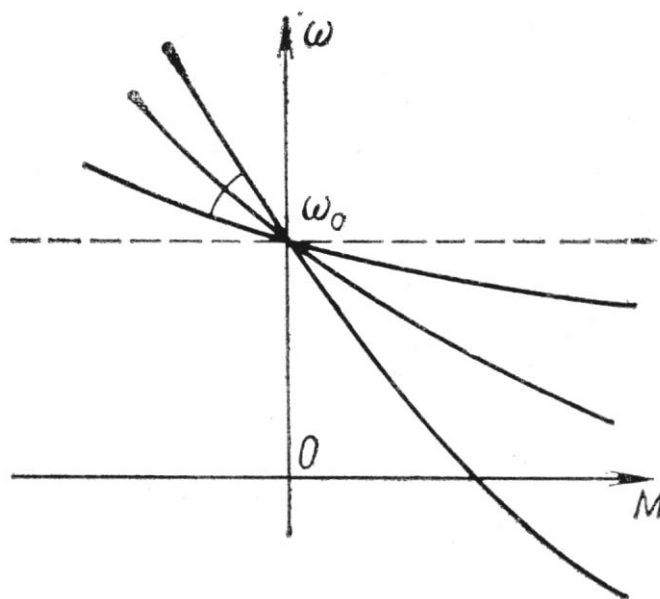


Рис. 3.9 Механические характеристики электродвигателя со смешанным возбуждением

Благодаря наличию параллельной обмотки возбуждения, опасность разноса на холостом ходу у таких двигателей отсутствует.

Двигатели со смешанным возбуждением имеют три режима электрического торможения: **рекуперативное, динамическое и торможение противовключением.**

При переходе двигателя в режим рекуперативного и динамического торможения направление тока в цепи якоря, а следовательно, и в последовательной обмотке возбуждения изменяется на обратное. Магнитный поток при этом будет направлен навстречу потоку параллельной обмотки возбуждения, что приводит к резкому уменьшению магнитного потока двигателя. Поэтому в момент перехода в режим динамического или рекуперативного торможения параллельную обмотку

возбуждения оставляют включенной в сеть, а последовательную обмотку отключают или шунтируют.

Механические характеристики в этих режимах прямолинейны и напоминают соответствующие характеристики двигателя параллельного возбуждения (см. рис.3.9, линии с засечкой - для рекуперативного торможения).

Режим торможения противовключением осуществляется, как и двигателей с последовательным и параллельным возбуждением.

Пример 1. Для двигателя постоянного тока параллельного возбуждения, номинальные данные которого $P_n=75$ кВт; $U_n=220$ В; $I_n=380$ А; $n_n=900$ об/мин (94 рад/с), требуется:

- 1) построить естественную механическую характеристику;
- 2) построить искусственную (реостатную) механическую характеристику при введении в цепь якоря сопротивления $R_p=0,2$ Ом;
- 3) построить механическую характеристику в режиме рекуперативного торможения и определить величину сопротивление реостата, который нужно ввести в цепь якоря при $n_3=1100$ об/мин;
- 4) построить механическую характеристику в режиме динамического торможения и определить величину сопротивление реостата, который нужно ввести в цепь якоря при $n_4=560$ об/мин;
- 5) построить механическую характеристику в тормозном режиме противовключения и определить величину сопротивление реостата, который нужно ввести в цепь якоря при $n_5=560$ об/мин;

Решение.

1 Номинальный КПД электродвигателя

$$\eta_n = \frac{P_n \cdot 10^3}{I_n \cdot U_n} = \frac{75 \cdot 10^3}{380 \cdot 220} = 0,9$$

2 Сопротивление якоря двигателя

$$R_{\text{я}} = 0,5 \cdot (1 - \eta_n) \cdot \frac{U_n}{I_n} = 0,5 \cdot (1 - 0,9) \cdot \frac{220}{380} = 0,029 \text{ Ом}$$

3 Частота вращения холостого хода

$$n_0 = n_n \cdot \frac{U_n}{U_n - I_n \cdot R_{\text{я}}} = 900 \cdot \frac{220}{220 - 380 \cdot 0,029} = 950 \text{ об / мин}$$

$$\text{или } \omega = \frac{n_0}{9,55} = \frac{950}{9,55} = 100 \text{ рад / с}$$

4 Номинальный момент двигателя

$$M_n = \frac{P_n \cdot 10^3}{\omega_n} = \frac{75 \cdot 10^3}{94} = 800 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

5 Определяем координаты для построения естественной механической характеристики 1 (рис. 3.10): первая точка $M=0$ и $n=n_0=950$ об/мин; вторая точка $M=M_H=800$ Н·м и $n=n_H=900$ об/мин

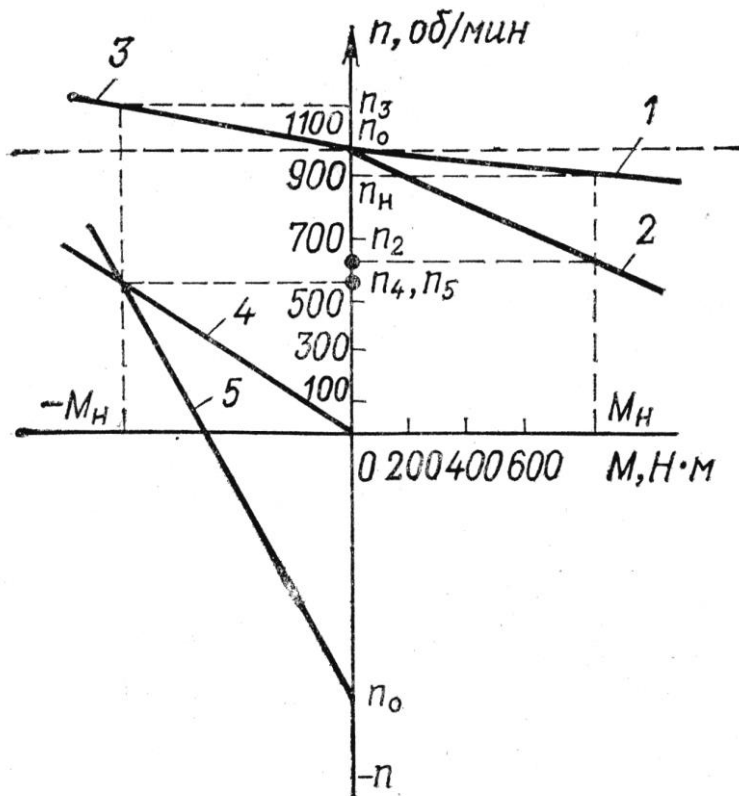


Рис.3.10 Построение механических характеристик электродвигателя с параллельным возбуждением

6 Частота вращения при номинальной нагрузке и введении в цепь якоря реостата:

$$n_2 = n_0 \cdot \left[1 - \frac{I_H \cdot (R_{\text{я}} + R_p)}{U_H} \right] = 950 \cdot \left[1 - \frac{380 \cdot (0,029 + 0,2)}{220} \right] = 590 \text{ об / мин}$$

Координаты для построения реостатной (искусственной) характеристики 2: первая точка $M=0$ и $n=n_0=950$ об/мин; вторая точка $M=M_H=800$ Н·м и $n=n_2=590$ об/мин.

7 Определяем величину сопротивления реостата R_3 в режиме рекуперативного торможения. Находим величину ЭДС E_3 :

$$E_3 = \frac{n_3 \cdot (U_H - I_H \cdot R_{\text{я}})}{n_H} = \frac{1100 \cdot (220 - 380 \cdot 0,029)}{900} = 258 \text{ В}$$

Величина внешнего сопротивления R_3 :

$$R_3 = \frac{E_3 - U_H}{I_H} - R_{\text{я}} = \frac{258 - 220}{380} - 0,029 = 0,07 \text{ Ом}$$

Координаты механической характеристики **3** в режиме рекуперативного торможения: первая точка $M=0$ и $n=n_0=950$ об/мин; вторая точка $M=-M_H = -800$ Н·м и $n=n_3=1100$ об/мин.

8 Определяем величину сопротивления реостата R_4 в режиме динамического торможения. Находим величину ЭДС E_4 :

$$E_4 = \frac{n_4 \cdot (U_H - I_H \cdot R_{\text{я}})}{n_H} = \frac{560 \cdot (220 - 380 \cdot 0,029)}{900} = 130 \text{ В}$$

Величина внешнего сопротивления R_4 :

$$R_4 = \frac{E_4}{I_H} - R_{\text{я}} = \frac{130}{380} - 0,029 = 0,32 \text{ Ом}$$

Координаты механической характеристики **4** в режиме динамического торможения: первая точка $M=0$ и $n=0$; вторая точка $M=-M_H = -800$ Н·м и $n=n_4=560$ об/мин.

9 Определяем величину сопротивления реостата R_5 в режиме торможения противовключением. Принимаем, что $E_5=E_4$:

$$R_5 = \frac{U_H - E_5}{I_H} - R_{\text{я}} = \frac{220 - 130}{380} - 0,029 = 0,89 \text{ Ом}$$

Координаты механической характеристики **5** в режиме торможения противовключением: первая точка $M=0$ и $n=-n_0=-950$ об/мин; вторая точка $M=-M_H = -800$ Н·м и $n=n_5=560$ об/мин.

Пример 2 Для двигателя постоянного тока последовательного возбуждения, номинальные данные которого $P_H=5,5$ кВт; $U_H=250$ В; $I_H=25$ А; $n_H=730$ об/мин (76,4 рад/с) $R_d=0,25$ Ом, требуется:

- 1) построить естественную механическую характеристику;
- 2) построить искусственную (реостатную) механическую характеристику при введении в цепь якоря сопротивления $R_p=1,5$ Ом;

Универсальная характеристика двигателя приведена на рис. 3.7.

Решение.

1. Номинальный момент двигателя

$$M_H = \frac{P_H \cdot 10^3}{\omega_H} = \frac{5,5 \cdot 10^3}{76,4} = 72 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

2. На универсальной характеристике (рис. 3.7) заменяем Относительные значения момента M^* (кривая 2), тока I^* и скорости вращения $n^*(\omega^*)$ (кривые 1) на их абсолютные значения, применительно к данному двигателю, получаем необходимые данные для построения естественной механической характеристики. Данные сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

$I^*=I/I_H$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
$M^*=M/M_H$	0,2	0,3	0,6	0,7	1,0	1,3	1,6	1,9	2,3	2,6
$\omega^*=\omega/\omega_H$	2,1	1,8	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,75	0,6	0,5
$I=I^*/I_H, A$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$M=M^*/M_H, H\cdot m$	14,4	21,6	43,2	50,4	72	93,6	115	137	166	187
$\omega^*=\omega/\omega_H, \text{ рад/с}$	160	137,5	91,7	84	76,4	68,8	61,1	57,3	45,8	38,2
$n, \text{ об/мин}$	1528	1313	876	802	730	657	584	547	437	365

По этим данным строим естественную механическую характеристику **1** (рис. 3.11)

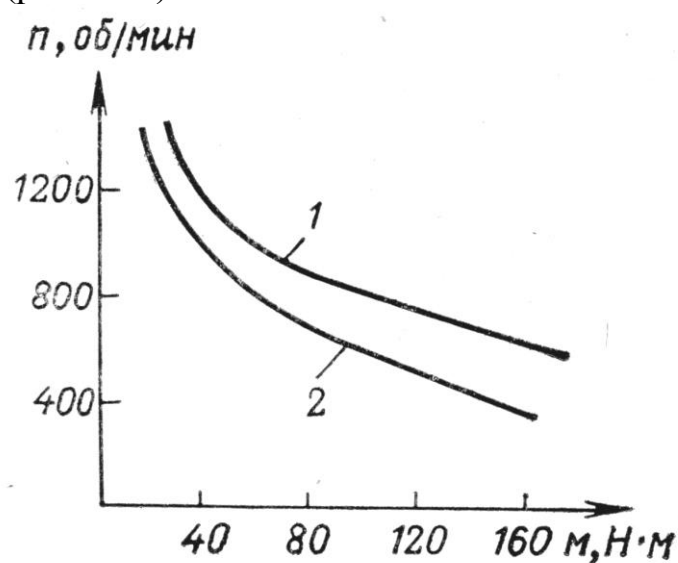


Рис. 3.11 Построение механических характеристик электродвигателя с последовательным возбуждением

3. Определим частоту вращения якоря при номинальном токе $I_H=25$ А и частоте вращения $n_H=n_e=730$ об/мин при введении сопротивления реостата $R_p=1,5$ Ом:

$$n'_я = n_e \cdot \frac{U_H - I_H \cdot (R_d + R_p)}{U_H - I_H \cdot R_d} = 730 \cdot \frac{250 - 25 \cdot (0,25 + 1,5)}{250 - 25 \cdot 0,25} = 618 \text{ об / мин}$$

Аналогично находим частоту вращения при других значениях тока.

Данные расчеты сведем в таблицу 3.2.

Таблица 3.2

$I^*=I/I_H$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
$M^*=M/M_H$	0,2	0,3	0,6	0,7	1,0	1,3	1,6	1,9	2,3	2,6
$\omega^*=\omega/\omega_H$	2,1	1,8	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,75	0,6	0,5
$I=I^*/I_H, A$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$M=M^*/M_H, H\cdot m$	14,4	21,6	43,2	50,4	72	93,6	115	137	166	187
$\omega^*=\omega/\omega_H, \text{ рад/с}$	74,1	71,7	69,4	67,1	64,7	62,3	59,8	57,1	54,9	52,4
$n, \text{ об/мин}$	708	685	663	641	618	595	571	545	524	500

По полученным данным строим искусственную механическую характеристику 2 (рис. 3.11).

3 Расчет пусковых реостатов

В начальный момент пуска ток двигателя постоянного тока достигает большой величины. Скачок тока объясняется тем, что в неподвижном якоре двигателя постоянного тока отсутствует противо-ЭДС. Большие пусковые токи могут вызвать перегрев обмоток, искрение щеток, значительные электродинамические усилия в обмотках двигателя, приводящие к порче изоляции. По условиям коммутации двигателя постоянного тока не должны иметь пусковой ток выше **200-250%** номинального.

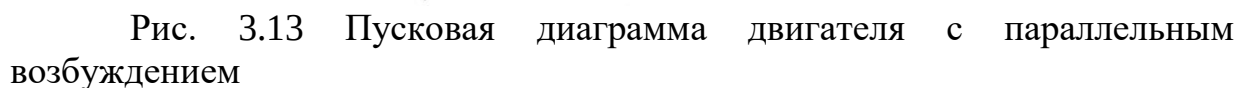
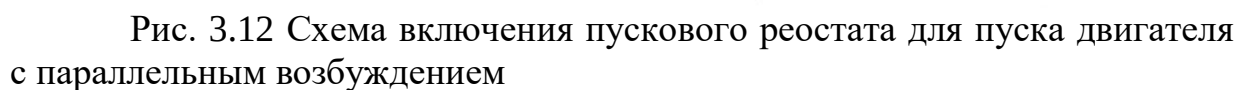
Пуск двигателей постоянного тока осуществляется с помощью специального пускового реостата, включенного в цепь якоря, а также плавным повышением напряжения на зажимах якоря.

3.1 Расчет пусковых реостатов для двигателей с параллельным и независимым возбуждением

Пуск двигателей с параллельным и независимым возбуждением (рис. 3.12) осуществляется через пусковые реостаты.

При пуске двигателя с параллельным возбуждением (рис.3.12) с помощью пускового реостата сначала замыкаются контакты **Л**. Ток проходит через весь пусковой реостат, кроме секции противовключения $r_{пр}$, так как контакт **ПР** замкнут.

Если пусковой вращающий момент M_n (рис. 3.13) меньше статического момента сопротивления M_c , то привод разгоняться не будет (точка **а**). Характеристика **hm** называется **предварительной** и служит для предварительного натяга приводного механизма.



36

точке **с**, замыкается первый ускоряющий контакт **У1**, который шунтирует секцию пускового реостата r_1 . Момент $M_{пер}$ и ток I_2 , при которых замыкаются ускоряющие контакты, называют **переключающими**.

После шунтирования r_1 двигатель мгновенно (не изменив скорости) переходит на вторую искусственную характеристику **dh** по горизонтальной линии **cd**.

В точке **е** шунтируется вторая секция r_2 пускового реостата и двигатель выходит по линии **ef** на естественную характеристику **fh**. В точке **q**, $M=M_c$, наступает установившаяся угловая скорость, и пуск заканчивается.

При рассмотренном способе разгона пусковой момент изменяется в пределах от M_{max} до $M_{пер}$.

