

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Емельянов Сергей Геннадьевич
Должность: ректор
Дата подписания: 13.06.2022 21:38:09
Уникальный программный ключ:
9ba7d3e34c012eba476ffd2d064cf2781953be730df2374d16f3e0ce338f01e8

МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)
Кафедра электроснабжения

Проректор по учебной работе
О.Б. Дюктынова
« 1 » 06 2022 г.



АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД
Методические указания по курсовому проектированию
для студентов направления подготовки 13.04.02

Курск 2022

УДК 62-83

Составители: А.С. Чернышев, В.Н. Алябьев

Рецензент:

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение»

О.М. Ларин

Автоматизированный электропривод: методические указания по курсовому проектированию / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: А.С. Чернышев, В.Н. Алябьев. – Курск, 2022. . 27 с.: ил. 2, Библиогр.: с. 22 .

Содержат сведения по выполнению курсовой работы по дисциплине «Автоматизированный электропривод».

Методические указания соответствуют требованиям программы для направления подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника. Предназначены для студентов очной и заочной форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16.

Усл.печ.л. 1,56. Уч.–изд.л 1,42. Тираж 100 экз. Заказ 1528 Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040, г.Курск, ул.50 лет Октября, 94

Общие указания

Учебным планом по курсу "Автоматизированный электропривод" предусмотрено выполнение курсовой работы.

Задачей курсовой работы является закрепление теоретических знаний по курсу, развитие навыков самостоятельной работы, а также освоение методов расчета и выбора электроприводов промышленных машин и установок.

Для выполнения курсовой работы студенту следует изучить теоретический материал по литературе.

Пояснительная записка оформляется в соответствии со стандартом университета.

Все расчеты в курсовой работе выполняются в Международной системе единиц измерения (СИ). Условные графические и буквенные обозначения в электрических схемах должны соответствовать требованиям действующих ГОСТ.

В качестве промышленной машины в курсовой работе принят мостовой кран. В зависимости от режима работы краны могут быть следующих типов:

О – облегченный, режимная группа 3К;

Н – нормальный, режимная группа 5К;

Т – тяжелый, режимная группа 7К.

В зависимости от места, с которого управляют краном, устанавливаются следующие исполнения:

А – управление с пола;

Б – управление из кабины.

В зависимости от количества механизмов подъема краны могут быть в следующих исполнениях:

1 – с одним механизмом подъема;

2 – с одним главным и одним вспомогательным механизмами подъема.

Пример условного обозначения крана нормального типа, с управлением из кабины, грузоподъемностью главного подъема 32 т и вспомогательного подъема 5 т, пролетом 28,5 м, высотой главного подъема 12,5 м и вспомогательного подъема 20 м, скоростью главного подъема 0,16 м/с и вспомогательного подъема 0,2 м/с, скоростью передвижения тележки 0,63 м/с и передвижения крана 1,25 м/с, климатического исполнения У1:

Кран НБ 2—3215—28, 5—12,5/20—0,16/0,2—0,63—1,25—У1

Задание на курсовую работу

1. Для механизма подъема.

1.1. Для привода механизма главного подъема.

1.1.1. Выбрать асинхронный электродвигатель (АД) с фазным ротором серии МТФ (крановый). Режим работы электропривода – S3.

1.1.2. Определить графически сопротивления ступеней пускового реостата и определить пусковой ток в роторе электродвигателя и в сети.

1.1.3. Определить пусковые токи в роторе и сети.

1.1.4. Разработать схему автоматического управления пуском электродвигателя в функции параметра (тока, времени, скорости), указанного в задании. Количество ступеней пускового реостата должно соответствовать расчету (см. п.1.1.2).

1.1.5. Определить переключающие токи и скорости, а также время пуска на каждой ступени регулирования.

1.1.6. Определить сопротивления, которые требуется ввести в цепь ротора, чтобы груз двигался на подъем и на спуск со скоростью, равной 0,5 заданного значения.

1.2. Для привода механизма вспомогательного подъема.

1.2.1. Выбрать асинхронный электродвигатель (АД) с фазным ротором серии МТФ (крановый). Режим работы электропривода – повторно-кратковременный (S3).

1.2.2. Определить аналитически сопротивления ступеней пускового реостата.

2. Для механизма передвижения тележки.

2.1. Выбрать асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором основного исполнения. Режим работы электропривода – S3.

2.2. Определить время пуска при подъеме и спуске груза.

2.3. Для выбранного электродвигателя определить допустимое число включений в час.

3. Для механизма перемещения крана.

3.1. Выбрать асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором основного исполнения. Режим работы электропривода – S3.

3.2. Определить время пуска, выбранного АД.

3.3. Для выбранного электродвигателя определить допустимое число включений в час.

Методические указания

2. Расчет мощности двигателя механизма подъёма

1.1. Механизм главного подъема

1.1.1. Для правильного выбора мощности электродвигателя подъемного механизма необходимо определить мощность сопротивления P_c , время работы t_p и паузы t_0 по выражениям:

$$P_c = \frac{mgV}{\eta_{\text{п}}}, \quad (1)$$

где m – грузоподъемность, кг;

V – скорость подъема груза, м/с;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

$\eta_{\text{п}}$ – КПД механизма подъёма (табл. 1).

Время включения за один цикл (подъем и спуск)

$$t_{\text{в}} = 2 \frac{H}{V}, \quad (2)$$

где H – высота перемещения груза, м.

Продолжительность включения

$$ПВ = \frac{t_B}{t_B + t_0} \cdot 100\% \quad (3)$$

где t_0 – время паузы (не более 5 мин).

Выбор мощности электродвигателя производится по условию

$$P_H \geq P_{ЭКВ}, \quad (4)$$

где P_H – номинальная мощность электродвигателя, кВт;

$P_{ЭКВ}$ – эквивалентная мощность по нагрузочной диаграмме, определяемая по выражению:

$$P_{ЭКВ} = \sqrt{\frac{P_C^2 t_B}{t_B + \beta t_0}}, \quad (5)$$

где β – коэффициент ухудшения охлаждения двигателя в период паузы ($\beta = 0,45 \dots 0,55$).

