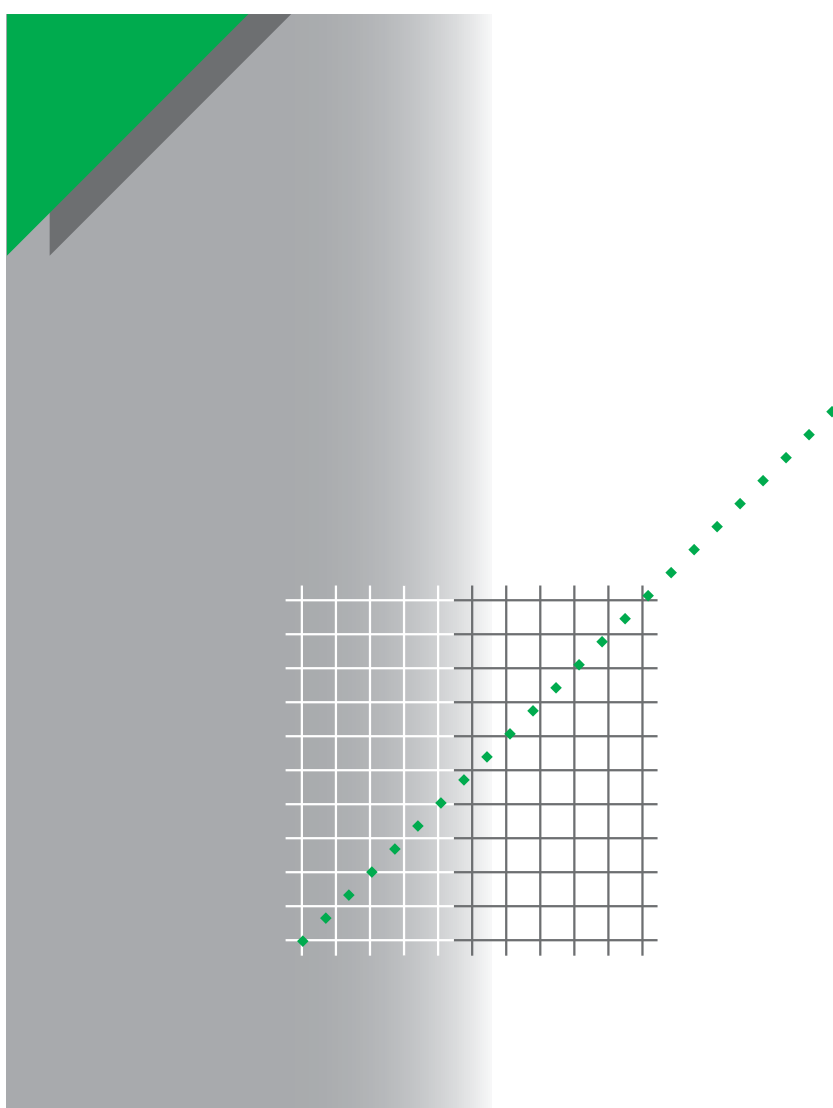


## Выпуск № 7

### Методика по силовому расчету частотно-регулируемых электроприводов крановых механизмов



Компания *Schneider Electric* приступила к выпуску «**Технической коллекции Schneider Electric**» на русском языке.

**Техническая коллекция** представляет собой серию отдельных выпусков для специалистов, которые хотели бы получить более подробную техническую информацию о продукции *Schneider Electric* и ее применении, в дополнение к тому, что содержится в каталогах.

В **Технической коллекции** будут публиковаться материалы, которые позволят лучше понять технические и экономические проблемы и явления, возникающие при использовании электрооборудования и средств автоматизации *Schneider Electric*.

**Техническая коллекция** предназначена для инженеров и специалистов, работающих в электротехнической промышленности и в проектных организациях, занимающихся разработкой, монтажом и эксплуатацией электроустановок, распределительных электрических сетей, средств и систем автоматизации.

**Техническая коллекция** будет также полезна студентам и преподавателям ВУЗов. В ней они найдут сведения о новых технологиях и современных тенденциях в мире Электричества и Автоматики.

В каждом выпуске **Технической коллекции** будет углубленно рассматриваться конкретная тема из области электрических сетей, релейной защиты и управления, промышленного контроля и автоматизации технологических процессов.