Пусковые и тормозные резисторы по ступеням следует разбивать так, чтобы отношение максимального (пикового) момента к статическому M_{max}/M_c и отношение момента переключения к статическому $M_{пер}/M_c$ на всех ступенях оставалось бы постоянным.

Чем больше пусковых ступеней содержит реостат, тем плавнее будет пуск.

Задачей расчета реостатов является определение величин сопротивлений и протекающих по ним токов.

Порядок расчета следующий (см. рис. 3.13).

1. Строим естественную механическую характеристику **hqf** по двум точкам: первая точка **h**: $M=0$ и $\omega=\omega_0$; вторая точка **q**: $M=M_H = M_c$ и $\omega=\omega_H$ (способ определения этих точек рассмотрен выше).

2. Задаемся пределами колебаний пускового момента: максимальным $M_{max} = (2 \div 2,5) \cdot M_H$ и переключения $M_{пер} = (1,1 \div 1,2) \cdot M_H$ и через точки M_{max} и $M_{пер}$ проводим вертикальные линии.

3. Строим первую механическую пусковую характеристику **hb**, соответствующую полностью введенному пусковому реостату в цепь якоря. Эта характеристика строится по двум точкам: точке **h** и точке **b**, для которой $\omega=0$ $M = M_{max}$.

В точке **с** первая секция пускового реостата выключается.

4. Из точки **с** проводим горизонтальную прямую **cd** до пересечения с линией с линией **bf** в точке **d**.

5. Строим вторую пусковую характеристику **hd**. Горизонтальная прямая, проведенная из точки **е**, которая принадлежит последней реостатной характеристике, должна пересечь естественную характеристику в точке **f**. В противном случае построение следует произвести снова, изменив значение $M_{пер}$.

Величины сопротивлений каждой ступени определяются следующим образом.

Номинальное сопротивление двигателя

$$R_H = U_H / I_H$$

На графике (см. рис. 3.13) этому сопротивлению соответствует отрезок pl .

Масштаб сопротивлений

$$m_r = R_n/pl, \text{ Ом/мм.}$$

Определяет сопротивления секций и ступеней.

Секций: $r_1 = ik \cdot m_r, \text{ Ом}; \quad r_2 = qi \cdot m_r, \text{ Ом.}$

Предварительная секция

$$r_{\Pi} = kl \cdot m_r, \text{ Ом.}$$

Ступени (см. рис. 3.10):

$$R_1 = pk \cdot m_r, \text{ Ом}; \quad R_2 = pi \cdot m_r, \text{ Ом.}$$

Предварительная ступень

$$R_{\Pi} = pl \cdot m_r, \text{ Ом.}$$

Сопротивление ступени противовключения можно определить из выражения

$$R_{\text{пр}} = U_n/I_{\text{т.п}}, \text{ Ом.}$$

где $I_{\text{т.п}}$ - сила тока в начале торможения. Часто принимают $I_{\text{т.п}} = I_n$.

В состав ступени $R_{\text{пр}}$ входит пусковой реостат и предварительная ступень.

Сопротивление секции противовключения

$$r_{\text{пр}} = R_{\text{пр}} - r_{\Pi} - r_1 - r_2 - r_{\text{я}}$$

Сопротивление ступени динамического торможения определяется по формуле

$$R_{\text{д.т}} = \frac{\omega_{\text{д.т}} \cdot U_n}{\omega_o \cdot I_{\text{д.т}}}$$

где $\omega_{\text{д.т}}$ - угловая скорость в начальный момент динамического торможения.

Скорость $\omega_{\text{д.т}}$ определяется по механической характеристике, на которой двигатель работал перед переключением на тормозной режим.

Графически характеристику динамического торможения строят по заданным значениям $n_{\text{д.т}}$ и $M_{\text{д.т}}$ (см. рис. 3.14).

При рекуперативном торможении сопротивление реостата

$$R_{\text{р.т}} = \frac{E_{\text{р.т}} - U_n}{I_{\text{р.т}}}$$

Графическое определение сопротивления ступени произведено на рис. 3.13.

3.2 Расчет пусковых реостатов для двигателей с последовательным и смешанным возбуждением

Пуск двигателей с последовательным и смешанным возбуждением (рис. 3.14) осуществляется через пусковые реостаты.

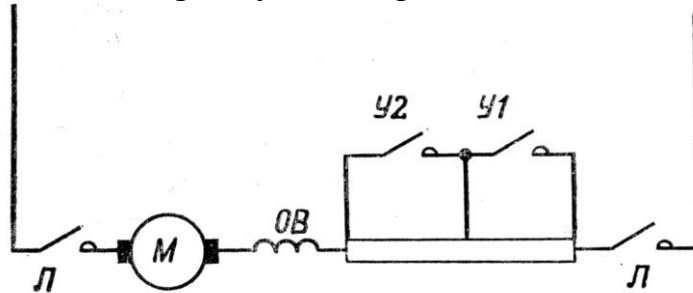


Рис. 3.14 Схема включения пускового реостата для пуска двигателя с последовательным возбуждением

Задачей расчета реостатов является определение величин сопротивлений и протекающих по ним токов. Расчет удобно производить графическим способом. Метод расчета основан на предположении, что между сопротивлением якорной цепи и скоростью при неизменном потоке возбуждения существует линейная зависимость

$$\omega = \frac{U}{c_d \cdot \Phi} - I \cdot \frac{R}{c_d \cdot \Phi} = A - BR$$

где $R = R_d + R_p$ - полное сопротивление якорной цепи двигателя.

Для построения прямолинейной зависимости $\omega = f(R)$ ось направим влево от начала координат (рис.3.15).

Построение пусковой диаграммы осуществляем в следующей последовательности.

1. Строим естественную характеристику (см. выше).

2. По оси абсцисс **OR** влево в масштабе откладываем сопротивление двигателя. Отрезок **OA** соответствует внутреннему сопротивлению двигателя R_d , которое определяется по каталожным данным, или из уравнения

$$R_d = 0,75 \cdot (1 - \eta_n) \cdot \frac{U_n}{I_n}$$

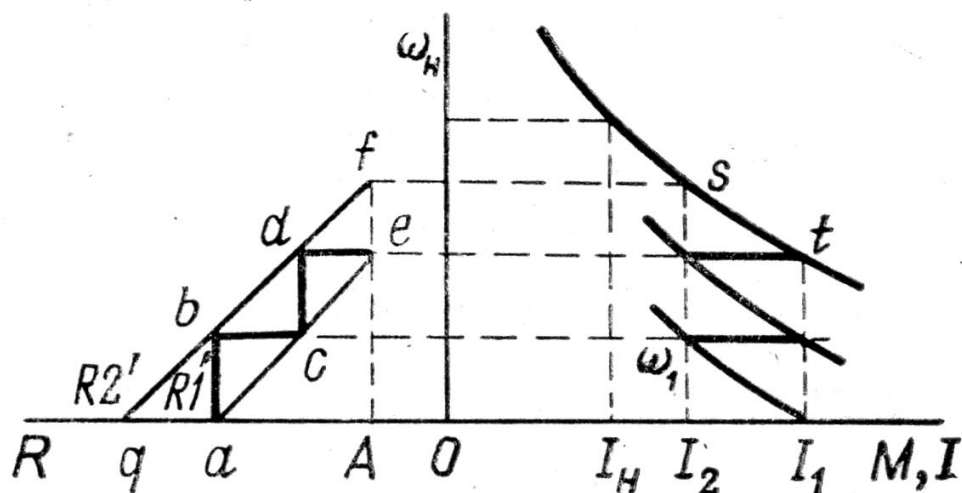


Рис. 3.15 Пусковая диаграмма двигателя с последовательным возбуждением

3. Через точку **A** проводим вертикаль **Af**.

4. Выбрав пределы колебаний пускового тока I_1 и I_2 проводим через соответствующие точки вертикальные прямые до пересечения с естественной характеристикой. Из полученных точек пересечения **s** и **t** проводим горизонтальные прямые до пересечения с линией **Af**.

На оси **OR** откладываем в масштабе сопротивления, соответствующие выбранным пределам пусковых токов

$$Oq = \frac{U_{\text{н}}}{I_2} = R'_2 \quad Oa = \frac{U_{\text{н}}}{I_1} = R'_1$$

Соединяя точки **a** и **e**, а также **q** и **f**, получаем прямые, характеризующие линейную зависимость между угловой скоростью двигателя и сопротивлением его якорной цепи при неизменном токе якоря.

Линия **ae** соответствует максимальному значению пускового тока двигателя I_1 , а линия **qf** - току переключения I_2 .

Для определения числа и величин сопротивлений пусковых ступеней между прямыми **qf** и **ae** проводим ломаную линию, начиная от точки **a**. Отрезки **ab** и **cd** этой линии параллельны оси ординат, отрезки **bc** и **de** - оси абсцисс.

Число горизонтальных участков этой линии (на рис.3.15 их два) равно числу ступеней пускового реостата.

Величины сопротивления ступеней определяются длиной соответствующих отрезков с учетом масштаба, величина которого

$$m_r = R_d/OA, \text{ Ом/мм.}$$

Расчет сопротивления ступени противовключения производят тем же методом, что и для двигателя параллельного возбуждения.

При динамическом торможении по схеме, приведенной на рис. 3.8, б, с независимым возбуждением сопротивление ступени торможения определяется для цепи возбуждения по формуле

$$R_{д.т} = \frac{U_n}{I_{в.д.т}}$$

где $I_{в.д.т}$ - ток возбуждения. Величина этого тока обычно принимается равной номинальной.

Для якорной цепи сопротивление ступени динамического торможения

$$R_{д.т} = \frac{E_{д.т}}{I_{д.т}}$$

Сопротивление секции динамического торможения

$$r_{д.т} = \frac{E_{д.т}}{I_{д.т}} - R_{я} - R_p$$

где R_p - сопротивление пускового реостата, включенного последовательно с секцией $r_{д.т}$.

$E_{д.т}$ - ЭДС двигателя в начале торможения

$$E_{д.т} = E_n \cdot \frac{\omega_{\max}}{\omega_n}$$

Величина $E_{д.т}$ для двигателей с последовательным возбуждением определяется максимально допустимым током $I_{д.т}$ двигателя и максимально возможной скоростью $\omega_{\max}$ при переходе от двигательного режима к режиму торможения. Обычно

$$E_{д.т} = 1,25 \cdot U_n$$

Пуск в ход двигателей смешанного возбуждения производится через пусковые реостаты, расчет которых выполняется графически так же, как и для двигателей последовательного возбуждения.

Пример 3. Для двигателя постоянного тока параллельного возбуждения, номинальные данные которого $P_n=75$ кВт; $U_n=220$ В; $I_n=380$ А; $n_n=900$ об/мин (94 рад/с), требуется:

1) рассчитать сопротивление пускового реостата для форсированного пуска в четыре ступени;

2) определить сопротивление ступени динамического торможения при условии, что $I_{д.т}=2,5 \cdot I_n$ и $E_{д.т}=U_n$.

Решение.

1. По данным строим естественную механическую характеристику (рис. 3.16).

2. Номинальный момент двигателя

$$M_n = \frac{P_n \cdot 10^3}{\omega_n} = \frac{75 \cdot 10^3}{94} = 800 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

3. Принимаем $M_{\max}=2 \cdot M_n = 2 \cdot 800 = 1600$ Н·м

4. Величину момента переключения $M_{\text{пер}}$ подбираем путем графического построения при условии получения четырех ступеней (см. рис. 3.16).

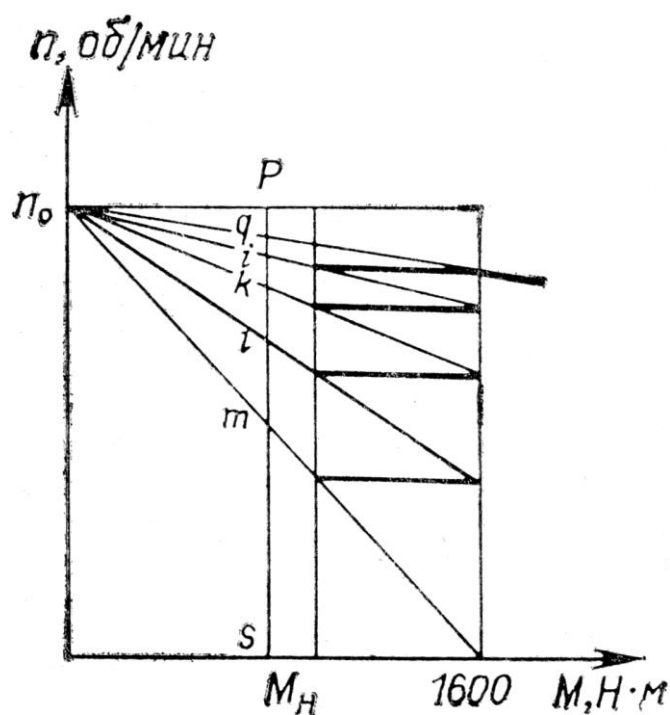


Рис. 3.16 Расчет пускового реостата двигателя с параллельным возбуждением

5. Построив пусковые характеристики и определив масштаб сопротивлений, находим величины сопротивлений каждой ступени.

Номинальное сопротивление двигателя

$$R_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}}} = \frac{220}{380} = 0,58 \text{ Ом}$$

Масштаб сопротивления для случая, когда $p_s = 44 \text{ мм}$

$$m_r = R_{\text{д}}/p_s = 0,58/44 = 0,013 \text{ Ом/мм.}$$

Сопротивления:

- 1 ступени $R_1 = p_m \cdot m_r = 22 \cdot 0,013 = 0,29 \text{ Ом};$

- 2 ступени $R_2 = p_l \cdot m_r = 12 \cdot 0,013 = 0,165 \text{ Ом};$

- 3 ступени $R_3 = p_k \cdot m_r = 7 \cdot 0,013 = 0,09 \text{ Ом};$

- 4 ступени $R_4 = p_i \cdot m_r = 4 \cdot 0,013 = 0,05 \text{ Ом.}$

Сопротивления секций:

r_1 определяется отрезком

$$l_m = R_1 - R_2 = 0,29 - 0,165 = 0,125 \text{ Ом}$$

r_2 определяется отрезком

$$k_l = R_2 - R_3 = 0,165 - 0,09 = 0,075 \text{ Ом}$$

r_3 определяется отрезком

$$i_k = R_3 - R_4 = 0,09 - 0,05 = 0,04 \text{ Ом}$$

r_4 определяется отрезком

$$q_i = R_4 - R_{\text{я}} = 0,05 - 0,029 = 0,021 \text{ Ом.}$$

Можно также рассчитать тот же реостат аналитическим методом.

Принимаем пусковой ток $I_1 = 2 \cdot I_{\text{н}}$; ток переключения

$$I_2 = 1,1 \cdot I_{\text{н}}, \text{ тогда}$$

$$\lambda = \frac{I_1}{I_2} = \frac{2}{1,1} = 1,84$$

Найдем сопротивления ступеней:

$$R_1 = \frac{U_n}{I_1} = \frac{U_n}{2I_n} = \frac{220}{2 \cdot 380} = 0,29 \text{ Ом}$$

$$R_2 = \frac{R_1}{\lambda} = \frac{0,29}{1,84} = 0,16 \text{ Ом}$$

$$R_3 = \frac{R_2}{\lambda} = \frac{0,16}{1,84} = 0,09 \text{ Ом}$$

$$R_4 = \frac{R_3}{\lambda} = \frac{0,09}{1,84} = 0,05 \text{ Ом}$$

6. Сопротивление секции динамического торможения

$$r_{д.т} = \frac{U_n}{I_{д.т}} - R_{я} = \frac{U_n}{2,5 \cdot I_n} - R_{я} = \frac{220}{2,5 \cdot 380} - 0,029 = 0,203 \text{ Ом}$$

Пример 4. Для двигателя постоянного тока последовательного возбуждения номинальные данные которого: $P_n=5,5$ кВт; $U_n=250$ В; $I_n=25$ А; $n_n=730$ об/мин (76 рад/с). Требуется рассчитать пусковой реостат и определить сопротивление ступени противовключения. Пуск осуществляется в две ступени.

Решение.

1. По данным строим естественную механическую характеристику (рис. 3.17).

2. Пусковой ток двигателя (обычно $(2 \div 2,5) \cdot I_n$)

$$I_1 = 2 \cdot I_n = 2 \cdot 25 = 50 \text{ А}$$

3. Значение тока переключения подбирается путем предварительных проб. Рекомендуется выбирать значение $(1,1 \div 1,2) I_n$. Выберем $I_2 = 1,2 \cdot 25 = 30 \text{ А}$.