Для обеспечения надежного пуска двигателя следует сделать проверку по условию:

$$k_{\Pi}^2 M_{\Pi} \geq M_{\text{тр}} + 0,25 M_H, \quad (6)$$

где $k_{\Pi} = \frac{U_{\Pi}}{U_H}$ – действительное напряжение при пуске, о.е.;

U_{Π} – действительное напряжение при пуске, В;

U_H – номинальное напряжение сети, В;

M_{Π} – пусковой момент электродвигателя (Н·м), который принимается равным 0,8...0,9 момента критического;

$M_{\text{тр}}$ – момент трогания рабочего органа подъемного механизма (Н·м), который приближенно можно определить по выражению:

$$M_{\text{тр}} = \frac{P_C}{\omega_H}, \quad (7)$$

где ω_H – номинальная угловая скорость электродвигателя, рад/с.

1.1.2. При расчете сопротивлений ступеней пускового реостата следует использовать графический способ, для чего необходимо построить естественную механическую характеристику асинхронного электродвигателя по полной формуле Клосса:

$$M = \frac{2M_K(1 + \alpha s_K)}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s} + 2\alpha s_K}, \quad (8)$$

где $M_k = \mu_k M_H$ – критический (максимальный) момент электродвигателя, Н·м;

μ_k – кратность критического момента;

$$\alpha = \frac{R_1}{R_2'};$$

R_1 – активное сопротивление обмотки статора, Ом;

R_2' – приведенное активное сопротивление обмотки ротора, Ом;

s – текущие значения скольжения электродвигателя;

s_k – критическое скольжение электродвигателя.

$$s_k = s_H \frac{\mu_k + \sqrt{\mu_k^2 + 2s_H(\mu_k - 1)} - 1}{1 - 2s_H(\mu_k - 1)}, \quad (9)$$

где $s_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0}$ – номинальное скольжение электродвигателя;

n_0 – синхронная частота вращения, об/мин;

n_H – номинальная частота вращения, об/мин.

Переход от скольжения s к угловой скорости ω производят, используя формулу

$$\omega = \omega_0(1 - s), \quad (10)$$

где ω_0 – синхронная угловая скорость электродвигателя, рад/с.

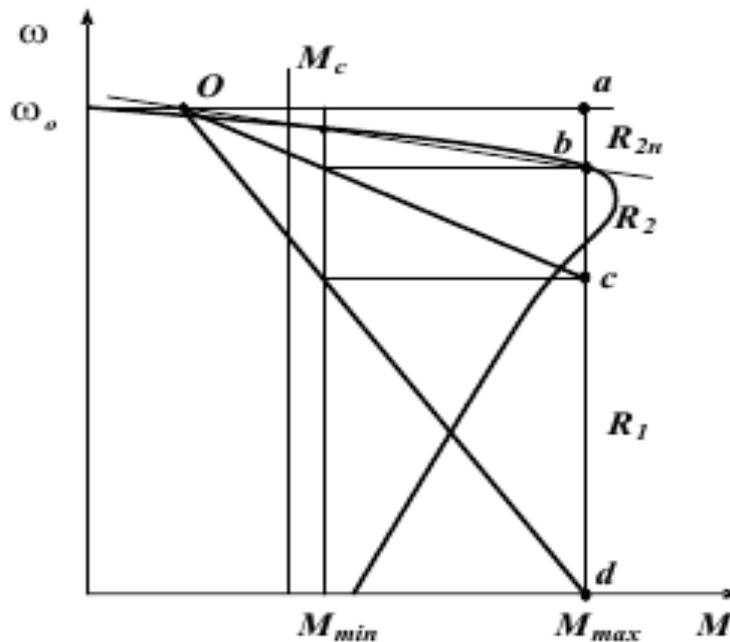


Рис. 1 – Пусковая диаграмма

Результаты расчета механической характеристики необходимо также представить в виде таблицы.

Построение пусковой диаграммы (рис. 1) следует начинать с определения предельного (максимального) M_1 и переключающего (минимального) M_2 моментов по выражениям:

$$M_1 = (0,8 \dots 0,9)M_K; M_2 = (1,1 \dots 1,3)M_c, \quad (11)$$

где $M_c = \frac{P_c}{\omega_c}$ – момент сопротивления подъемного механизма, Н·м.

После построения пусковой диаграммы необходимо определить масштаб сопротивления m_R (Ом/мм):

$$m_R = \frac{R_{2H}}{ab}, \quad (12)$$

где $R_{2H} = \frac{E_{2K} S_H}{\sqrt{3} I_{2H}}$ – номинальное сопротивление ротора, Ом;

E_{2K} – ЭДС между кольцами неподвижного разомкнутого ротора, В;

I_{2H} – номинальный ток ротора, А;

\overline{ab} – отрезок на пусковой диаграмме, соответствующий номинальному сопротивлению ротора, мм.

Тогда сопротивления ступеней пускового реостата равны:

$$R_1 = m_R \overline{cd}, \quad R_2 = m_R \overline{bc}, \quad (13)$$

всего реостата:

$$R_{\text{реос}} = m_R \overline{bd} = R_1 + R_2 \quad (14)$$

1.1.3. Пусковой ток ротора определяют по выражению:

$$I_{2\text{пуск}} = \frac{E_{2K}}{\sqrt{3}(R_{2H} + R_{\text{реос}})} \quad (15)$$

Определение пускового тока в сети основывается на соотношении:

$$\frac{I_{1H}}{I_{2H}} = \frac{I_{1\text{пуск}}}{I_{2\text{пуск}}} \quad (16)$$

то есть на том, что отношение токов статора и ротора в любом режиме работы электродвигателя остается постоянным.