**Валерий Саженов,**  
Технический директор  
ЗАО «Шнейдер Электрик»,  
Кандидат технических наук



**Ласточкин Валерий Михайлович**

Главный конструктор ООО «Промышленный ресурс»,  
г. Санкт-Петербург



**Шамрай Феликс Анатольевич**

Заместитель генерального директора  
ЗАО «Уральский турбинный завод», г. Екатеринбург

# Содержание

	<i>Стр.</i>
<b>Введение</b>	5
<b>1. Механизм подъема</b>	6
1.1. Исходные данные	6
1.2. Расчет усилия в канате	6
1.3. Расчет статического момента на валу двигателя	6
1.4. Расчет динамического момента на валу двигателя	6
1.5. Расчет полного момента	6
1.6. Выбор двигателей	7
<b>2. Механизм передвижения тележки</b>	8
2.1. Исходные данные	8
2.2. Расчет статического момента на валу двигателя	8
2.3. Расчет динамического момента на валу двигателя	8
2.4. Расчет полного момента	8
2.5. Выбор двигателей	8
2.6. Проверка запаса сцепления колес	10
<b>3. Механизм перемещения моста</b>	10
3.1. Исходные данные	10
3.2. Расчет статического момента на валу двигателя	11
3.3. Расчет динамического момента на валу двигателя	11
3.4. Расчет полного момента	11
3.5. Выбор двигателей	11
3.6. Проверка запаса сцепления колес	12
<b>4. Расчет и выбор тормозных сопротивлений</b>	13
4.1. Механизм подъема	13
4.2. Механизм передвижения тележки	14
4.3. Механизм передвижения моста	14
<b>Список литературы</b>	15



## Введение

Возрастающие технологические требования к качеству производственных процессов, необходимость использования высоких технологий обуславливают устойчивую тенденцию внедрения в различные отрасли промышленного производства современных регулируемых электроприводов

В настоящее время самым распространённым двигателем промышленных электроприводов является трёхфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Про него можно сказать, что он является самым простым, самым надёжным и самым дешёвым электродвигателем в широком диапазоне частоты вращения и мощности. Самым эффективным и самым распространённым среди глубокорегулируемых асинхронных электроприводов является частотно-регулируемый электропривод на основе преобразователя частоты с промежуточным звеном постоянного тока.

Применение частотно-регулируемого асинхронного электропривода в механизмах подъемно-транспортного оборудования является эффективным методом повышения технологичности производства. Использование таких приводов позволяет:

1. Значительно (до 40%) снизить энергопотребление крана, что особенно актуально при постоянно растущих тарифах на энергоносители.

2. Осуществить разгон и торможение двигателя плавно, по линейному закону от времени, при варьировании временем разгона и временем торможения от долей секунды до 50 мин.

3. Повысить комфортные показатели при движении крана и долговечность механического оборудования благодаря плавности переходных процессов.

4. Защитить двигатель от перегрузок по току, перегрева, утечек на землю и от обрывов в цепях питания двигателей.

5. Снизить эксплуатационные расходы на капитальный ремонт оборудования за счет значительного снижения динамических нагрузок в элементах кинематической цепи.

6. Изменять скорости и ускорения движения механизмов крана применительно к конкретным технологическим задачам.

Эффективность и экономичность таких электроприводов в значительной степени зависят от правильности выбора номинальных параметров их основных элементов, т.е. двигателя и преобразователя частоты. В данной технической тетради приводится методика расчета основных параметров и выбора оборудования частотно-регулируемого электропривода механизмов подъемного мостового крана на базе приводной техники компании Schneider Electric.

Новейшее семейство преобразователей частоты ALTIVAR 71 обладает всеми необходимыми функциями для управления крановыми приводами. Подъем с повышенной скоростью, контроль состояния тормоза, позиционирование с помощью конечных выключателей, выравнивание нагрузки, управление тормозом, адаптированное для приводов перемещения, подъема и поворота, выбор слабины тросов, управление моментом, измерение нагрузки, многочисленные алгоритмы управления двигателем – вот далеко не полный перечень возможностей преобразователя ATV 71.