4. Номинальное сопротивление двигателя

$$R_n = \frac{U_n}{I_n} = \frac{250}{25} = 10 \text{ Ом}$$

5. Номинальный КПД двигателя

$$\eta = \frac{P_n \cdot 10^3}{U_n \cdot I_n} = \frac{5,5 \cdot 10^3}{250 \cdot 25} = 0,88$$

Порядок выполнения работы

1. Изучить основные положения и ознакомиться с порядком построения механических характеристик и расчета параметров пусковых реостатов.
2. Составить отчет о работе с ответами на контрольные вопросы.
3. Выполнить расчеты и вычертить механические характеристики двигателей постоянного тока по индивидуальному заданию.
4. Выполнить расчет пускового реостата по индивидуальному заданию.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой механическая характеристика двигателей постоянного тока ?
2. Как выглядит уравнение механической характеристики?
3. Как определяется скорость идеального холостого хода ?
4. Как изменяется жесткость механических характеристик при увеличении сопротивления реостата в цепи якоря?
5. Каким образом можно определить сопротивление якоря двигателя независимого и параллельного возбуждения ?
6. Какие режимы торможения возможны для двигателей с независимым и параллельным возбуждением?
7. При каких условиях возможен режим рекуперативного торможения в двигателях с независимым и параллельным возбуждением?
8. Как осуществляется динамическое торможение в двигателях с независимым и параллельным возбуждением ?
9. Где находятся механические характеристики динамического торможения двигателя с независимым и параллельным возбуждением ?
10. Как осуществляется режим торможения противовключением в двигателях с независимым и параллельным возбуждением ?
11. Где находятся механические характеристики режима торможения противовключением двигателей с независимым и параллельным возбуждением ?
12. Что представляют собой механические характеристики двигателя с последовательным возбуждением ?
13. Почему двигатели с последовательным возбуждением нельзя запускать вхолостую ?
14. Как изменяется жесткость механических характеристик двигателя с последовательным возбуждением при увеличении сопротивления реостата в цепи якоря ?
15. Какие режимы торможения возможны в двигателе с последовательным возбуждением ?
16. Как осуществляется динамическое торможение с самовозбуждением и независимым возбуждением в двигателе с последовательным возбуждением ?
17. Каковы механические характеристики двигателя со смешанным возбуждением ?
18. Почему в двигателе со смешанным возбуждением возможен режим холостого хода ?

19. Что необходимо предпринять в двигателе со смешанным возбуждением, чтобы перевести его в режим динамического или рекуперативного торможения ?

20. В чем причина скачка тока при пуске двигателей постоянного тока ?

21. Какова допустимая величина пускового тока двигателя постоянного тока и чем она ограничивается ?

22. По какой схеме производится пуск двигателя постоянного тока с параллельным (независимым) возбуждением ? Вычертите эту схему.

23. Каким образом производится процесс пуска двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением ?

24. Что называется начальным пусковым моментом и моментом переключений ?

25. От чего зависит число ступеней пускового реостата ?

26. Что такое естественная механическая характеристика двигателя с параллельным (независимым) возбуждением?

27. Что такое пусковая механическая характеристика двигателя с параллельным (независимым) возбуждением?

28. От каких параметров зависит сопротивление секции реостата в режиме торможения противовключением в двигателе с параллельным (независимым) возбуждением?

29. От каких параметров зависит сопротивление реостата в режиме динамического торможения в двигателе с параллельным (независимым) возбуждением?

30. От каких параметров зависит сопротивление реостата в режиме рекуперативного торможения в двигателе с параллельным (независимым) возбуждением?

31. В чем особенности пуска двигателя с последовательным возбуждением ? Вычертите схему пуска.

32. Каким образом определяется сопротивление реостата при динамическом торможении в двигателе последовательного возбуждения ?

33. Каким образом определяется сопротивление реостата при торможении противовключением в двигателе последовательного возбуждения ?

Контрольные задания

Задание 3.1 Для двигателя постоянного тока параллельного возбуждения, номинальные данные которого P_n , кВт; U_n , В; I_n , А; n_n , об/мин, требуется:

- 1) построить естественную механическую характеристику;
- 2) построить искусственную (реостатную) механическую характеристику при введении в цепь якоря сопротивления R_p , Ом;
- 3) построить механическую характеристику в режиме рекуперативного торможения и определить величину сопротивления реостата, который нужно ввести в цепь якоря при n_3 , об/мин;

4) построить механическую характеристику в режиме динамического торможения и определить величину сопротивления реостата, который нужно ввести в цепь якоря при n_4 , об/мин;

5) построить механическую характеристику в тормозном режиме противовключения и определить величину сопротивления реостата, который нужно ввести в цепь якоря при n_5 , об/мин.

Построение выполнить на миллиметровой бумаге или с помощью специальных программ (MatCad и др). Данные для расчета приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3

Но- мер ва- ри- ант а	Тип двигателя	P_n , кВт	U_n , В	I_n , А	n_n , об/мин	R_p , Ом	n_3 , об/мин	n_4 , об/мин	n_5 , об/мин
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2ПН90МУХЛ4	1,0	110	12,7	3000	8,6	3500	2200	2200
2	2ПН100ЛУХЛ4	2,2	110	25,2	3000	3,1	3200	1800	1800
3	2ПН112МУХЛ4	3,6	110	41,7	3150	1,9	3600	1400	1400

Окончание таблицы 3.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	2ПН132МУХЛ4	4,0	110	46,9	1500	1,8	2100	600	600
5	2ПН132МУХЛ4	7,0	110	78,6	2200	0,9	2600	900	900
6	2ПФ132ЛУХЛ4	5,5	110	62,5	1500	1,3	3600	850	850
7	2ПН160ЛУХЛ4	6,3	110	71,1	1000	1,1	1600	550	550
8	2ПО160МУХЛ4	8,0	110	84,6	2240	0,6	2800	1200	1200
9	4ПФ112S	4,0	220	24,0	900	8,9	3500	220	220
10	4ПФ132S	15,0	220	85,4	1400	2,0	3200	960	960
11	4ПФ132S	7,5	220	43,6	1000	4,2	4000	380	380
12	4ПФ132M	8,5	220	48,6	875	3,8	3800	300	300
13	4ПФ132L	11,0	220	62,8	800	2,9	4200	520	520
14	4ПФ160S	15,0	220	79,6	850	2,4	3300	150	150
15	4ПФ180	17,0	220	99,4	500	2,1	3000	180	180
16	4ПФ180M	20,0	220	114,5	475	1,7	1800	200	200
17	2ПФ160МУХЛ4	4,2	440	11,6	750	35	1100	250	250
18	2ПО180ЛУХЛ4	7,5	440	20	1120	11	1800	300	300
19	2ПО200ЛУХЛ4	11,0	440	29	1000	6,9	2200	400	400
20	2ПО200ЛУХЛ4	17,0	440	43,4	1500	3,9	3100	350	350
21	2ПФ200ЛУХЛ4	15,0	440	42	800	6,1	1500	280	280
22	2ПФ200ЛУХЛ4	20,0	440	53	1000	4,2	2000	420	420
23	2ПФ200ЛУХЛ4	30,0	440	77	1500	2,3	2500	720	720
24	2ПФ200ЛУХЛ4	42,0	440	106	2360	1,4	3100	650	650
25	2ПФ200ЛУХЛ4	55,0	440	137	3150	1,0	3500	1800	1800

Задание 3.2 Для двигателя постоянного тока последовательного возбуждения, номинальные данные которого P_n , кВт; U_n , В; I_n , А; n_n , об/мин; R_d , Ом, требуется:

- 1) построить естественную механическую характеристику;
- 2) построить искусственную (реостатную) механическую характеристику при введении в цепь якоря сопротивления R_p , Ом;

Универсальная характеристика двигателя приведена на рис. 3.7.

Построение выполнить на миллиметровой бумаге или с помощью специальных программ (MatCad и др). Данные для расчета приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4

Номер варианта	Тип двигателя	P_n , кВт	U_n , В	I_n , А	n_n , об/мин	R_d , Ом	R_p , Ом
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Д816	130,0	220	760	450	0,013	0,08
2	Д818	185,0	220	935	410	0,005	0,03
3	Д21	5,5	220	33	1200	0,33	1,9
4	Д22	8,0	220	46	1200	0,20	1,2

Окончание таблицы 3.4

1	2	3	4	5	6	7	8
5	Д31	12,0	220	67	1100	0,13	0,8
6	Д32	18,0	220	98	960	0,08	0,5
7	Д41	24,0	220	130	970	0,06	0,4
8	Д806	32,0	220	170	900	0,04	0,3
9	Д808	47,0	220	250	720	0,03	0,2
10	Д12	2,5	220	16,0	1100	0,83	4,8
11	Д810	55,0	220	290	500	0,02	0,12
12	Д812	75,0	220	390	475	0,015	0,09
13	Д814	110,0	220	565	460	0,01	0,06
14	Д21	4,0	440	13	1050	2,12	8,3
15	Д31	6,7	440	19,5	800	1,03	6,2
16	Д41	15,0	440	43	660	0,45	2,7
17	Д808	37,0	440	100	525	0,17	1,0
18	Д810	55,0	440	145	510	0,09	0,5
19	Д812	70,0	440	180	500	0,06	0,4
20	Д814	110,0	440	280	460	0,04	0,3
21	Д816	150,0	440	380	460	0,024	0,15
22	Д818	185,0	440	467	410	0,019	0,11
23	Д22	7,0	440	20,5	1180	0,98	5,9
24	Д32	17,0	440	47	970	0,35	2,1
25	Д806	32,0	440	85	900	0,15	0,9

Задание 3.3 Для двигателя постоянного тока параллельного возбуждения, номинальные данные которого P_n , кВт; U_n , В; I_n , А; n_n , об/мин (рад/с), требуется:

- 1) рассчитать сопротивление пускового реостата для форсированного пуска в три ступени;

2) определить сопротивление ступени динамического торможения при условии, что $I_{д.т}=2,5 \cdot I_n$ и $E_{д.т}=U_n$.

Значение параметров двигателя приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5

Номер варианта	Тип двигателя	P_n , кВт	U_n , В	I_n , А	n_n , об/мин
1	2	3	4	5	6
1	2ПН90МУХЛ4	1,0	110	12,7	3000
2	2ПН100ЛУХЛ4	2,2	110	25,2	3000
3	2ПН112МУХЛ4	3,6	110	41,7	3150
4	2ПН132МУХЛ4	4,0	110	46,9	1500
5	2ПН132МУХЛ4	7,0	110	78,6	2200
6	2ПФ132ЛУХЛ4	5,5	110	62,5	1500
7	2ПН160ЛУХЛ4	6,3	110	71,1	1000

Окончание таблицы 3.5

1	2	3	4	5	6
8	2ПО160МУХЛ4	8,0	110	84,6	2240
9	4ПФ112S	4,0	220	24,0	900
10	4ПФ132S	15,0	220	85,4	1400
11	4ПФ132S	7,5	220	43,6	1000
12	4ПФ132M	8,5	220	48,6	875
13	4ПФ132L	11,0	220	62,8	800
14	4ПФ160S	15,0	220	79,6	850
15	4ПФ180	17,0	220	99,4	500
16	4ПФ180M	20,0	220	114,5	475
17	2ПФ160МУХЛ4	4,2	440	11,6	750
18	2ПО180ЛУХЛ4	7,5	440	20	1120
19	2ПО200ЛУХЛ4	11,0	440	29	1000
20	2ПО200ЛУХЛ4	17,0	440	43,4	1500
21	2ПФ200ЛУХЛ4	15,0	440	42	800
22	2ПФ200ЛУХЛ4	20,0	440	53	1000
23	2ПФ200ЛУХЛ4	30,0	440	77	1500
24	2ПФ200ЛУХЛ4	42,0	440	106	2360
25	2ПФ200ЛУХЛ4	55,0	440	137	3150

Задание 3.4 Для двигателя постоянного тока последовательного возбуждения номинальные данные которого: P_n , кВт; U_n , В; I_n , А; n_n , об/мин (рад/с). Требуется рассчитать пусковой реостат и определить сопротивление ступени противовключения. Пуск осуществляется в две ступени.

Значение параметров двигателя приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6

Номер варианта	Тип двигателя	P_n , кВт	U_n , В	I_n , А	n_n , об/мин
1	2	3	4	5	6
1	Д816	130,0	220	760	450
2	Д818	185,0	220	935	410
3	Д21	5,5	220	33	1200
4	Д22	8,0	220	46	1200
5	Д31	12,0	220	67	1100
6	Д32	18,0	220	98	960
7	Д41	24,0	220	130	970
8	Д806	32,0	220	170	900
9	Д808	47,0	220	250	720
10	Д12	2,5	220	16,0	1100
11	Д810	55,0	220	290	500
12	Д812	75,0	220	390	475
13	Д814	110,0	220	565	460
14	Д21	4,0	440	13	1050
15	Д31	6,7	440	19,5	800
16	Д41	15,0	440	43	660
17	Д808	37,0	440	100	525
18	Д810	55,0	440	145	510
19	Д812	70,0	440	180	500
20	Д814	110,0	440	280	460
21	Д816	150,0	440	380	460
22	Д818	185,0	440	467	410
23	Д22	7,0	440	20,5	1180
24	Д32	17,0	440	47	970
25	Д806	32,0	440	85	900

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 4

РАСЧЕТ МОЩНОСТИ И ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Цель работы: определение мощности и выбор электродвигателей для различных режимов работы машин и механизмов

Основные положения

Основой электропривода является электрический двигатель. Соответствие его конструктивных, механических и энергетических параметров условиям работы производственного механизма обеспечивает заданную производительность, качество продукции, надежность и экономичность.

При выборе электродвигателя для машины или механизма приходится решать широкий круг вопросов, а именно рассчитать его мощность, выбрать род тока, напряжение, угловую скорость, конструктивное исполнение электродвигателя.

В производственных условиях при эксплуатации электроприводов машин и механизмов необходимость выбора электродвигателя чаще всего возникает при замене слабозагруженных асинхронных электродвигателей, модернизации оборудования, изменении технологического процесса.

1 Номинальные данные электродвигателей

Номинальными данными электродвигателей называются величины, указанные на его заводском щитке и характеризующие номинальный режим его работы: мощность, напряжение, ток, частоту вращения.

Номинальной мощностью называется полезная механическая мощность на его валу, выраженная в ваттах (Вт) или киловаттах (кВт).

Номинальное напряжение (В, кВ) и **номинальный ток** (А, кА) электрической машины соответствует номинальному режиму ее работы. Номинальным напряжением трехфазного электродвигателя называется междуфазное (линейное) напряжение ее, а номинальным напряжением ротора асинхронного электродвигателя с контактными кольцами - напряжение разомкнутой обмотки ротора между контактными кольцами в неподвижном его состоянии при включенной на номинальное напряжение обмотке статора.

Нагрузкой электродвигателя называется мощность, которую он развивает в данный момент времени. Если нагрузка равна номинальной мощности, то она называется **номинальной**. Нагрузка может быть задана током, потребляемым электродвигателем в данный момент, и тогда она выражается в амперах, процентах или в долях номинального тока.

Ряд номинальных величин, которые не указаны на заводском щитке электродвигателя, но также характеризуют номинальный режим его работы, можно определить по формулам:

- **номинальный момент** на валу (Н·м)

$$M_H \approx P_H \cdot 10^3 / n_H \quad \text{или} \quad M_H = P_H \cdot 10^3 / \omega_H$$

где P_H - номинальная мощность на валу электродвигателя, кВт;

n_H - номинальная частота вращения, об/мин;

$\omega_H = 2\pi \cdot n_H / 60$ - номинальная угловая скорость, рад/с;

- **номинальное скольжение** трехфазного асинхронного электродвигателя

$$s_H = (n_c - n_H) / n_H \quad \text{или} \quad s_H = (\omega_c - \omega_H) / \omega_H$$

где $n_c = 60 \cdot f / p$ - частота вращения магнитного поля статора (или синхронная частота), об/мин;

f - частота сети переменного тока, Гц;

p - число пар полюсов магнитного поля статора (указывается на щитке и обозначении типа электродвигателя);

ω_c - синхронная угловая скорость, рад/с;

- **номинальная активная мощность**, потребляемая из сети трехфазным асинхронным электродвигателем (кВт)

$$P_{1H} = \sqrt{3} \cdot U_H \cdot I_H \cdot \cos \varphi_H \cdot 10^3$$

где U_H - номинальное напряжение, В;

I_H - номинальный ток, А;

$\cos \varphi_H$ - номинальный коэффициент мощности;

- **номинальная реактивная мощность** (квар)

$$Q_{1H} = \sqrt{3} \cdot U_H \cdot I_H \cdot \sin \varphi_H \cdot 10^3$$

где $\sin \varphi_H$ - синус сдвига фаз, соответствующий номинальной величине коэффициента мощности;

- **полная (кажущаяся) мощность** (кВ·А)

$$S_{1H} = U_H \cdot I_H \cdot 10^3$$

2 Основные конструктивные исполнения двигателей

В единых сериях электродвигателей общего назначения применяются различные формы их исполнения: по способу монтажа; по степени защиты; по способу охлаждения; по воздействию климатических факторов.