1.1.4. Разработка схемы автоматического управления пуском электродвигателя в функции времени

Электроприводы для автоматических линий и механизмов обычно строятся с применением релейно-контакторной аппаратуры, на которую возлагаются функции включения питания (подсоединение к сети) силовых блоков и блоков управления, защиты и ввода первоначальных и конечных команд в систему управления приводом. При релейно-контактном управлении электродвигателем процесс его пуска обычно автоматизируется, что устраняет возможные при ручном управлении ошибки. Для пуска электродвигателя от персонала в этом случае требуется лишь нажать кнопку управления или повернуть в рабочее положение рукоятку командоконтроллера. Пуск двигателя с фазным ротором осуществляется с введенными резисторами в цепи ротора. Резисторы в цепи ротора служат для ограничения токов не только в процессе пуска, но и при реверсе, торможении, а также при снижении скорости. По мере разгона двигателя для поддержания ускорения привода резисторы выводятся. Когда пуск закончится, резисторы полностью шунтируются, и двигатель перейдет работать на естественную механическую характеристику.

Схема управления пуском АД с фазным ротором в функции времени в две пусковые ступени приведена на рис. 2.

В данной схеме применены реле времени КТ1 и КТ2, имеющие свои контакты КТ1 и КТ2 в цепях силовых контакторов КМ2 и КМ3. Контакты КТ1 и КТ2 работают на замыкание после потери питания катушек реле КТ1 и КТ2 с задержкой по времени.

При замыкании рубильника Q напряжение сразу подается на катушки реле времени КТ1 и КТ2 через замкнутые контакты КМ1 и КМ2. Тем самым контакты реле КТ1 и КТ2 оказываются разомкнутыми. После нажатия кнопки пуска SB1 получает питание катушка контактора КМ1, в результате чего подается напряжение на статор двигателя, блокируется кнопка SB1 и теряет питание катушка реле времени КТ1. Начинается отсчет времени пуска со всеми пусковыми резисторами. После выдержки времени замыкается

контакт КТ1, получает питание силовой контактор КМ2, что приводит к выводу из цепи ротора резистора $R_{д1}$ и к потере питания реле времени КТ2. По окончании времени установки катушки реле КТ2 замыкается контакт реле КТ2, получает питание силовой контактор КМ3, шунтируется оставшийся резистор $R_{д2}$, двигатель переходит на естественную характеристику. Все время автоматического пуска складывается из двух установок реле времени КТ1 и КТ2 и времени разгона двигателя по естественной характеристике.

Нажатием кнопки останова SB2 двигатель отключается от сети, при этом катушка контактора КМ1 теряет питание и замыкающие контакторы его КМ1 размыкают цепь статора.

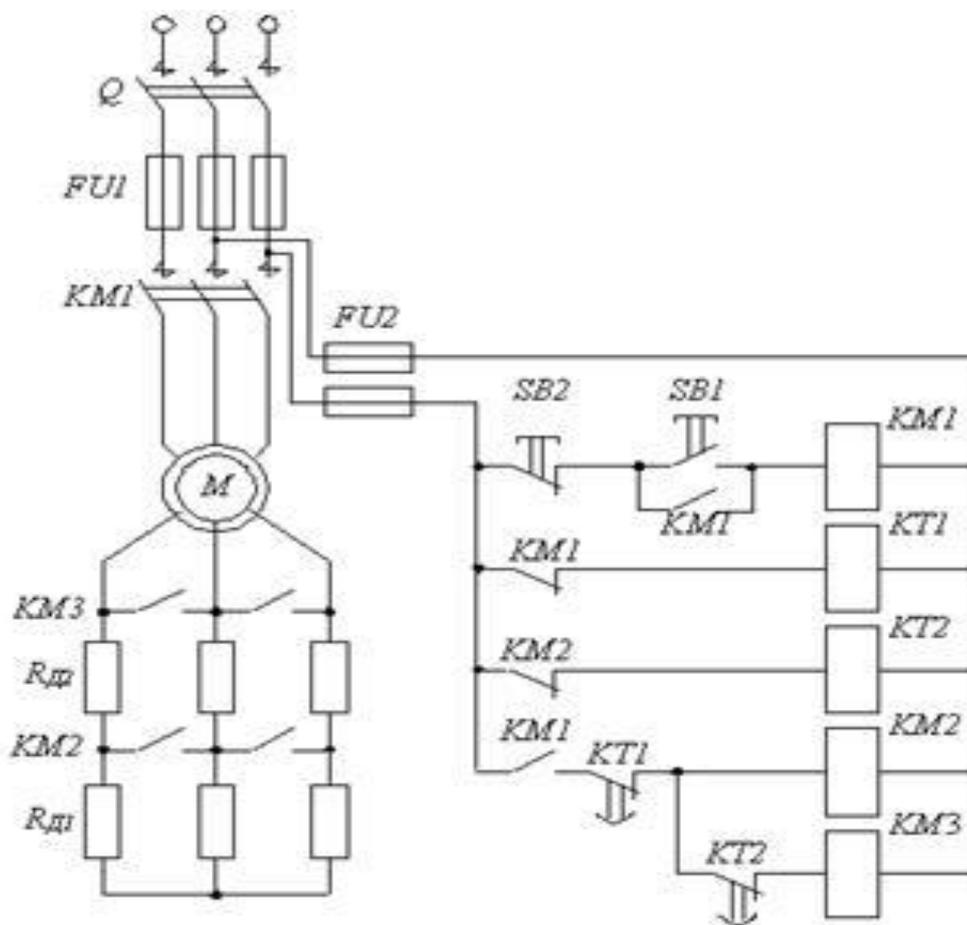


Рисунок 2 – Принципиальная схема автоматического управления трехфазным асинхронным двигателем с фазным ротором в функции времени

1.1.5. Переключающие скорости по ступеням определяются по пусковой диаграмме.

Переключающие токи определяют по выражению

$$I_{2\text{пер}} = \frac{E_{2к} S_{\text{пер}}}{\sqrt{3}(R_{2н} + R_{\text{пер}})} \quad (17)$$

Из основного уравнения движения системы электродвигатель-крановый механизм следует, что время пуска (разгона) двигателя при постоянном моменте инерции

$$t_{\text{п}} = J_{\text{пр}} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{d\omega}{M - M_c}, \quad (18)$$

где $J_{\text{пр}}$ – момент инерции системы, приведенный к валу двигателя, кг·м².

$$J_{\text{пр}} = \frac{(GD^2)_{\text{пр}}}{4g}, \quad (19)$$

где $(GD^2)_{\text{пр}}$ – приведенный маховый момент к валу двигателя.