# 1. Механизм подъема

## 1.1. Исходные данные

- Грузоподъемность на крюке, кг	$Q1 = 32000$
- Масса траверсы, кг	$Q2 = 6000$
- Вес каната, кг	$Jt = 350$
- Скорость подъема, м/с	$V = 0,33$
- Количество полиспастов	$a = 2$
- Кратность полиспастов	$m = 4$
- КПД блоков полиспастов	$\eta_{bl} = 0,97$
- КПД механизма	$\eta = 0,903$
- Диаметр барабана, м	$Db = 0,827$
- Передаточное число механизма	$i = 32,42$
- Время разгона, с	$t = 2$

## 1.2. Расчет усилия в канате

Максимальное усилие в канате  $S$  рассчитывается по формуле:

$$S = \frac{Q1 + Q2 + Jt}{a \cdot m \cdot \eta_{bl}} = \frac{32000 + 6000 + 350}{2 \cdot 4 \cdot 0,97} = 4942 \text{ кг}$$

## 1.3. Расчет статического момента на валу двигателя

Статический момент на валу двигателя  $Mst$  равен:

$$Mst = \frac{S \cdot a \cdot Db \cdot g}{2 \cdot i \cdot \eta} = \frac{4942 \cdot 2 \cdot 0,827 \cdot 9,81}{2 \cdot 32,42 \cdot 0,903} = 1370 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

## 1.4. Расчет динамического момента на валу двигателя

Динамический момент на валу двигателя  $Md$  равен:

$$Md = \frac{\delta \cdot (2 \cdot \sum J) \cdot Ndv \cdot g}{375 \cdot t} + \frac{0,975 \cdot (J + \sum Q) \cdot V^2 \cdot g}{Ndv \cdot t \cdot \eta \cdot \eta_{bl}} =$$
$$= \frac{1,1 \cdot (2 \cdot (13 + 9,32 + 2)) \cdot 960 \cdot 9,81}{375 \cdot 2} + \frac{0,975 \cdot (350 + 32000 + 6000) \cdot 0,33^2 \cdot 9,81}{960 \cdot 2 \cdot 0,903 \cdot 0,97} = 696 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где  $\delta$  - коэффициент влияния масс механизма (1,1 - 1,25);

$\sum J$  - суммарный маховый момент роторов двигателей, тормозных шкивов и соединительных муфт:  $\sum J = Jd + Jsh + Jmf$ ;

$Jd$  - маховый момент ротора двигателя;

$Jsh$  - маховый момент тормозного шкива;

$Jmf$  - маховый момент муфты;

$Ndv$  - скорость вращения ротора двигателя, 960 об/мин;

$g$  - ускорение свободного падения, 9,81 м/с<sup>2</sup>

## 1.5. Расчет полного момента

Расчётное значение максимального момента двигателя при пуске механизма будет равно:

$$Mmax = \frac{Mst + Md}{ft \cdot fh \cdot fu \cdot f\omega} = \frac{1370 + 696}{1 \cdot 1 \cdot 0,81 \cdot 1} = 2551 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где  $ft$  - коэффициент снижения момента от превышения температуры окружающей среды, для температуры окружающей среды 40°C  $ft = 1$ ;

$fh$  - коэффициент снижения момента при высоте над уровнем моря выше 1000 м, для высоты над уровнем моря до 1000 м  $fh = 1$ ;

- $f_u$  - коэффициент снижения момента при просадках напряжения питания; согласно ТЗ напряжение питания  $380 \text{ В} \pm 10 \%$ , так как максимальный момент уменьшается пропорционально квадрату напряжения, при его просадке на  $10\%$  значение коэффициента снижения момента будет  $f_u = 0,9^2 = 0,81$ ;
- $f_\omega$  - коэффициент снижения момента при скорости вращения ротора выше синхронной,  $f_\omega = 1$

### 1.6. Выбор двигателей

В механизме подъема установлены два двигателя, валы которых жестко связаны. При управлении двигателями от преобразователей частоты, принимаем, что нагрузка делится ровно на два двигателя.

Двигатель выбирается по номинальному моменту по двум критериям.

Первый критерий – номинальный момент двигателя должен быть больше статического расчетного момента, приведенного к валу одного двигателя:

$$Mn.dv > \frac{Mst \cdot kz}{\text{количество\_двиг.} \cdot \lambda} = \frac{1370 \cdot 1,15}{2 \cdot 1,0} = 788 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где  $\lambda$  – сервис-фактор (допустимая перегрузка двигателя при номинальных напряжении и частоте питающего напряжения), для электродвигателей фирмы VEM принимаем  $\lambda = 1,0$ ;

$kz$  – коэффициент запаса (по требованиям ТЗ).