Исполнение по способу монтажа. Формы исполнения электродвигателей по способу монтажа и их условное обозначение установлены ГОСТ 2479-79. В обозначение входят буквы **IM (International Mounting)** и четыре цифры, первая из которых определяет группу (от 1 до 9), а остальные способ монтажа и форму конца вала. Наиболее распространенными являются следующие группы конструктивного исполнения: 1 - электродвигатели на лапах с подшипниковыми щитами; 2 - то же с фланцем на одном щите; 3 - без лап с подшипниковыми щитами, с фланцем на одном щите.

Обозначение конца вала, т.е. части его выступающей за подшипник: 0 - без конца вала; 1 - с одним цилиндрическим концом; 2 - с двумя цилиндрическими концами и т.д.

Например, условное обозначение машины IM1001 расшифровывается таким образом: машина на лапах с двумя подшипниковыми щитами и горизонтальным валом, конец вала - цилиндрический; IM1011 - машина на лапах с двумя подшипниковыми щитами и вертикальным валом, конец вала - цилиндрический, направлен вниз; IM3001 - машина без лап с подшипниковыми щитами, с фланцем на одном подшипниковом щите, доступным с обеих сторон, с горизонтальным расположением вала, конец вала - цилиндрический.

Исполнение по степени защиты. Различают исполнение по степени защиты от попадания внутрь машины посторонних предметов и от возможного соприкосновения обслуживающего персонала к токоведущими и вращающимися частями, находящимися внутри машины. ГОСТ 14254-80 устанавливает обозначение исполнений, состоящее из двух букв **IP (International Protectional)** и двух цифр, первая из которых (от 0 до 6) характеризует степень защиты персонала от соприкосновения с токоведущими частями, находящимися внутри машины, а вторая (от 0 до 8) - степень защиты самой машины от проникновения в нее влаги.

Наиболее распространенными исполнениями по степени защиты являются машины IP22 и IP23. Они соответствуют защите от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями машины пальцев человека и твердых предметов диаметром более 12,5 мм (первая цифра 2), а также защите от попадания в машину капель воды. Исполнение IP22 предусматривает защиту от проникновения внутрь машины капель, падающих под углом не более 15° к вертикали, а исполнение IP23 - под углом не более 60° к вертикали. Машины исполнения IP22 и IP23 называются **каплезащищенными** (по старой термина-логии).

Машины исполнения IP44 защищены от соприкосновения инструментов, проволоки или других подобных предметов, толщина которых не превышает 1 мм, с токоведущими частями, а также попадания внутрь машины предметов диаметром более 1 мм (первая цифра). Вторая цифра обозначает, что машина защищена от попадания внутрь корпуса водяных брызг любого направления. Такие машины называются также **закрытыми**.

Машины исполнения IP54, IP55, IP56, в которых предусмотрены конструктивные меры по устранению или затруднению возможности воспламенения окружающей его взрывоопасной среды, называются также **взрывозащищенными** и используются они на подземных горных работах.

Для специальных целей выпускаются электродвигатели с более высокой степенью защиты, например IP57. В этом исполнении машина защищена от попадания внутрь корпуса пыли и может работать даже при погружении в воду.

Исполнение по способу охлаждения. Обозначение способов охлаждения электрических машин по ГОСТ 2059-75 состоит из двух букв **IC (International Cooling)**, характеризующих цепь охлаждения, прописной буквы, обозначающей вид хладагента (воздух - **A**, водород - **H**, вода - **W** и т.д.), и двух цифр. Первая цифра означает устройство цепи для циркуляции хладагента, вторая - способ ее перемещения. Если хладагентом является воздух, то буква опускается. Если машина имеет две и более цепи охлаждения, то в обозначении указываются цифровые характеристики всех цепей, начиная с цепи со вторичным хладагентом (с более низкой температурой). Поэтому в обозначении машин с воздушным хладагентом могут быть четыре буквы, две из которых (например, для закрытых машин) характеризуют внешнюю цепь охлаждения и две - внутреннюю.

Наиболее распространенными исполнениями по способу охлаждения являются машины **IC01** и **IC17**. Машины исполнения **IC01** соответствуют воздушному охлаждению с принудительной циркуляцией вентилятором, расположенным на валу двигателя.

Исполнение по воздействию климатических факторов. Исполнение электродвигателей для различных климатических районов, их категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования при воздействии климатических факторов среды установлены ГОСТ 15150-69 и ГОСТ 15143-70. Например, исполнение электродвигателей, предназначенных для эксплуатации на суше, реках или озерах в макроклиматических районах с умеренным климатом, обозначается буквой **У**, с холодным климатом - буквами **ХЛ**, с влажным тропическим климатом - буквами **ТВ**, во всех климатических районах на суше (общеклиматическое исполнение) - буквой **О**.

Категория размещения электродвигателей обозначается цифрой (от 1 до 5), следующей за буквами. Исполнение электродвигателей, которые могут эксплуатироваться на открытом воздухе, обозначается цифрой **1**; в закрытом помещении, где температура и влажность несущественно отличается от наружного воздуха, цифрой **2**; в закрытом помещении, в котором температура и влажность, а также воздействие песка и пыли на машину существенно меньше, чем на открытом воздухе, - цифрой **3**; в помещениях с искусственно регулируемыми климатическими условиями, например в закрытых отапливаемых помещениях, - цифрой **4**; в помещениях с повышенной влажностью, в которых возможно длительное наличие воды, например в неотапливаемых и невентилируемых подземных камерах, - цифрой **5**.

Электродвигатели общего назначения, к которым не предъявляются какие-либо дополнительные требования, имеют исполнение **У3** или **У4**, т.е. они могут работать в районах с умеренным климатом в закрытых помещениях категории **3** или **4**.

3 Номинальные режимы работы электродвигателей

Нагрузка электродвигателя в процессе его работы может меняться. Кроме этого, электродвигатель может периодически отключаться на некоторое время. Все это оказывает влияние на его нагрев и охлаждение. ГОСТ 183-74 предусматривает восемь (S1- S8) номинальных режимов работы электродвигателя, учет которых позволяет более точно рассчитать его мощность. Режимы S1, S2, S3 относятся к основным, а остальные - к дополнительным.

Продолжительный режим S1 (рис.4.1, а,б) - это работа длительное время при неизменной нагрузке, в течение которого температура электродвигателя **достигает** установившегося значения (при неизменной температуре окружающей среды). Различают продолжительные режимы с неизменной нагрузкой $P=\text{const}$ (рис.4.1, а) и с изменяющейся нагрузкой (рис.4.1,б). Электроприводы насосов, вентиляторов, компрессоров, конвейеров работают в продолжительном режиме с неизменной нагрузкой, а электроприводы металлорежущих станков и т.п. работают в продолжительном режиме с изменяющейся нагрузкой.

Кратковременный режим S2 (рис.4.1, в), когда период неизменной нагрузки чередуется с периодом отключения электродвигателя от сети; при этом за время работы t_p температура электродвигателя **не достигает** установившегося значения, а за период паузы t_o он **успевает** полностью охладиться. Для этого режима устанавливается следующая продолжительность рабочего периода t_p : 10, 30, 60 и 90 мин.

В таком режиме работают электроприводы разного рода заслонок, вентилялей и других запорных устройств.

Повторно-кратковременный S3 (рис. 4.1, г), при котором периоды неизменной нагрузки чередуются с периодами отключения электродвигателя от сети; при этом за время работы t_p его температура **не достигает** установившегося значения, а за время паузы t_o электродвигатель **не успевает** охладиться до температуры окружающей среды. Этот режим

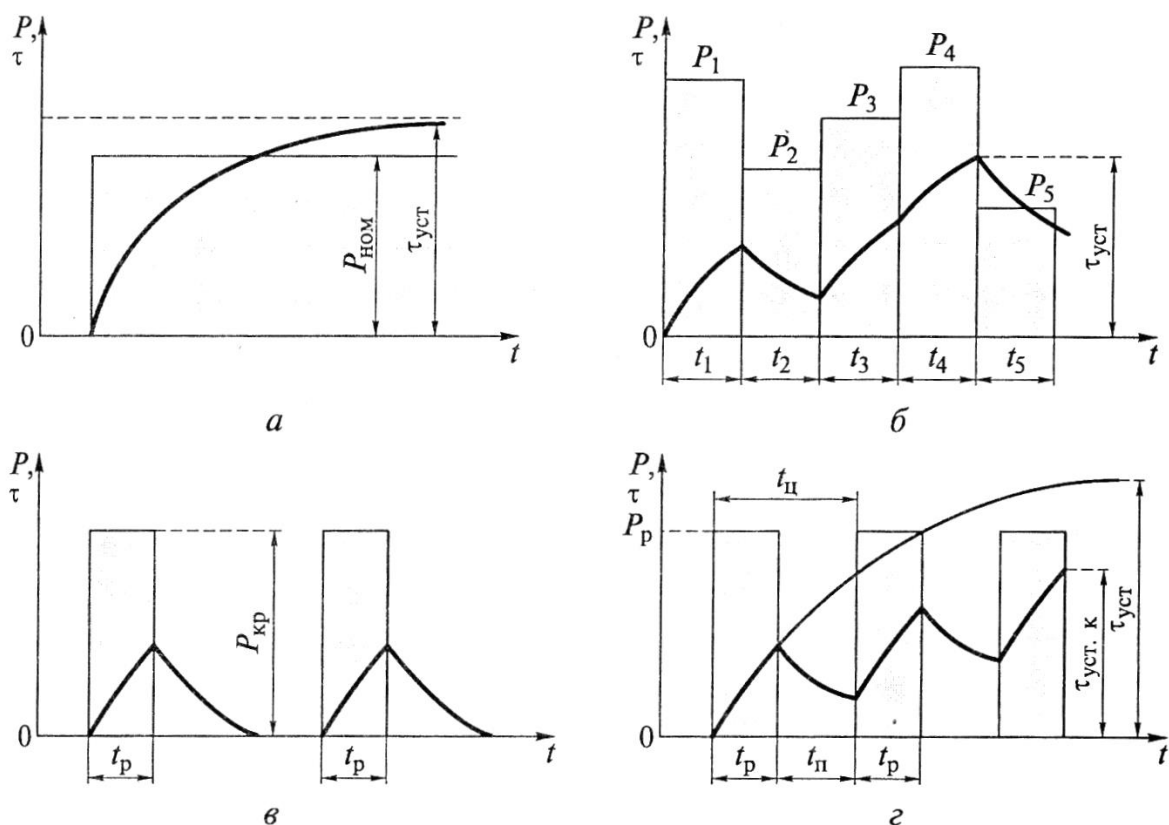


Рис. 4.1 Нагрузочные диаграммы при различных режимах работы электродвигателей

а-продолжительный с неизменной нагрузкой; б-продолжительный с переменной нагрузкой; в-кратковременной нагрузкой; г-повторно-кратковременной нагрузкой.

характеризуется длительностью цикла работы, которая согласно стандарту принимается равной 10 мин, и относительной (в процентах) продолжительностью включения, определяемой по формуле:

$$ПВ = 100 \cdot t_p / (t_p + t_o) = 100 \cdot t_p / t_{ц}$$

где t_p - время работы;

t_o - время паузы;

$t_{ц} = t_p + t_o$ - время цикла.

Нормируемые значения ПВ: 15, 25, 40, 60% или

$$\varepsilon = t_p / (t_p + t_o) = t_p / t_{ц} = 0,15; 0,25; 0,4; 0,6.$$

В таком режиме работают электроприводы лифтов, подъемных кранов, экскаваторов и других устройств, для работы которых характерна цикличность (чередование периодов нагрузки с паузами). При этом продолжительность цикла не должна превышать 10 мин. Если $t_{ц} > 10$ мин, то режим считают продолжительным.

Рассмотренные три режима работы считаются основными. В каталогах на электродвигатели, предназначенные для работы в каком-либо из этих режимов, указаны номинальные данные, соответствующие режиму работы.

Помимо рассмотренных трех основных режимов стандартом предусмотрены еще пять дополнительных:

- повторно-кратковременный режим **S4** с частыми пусками, с числом включений в час 30,60,120 или 240;
- повторно-кратковременный режим **S5** с частыми пусками и электрическим торможением в конце каждого цикла;
- перемежающийся режим **S6** с частыми реверсами и электрическим торможением;
- перемежающийся режим **S7** с частыми пусками, реверсами и электрическим торможением;
- перемежающийся режим **S8** с двумя и более разными частотами вращения.

4 Расчет мощности электродвигателей

Правильный выбор мощности электродвигателя имеет большое значение. Недостаточная мощность может привести к нарушению нормальной работы механизма, снижению его производительности, чрезмерному повышению температуры отдельных частей и обмоток электродвигателя и в конечном итоге к выходу его из строя. Использование же электродвигателя завышенной мощности способствует неоправданному увеличению капитальных затрат, снижению электрических показателей, уменьшению КПД, а в установках переменного тока, кроме того, ухудшению коэффициента мощности.

Мощность электродвигателя должна удовлетворять условиям **допустимого нагрева, перегрузочной способности и пусковым условиям.**

Расчет мощности электродвигателя при продолжительном режиме работы S1

Существует много механизмов работающих **продолжительно с неизменной нагрузкой** без регулирования скорости, например насосы, вентиляторы, компрессоры, конвейеры, преобразовательные установки и т.п.

При выборе электродвигателя для такого режима необходимо знать мощность, потребляемую механизмом. Если эта мощность неизвестна, ее определяют теоретическими расчетами или расчетами по эмпирическим формулам с использованием коэффициентов, полученных из многочисленных опытов.

При известной мощности механизма мощность электродвигателя выбирается по каталогу с учетом КПД промежуточной передачи. Расчетная мощность на валу электродвигателя составит:

$$P_{\text{расч}} = 0,105 \cdot 10^{-3} \cdot M_c \cdot n / \eta_n, \text{ кВт}$$

где M_c - статический момент сопротивления механизма;

n - частота вращения механизма;

$\eta_{\text{п}}$ - КПД передачи.

Номинальная мощность электродвигателя, принятого по каталогу, должна быть равна или несколько большей расчетной.

При тяжелых условиях пуска и возможных перегрузках выбранный электродвигатель следует проверить на достаточность начального пускового момента и перегрузочную способность.

Выбранный электродвигатель **не нуждается** в проверке по нагреву или по перегрузке, так как завод-изготовитель произвел все расчеты и испытания, причем основанием для расчетов являлось максимальное использование материалов, заложенных в электродвигателе при его номинальной мощности.

Мощность (кВт) электродвигателя для насоса определяется по формуле:

$$P = k_3 \cdot \frac{g \cdot Q \cdot H \cdot \gamma}{\eta_{\text{нас}} \cdot \eta_{\text{п}}} \cdot 10^{-3} = k_3 \cdot \frac{Q \cdot p}{\eta_{\text{нас}} \cdot \eta_{\text{п}}} \cdot 10^{-3}$$

где k_3 - коэффициент запаса, принимаемый в зависимости от мощности электродвигателя, и составляющий 1,1-1,4;

g - ускорение свободного падения, м/с²;

Q - подача (производительность) насоса, м³/с;

H - расчетная высота подъема, м;

γ - плотность перекачиваемой жидкости, кг/м³;

$\eta_{\text{нас}}$ - КПД насоса. Для поршневого 0,7-0,9; для центробежного с давлением свыше $0,4 \cdot 10^5$ Па 0,6-0,75; с давлением до $0,4 \cdot 10^5$ Па 0,45-0,6.

$\eta_{\text{п}}$ - КПД передачи, равный 0,9-0,95.

$p = \gamma \cdot H \cdot g$ - давление, развиваемое насосом, Па.

Для центробежного насоса особенно важен правильный выбор частоты вращения электродвигателя, так как производительность насоса Q , расчетная высота H , момент M и мощность P на валу электродвигателя зависят от угловой скорости ω . Для одного и того же насоса значения Q_1 , H_1 , M_1 , P_1 при ω_1 связаны со значениями Q_2 , H_2 , M_2 , P_2 при скорости ω_2 соотношениями $Q_1/Q_2 = \omega_1/\omega_2$; $H_1/H_2 = M_1/M_2 = \omega_1^2/\omega_2^2$; $P_1/P_2 = \omega_1^3/\omega_2^3$.