Приведенный маховый момент к валу двигателя

$$(GD^2)_{\text{пр}} = k \cdot G_p D_p^2 + 4 \frac{G_0 V^2}{\omega_{\text{дв}}^2}, \quad (20)$$

где $k = 1,15$ – коэффициент, учитывающий маховые моменты звеньев системы, вращающихся со скоростями, отличными от скорости ротора;

V – скорость поступательно движущихся частей, м/с;

$\omega_{\text{дв}}$ – угловая скорость двигателя, рад/с;

G_0 – вес груза, Н;

$G_p D_p^2$ – маховый момент электродвигателя, Н·м²;

$$G_p D_p^2 = 4gJ_p, \quad (21)$$

где J_p – момент инерции ротора двигателя, кг·м².

Учитывая, что пусковая диаграмма АД с фазным ротором строится в предположении линейности рабочих участков механических характеристик, время пуска ступени регулирования можно определить, как

$$t_{\text{п}} = J_{\text{пр}} \frac{\omega_2 - \omega_1}{M_1 - M_2} \ln \frac{M_1}{M_2}, \quad (22)$$

где ω_1, ω_2 – соответствующие угловые скорости в начале и конце участка ступени пусковой диаграммы, рад/с;

M_1 и M_2 – соответственно предельный и переключающий моменты, Н·м.

Для последней ступени регулирования (при работе по естественной характеристике) в (22) вместо M_2 следует использовать M_c , а вместо $\omega_2 - \omega_c$.

1.1.6. Добавочное сопротивление, введенное в цепь ротора, определяют, используя выражение:

$$\frac{s_e}{s_p} = \frac{R_{2н}}{R_{2н} + R_{2доб}}, \quad (23)$$

где s_e , s_p – скольжения при работе с $M = M_c$ на естественной и искусственной механических характеристиках соответственно;

$R_{2доб}$ – добавочное сопротивление в цепи ротора, Ом.

Выражение (23) справедливо при одинаковом моменте на естественной и искусственной характеристиках.

Скольжение электродвигателя при работе на подъем

$$s_{рпод} = \frac{\omega_0 - 0,5\omega_c}{\omega_0}, \quad (24)$$

на спуск груза

$$s_{рсп} = \frac{\omega_0 + 0,5\omega_c}{\omega_0}, \quad (25)$$

где ω_c – угловая скорость электродвигателя при работе на естественной характеристике при $M = M_c$.

Для построения характеристики электродвигателя при подъеме груза необходимо определить критическое скольжение.

Токи в статоре и роторе при работе на искусственных характеристиках определяют так же, как в п. 1.1.3, при соответствующих значениях скольжения $s_{рпод}$, $s_{рсп}$ и добавочного сопротивления $R_{2доб}$.

1.2. Механизм вспомогательного подъема

1.2.1. Аналогично п. 1.1.1 выполняется выбор электродвигателя для механизма вспомогательного подъема.

1.2.2. Для определения сопротивлений пускового реостата пусковая диаграмма строится в предположении, что рабочий участок механических характеристик близок к линейному.

При построении пусковой диаграммы предельный момент M_1 не может быть больше критического и обычно принимается $(0,8-0,9) M_k$, а момент переключения M_2 должен составлять $(1,1-1,3) M_c$.

Число ступеней пусковой диаграммы m (равно числу искусственных характеристик) и значение моментов M_1 и M_2 связаны между собой соотношением

$$m = \frac{\log_{10}\left(\frac{M_H}{M_1 S_H}\right)}{\log_{10}\left(\frac{M_1}{M_2}\right)}, \quad (26)$$

Если при выбранных значениях M_1 и M_2 число ступеней m не получается целым, то его следует округлить в сторону ближайшего целого числа и пересчитать момент переключения M_2 .

$$M'_2 = M_1 \sqrt[m]{\frac{M_1}{M_H} S_H}. \quad (27)$$

После этого определяют отношение $\lambda = \frac{M_1}{M'_2}$ и величину сопротивления по ступеням по формулам

$$R_{dm} = R_{2H}(\lambda - 1) \text{ и } R_{d(i-1)} = R_{d(i)} \cdot \lambda, \quad (28)$$

где $i=m, m-1, \dots, 2$ (изменяется от m до 2);

R_{2H} – номинальное сопротивление ротора, Ом.

Рассчитывают сопротивления по секциям

$$R_m = R_{dm} \text{ и } R_{(i-1)} = R_{d(i-1)} - R_{d(i)} \quad (29)$$

Например, при $m=3$, будет

$$R_{d3} = R_{2H}(\lambda - 1); R_{d2} = R_{d3}\lambda; R_{d1} = R_{d2}\lambda$$

$$R_3 = R_{d3}; R_2 = R_{d2} - R_{d3}; R_1 = R_{d1} - R_{d2}$$

2. Расчет мощности двигателя передвижения тележки

Определим основные параметры колес тележки.

У тележек мостовых кранов сила давления на колеса принимается приблизительно равномерной

$$F_{к1} = \frac{(G_0 + G_T)}{n_T} k_H, \text{ кН}, \quad (30)$$

где G_0 – вес груза, кН;

G_T – вес тележки с учетом подвески, кН; (табл. 2);

n_T – число колес тележки;

$k_H = 1,1$ – коэффициент неравномерности нагрузки колес тележки.

По полученной нагрузке определяем размеры колеса (табл. 3).

2.1. Статическая мощность на валу двигателя

$$P_{ст} = \frac{k_p(G + G_0)(\mu d_{ц} + 2f)V_T}{D_k \eta}, \text{ кВт}, \quad (31)$$

где G_0 – вес груза, кН;

G – вес тележки с учетом подвески, кН;

V_T – скорость передвижения тележки, м/сек;

k_p – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления движению из-за трения ребер ходовых колес о рельсы (таб. 4);

D_k – диаметр колеса, м;

$d_{ц}$ – диаметр цапфы оси ходового колеса, м;

μ – коэффициент трения скольжения в подшипниках опор вала ходового колеса; (0,015-0,02 – для подшипников качения, 0,08-0,15 – для подшипников качения);

f – коэффициент трения качения ходовых колес по рельсам, м

η – КПД механизма передвижения (табл. 1)

Коэффициент f можно определить по формуле

$$f = 2,7 \cdot 10^{-7} \sqrt{\frac{F_{к1} D_k}{B_k}}, \text{ м}, \quad (32)$$

где D_k и B_k – соответственно диаметр и ширина колеса, м;

$F_{к1}$ – сила давления на колесо, Н.