При завышении угловой скорости электродвигателя потребляемая им мощность резко возрастает, что приводит к перегреву его и выходу из строя. При заниженной скорости создаваемый насосом напор может оказаться недостаточным, и насос не будет перекачивать жидкость.

Мощность (кВт) электродвигателя для вентилятора определяется по формуле:

$$P = k_3 \cdot \frac{Q \cdot H}{\eta_{\text{в}} \cdot \eta_{\text{п}}} \cdot 10^{-3}$$

где k_3 - коэффициент запаса, равный 1,1-1,2 при мощности более 5 кВт, 1,5 - при мощности до 2 кВт и 2,0 - при мощности до 1 кВт.

Q - производительность вентилятора, м³/с;

H - давление (напор) на выходе вентилятора, Па;

$\eta_{\text{нас}}$ - КПД вентилятора. Для осевого 0,5-0,85; для центробежного 0,4-0,7.

$\eta_{\text{п}}$ - КПД передачи, равный 0,92-0,94 (для клиноременной), 0,87-0,9 (для плоскоременной).

Мощность (кВт) электродвигателя для поршневого компрессора определяется по формуле:

$$P = k_3 \cdot \frac{Q \cdot A}{\eta_k \cdot \eta_{\text{п}}} \cdot 10^{-3}$$

где k_3 - коэффициент запаса, равный 1,05-1,15;

Q - подача (производительность) компрессора, м³/с;

$A = (A_{\text{и}} + A_{\text{а}})/2$ - работа изотермического и адиабатического сжатия 1 м³ атмосферного воздуха давлением $p_1 = 1,1 \cdot 10^5$ Па до требуемого давления p_2 , Дж/м³ (значения A приведены в таблице 4.1);

η_k - индикаторный КПД компрессора, равный 0,6-0,8;

$\eta_{\text{п}}$ - КПД передачи, равный 0,9-0,95.

Таблица 4.1

$P_2, 10^5 \text{ Па}$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$A, 10^3 \text{ Дж/м}^3$	72	117	152	179	203	224	242	263	273

Мощность (кВт) электродвигателя для ленточного конвейера определяется по формуле:

$$P = \left(\frac{A \cdot L_1 \cdot v}{1,5} + \frac{B \cdot L_2 \cdot v}{300} + \frac{Q \cdot H}{270} + C \right) \cdot \frac{0,736 \cdot k_1 \cdot k_2}{\eta_k}$$

где A и B - коэффициент холостого хода лент и груза;

v - скорость, м/с;

C - коэффициент на сбрасыватель;

L_1 и L_2 - длины конвейера между барабанами и перемещения груза, м;

Q - производительность конвейера, т/час;

H - высота подъема груза, м;

k_1 - коэффициент, учитывающий добавочные потери в зависимости от длины конвейера (при длине конвейера до 15, 30, 45 и выше 45 м k_1 принимают равным соответственно 1,2; 1,1; 1,05 и 1,0);

k_2 - коэффициент, учитывающий увеличенное сопротивление при пуске (принимается в пределах 1,25-1,5);

η_k - КПД конвейера принимается равным 0,7-0,85.

Значения коэффициентов A , B и C в зависимости от ширины ленты приведены в таблице 4.2 и относятся к подшипникам скольжения; для подшипников качения их следует уменьшить вдвое.

Таблица 4.2

Коэффициент	Ширина конвейерной ленты, мм							
	450	500	600	750	900	1050	1200	1500
A	0,026	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,1
B	0,14	0,13	0,12	0,11	0,1	0,1	0,1	0,09
C	1,5	1,5	1,75	2,5	3	4	5	7

При выборе электродвигателя для режима с **продолжительной переменной нагрузкой** расчет номинальной мощности выполняют либо методом средних потерь, либо методом эквивалентных величин (мощности, момента или тока).

Метод средних потерь. Используя нагрузочную диаграмму (рис. 4.1, б), определяют среднее значение мощности, кВт:

$$P_{\text{ср}} = \frac{P_1 \cdot t_1 + P_2 \cdot t_2 + \dots + P_n \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}$$

Затем по каталогу предварительно выбирают номинальную мощность двигателя, кВт:

$$P'_{\text{ном}} = (1,2-1,3)P_{\text{ср}}$$

По каталогу определяют КПД в номинальном режиме для предварительно выбранного двигателя, затем рассчитывают потери при номинальной нагрузке, кВт:

$$\Delta P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{\text{ном}}} - 1 \right)$$

где $\eta_{\text{ном}}$ - КПД двигателя в номинальном режиме.

Определяют потери ΔP_x на участках нагрузочной диаграммы $P_1, P_2 \dots P_n$:

$$\Delta P_x = P_x \cdot \left(\frac{1}{\eta_x} - 1 \right)$$

В справочнике на выбранный типоразмер двигателя приводится таблица зависимости КПД от нагрузки. Если же таких данных нет, то полные потери $\Delta P = \Delta P_{\text{пост}} + \Delta P_{\text{пер}}$ для разных значений коэффициента нагрузки по току $\beta = I_x/I_{\text{ном}}$ с некоторым приближением можно определить на участках нагрузочной диаграммы по формуле:

$$\Delta P_x = \Delta P_{\text{ном}} \cdot \frac{\gamma + \beta_x^2}{\gamma + 1}$$

где γ - отношение постоянных потерь $\Delta P_{\text{пост}}$ к переменным $\Delta P_{\text{пер}}$.

$$\gamma = \Delta P_{\text{пост}} / \Delta P_{\text{пер}}$$

Приблизительные значения γ для различных типов электродвигателей приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3

Типы электродвигателей	γ
Асинхронные двигатели общего назначения с короткозамкнутым ротором	0,5-0,7
Асинхронные двигатели крановые с короткозамкнутым ротором	0,4-0,5
Асинхронные двигатели крановые с фазным ротором	0,6-0,9
Двигатели постоянного тока с независимым возбуждением	0,5-0,9
Двигатели постоянного тока крановые	1,0-1,5

Примечание. Большие значения γ соответствуют двигателям большой мощности

Затем в соответствии с нагрузочной диаграммой определяют средние потери двигателя, кВт,

$$\Sigma \Delta P_{cp} = \Sigma \Delta P_x \cdot t_x / \Sigma t_x$$

$$\text{где } \Sigma \Delta P_x \cdot t_x = \Delta P_1 \cdot t_1 + \Delta P_2 \cdot t_2 + \dots + \Delta P_n \cdot t_n$$

Полученное значение ΔP_{cp} должно быть не больше номинальных потерь выбранного двигателя $\Delta P_{ном}$. Если же $\Delta P_{cp} > \Delta P_{ном}$, то выбирают двигатель смежного типоразмера большей мощности и повторяют расчет. Окончательно выбранный типоразмер двигателя следует проверить на величину начального пускового момента и перегрузочную способность. Поскольку средние потери в двигателе не превышают величину номинальных потерь выбранного двигателя, проверка двигателя на нагрев не требуется.

Метод средних потерь универсален и применим для всех режимов работы двигателей. Он является более точным по сравнению с методом эквивалентных величин, хотя и более трудоемок.

Метод эквивалентных потерь. Выбор электродвигателя методом эквивалентных потерь можно вести по эквивалентному току, моменту или мощности.

Метод эквивалентного тока основан на замене изменяющегося по времени тока нагрузки двигателя неизменным эквивалентным током

$$I_{эк} = \sqrt{\frac{\Sigma I_x^2 \cdot t_x}{\Sigma t_x}}$$

Предполагается, что эквивалентный ток создает в двигателе такие же потери, что и фактический ток нагрузки. Рассчитав эквивалентный ток, по каталогу выбирают электродвигатель, номинальный ток которого равен или несколько больше эквивалентного тока. Выбранный двигатель следует проверить по перегрузочной способности.

Для двигателей, у которых величина момента пропорциональна току нагрузки и частота вращения не регулируется изменением магнитного потока возбуждения (двигатели постоянного тока независимого возбуждения), выбор электродвигателя можно вести по эквивалентному значению момента

$$M_{эк} = \sqrt{\frac{\Sigma M_x^2 \cdot t_x}{\Sigma t_x}}$$

или по эквивалентному значению мощности

$$P_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{\sum P_x^2 \cdot t_x}{\sum t_x}}$$

Расчет требуемой мощности двигателя методом эквивалентных величин менее трудоемок по сравнению с методом средних потерь, но уступает ему в точности.

Расчет мощности электродвигателя при кратковременном S2 режиме работы

В этом режиме работают отдельные устройства металлорежущих станков, задвижек, заслонок и др..

Расчет сводится к определению мощности электродвигателя $P_{\text{ном.кр}}$, способного выдержать перегрузку $P_{\text{кр}}$, работая в кратковременном режиме в течение времени $t_{\text{кр}}$ (рис. 4.1, в). При этом нагрев двигателя не должен превысить значения $\tau_{\text{уст}}$, соответствующего продолжительному режиму работы этого двигателя с номинальной нагрузкой $P_{\text{ном}}$. Полученная в результате расчета мощность $P_{\text{ном.кр}}$ меньше мощности кратковременного режима $P_{\text{кр}}$ на величину коэффициента механической перегрузки p_m :

$$P_{\text{ном.кр}} = P_{\text{кр}} / p_m$$

Коэффициент механической перегрузки можно определить по графику $p_m = f(t^*)$ (рис. 4.2), где t^* - относительное значение времени работы кратковременного режима.

$$t^* = t_p / T_H$$

где t_p - общая продолжительность времени работы кратковременного режима, с;

T_H - постоянная времени нагревания двигателя, с

$$t_p = t_1 + t_2$$

где t_1 и t_2 - время работы на первом и втором участке нагрузочной диаграммы, с

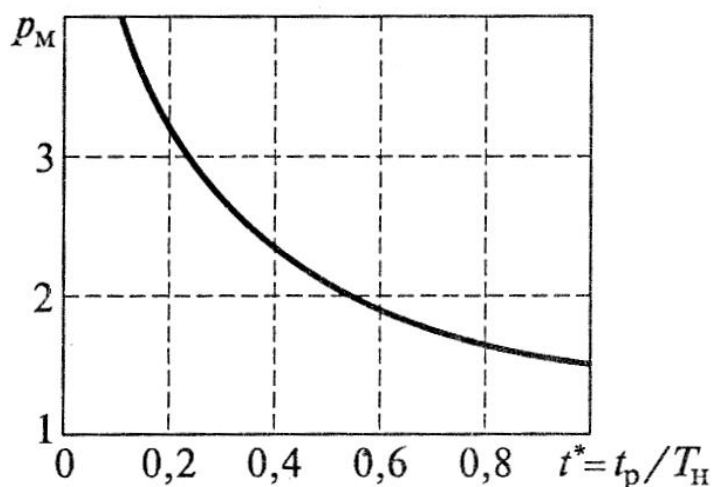


Рис. 4.2 График для определения коэффициента механической перегрузки

Мощность $P_{кр}$ при этом режиме обычно определяют методом средних потерь, как и при продолжительном режиме.

Установлено, что при значениях $t^* < 0,35$ нагрузка двигателя в кратковременном режиме $P_{кр}$ превышает номинальную мощность выбранного двигателя $P_{ном}$ в 2,5 раз и более. При этом перегрузочная способность двигателя не удовлетворяет требованиям электропривода. Поэтому при $t^* \leq 0,35$ двигатель выбирают по требуемой для кратковременного режима перегрузочной способности двигателя λ_m . Например, если постоянная времени нагревания электродвигателя составляет $T_n = 40$ мин, то при такой постоянной времени нагревания, начиная с $t_{кр} = 40 \cdot 0,35 = 14$ мин и меньше, двигатель следует выбирать по требуемой перегрузочной способности.

Использование для этого режима работы электродвигателей общего назначения (режима S1) **нецелесообразно**, так как во всех случаях из-за невысокой перегрузочной способности (2-2,5) они оказываются недоиспользованными по допустимому превышению температуры. Поэтому для режима S2 создана специальная серия электродвигателей, в которых электродвигатели полностью использованы по нагреву. Основная особенность этих электродвигателей заключается в повышенной перегрузочной способности (более 2,6), что позволяет полнее использовать их по нагреву. Время работы этих электродвигателей нормируется и составляет 10, 30, 60 и 90 минут. Это значит, что двигатель, имеющий, например, номинальную мощность $P_{ном} = 20$ кВт при $t_{раб} = 60$ мин, может развивать в течение 60 мин мощность 20 кВт не перегружаясь. Затем он должен быть отключен от сети до тех пор, пока полностью не охладится до температуры окружающей среды.

Необходимо отметить, что двигатели, предназначенные для режима работы S2, **нецелесообразно** использовать в продолжительном режиме S1 из-за присущих им повышенных постоянных потерь мощности. Иногда такие двигатели не могут работать в продолжительном режиме S1 даже вхолостую, перегреваясь при этом выше допустимого уровня.

Расчет мощности электродвигателя при повторно-кратковременном S3 режиме работы

В этом режиме работают отдельные устройства металлургического оборудования и кранового хозяйства.

При повторно-кратковременном режиме условия теплоотдачи резко ухудшаются. В связи с этим для работы в таких условиях применяются специальные электродвигатели краново-металлургической серии переменного и постоянного тока, изоляционные материалы которых имеют класс нагревостойкости F и H.

В крановых электродвигателях переменного тока за номинальный принят режим с ПВ=40%, а в электродвигателях постоянного тока - наряду с режимом ПВ=40% и 60-минутный режим.

Для повторно-кратковременного режима работы применяются как электродвигатели, предназначенные для **продолжительного** режима работы, так и электродвигатели **краново-металлургические**.

Расчет мощности для повторно-кратковременного режима производится в соответствии с нагрузочной диаграммой (рис. 4, г), в которой каждый период работы t_p может иметь несколько ступеней. Для приведения такой диаграммы, рассчитывают эквивалентную по нагреву мощность только периодов работы (без учета паузы t_n):

$$P_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{\sum P_x^2 \cdot t_x}{\sum t_x}}$$

Расчетное значение относительной продолжительности включения определяется

$$ПВ_{\text{расч}} = (t_p / t_{\text{ц}}) \cdot 100, \%$$

где $t_{\text{ц}}$ - продолжительность цикла, с

$$t_{\text{ц}} = t_p + t_n, \text{ с}$$

Для электродвигателей с самовентиляцией, у которых эффективность охлаждения зависит от частоты вращения, при расчете $ПВ_{\text{расч}}$ необходимо учитывать ухудшение охлаждения во время паузы t_n :

$$t_{\text{ц}} = t_p + \beta \cdot t_n$$

где β - коэффициент, учитывающий ухудшение условий охлаждения двигателей.

При частоте вращения $n \leq 0,2n_{\text{ном}}$ принимают $\beta = \beta_0$; при частоте вращения $0,8n_{\text{ном}} \geq n \geq 0,2n_{\text{ном}}$ принимают $\beta = 0,5(1+\beta_0)$; при $n \geq 0,8n_{\text{ном}}$ принимают $\beta = 1$.

Значения β зависят от исполнений двигателей по способам защиты и охлаждения и приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4

Способ защиты и охлаждения электродвигателей	β
Закрытый с независимой вентиляцией	1
Закрытый с естественным охлаждением	0,97
Закрытый с самовентиляцией	0,5
Защищенный с самовентиляцией	0,3

При $ПВ_{\text{расч}} < 10\%$ расчет мощности ведут как для **кратковременного** режима работы, а если $ПВ_{\text{расч}} > 60\%$ или продолжительность цикла $t_{\text{ц}} > 10$ мин, расчет мощности двигателя ведут как для **продолжительного** режима работы с переменной нагрузкой. Если же $10\% \leq ПВ_{\text{расч}} \leq 60\%$, то эквивалентную мощность $P_{\text{эк}}$ пересчитывают на номинальную мощность **повторно-кратковременного** режима $P_{\text{пкр}}$, соответствующую ближайшему номинальному значению $ПВ=15,25,40$ или 60% .

$$P_{\text{пкр}} = P_{\text{эк}} \cdot \sqrt{\frac{ПВ_{\text{расч}}}{ПВ}}$$

По полученным значениям $P_{пкр}$ и ПВ выбирают двигатель постоянного или переменного тока серий, предназначенных для работы в повторно-кратковременной режиме, например двигатель краново-металлургической серии постоянного тока или асинхронный. Эти двигатели обладают повышенной перегрузочной способностью и большим пусковым моментом при сравнительно небольших пусковых токах. Пониженная величина момента инерции ротора (якоря) обеспечивает этим двигателям улучшенные динамические свойства, что является важным качеством при повторно-кратковременном режиме работы. В каталогах этих серий указана номинальная мощность при ПВ=40%. При необходимости выбора мощности двигателя для других значений ПВ, можно воспользоваться формулой:

$$P_x = P_{40} \cdot \sqrt{\frac{40}{ПВ_x}}$$

Выбранный по каталогу электродвигатель нуждается в проверке по перегрузке и пусковым условиям.

Если для повторно-кратковременного режима выбирается электродвигатель, предназначенный для продолжительного режима работы, необходимо проверить его на допустимое число включений в час h . Это обусловлено тем, что частые включения и торможения приводят к интенсивному нагреву.

$$h = 3600/t_{ц}$$

где $t_{ц}$ - продолжительность цикла, с.

Затем сравнивают его с допустимым числом пусков данной серии $h_{доп}$. Действующим стандартом установлены допустимые значения $h_{доп} = 30, 60, 120$ и 240 вкл/ч. Если фактическое число включений в час оказалось больше допустимого значения, то нужно выбрать двигатель другого типоразмера с достаточным значением $h_{доп}$ и проверить его на возможный перегрев.

При отсутствии значительных нагрузок возможно применение в электроприводах с повторно-кратковременным режимом работы двигателей общепромышленного назначения, для продолжительного режима работы. В этом случае номинальная мощность двигателя $P_{ном}$, указанная в каталоге, должна быть увеличена

$$P_{пкр} = P_{ном} \cdot K_p$$

$$\text{где } K_p = \sqrt{100 / ПВ}$$

Использование двигателей продолжительного режима в повторно-кратковременном режиме вместо специальных двигателей, рассчитанных для этого режима, ведет к снижению надежности электропривода и его энергетических показателей.

Пример 1. Рассчитать и выбрать электродвигатель для привода центробежного насоса, обеспечивающий при частоте вращения $n=2900$ об/мин ($\omega_1=304$ рад/с) производительность $Q=100$ м³/час ($0,028$ м³/с) и расчетную подачу $H=98$ м. Плотность перекачиваемой жидкости $\gamma=1000$ кг/м³. Номинальный режим работы электродвигателя насоса S1.

Насос непосредственно соединен с электродвигателем ($\eta_n=1$), КПД насоса $\eta_n=0,62$. Пуск электродвигателя осуществляется вхолостую. Регулирование скорости насоса не требуется. Условия окружающей среды требует применения электродвигателя исполнения IP44.

Решение.

1. Рассчитываем давление, развиваемого насосом

$$p = \gamma \cdot H \cdot g = 1000 \cdot 98 \cdot 9,8 = 9,6 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

2. Мощность электродвигателя

$$P = k_s \cdot \frac{Q \cdot p}{\eta_{\text{нас}} \cdot \eta_n} \cdot 10^{-3} = 1,1 \cdot \frac{0,028 \cdot 9,6 \cdot 10^5}{0,62 \cdot 1} \cdot 10^{-3} = 47,7 \text{ кВт}$$

3. Учитывая, что регулирования скорости не требуется, выбираем по каталогу асинхронный электродвигатель серии 4A225M2Y3 со следующими номинальными данными:

$P_n = 55$ кВт; $U_n = 380/660$ В; $n_n = 2945$ об/мин ($\omega_2=308$ рад/с); IP44; IC0141; режим работы S1.

4. При частоте вращения насоса $n_n=2945$ об/мин ($\omega_2=308$ рад/с) мощность, напор и производительность составят:

$$P_1/P_2 = \omega_1^3/\omega_2^3$$

$$P_2 = P_1 \cdot (\omega_1^3/\omega_2^3) = 47,7 \cdot (304^3/308^3) = 45,9 \text{ кВт};$$

$$H_1/H_2 = \omega_1^2/\omega_2^2;$$

$$H_2 = H_1 \cdot (\omega_1^2/\omega_2^2) = 98 \cdot (304^2/308^2) = 95,5 \text{ м}$$

$$Q_1/Q_2 = \omega_1/\omega_2;$$

$$Q_2 = Q_1 \cdot (\omega_1/\omega_2) = 0,028 \cdot (304/308) = 0,0276 \text{ м}^3/\text{с} = 99,4 \text{ м}^3/\text{час}$$

Выбранный электродвигатель подходит по параметрам

$$P_n > P_2 \quad 55 \text{ кВт} > 45,9 \text{ кВт}$$

$$\omega_2 > \omega_1 \quad 308 \text{ рад/с} > 304 \text{ рад/с}$$

Пример 2. Рассчитать и выбрать электродвигатель для привода центробежного вентилятора, обеспечивающего при частоте вращения $n=1000$ об/мин ($\omega_1=105$ рад/с) производительность $Q=3$ м³/с и напор $H=570$ Па. Номинальный режим работы электродвигателя вентилятора S1.

Вентилятор непосредственно соединен с электродвигателем ($\eta_n=1$), КПД вентилятора $\eta_v=0,64$. Пуск электродвигателя осуществляется вхолостую. Регулирование скорости вентилятора не требуется. Условия окружающей среды требует применения электродвигателя исполнения IP23.

Решение.

1. Мощность электродвигателя

$$P = k_3 \cdot \frac{Q \cdot H}{\eta_{\text{нас}} \cdot \eta_{\text{п}}} \cdot 10^{-3} = 1,1 \cdot \frac{3 \cdot 570}{0,64 \cdot 1} \cdot 10^{-3} = 2,9 \text{ кВт}$$

2. Учитывая, что регулирования скорости не требуется, выбираем по каталогу асинхронный электродвигатель серии 4АН112МА6У3 со следующими номинальными данными:

$P_{\text{н}} = 3 \text{ кВт}$; $U_{\text{н}} = 380/660 \text{ В}$; $n_{\text{н}} = 955 \text{ об/мин}$ ($\omega_2 = 100 \text{ рад/с}$); IP23; IC01; режим работы S1.

3. При частоте вращения вентилятора $n_{\text{н}} = 955 \text{ об/мин}$ ($\omega_2 = 100 \text{ рад/с}$) мощность, напор и производительность составят:

$$P_1/P_2 = \omega_1^3/\omega_2^3$$

$$P_2 = P_1 \cdot (\omega_1^3/\omega_2^3) = 2,9 \cdot (105^3/100^3) = 3,4 \text{ кВт};$$

$$H_1/H_2 = \omega_1^2/\omega_2^2;$$

$$H_2 = H_1 \cdot (\omega_1^2/\omega_2^2) = 570 \cdot (105^2/100^2) = 628 \text{ Па}$$

$$Q_1/Q_2 = \omega_1/\omega_2;$$

$$Q_2 = Q_1 \cdot (\omega_1/\omega_2) = 3 \cdot (105/100) = 3,15 \text{ м}^3/\text{с}$$

Электродвигатель вентилятора будет перегружен по мощности,

$$P_{\text{н}} < P_2 \quad 3 \text{ кВт} < 3,4 \text{ кВт}$$

Поэтому, выбираем по каталогу асинхронный электродвигатель серии 4АН112МВ6У3 со следующими номинальными данными: $P_{\text{н}} = 4 \text{ кВт}$; $U_{\text{н}} = 380/660 \text{ В}$; $n_{\text{н}} = 950 \text{ об/мин}$ ($\omega_2 = 100 \text{ рад/с}$); IP23; IC01; режим работы S1.

Выбранный электродвигатель подходит по параметрам

$$P_{\text{н}} > P_2 \quad 4 \text{ кВт} > 3,4 \text{ кВт}$$

Пример 3. Рассчитать и выбрать электродвигатель для привода поршневого компрессора, обеспечивающего при частоте вращения $n=1000 \text{ об/мин}$ ($\omega_1=105 \text{ рад/с}$) производительность $Q=20 \text{ м}^3/\text{мин}$ ($0,33 \text{ м}^3/\text{с}$) и при конечном давлении $p_2 = 10 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Начальное давление воздуха составляет $p_1 = 1,1 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Номинальный режим работы электродвигателя компрессора S1.

Компрессор непосредственно соединен с электродвигателем ($\eta_{\text{п}}=1$), КПД компрессора $\eta_{\text{к}}=0,78$. Пуск электродвигателя осуществляется вхолостую. Регулирование скорости компрессора не требуется. Условия окружающей среды требует применения электродвигателя исполнения IP23.

Решение.

1. В соответствии с таблицей 4.1 для $p_2 = 10 \cdot 10^5 \text{ Па}$ определяем значение $A = 273 \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^3$.

2. Мощность электродвигателя

$$P = k_3 \cdot \frac{Q \cdot A}{\eta_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{п}}} \cdot 10^{-3} = 1,05 \cdot \frac{0,33 \cdot 273 \cdot 10^3}{0,78 \cdot 1} \cdot 10^{-3} = 121 \text{ кВт}$$

3. Учитывая, что регулирования скорости не требуется, выбираем по каталогу асинхронный электродвигатель серии 4АН315М6У3 со следующими номинальными данными:

$P_n = 132$ кВт; $U_n = 380/660$ В; $n_n = 985$ об/мин ($\omega_2 = 103$ рад/с); IP23; IC01; режим работы S1.

Выбранный электродвигатель подходит по параметрам

$$P_n > P \quad 132 \text{ кВт} > 121 \text{ кВт}$$

Пример 4. Рассчитать и выбрать электродвигатель для привода ленточного конвейера, с шириной 600 мм, обеспечивающего при скорости движения ленты $v=0,5$ м/с, производительность $Q=50$ т/час. Длина конвейера между барабанами $L_1=6$ м, длина перемещения груза $L_2=6,5$ м, высота подъема груза $H=2$ м. Номинальный режим работы электродвигателя конвейера S1.

Конвейер соединен с электродвигателем через редуктор с КПД $\eta_n=0,85$, КПД конвейера $\eta_k=0,8$. Пуск электродвигателя осуществляется вхолостую. Регулирование скорости конвейера не требуется. Окружающая среда - рудничная взрывоопасная и требует применения электродвигателя исполнения IP54.

Решение.

1. В соответствии с таблицей 4.2 для ширины конвейерной ленты 600 мм определяем значения коэффициентов: $A = 0,04$; $B=0,12$; $C=1,75$.

2. Мощность электродвигателя конвейера

$$P = \left(\frac{A \cdot L_1 \cdot v}{1,5} + \frac{B \cdot L_2 \cdot v}{300} + \frac{Q \cdot H}{270} + C \right) \cdot \frac{0,736 \cdot k_1 \cdot k_2}{\eta_n \cdot \eta_k} =$$

$$= \left(\frac{0,04 \cdot 6 \cdot 0,5}{1,5} + \frac{0,12 \cdot 6,5 \cdot 0,5}{300} + \frac{50 \cdot 2}{270} + 1,75 \right) \cdot \frac{0,736 \cdot 1,2 \cdot 1,25}{0,85 \cdot 0,8} = 3,6 \text{ кВт}$$

3. Учитывая, что регулирования скорости не требуется, а также условия окружающей среды, выбираем по каталогу асинхронный электродвигатель взрывозащищенного исполнения серии ВАО 41-6 со следующими номинальными данными: $P_n = 4$ кВт; $U_n = 380/660$ В; $n_n = 960$ об/мин; IP54; IC0141; режим работы S1, степень взрывозащищенности IExdIIBT4.

Выбранный электродвигатель подходит по параметрам

$$P_n > P \quad 4 \text{ кВт} > 3,6 \text{ кВт}$$

Пример 5. Рассчитать и выбрать электродвигатель для электропривода токарного станка, нагрузочная диаграмма которого приведена на рис. 4.1, б. Значения мощности на участках диаграммы P_x (кВт) и их продолжительность t_x (мин) составляют:

$$P_1 = 14 \text{ кВт} \quad P_2 = 10 \text{ кВт} \quad P_3 = 12 \text{ кВт} \quad P_4 = 17 \text{ кВт} \quad P_5 = 7 \text{ кВт}$$

$$t_1 = 6 \text{ мин} \quad t_2 = 6 \text{ мин} \quad t_3 = 4 \text{ мин} \quad t_4 = 4 \text{ мин} \quad t_5 = 8 \text{ мин}$$

Частота вращения $n_{\text{ном}} = 1460 \pm 5$ об/мин. Пуск двигателя производится без нагрузки. Регулирование скорости не требуется. Условия окружающей среды требует применения электродвигателя исполнения IP23. Номинальный режим работы электродвигателя токарного станка S1.

Решение.

Расчет выполним методом средних потерь.

1. Определяем среднее значение мощности

$$P_{\text{cp}} = \frac{P_1 \cdot t_1 + P_2 \cdot t_2 + \dots + P_n \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} = \frac{14 \cdot 6 + 10 \cdot 6 + 12 \cdot 4 + 17 \cdot 4 + 7 \cdot 8}{6 + 6 + 4 + 4 + 8} = 11,3 \text{ кВт}$$

2. Принимаем предварительно двигатель номинальной мощностью

$$P'_{\text{ном}} = (1,2-1,3) P_{\text{cp}} = 1,25 \cdot 11,3 = 14,1 \text{ кВт}$$

По каталогу принимаем электродвигатель АИР160S4У3 мощностью $P_{\text{ном}} = 15$ кВт; частотой вращения $n_{\text{ном}} = 1455$ об/мин; КПД $\eta_{\text{ном}} = 90\%$; коэффициент мощности $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,89$; перегрузочная способность $\lambda_{\text{м}} = 2,9$; кратность пускового момента $\lambda_{\text{п}} = 1,9$; кратность пускового тока $\lambda_{\text{т}} = 7,0$; IP23; IC23; режим работы S1.

$$P_{\text{ном}} > P'_{\text{ном}} \quad 15 \text{ кВт} > 14,1 \text{ кВт}$$

3. Определяем коэффициент нагрузки β^2 для каждого участка нагрузочной диаграммы:

$$\beta^2_1 = P_1/P_{\text{ном}} = 14/15 = 0,93 \quad \beta^2_2 = P_2/P_{\text{ном}} = 10/15 = 0,67$$

$$\beta^2_3 = P_3/P_{\text{ном}} = 12/15 = 0,8 \quad \beta^2_4 = P_4/P_{\text{ном}} = 17/15 = 1,13$$

$$\beta^2_5 = P_5/P_{\text{ном}} = 7/15 = 0,47$$

4. Для трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором общего назначения по таблице 4.3 принимаем $\gamma = 0,5$.

5. Определяем потери при номинальной нагрузке

$$\Delta P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{\text{ном}}} - 1 \right) = 15 \cdot \left(\frac{1}{0,9} - 1 \right) = 1,67 \text{ кВт}$$

6. Определим потери для каждого участка нагрузочной диаграммы:

$$\Delta P_1 = \Delta P_{\text{ном}} \cdot \frac{\gamma + \beta^2_1}{\gamma + 1} = 1,67 \cdot \frac{0,5 + 0,93}{0,5 + 1} = 1,59 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_2 = \Delta P_{\text{ном}} \cdot \frac{\gamma + \beta^2_2}{\gamma + 1} = 1,67 \cdot \frac{0,5 + 0,67}{0,5 + 1} = 1,30 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_3 = \Delta P_{\text{ном}} \cdot \frac{\gamma + \beta^2_3}{\gamma + 1} = 1,67 \cdot \frac{0,5 + 0,8}{0,5 + 1} = 1,45 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_4 = \Delta P_{\text{ном}} \cdot \frac{\gamma + \beta^2_4}{\gamma + 1} = 1,67 \cdot \frac{0,5 + 1,13}{0,5 + 1} = 1,81 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_5 = \Delta P_{\text{ном}} \cdot \frac{\gamma + \beta^2_5}{\gamma + 1} = 1,67 \cdot \frac{0,5 + 0,47}{0,5 + 1} = 1,08 \text{ кВт}$$

7. Средние потери двигателя:

$$\Sigma \Delta P_x \cdot t_x = 1,59 \cdot 6 + 1,30 \cdot 6 + 1,45 \cdot 4 + 1,81 \cdot 4 + 1,08 \cdot 8 = 39,02$$

$$\Delta P_{\text{cp}} = \Sigma \Delta P_x \cdot t_x / \Sigma t_x = 39,02 / 28 = 1,39 \text{ кВт}$$

В связи с тем, средние потери $\Delta P_{\text{ср}}$ меньше номинальных потерь $\Delta P_{\text{ном}}$ т.е. $1,39 \text{ кВт} < 1,67 \text{ кВт}$, пересчета мощности двигателя **не требуется**.