Находим предварительную мощность для выбора электродвигателя.

$$P_H \geq \frac{P_{ст}}{k_T}, \quad (33)$$

где k_T – коэффициент выбора двигателя по тепловому режиму (табл. 5 и 6).

По найденной мощности выбирается электродвигатель.

Определяется приведенный маховый момент к валу двигателя:

$$(GD^2)_{\text{пр}} = k \cdot G_p D_p^2 + 4 \frac{(G_0 + G_T) V^2}{\omega_H^2}, \quad (34)$$

где $k=1,15$ – коэффициент, учитывающий маховые моменты звеньев системы, вращающихся со скоростями, отличными от скорости ротора;

V – скорость передвижения, м/с;

ω_H – угловая скорость двигателя, рад/с;

$G_p D_p^2$ – маховый момент электродвигателя, Н·м²; см. (21);

Проверим двигатель на обеспечение теплового режима

$$P_H \geq \frac{k_{\text{ЭКВ}} k_z \eta_{\text{ЭКВ.б}} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_H}}}{k_p k_0 [\eta_{\text{ЭКВ.б}} - k_{\text{д.п}} (\eta_{\text{ЭКВ.б}} - \eta_{\text{ЭКВ}})]} P_{\text{СТ}}, \quad (35)$$

где $k_{\text{ЭКВ}}$, k_z , ε_0 , ε_p – расчетные коэффициенты, зависящие от режима работы и маховых масс (таб. 7);

$k_{\text{д.п}}$ – коэффициент, учитывающий степень включений динамических потерь на нагрев машины (таб. 5);

k_0 – коэффициент, зависящий от относительной продолжительности включения кранового механизма (табл. 8);

k_p – коэффициент, учитывающий увеличение потерь на регулировочных характеристиках.

$$k_p = 1 - 1,2(\varepsilon_p - \varepsilon_{p.б}), \quad (36)$$

$$\varepsilon_p = \frac{L_{\text{пр}} - l_1 - l_2}{600V_T}, \quad (37)$$

где V_T – скорость тележки. м/с;

$L_{\text{пр}}$ – длина пролета, м;

l_1, l_2 – расстояния от вертикальной оси крюка механизма до оси ближайшего подкранового пути, м (табл. 9);

$\eta_{\text{ЭКВ.б}}$ – эквивалентный базисный КПД (табл. 5);

$\eta_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентный КПД, является показателем энергетических свойств системы регулирования и определяющий потери энергии в электроприводе.

$$\eta_{\text{ЭКВ}} = \frac{\eta_{\text{ЭКВ.б}}}{1 + \frac{(\eta_{\text{ЭКВ.б}} - \eta_{\text{ЭКВ.з}})(GD^2)_{\text{пр}}}{\eta_{\text{ЭКВ.з}} \cdot 1.2 \cdot G_p D_p^2}}, \quad (38)$$

где $\eta_{\text{ЭКВ.з}}$ – значение эквивалентного КПД, соответствующее заданному числу включений в час $Z_{\text{ЭКВ}}$ (табл. 10).

Если выбранный электродвигатель по нагреву не подходит, берем следующий по мощности и вновь выполняем проверку.

Выбранный двигатель проверяется по обеспечению пускового режима

$$M_{\text{max}} > k_{\text{зМ}}(M_{\text{с}} + M_{\text{дин}}), \quad (39)$$

где M_{max} – максимальный момент электродвигателя для АД с фазным ротором или пусковой момент для АД с короткозамкнутым ротором, Н·м;

$k_{\text{зМ}} = 1,1-1,2$ – коэффициент запаса по моменту;

$M_{\text{с}}$ – максимально возможный для данного кранового механизма момент статической нагрузки приведенной к валу электродвигателя, Н·м;

$M_{\text{дин}}$ – динамический момент, определяемый из условия необходимого ускорения, Н·м.

$$M_{\text{дин}} = \frac{(GD^2)_{\text{пр}}}{4g} \frac{\omega_{\text{н}}}{V} a_{\text{м}}, \quad (40)$$

где $a_{\text{м}}$ – ускорение перемещения механизма, м/с² (табл. 11).

2.2. При приближенных расчетах, считая динамический момент в период пуска постоянным, время пуска можно определить по формуле

$$t_{\text{п}} = \frac{(GD^2)_{\text{пр}}}{4g} \frac{\omega_{\text{с}}}{M_{\text{ср.п}} - M_{\text{с}}}, \quad (41)$$

где $\omega_{\text{с}}$ – скорость АД, до которой он разгоняется при пуске, рад/с;

$M_{\text{ср.п}}$ – средний пусковой момент, определяемый по каталожным данным (АД с короткозамкнутым ротором) или по пусковой диаграмме (АД с фазным ротором), Н·м;

$M_{\text{с}}$ – момент статического сопротивления, приведенный к валу электродвигателя, Н·м.

$$M_{\text{с}} = \frac{P_{\text{с}}}{\omega_{\text{с}}}, \quad (42)$$

Приведенный маховый момент к валу двигателя

$$(GD^2)_{\text{пр}} = k \cdot G_p D_p^2 + 4 \frac{(G_0 + G_T) V^2}{\omega_{\text{дв}}^2}, \quad (43)$$

где $k=1,15$ – коэффициент, учитывающий маховые моменты звеньев системы, вращающихся со скоростями, отличными от скорости ротора;

V – скорость поступательно движущихся частей, м/с;

$\omega_{\text{дв}}$ – угловая скорость двигателя, рад/с;

G_T – вес тележки, Н;

G_0 – вес груза, Н;

$G_p D_p^2$ – маховый момент электродвигателя, Н·м²;

$$G_p D_p^2 = 4gJ_p, \quad (44)$$

где J_p – момент инерции ротора двигателя, кг·м².

Средний пусковой момент ориентировочно можно определить по формуле

$$M_{\text{ср.п}} = M_H \cdot \Psi_{\text{п}}, \quad (45)$$

где $\Psi_{\text{п}}$ – кратность среднего пускового момента для двигателя АИР(АИ)
 $\Psi_{\text{п}} \approx 1,6$.

2.3. Допустимое число включений в час для электродвигателя подъемного механизма, выбранного в п. 2.1, рассчитывается по формуле:

$$h_{\text{доп}} = 3600 \frac{\Delta P_H \beta (1 - \varepsilon_{\text{ф}})}{\Delta A_{\text{пуск}}}, \quad (46)$$

где ΔP_H – номинальные потери мощности, Вт;

$\beta = 0,5$ коэффициент ухудшения охлаждения;

$\Delta A_{\text{пуск}}$ – потери энергии в двигателе при пуске, Дж,

$\varepsilon_{\text{ф}}$ – фактическое значение относительной продолжительности включения. о.е.;

Номинальные потери мощности

$$\Delta P_H = P_H \frac{1 - \eta_H}{\eta_H}, \quad (47)$$

где η_H – номинальный КПД электродвигателя.

Потери энергии при пуске АД определяется по формуле

$$\Delta A_{\text{пуск}} = 0,81 \frac{1-\eta_{\text{п}}}{\eta_{\text{п}}(1+\alpha)} P_{\text{дв}} t_n \cdot i_n^2, \quad (48)$$

где t_n – время пуска, с, (по формуле(41));

i_n – кратность пускового тока;

$\alpha \approx 0,6$ – коэффициент, равный отношению постоянных потерь к переменным;

$\eta_{\text{п}}$ – КПД передачи;

$P_{\text{дв}}$ – мощность на валу двигателя, Вт.

3. Расчет мощности двигателя передвижения моста

Нагрузки на колеса одной стороны крана можно принимать распределенными равномерно

$$F_{1\text{max}} = \frac{G_{\text{каб}}(L-l_{\text{каб}})+(G_{\text{т}}+G_0)(L-l_1)+0,5G_{\text{кр}}L}{L}, \quad (49)$$

$$F_{2\text{max}} = \frac{G_{\text{каб}}l_{\text{каб}}+(G_{\text{т}}+G_0)(L-l_2)+0,5G_{\text{кр}}L}{L}, \quad (50)$$

где $F_{1\text{max}}, F_{2\text{max}}$ – сила давления на колеса с левой и правой стороны крана, кВ;

L – длина пролета крана, м;

l_1, l_2 – расстояния от вертикальной оси крюка механизма до оси ближайшего подкранового пути, м (табл. 9);

$l_{\text{каб}}$ – расстояние кабины до ближайшего подкранового пути, равное 2,4 м;

$G_{\text{каб}}$ – вес кабины, принимаемый 10 кН для всех кранов;

G_0 – вес груза, кН;

$G_{\text{т}}$ – вес тележки с учетом подвески, кН;

$G_{\text{кр}}$ – вес крана, кН (табл. 12).

Максимальная нагрузка на одно колесо составит

$$F_{\text{к1}} = \frac{\max\{F_{1\text{max}}; F_{2\text{max}}\}}{n_1} k_{\text{н}}, \quad (51)$$

где n_1 – количество колес с одной стороны;

$\max\{F_{1\text{max}}; F_{2\text{max}}\}$ – максимальное значение из $F_{1\text{max}}$ и $F_{2\text{max}}$.

По полученной нагрузке определяются размеры колеса (табл. 3).

3.1. Статическая мощность на валу двигателя:

$$P_{ст} = \frac{k_p(G_{кр} + G_T + G_0)(\mu d_{ц} + 2f)V_{кр}}{D_k \eta}, \text{ кВт}, \quad (52)$$

где $V_{кр}$ – скорость перемещения крана, м/с.

Ориентировочное время пуска АД

$$t_{п} = \frac{V_{кр}}{a_{кр}}, \text{ с}, \quad (53)$$

где $a_{кр}$ – среднее ускорение перемещения крана (табл. 11).

Продолжительность рабочей операции

$$t_p = \frac{L_{кр}}{V_{кр}}, \text{ с}, \quad (54)$$

где $L_{кр}$ – длина рабочего пути крана, м;

$V_{кр}$ – скорость перемещения крана, м/с.

Определяется коэффициент $\alpha = f(t_{п}/t_p)$ (табл. 13).

Рассчитывается эквивалентная мощность для рабочей части цикла (без пауз)

$$P_{э.р} = \alpha P_{ст}. \quad (55)$$

Крановый механизм относят к конкретному номинальному режиму работы (Л – легкий, С – средний, Т – тяжелый, ВТ – весьма тяжёлый).

Рассчитывают необходимую номинальную мощность электродвигателя для стандартной продолжительности включения, равной 25% или 40%.

$$P_{25} = k_{25} P_{э.р} \text{ или } P_{40} = k_{40} P_{э.р}, \quad (56)$$

где k_{25} и k_{40} – коэффициенты для конкретного режима (табл. 14).

Из каталогов выбирают ближайший больший по мощности электродвигатель.

После выбора электродвигателя определяют время пуска $t_{п}$.

3.2. При приближенных расчетах, считая динамический момент в период пуска постоянным, время пуска можно определить по формуле

$$t_{п} = \frac{(GD^2)_{пр}}{4g} \frac{\omega_c}{M_{ср.п} - M_c}, \quad (57)$$

где ω_c – скорость АД, до которой он разгоняется при пуске, рад/с;

$M_{\text{ср.п}}$ – средний пусковой момент, определяемый по каталожным данным (АД с короткозамкнутым ротором), Н·м;

$M_{\text{с}}$ – момент статического сопротивления, приведенный к валу электродвигателя, Н·м.

$$M_{\text{с}} = \frac{P_{\text{с}}}{\omega_{\text{с}}}, \quad (58)$$

Приведенный маховый момент к валу двигателя

$$(GD^2)_{\text{пр}} = k \cdot G_{\text{р}} D_{\text{р}}^2 + 4 \frac{(G_0 + G_{\text{т}} + G_{\text{кр}}) V^2}{\omega_{\text{дв}}^2}, \quad (59)$$

где $k=1,15$ – коэффициент, учитывающий маховые моменты звеньев системы, вращающихся со скоростями, отличными от скорости ротора;

$G_{\text{кр}}$ – вес крана, Н;

V – скорость поступательно движущихся частей, м/с;

$\omega_{\text{дв}}$ – угловая скорость двигателя, рад/с;

$G_{\text{р}} D_{\text{р}}^2$ – маховый момент электродвигателя, Н·м²;

$$G_{\text{р}} D_{\text{р}}^2 = 4gJ_{\text{р}}, \quad (60)$$

где $J_{\text{р}}$ – момент инерции ротора двигателя, кг·м².