8. Наибольшая мощность по нагрузочной диаграмме равна $P_4 = 17 \text{ кВт}$, что превышает номинальную мощность выбранного двигателя $P_{\text{ном}} = 15 \text{ кВт}$. Поэтому требуется проверка двигателя на перегрузочную способность.

Определяем момент нагрузки двигателя на четвертом участке при $P_4 = 17 \text{ кВт}$:

$$M_4 = 9,55 \cdot P_4 / n_4 = 9,55 \cdot 17000 / 1449 = 112 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

где n_4 - частота вращения на четвертом участке диаграммы, об/мин;

$$n_4 = n_1 - \frac{P_4}{P_{\text{ном}}} \cdot (n_1 - n_{\text{ном}}) = 1500 - \frac{17}{15} \cdot (1500 - 1455) = 1449 \text{ об / мин}$$

Определяем момент двигателя при номинальной нагрузке:

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \cdot P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 15000 / 1455 = 98,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Таким образом, превышение момента на четвертом участке диаграмм составляет $112/98,5 = 1,14$. Перегрузочная способность выбранного двигателя при номинальной нагрузке составляет $\lambda_m = 2,9$. Следовательно, на четвертом участке диаграммы перегрузочная способность двигателя составит $2,9/1,14 = 2,54$, т.е. **устойчивая** работа двигателя будет **обеспечена**.

Окончательно принимаем двигатель АИР160S4У3.

Пример 6. Рассчитать и выбрать электродвигатель для электропривода токарного станка, нагрузочная диаграмма которого приведена на рис. 4.1, б. Значения мощности на участках диаграммы P_x (кВт) и их продолжительность t_x (мин) составляют:

$$P_1 = 14 \text{ кВт} \quad P_2 = 10 \text{ кВт} \quad P_3 = 12 \text{ кВт} \quad P_4 = 17 \text{ кВт} \quad P_5 = 7 \text{ кВт}$$

$$t_1 = 6 \text{ мин} \quad t_2 = 6 \text{ мин} \quad t_3 = 4 \text{ мин} \quad t_4 = 4 \text{ мин} \quad t_5 = 8 \text{ мин}$$

Частота вращения $n_{\text{ном}} = 1460 \pm 5 \text{ об/мин}$. Пуск двигателя производится без нагрузки. Регулирование скорости не требуется. Условия окружающей среды требует применения электродвигателя исполнения IP23. Номинальный режим работы электродвигателя токарного станка S1.

Решение.

Расчет выполним методом эквивалентных потерь.

1. Определим эквивалентную мощность

$$P_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{\sum P_x^2 \cdot t_x}{\sum t_x}} = \sqrt{\frac{14^2 \cdot 6 + 10^2 \cdot 6 + 12^2 \cdot 4 + 17^2 \cdot 4 + 7^2 \cdot 8}{6 + 6 + 4 + 4 + 8}} = 11,8 \text{ кВт}$$

По каталогу принимаем электродвигатель АИР160S4У3 ближайшей большей номинальной мощностью $P_{\text{ном}} = 15 \text{ кВт}$; частотой вращения $n_{\text{ном}} = 1455 \text{ об/мин}$; КПД $\eta_{\text{ном}} = 90\%$; коэффициент мощности $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,89$; перегрузочная способность $\lambda_m = 2,9$; кратность пускового момента $\lambda_{\text{п}} = 1,9$; кратность пускового тока $\lambda_{\text{т}} = 7,0$; IP23; IC23; режим работы S1.

$$P_{\text{ном}} > P_{\text{эк}} \quad 15 \text{ кВт} > 11,8 \text{ кВт}$$

2. Проверим выбранный электродвигатель по перегрузочной способности, учитывая, что наибольшая мощность по нагрузочной диаграмме равна $P_4 = 17$ кВт, что превышает номинальную мощность выбранного двигателя $P_{ном} = 15$ кВт.

Определяем момент нагрузки двигателя при $P_4 = 17$ кВт:

$$M_4 = 9,55 \cdot P_4 / n_4 = 9,55 \cdot 17000 / 1449 = 112 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

где n_4 - частота вращения на четвертом участке диаграммы, об/мин;

$$n_4 = n_1 - \frac{P_4}{P_{ном}} \cdot (n_1 - n_{ном}) = 1500 - \frac{17}{15} \cdot (1500 - 1455) = 1449 \text{ об / мин}$$

Определяем момент двигателя при номинальной нагрузке:

$$M_{ном} = 9,55 \cdot P_{ном} / n_{ном} = 9,55 \cdot 15000 / 1455 = 98,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Таким образом, превышение момента на четвертом участке диаграммы составляет $112/98,5 = 1,14$. Перегрузочная способность выбранного двигателя при номинальной нагрузке составляет $\lambda_m = 2,9$. Следовательно, на четвертом участке диаграммы перегрузочная способность двигателя составит $2,9/1,14 = 2,54$, т.е. **устойчивая** работа двигателя будет **обеспечена**.

Окончательно принимаем двигатель АИР160S4У3.

Пример 7. Рассчитать и выбрать электродвигатель для электропривода заслонки трубопровода, нагрузочная диаграмма которого двухступенчатая. Режим работы кратковременный S2 с продолжительностью $t_p = 15$ мин и статическим моментом сопротивления $M_c = 70 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Частота вращения заслонки $n = 940 \pm 10$ об/мин. Пуск производится под нагрузкой. Регулирование скорости не требуется. Условия окружающей среды требует применения электродвигателя исполнения IP23.

Решение.

1. Требуемая мощность двигателя

$$P_{кр} = 0,105 \cdot 10^{-3} \cdot M_c \cdot n = 0,105 \cdot 10^{-3} \cdot 70 \cdot 930 = 6,84 \text{ кВт}$$

2. Выбираем двигатель серии АИР (основное исполнение) с IP54; IC0141; режим работы S1; постоянная времени нагревания $T_H = 30$ мин.

3. Определяем относительное значение времени рабочего цикла

$$t^* = t_p / T_H = 15 / 30 = 0,5$$

4. По графику рис.4.2 определяем коэффициент механической перегрузки $p_m = 2,1$. Тогда мощность двигателя продолжительного режима S1, используемого в кратковременном режиме S2 составит:

$$P_{ном.кр} = P_{кр} / p_m = 6,84 / 2,1 = 3,25 \text{ кВт}$$

5. По каталогу двигателей серии АИР принимаем электродвигатель АИР112МВ6У3 ближайшей большей номинальной мощностью $P_{ном} = 4$ кВт; частотой вращения $n_{ном} = 950$ об/мин; КПД $\eta_{ном} = 82\%$; коэффициент мощности $\cos \varphi_{ном} = 0,81$; перегрузочная способность $\lambda_m = 2,2$; кратность пускового момента $\lambda_n = 2,0$; кратность пускового тока $\lambda_i = 6,0$; IP54; IC0141; режим работы S1.

$$P_{ном} > P_{ном.кр} \quad 4 \text{ кВт} > 3,25 \text{ кВт}$$

6. Учитывая перегрузку двигателя, определяем частоту вращения при кратковременной нагрузке $P_{кр} = 6,84$ кВт.

$$n_{кр} = n_1 - \frac{P_{кр}}{P_{ном}} \cdot (n_1 - n_{ном}) = 1000 - \frac{6,84}{4,0} \cdot (1000 - 950) = 915 \text{ об / мин}$$

7. Момент на валу двигателя, соответствующий кратковременной нагрузке $P_{кр} = 6,84$ кВт и частоте вращения $n_{кр} = 915$ об/мин

$$M_{кр} = 9,55 \cdot P_{кр} / n_{кр} = 9,55 \cdot 6840 / 915 = 71,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{кр} > M_c \quad 71,4 \text{ Н} \cdot \text{м} > 70 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

8. Номинальный вращающий момент двигателя в продолжительном режиме S1

$$M_{ном} = 9,55 \cdot P_{ном} / n_{ном} = 9,55 \cdot 4000 / 950 = 40,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

9. Максимальный момент

$$M_{мах} = M_{ном} \cdot \lambda_m = 40,2 \cdot 2,2 = 88,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

10. Действительная перегрузочная способность двигателя $M_{мах} / M_c = 88,4 / 70 = 1,26$

11. Пусковой момент двигателя

$$M_{п} = M_{ном} \cdot \lambda_{п} = 40,2 \cdot 2,0 = 80,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{п} > M_c \quad 80,4 \text{ Н} \cdot \text{м} > 70 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Выбранный двигатель удовлетворяет требованиям электропривода по пусковому моменту и перегрузочной способности.

Пример 8. Рассчитать и выбрать электродвигатель для электропривода подъемного механизма, нагрузочная диаграмма которого трехступенчатая. Режим работы повторно-кратковременный S3. Значения момента на участках диаграммы M_x (Н·м) и их продолжительность t_x (с) составляют:

$$M_1 = 327 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad M_2 = 130 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad M_3 = 164 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$t_1 = 4 \text{ с} \quad t_2 = 20 \text{ с} \quad t_3 = 15 \text{ с}$$

Время паузы $t_{п} = 120$ с. Частота вращения $n_{ном} = 700 \pm 10$ об/мин. Пуск двигателя производится с нагрузкой. Регулирование скорости не требуется. Условия окружающей среды требует применения электродвигателя исполнения IP23.

Решение.

Расчет выполним методом эквивалентных потерь.

1. Определим эквивалентный момент

$$M_{эк} = \sqrt{\frac{\sum M_x^2 \cdot t_x}{\sum t_x}} = \sqrt{\frac{327^2 \cdot 4 + 130^2 \cdot 20 + 164^2 \cdot 15}{4 + 20 + 15}} = 173 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

2. Определим эквивалентную мощность двигателя

$$P_{эк} = 0,105 \cdot 10^{-3} \cdot M_{эк} \cdot n_{ном} = 0,105 \cdot 10^{-3} \cdot 173 \cdot 700 = 12,7 \text{ кВт}$$

3. Определим продолжительность цикла с учетом, что будет использоваться двигатель с исполнением закрытым с самовентилиацией (IC0141), у которого в соответствии с таблицей 4.4 $\beta = 0,5$.

$$t_{ц} = t_p + \beta \cdot t_{п} = (4 + 20 + 15) + 0,5 \cdot 120 = 99 \text{ с}$$

4. Определим расчетное значение ПВ

$$ПВ_{расч} = (t_p / t_{ц}) \cdot 100 = (39/99) \cdot 100 = 39 \%$$

5. Поскольку $ПВ_{расч} = 39\%$, т.е. $10\% \leq ПВ_{расч} \leq 60\%$, то эквивалентную мощность $P_{эк}$ пересчитываем на номинальную мощность **повторно-кратковременного** режима $P_{пкр}$, соответствующую ближайшему стандартному значению $ПВ=40 \%$.

$$P_{пкр} = P_{эк} \cdot \sqrt{\frac{ПВ_{расч}}{ПВ}} = 12,7 \cdot \sqrt{\frac{39}{40}} = 12,5 \text{ кВт}$$

6. По каталогу принимаем асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором краново-металлургической серии МТКН411-8 ближайшей большей номинальной мощностью $P_{ном}=15$ кВт при $ПВ=40\%$; частотой вращения $n_{ном}=695$ об/мин; КПД $\eta_{ном}=80\%$; коэффициент мощности $\cos \varphi_{ном}=0,71$; максимальный момент $M_{мах}=657$ Н·м; пусковой момент $M_{пуск}=638$ Н·м; IP44; IC0141; режим работы S3.

$$P_{ном} > P_{пкр} \quad 15 \text{ кВт} > 12,5 \text{ кВт}$$

7. Номинальный вращающий момент двигателя в режиме S3

$$M_{ном} = 9,55 \cdot P_{ном} / n_{ном} = 9,55 \cdot 15000 / 695 = 206 \text{ Н·м}$$

8. Определим частоту вращения на первой ступени диаграммы при $M_1 = 327$ Н·м

$$n_{пкр} = n_1 - \frac{M_1}{M_{ном}} \cdot (n_1 - n_{ном}) = 750 - \frac{327}{206} \cdot (750 - 695) = 663 \text{ об / мин}$$

9. Проверим двигатель по условию пуска

$$M_{пуск} > M_1 \quad 638 \text{ Н·м} > 327 \text{ Н·м}$$

10. Фактическая перегрузочная способность двигателя

$$\lambda_m = M_{мах} / M_1 = 657 / 327 = 2,0$$

11. Определим число включений в час

$$h = 3600 / t_{ц} = 3600 / 99 = 37 \text{ вкл/час}$$

Допустимое число пусков для краново-металлургической серии МТКН составляет $h_{доп}=120$ вкл/час т.е.

$$h_{доп} > h \quad 120 \text{ вкл/час} > 37 \text{ вкл/час}$$

Таким образом, выбранный двигатель по величинам пускового момента, перегрузочной способности и числу пусков удовлетворяет заданным условиям.

12. Проверим возможность применения для этого режима S3 двигателей общепромышленного назначения для режима S1.

Для этого примем двигатель с короткозамкнутым ротором общепромышленного назначения серии АИР по эквивалентной мощности $P_{эк}=12,7$ кВт и частоте вращения $n_{ном} = 700 \pm 10$ об/мин. Предварительно примем двигатель АИР180М8У3 мощностью $P_{ном}=15$ кВт и $n_{ном}=730$ об/мин.

13. Приведем этот двигатель к повторно-кратковременному режиму работы S3 при $ПВ=40\%$

$$P_{\text{пкр}} = P_{\text{ном}} \cdot \sqrt{\frac{100}{\text{ПВ}}} = 15 \cdot \sqrt{\frac{100}{40}} = 23,7 \text{ кВт}$$

14. По каталогу принимаем асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором АИР200L8У3 ближайшей номинальной мощностью $P_{\text{ном}}=22$ кВт; частотой вращения $n_{\text{ном}}=730$ об/мин; КПД $\eta_{\text{ном}}=89\%$; коэффициент мощности $\cos \varphi_{\text{ном}}=0,81$; перегрузочная способность $\lambda_{\text{м}}=2,3$; кратность пускового момента $\lambda_{\text{п}}=1,6$; кратность пускового тока $\lambda_{\text{и}}=6,0$; IP54; IC0141; режим работы S1.

15. Номинальный вращающий момент двигателя в продолжительном режиме S1

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \cdot P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 22000 / 730 = 288 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

16. Определим частоту вращения на первой ступени диаграммы при $M_1 = 327 \text{ Н} \cdot \text{м}$

$$n_{\text{пкр}} = n_1 - \frac{M_1}{M_{\text{ном}}} \cdot (n_1 - n_{\text{ном}}) = 750 - \frac{327}{288} \cdot (750 - 730) = 727 \text{ об / мин}$$

17. Определим пусковой момент

$$M_{\text{пуск}} = M_{\text{ном}} \cdot \lambda_{\text{п}} = 288 \cdot 1,6 = 461 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

18. Проверим двигатель по условию пуска

$$M_{\text{пуск}} > M_1 \quad 461 \text{ Н} \cdot \text{м} > 327 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

19. Максимальный момент

$$M_{\text{мах}} = M_{\text{ном}} \cdot \lambda_{\text{м}} = 288 \cdot 2,3 = 662 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

20. Действительная перегрузочная способность двигателя $M_{\text{мах}}/M_1 = 662/327 = 2,02$

Расчеты показывают, что мощность двигателя, предназначенного для режима работы S1, в $22/15=1,5$ оказалась выше, чем мощность специально предназначенного двигателя для режима работы S3.

Вопросы для самопроверки

1. Что является основой электропривода?
2. Какие данные электродвигателя относятся к номинальным? Как они определяются?
3. Какие существуют формы исполнения электродвигателей?
4. Какое условное обозначение имеет форма исполнения электродвигателей по способу монтажа?
5. Какое условное обозначение имеет форма исполнения электродвигателей по степени защиты?
6. Чем особенностью электродвигателей с исполнением IP56?
7. Какое условное обозначение имеет форма исполнения электродвигателей по способу охлаждения?
8. Какие формы исполнения электродвигателей по способу охлаждения являются самыми распространенными и чем они характеризуются?

9. Какое условное обозначение имеет форма исполнения электродвигателей по воздействию климатических факторов?
10. Какие существуют номинальные режимы работы электродвигателей?
11. Дайте описание основных номинальных режимов работы электродвигателей?
12. Каким критериям должен удовлетворять выбранный электродвигатель?
13. В чем особенности расчета мощности электродвигателя для режима работы S1?
14. Почему электродвигатель, выбранный для режима работы S1 не нуждается в проверке по нагреву и по нагрузке?
15. В чем особенности расчета мощности электродвигателя для режима работы S2?
16. Какой проверки требует электродвигатель, выбранный для режима работы S2?
17. В чем особенности расчета мощности электродвигателя для режима работы S3?
18. Какой проверки требует электродвигатель, выбранный для режима работы S3?
19. В чем особенности расчета мощности электродвигателя для режима работы S6?
20. Какой проверки требует электродвигатель, выбранный для режима работы S6?