Средний пусковой момент ориентировочно можно определить по формуле

$$M_{\text{ср.п}} = M_{\text{н}} \cdot \Psi_{\text{п}}, \quad (61)$$

где $\Psi_{\text{п}}$ – кратность среднего пускового момента для двигателя АИР(АИ)

$\Psi_{\text{п}} \approx 1,6$.

Время разгона при опускании груза

$$t_{\text{н}} = \frac{(GD^2)_{\text{пр}}}{4g} \frac{\omega_{\text{с}}}{M_{\text{ср.п}} + M_{\text{с}}} \quad (62)$$

Уточняют отношение $t_{\text{п}}/t_{\text{р}}$. При значительном отклонении расчет повторяют.

Выбранный электродвигатель проверяют по пусковым условиям (39).

3.3. Допустимое число включений в час для электродвигателя подъемного механизма, выбранного в п. 3.2, рассчитывается по формуле:

$$h_{\text{доп}} = 3600 \frac{\Delta P_{\text{н}} \beta (1 - \varepsilon_{\phi})}{\Delta A_{\text{пуск}}}, \quad (63)$$

где $\Delta P_{\text{н}}$ – номинальные потери мощности, Вт;

$\beta = 0,5$ коэффициент ухудшения охлаждения;

$\Delta A_{\text{п}}$ – потери энергии в двигателе при пуске, Дж,

ε_{ϕ} – фактическое значение относительной продолжительности включения. о.е.;

Номинальные потери мощности

$$\Delta P_{\text{н}} = P_{\text{н}} \frac{1 - \eta_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}}, \quad (64)$$

где $\eta_{\text{н}}$ – номинальный КПД электродвигателя.

Потери энергии при пуске АД определяется по формуле

$$\Delta A_{\text{пуск}} = 0,81 \frac{1 - \eta_{\text{п}}}{\eta_{\text{п}}(1 + \alpha)} P_{\text{дв}} t_{\text{н}} \cdot i_{\text{н}}^2, \quad (65)$$

где $t_{\text{н}}$ – время пуска, с, (по формуле(57));

$i_{\text{н}}$ – кратность пускового тока;

$\alpha \approx 0,6$ – коэффициент, равный отношению постоянных потерь к переменным;

$\eta_{\text{п}}$ – КПД передачи;

$P_{\text{дв}}$ – мощность на валу двигателя, Вт.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Симаков, Г.М. Автоматизированный электропривод в современных технологиях [Электронный ресурс] : учебное пособие / Г.М. Симаков; Министерство образования и науки Российской Федерации, Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск: НГТУ, 2014. – 103 с. – Режим доступа:

http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=436277

2. Капунцов, Ю. Д. Электрический привод промышленных и бытовых установок [Текст] : учебное пособие / Ю. Д. Капунцов. – 3-е издание., стер. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 224 с.

3. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов [Текст] : учебник / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов. – М.: Академия, 2004. – 576 с.

4. Системы автоматизированного управления электроприводами [Текст] : учебное пособие / под ред. Ю. Н. Петренко. – Мн.: Новое знание, 2004. – 384 с.

5. Зарандия, Ж.А. Электрические машины и электропривод в электроэнергетике [Электронный ресурс] : учебное электронное издание / Ж.А. Зарандия, Е.А. Печагин, Н.П. Моторина ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Тамбовский государственный технический университет. – Тамбов : ФГБОУ ВПО "ТГТУ", 2018. – 113 с. – Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=570586>

6. Москаленко, В. В. Электрические приводы [Текст] : учебник / В. В. Москаленко. – М.: Высшая школа, 1991. – 429 с.

Приложение

Таблица 1 КПД крановых механизмов

Механизм	к.п.д. при опорах	
	качения	скольжения
подъема груза	0,80-0,85	0,70-0,80
передвижения тележки и крана	0,80-0,90	0,75-0,85

Таблица 2 Соотношение грузоподъемности и массы тележки

Грузоподъемность, т	5	8	10	12,5
Масса тележки, т	2,0	2,2	2,4	3,0
Грузоподъемность, т	16	20	32	50
Масса тележки, т	3,7	4,7	7,1	9,6
Грузоподъемность, т	16/3,2	20/5	32/5	32/8
Масса тележки, т	4,7	6,3	8,7	9,6
Грузоподъемность, т	32/12,5	50/8	50/10	50/12,5
Масса тележки, т	11,0	12,1	12,7	13,5

Таблица 3 Зависимость параметров колеса от нагрузки на него

F _к , кН	до 50		51-100		101-200		201-250		251-320		321-500	
D _к , мм	200	250	320	400	500	560	630	710	800			
B _к , мм	50	70	80	80	100	100	90	100	130	130	150	150
d _ц , мм	50	55	70	80	100	110	110	110	125	125	140	140

Таблица 4 Коэффициент трения реборд

Механизм	k _р
Тележка с жестким токопроводом	2,5
Тележка с кабельным токопроводом	2,0
Мостовой кран	1,5

Таблица 5 Коэффициенты для выбора электродвигателя

Система электропривода	$\eta_{\text{экв.б}}$	$k_{\text{д.п}}$	k_T для режимов				
			E1	E2	E3	E4	E5
односкоростной АД	0,83	4	1,35	1,00	0,65	0,30	-
двухскоростной АД	0,83	4	0,70	-	-	-	-
трехскоростной АД	0,83	4	1,30	0,95	0,55	0,20	-
АД с фазным ротором	0,76	1,25	1,45	1,20	0,96	0,75	0,45

Таблица 6 Классификация режимов работы электрооборудования мостовых кранов

Мостовой кран	Электроприводы механизма				
	подъема		тележки		передвижения крана
	главного	вспомогательного	главного подъема	вспомогательного подъема	
Крюковой облегченный	E1	E1	E1	E1	E1
Закалочный, крюковой	E2	E2	E2	E2	E2
Литейный	E3	E2	E2	E2	E2
Магнитный	E3	E2	E2	E2	E3
Ковочный, грейферный	E4	E4	E4	E3	E4
Клещевой	E4	E4	E4	-	E4
Завалочный	E5	-	E5	-	E5

Таблица 7 Классификационные параметры электродвигателя

Режим работы	ε_0	$\varepsilon_{\text{р.б}}$	$k_{\text{ЭКВ}}$	k_3	$Z_{\text{ЭКВ}}$	ПВ, %
E1	0,25	0,050	0,63	1,00	60	15-25
E2	0,40	0,075	0,69	1,00	120	40
E3	0,40	0,100	0,77	1,00	240	40

E4	0,60	0,125	0,80	1,20	600	60
E5	0,60	0,150	0,90	1,33	600	>60

Таблица 8 Соотношение k_0 и ε_0 для вентилируемых АД

Асинхронные двигатели	k_0 при ε_0		
	0,25	0,40	0,60
тихоходные	1,096	1,000	0,922
быстроходные	0,811	1,000	1,122

Таблица 9 Соотношение расстояний от вертикальной оси крюка механизма в зависимости от грузоподъемности крана

Q, т	5-8	10-12,5	16	16/3,2	20/5	32/5	50/12,5
l_1 , м	1,0	1,2	1,3	1,95	2,0	1,91	2,0
l_2 , м	0,8	1,1	1,12	1,3	1,12	1,6	1,9

Таблица 10 Эквивалентное $\eta_{\text{ЭКВ}}$ в зависимости от числа включений в час

АД	$\eta_{\text{ЭКВ},Z}$ при $Z_{\text{ЭКВ}}$			
	60	120	240	600
двухскоростной	0,715	0,631	0,508	0,327
с фазным ротором	0,767	0,746	0,707	0,617
трехскоростной быстроходный	0,814	0,793	0,754	0,664
односкоростной	0,808	0,793	0,765	0,964
трехскоростной тихоходный	0,838	0,823	0,795	0,724

Таблица 11 Среднее значение ускорений механизмов крана

Кран мостовой	Ускорение, м/с^2 , механизма		
	подъема	передвижения	
		тележки	крана
крюковой	0,3	0,3	0,3
магнитный, грейферный	0,5	0,5	0,5

литейный	0,1	0,2	0,2
закалочный	0,5	0,3	0,3

Таблица 12 Масса кранов в зависимости от грузоподъёмности и длины пролета

Грузоподъёмность, $m_{гр}$, Т	Пролёт, $L_{пр}$, М				
	10,5	16,5	22,5	28,5	34,5
	Масса крана, $m_{кр}$, Т				
1	2	3	4	5	6
Тип Н					
5	9,0	11,0	13,0	19,5	23,5
8	10,0	12,5	14,5	20,5	26,5
10	11,0	13,0	15,8	21,0	29,0
12,5	13,0	16,0	20,5	26,0	32,0
16	15,8	18,7	21,7	28,5	39,0
20	17,0	20,0	23,5	31,2	44,5
32	23,0	26,0	33,0	39,0	54,5
50	30,9	36,4	43,4	54,4	68,0
16/3,2	17,1	20,0	23,0	29,8	40,3
20/5	19,0	22,0	25,5	33,2	46,5
32/5	25,0	28,0	35,0	41,0	56,5
32/8	26,3	29,3	36,3	42,3	57,8
32/12,5	28,1	31,1	38,1	44,1	59,6
50/8	34,2	39,7	46,7	57,7	71,3
50/12,5	36,0	41,5	48,5	59,5	73,1
Тип О					
5	5,0	7,8	10,7	13,5	16,4
8	5,5	8,6	11,7	14,8	18,0
12,5	6,6	10,3	14,1	17,8	21,6
20	9,5	14,9	20,3	25,7	31,1
32	13,5	21,1	28,8	36,5	44,2
50	21,0	28,9	39,4	49,9	60,4
20/5	10,7	16,1	21,5	26,9	32,3
32/5	14,7	22,3	30,0	37,7	45,4
32/8	15,3	22,9	30,6	38,3	46,0

32/10	15,5	23,1	30,8	38,5	46,2
50/10	23,0	30,9	41,4	51,9	62,4
50/12,5	23,6	31,5	42,0	52,5	63,0
Тип Г					
1	2	3	4	5	5
5	13,5	18,0	25,0	31,0	37,0
8	15,5	20,0	26,5	33,5	41,5
12,5	18,5	23,0	29,5	38,0	48,0
20	23,5	28,5	36,0	46,5	57,5
32	35,0	42,5	52,0	62,0	73,0
50	49,0	58,0	69,0	79,0	86,0
20/5	25,5	30,5	38,0	48,5	59,5
32/5	37,0	44,5	54,0	64,0	75,0
32/8	37,5	45,0	54,5	64,5	75,5
32/10	38,0	45,5	55,0	65,0	76,0
50/10	52,0	61,0	72,0	82,0	89,0
50/12,5	52,5	61,5	72,5	82,5	89,5

Таблица 13 Зависимость $\alpha = f(t_n/t_p)$

Механизм	Отношение t_n/t_p										
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
	Коэффициент α										
подъема	0,70	0,83	0,96	1,07	1,17	1,27	1,35	1,43	1,49	1,55	1,60
тележки	0,89	1,00	1,10	1,19	1,27	1,35	1,43	1,49	1,55	1,6	1,65
крана	0,98	1,10	1,21	1,31	1,39	1,47	1,54	1,60	1,65	1,69	1,72

Таблица 14 Коэффициенты для определения мощности АД

	Л	С	Т	ВТ
k_{25}	0.50	0.75	1.00	1.50
k_{40}	0.35	0.50	0.75	1.00