Контрольные задания

Задание 4.1 Рассчитать и выбрать электродвигатель для привода центробежного насоса, обеспечивающий при частоте вращения n_1 производительность Q и расчетную подачу H . Плотность перекачиваемой жидкости γ . Номинальный режим работы электродвигателя насоса **S1**.

Насос непосредственно соединен с электродвигателем ($\eta_n=1$), КПД насоса η_n . Пуск электродвигателя осуществляется вхолостую. Регулирование скорости насоса не требуется. Условия окружающей среды требует применения электродвигателя исполнения **IP23**. Данные для расчета по вариантам приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3

Номер варианта	n_1 , об/мин	Q , м ³ /час	H , м	η_n	γ , кг/м ³
1	2	3	4	5	6
1	1475	38	22	0,6	1065
2	1475	38	25	0,61	1020
3	2950	60	33	0,62	1025
4	1450	105	98	0,63	1040
5	1450	180	42,5	0,64	1045
6	1450	180	68	0,65	1030
7	1450	300	60	0,66	1035
8	1450	300	100	0,67	1050
9	1475	500	80	0,68	1055
10	1450	800	125	0,69	1010
11	1450	180	85	0,7	1015
12	1450	180	128	0,71	1020
13	1450	180	170	0,72	1060
14	1450	180	212	0,73	1054
15	1450	300	120	0,74	1052
16	1450	300	240	0,75	1048
17	1450	300	600	0,6	1041
18	1450	300	540	0,61	1038
19	2950	300	1000	0,62	1033
20	2950	300	900	0,63	1029
21	2950	300	800	0,64	1024
22	2950	300	700	0,65	1021
23	1450	800	1000	0,66	1019
24	1450	800	750	0,67	1016
25	1450	800	500	0,68	1012

Задание 4.2. Рассчитать и выбрать электродвигатель для привода центробежного вентилятора, обеспечивающего при частоте вращения n_1 производительность Q и напор H . Номинальный режим работы электродвигателя вентилятора **S1**.

Вентилятор непосредственно соединен с электродвигателем ($\eta_n=1$), КПД вентилятора η_v . Пуск электродвигателя осуществляется вхолостую. Регулирование скорости вентилятора не требуется. Условия окружающей

среды требует применения электродвигателя исполнения **IP44**. Данные для расчета по вариантам приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4

Номер варианта	n_1 , об/мин	Q , м ³ /с	H , м	η_B
1	2	3	4	5
1	2980	14	720	0,75
2	975	20	350	0,76
3	1460	14	276	0,73
4	730	21,5	146	0,85
5	980	29	260	0,73
6	730	37	178	0,76
7	980	50	320	0,86
8	750	62	395	0,76
9	600	50	250	0,76
10	600	108	430	0,74
11	500	90	300	0,84
12	600	105	445	0,78
13	500	83	307	0,84
14	1460	10	330	0,77
15	985	42	330	0,77
16	750	62	260	0,76
17	500	120	240	0,76
18	375	245	290	0,8
19	2800	1	95	0,7
20	2900	2	130	0,72
21	2940	3,2	210	0,75
22	2950	5,7	260	0,76
23	2960	10	280	0,8
24	1470	20	250	0,76
25	2960	7	510	0,75

Задание 4.3. Рассчитать и выбрать электродвигатель для привода поршневого компрессора, обеспечивающего при частоте вращения n_1 производительность Q при конечном давлении p_2 . Начальное давление воздуха составляет $p_1 = 1,1 \cdot 10^5$ Па. Номинальный режим работы электродвигателя компрессора **S1**.

Компрессор непосредственно соединен с электродвигателем ($\eta_n=1$), КПД компрессора η_k . Пуск электродвигателя осуществляется вхолостую. Регулирование скорости компрессора не требуется. Условия окружающей среды требует применения электродвигателя исполнения **IP44**. Данные для расчета по вариантам приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5

Номер варианта	n_1 , об/мин	Q , м ³ /мин	p_2 , Па	η_v
1	2	3	4	5
1	1000	40	$2 \cdot 10^5$	0,6
2	1000	38	$3 \cdot 10^5$	0,61
3	1000	36	$4 \cdot 10^5$	0,62
4	1000	34	$5 \cdot 10^5$	0,63
5	1500	30	$6 \cdot 10^5$	0,64
6	1500	28	$7 \cdot 10^5$	0,65
7	1500	25	$8 \cdot 10^5$	0,66
8	1500	22	$9 \cdot 10^5$	0,67
9	750	10	$10 \cdot 10^5$	0,68
10	750	12	$2 \cdot 10^5$	0,69
11	750	14	$3 \cdot 10^5$	0,7
12	750	16	$4 \cdot 10^5$	0,71
13	750	18	$5 \cdot 10^5$	0,72
14	750	20	$6 \cdot 10^5$	0,73
15	1500	22	$7 \cdot 10^5$	0,74
16	1500	24	$8 \cdot 10^5$	0,75
17	1500	29	$9 \cdot 10^5$	0,76
18	1500	6	$10 \cdot 10^5$	0,77
19	2900	7	$2 \cdot 10^5$	0,78
20	2900	8	$3 \cdot 10^5$	0,79
21	2900	9	$4 \cdot 10^5$	0,8
22	2900	11	$5 \cdot 10^5$	0,6
23	1500	13	$6 \cdot 10^5$	0,61
24	1500	15	$7 \cdot 10^5$	0,62
25	1500	17	$8 \cdot 10^5$	0,63

Задание 4.4. Рассчитать и выбрать электродвигатель для привода ленточного конвейера, с шириной ? мм, обеспечивающего при скорости движения ленты v , производительность Q . Длина конвейера между барабанами L_1 , длина перемещения груза L_2 , высота подъема груза H . Номинальный режим работы электродвигателя конвейера $S1$.

Конвейер соединен с электродвигателем через редуктор с КПД η_p , КПД конвейера η_k . Пуск электродвигателя осуществляется вхолостую. Регулирование скорости конвейера не требуется. Окружающая среда - рудничная взрывоопасная и требует применения электродвигателя исполнения **IP54**. Данные для расчета по вариантам приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6

Номер варианта	Ширина ленты, мм	v , м/с	Q , т/час	L_1 , м	L_2 , м	H , м	η_p	η_k
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	450	0,8	25	25	25,8	2,2	0,8	0,7
2	500	0,6	32	40	41	1,8	0,81	0,71
3	600	0,55	40	12	13	1,5	0,82	0,72
4	750	1,2	56	64	64,8	2,0	0,83	0,73
5	900	1,1	60	80	81	3,0	0,84	0,74
6	1050	0,9	100	90	91,2	4,0	0,85	0,75
7	1200	0,5	120	100	101,6	5,5	0,86	0,76
8	1500	0,75	200	120	122	4,0	0,87	0,77
9	450	0,7	15	18	18,5	1,3	0,88	0,78
10	500	0,5	42	38	39,2	1,0	0,89	0,79
11	600	0,55	48	50	51	1,2	0,9	0,8
12	750	0,65	70	80	81	1,9	0,8	0,81
13	900	1,0	90	55	56	1,4	0,81	0,82
14	1050	0,95	140	85	86	2,1	0,82	0,83
15	1200	1,2	150	210	212	5,0	0,83	0,84
16	1500	1,3	280	200	201,8	4,0	0,84	0,85
17	450	0,7	18	30	30,8	1,5	0,85	0,7
18	500	0,5	22	45	46	2,0	0,86	0,71
19	600	0,4	55	95	96	3,0	0,87	0,72
20	750	1,1	82	60	61	1,5	0,88	0,73
21	900	1,0	110	30	30,9	0,8	0,89	0,74
22	1050	0,95	90	45	46	0,5	0,9	0,75
23	1200	0,8	180	150	152	4,0	0,8	0,76
24	1500	0,95	210	160	162	3,5	0,81	0,77
25	450	1,1	35	12	12,6	0,3	0,82	0,78

Задание 4.5. Рассчитать и выбрать электродвигатель для электропривода токарного станка, нагрузочная диаграмма которого приведена на рис. 4.1, б. Значения мощности на участках диаграммы P_x (кВт) и их продолжительность t_x (мин) составляют (см. таб. 4.7).

Частота вращения $n_{ном.х} = X \pm 5$ об/мин. Пуск двигателя производится без нагрузки. Регулирование скорости не требуется. Условия окружающей среды требует применения электродвигателя исполнения **IP23**. Номинальный режим работы электродвигателя токарного станка **S1**. Расчет выполнить методом средних потерь.

Данные для расчета по вариантам приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7

Номер варианта	P ₁ , кВт	t ₁ ,с	P ₂ кВт	t ₂ ,с	P ₃ , кВт	t ₃ ,с	P ₄ , кВт	t ₄ ,с	n _{ном.х} , об/мин
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	4	1,4	5	1,7	4	2,4	8	2940
2	8	5	5,6	6	6,9	3	9,6	7	2940
3	12	8	8,4	9	10,3	2	14,4	5	2940
4	15	3	10,5	5	12,9	3	18	4	2940
5	3	10	2,1	8	2,6	8	3,6	3	1460
6	5	7	3,5	7	4,3	8	6,0	9	1460
7	6	10	4,2	12	5,2	9	7,2	6	1460
8	10	6	7	4	8,6	5	12	3	1460
9	7	12	4,9	12	6,1	10	8,4	12	1460
10	1	15	0,7	14	0,9	10	1,2	8	965
11	4	11	2,8	8	3,4	5	4,8	9	965
12	9	4	6,3	6	7,7	10	10,8	5	965
13	11	8	7,7	4	9,5	9	13,2	10	965
14	13	3	9,1	3	11,2	5	15,6	5	740
15	14	5	9,8	8	12,0	10	16,8	2	740
16	15	11	10,5	8	12,9	6	18,0	6	740
17	5	5	3,5	4	4,8	12	7,2	7	740
18	4	10	2,5	9	4,4	4	5,8	8	590
19	12	7	9,4	10	12,3	12	16,4	4	590
20	3	15	2,5	9	4,6	10	7,6	15	590
21	9	14	3,3	16	5,7	11	5,9	6	590
22	7	10	5,9	11	5,1	9	14,4	14	490
23	2	14	2,4	3	1,8	9	2,9	18	490
24	11	18	8,7	14	6,5	8	11,2	2	490
25	6	11	3,2	10	8,2	4	9,2	3	490

Задание 4.6. Рассчитать и выбрать электродвигатель для электропривода токарного станка, нагрузочная диаграмма которого приведена на рис. 4.1, б. Значения мощности на участках диаграммы P_x (кВт) и их продолжительность t_x (мин) составляют (см. таб. 4.8).

Частота вращения $n_{ном.х} = X \pm 5$ об/мин. Пуск двигателя производится без нагрузки. Регулирование скорости не требуется. Условия окружающей среды требует применения электродвигателя исполнения **IP23**. Номинальный режим работы электродвигателя токарного станка **S1**. Расчет выполнить методом эквивалентных потерь.

Данные для расчета по вариантам приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8

Номер варианта	P ₁ , кВт	t ₁ ,с	P ₂ кВт	t ₂ ,с	P ₃ , кВт	t ₃ ,с	P ₄ , кВт	t ₄ ,с	П _{ном.х} , об/мин
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	7	10	5,9	11	5,1	9	14,4	14	490
2	2	14	2,4	3	1,8	9	2,9	18	490
3	11	18	8,7	14	6,5	8	11,2	2	490
4	6	11	3,2	10	8,2	4	9,2	3	490
5	1	15	0,7	14	0,9	10	1,2	8	965
6	4	11	2,8	8	3,4	5	4,8	9	965
7	9	4	6,3	6	7,7	10	10,8	5	965
8	11	8	7,7	4	9,5	9	13,2	10	965
9	4	10	2,5	9	4,4	4	5,8	8	590
10	12	7	9,4	10	12,3	12	16,4	4	590
11	3	15	2,5	9	4,6	10	7,6	15	590
12	9	14	3,3	16	5,7	11	5,9	6	590
13	13	3	9,1	3	11,2	5	15,6	5	740
14	14	5	9,8	8	12,0	10	16,8	2	740
15	15	11	10,5	8	12,9	6	18,0	6	740
16	5	5	3,5	4	4,8	12	7,2	7	740
17	3	10	2,1	8	2,6	8	3,6	3	1460
18	5	7	3,5	7	4,3	8	6,0	9	1460
19	6	10	4,2	12	5,2	9	7,2	6	1460
20	10	6	7	4	8,6	5	12	3	1460
21	7	12	4,9	12	6,1	10	8,4	12	1460
22	2	4	1,4	5	1,7	4	2,4	8	2940
23	8	5	5,6	6	6,9	3	9,6	7	2940
24	12	8	8,4	9	10,3	2	14,4	5	2940
25	15	3	10,5	5	12,9	3	18	4	2940

Задание 4.7. Рассчитать и выбрать электродвигатель для электропривода заслонки трубопровода, нагрузочная диаграмма которого **двухступенчатая**. Режим работы кратковременный **S2** с продолжительностью **t_p** и статическим моментом сопротивления **M_c**. Частота вращения заслонки **n=X±10 об/мин**. Пуск производится под нагрузкой. Регулирование скорости не требуется. Условия окружающей среды требует применения электродвигателя исполнения **IP23**. Данные для расчета по вариантам приведены в таблице 4.9.

Таблица 4.9

Номер варианта	t _p , мин	M _c , Н·м	T _н , мин	П _{ном.х} , об/мин
1	2	3	4	5
1	10	30	30	490
2	14	35	40	490

Продолжение таблицы 4.9

1	2	3	4	5
3	12	40	30	490
4	15	45	40	490
5	13	50	30	965
6	17	55	40	965
7	15	60	30	965
8	23	65	40	965
9	18	70	30	590
10	25	75	40	590
11	20	80	30	590
12	27	85	40	590
13	22	90	30	740
14	30	95	40	740
15	24	97	30	740
16	32	100	40	740
17	26	40	30	1460
18	34	50	40	1460
19	30	60	30	1460
20	36	70	40	1460
21	29	80	30	1460
22	38	90	40	2940
23	25	100	30	2940
24	39	30	40	2940
25	22	35	30	2940

Задание 4.8. Рассчитать и выбрать электродвигатель для электропривода подъемного механизма, нагрузочная диаграмма которого трехступенчатая. Режим работы повторно-кратковременный **S3**. Значения момента на участках диаграммы M_x (Н·м) и их продолжительность t_x (с) составляют (см. табл. 4.10).

Время паузы t_n (с). Частота вращения $n_{ном.х} = X \pm 10$ об/мин. Пуск двигателя производится с нагрузкой. Регулирование скорости не требуется. Условия окружающей среды требует применения электродвигателя исполнения **IP23**. Расчет выполнить методом эквивалентных потерь. Данные для расчета по вариантам приведены в таблице 4.10.

Таблица 4.10

Номер варианта	M_1 , Н·м	t_1 ,с	M_2 , Н·м	t_2 ,с	M_3 , Н·м	t_3 ,с	t_n ,с	$n_{ном.х}$, об/мин
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	600	5	200	25	300	15	100	780
2	500	10	250	50	375	30	100	785
3	400	15	200	30	290	25	100	860
4	300	20	150	5	225	12	100	865

Продолжение таблицы 4.10

1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	200	7	100	25	175	13	110	845
6	175	12	90	18	120	10	110	880
7	150	8	70	12	110	20	110	900
8	120	9	55	15	80	12	110	905
9	100	21	48	6	72	13	120	910
10	80	16	40	8	60	5	120	660
11	1000	12	500	5	750	18	120	675
12	900	14	450	6	675	20	120	660
13	800	3	400	15	600	18	120	675
14	700	24	350	6	480	10	130	835
15	600	22	300	8	450	8	130	875
16	500	18	250	11	425	11	130	900
17	420	19	210	21	320	4	130	835
18	480	6	240	8	360	15	90	880
19	460	7	230	15	330	12	90	900
20	380	12	300	12	450	16	90	910
21	360	19	280	9	320	13	90	920
22	310	17	240	7	340	17	80	930
23	280	16	320	9	180	15	80	945
24	240	21	140	4	220	20	80	710
25	220	20	110	10	300	10	80	950