Второй критерий - номинальный момент двигателя должен быть больше момента, полученного отношением максимального расчетного момента к кратности максимального момента двигателя к номинальному.

Исходя из паспортных данных на асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, диапазон кратности максимального момента по отношению к номинальному –  $2,0 - 2,5$ . Принимаем кратность равной  $2$ .

Тогда, номинальный момент одного двигателя должен быть не меньше момента:

$$Mn.dv > \frac{M_{max}}{\text{кол-во\_двиг.} \cdot \frac{M_{max}}{Mn}} = \frac{2551}{2 \cdot 2} = 638 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Исходя из двух условий  $Mn.dv > 788 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

Выбираем двигатель K21F 315 S6 TWS HB NS LL IL IGR с параметрами:

Номинальная мощность, кВт	88
Ном. скорость вращения ротора, об/мин	990
Номинальный момент, Н·м	853
$M_{max}/M_{ном}$	2,0
Сервис-фактор	1,0

Рассчитать суммарную мощность двигателей по максимальной статической нагрузке можно так:

$$P = ((Q1 + Q2 + J) \cdot g \cdot V) / (\eta_{bl} \cdot \eta) = ((32000 + 6000 + 350) \cdot 9,81 \cdot 0,33) / (0,97 \cdot 0,903) = 141739 \text{ Вт} = 142 \text{ кВт}.$$

Это справедливо при условии, что номинальная скорость двигателя равна:

$$Ndv = (V \cdot m \cdot i \cdot 60) / (Db \cdot \pi) = (0,33 \cdot 4 \cdot 32,42 \cdot 60) / (0,827 \cdot 3,14) = 989 \text{ об/мин}$$

В соответствии с ТЗ мощность ПЧ должна превышать мощность двигателя на  $20\%$ . Тогда  $P_{пч} \geq 75 \text{ кВт} \cdot 1,2 = 106 \text{ кВт}$ .

Выбираем (3) преобразователи частоты ATV71HC11N4 мощностью  $110 \text{ кВт}$  в количестве  $2$  шт.



## 2. Механизм передвижения тележки

### 2.1. Исходные данные

- Грузоподъемность на крюке, кг	$Q1 = 32000$
- Масса тележки с траверсой, кг	$Jt = 31200$
- Скорость передвижения, м/с	$V = 1$
- КПД механизма	$\eta = 0,85$
- Диаметр цапфы колеса, м	$d = 0,1$
- Диаметр колеса, м	$Dk = 0,5$
- Коэффициент трения в подшипнике	$f = 0,015$
- Коэффициент трения реборды колеса	$kp = 1,5$
- Передаточное число механизма	$i = 18$
- Коэффициент трения качения колеса	$\mu = 0,0006$
- Маховый момент ротора двигателя, кг · м <sup>2</sup>	$Jd = 1,84$
- Маховый момент тормозного шкива, кг · м <sup>2</sup>	$Jsh = 1,58$
- Маховый момент муфты, кг · м <sup>2</sup>	$Jmf = 0,76$
- Скорость вращения ротора двигателя, об/мин	$Ndv = 700$
- Время разгона, с	$t = 3$

### 2.2. Расчет статического момента на валу двигателя

Статический момент на валу двигателя  $Mst$  равен:

$$Mst = \frac{kp \cdot (J + Q1) \cdot (f \cdot d + 2 \cdot \mu) \cdot g}{2 \cdot i \cdot \eta} =$$
$$\frac{1,5 \cdot (31200 + 32000) \cdot (0,015 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,0006) \cdot 9,81}{2 \cdot 18 \cdot 0,85} = 82 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

### 2.3. Расчет динамического момента на валу двигателя

Динамический момент на валу двигателя  $Md$  равен:

$$Md = \frac{\delta \cdot (Jd + Jsh + Jmf) \cdot Ndv \cdot g}{375 \cdot t} + \frac{0,975 \cdot (J + Q1) \cdot V^2 \cdot g}{Ndv \cdot t \cdot \eta} =$$
$$= \frac{1,1 \cdot (1,84 + 1,58 + 0,76) \cdot 700 \cdot 9,81}{375 \cdot 3} + \frac{0,975 \cdot (31200 + 32000) \cdot 1^2 \cdot 9,81}{700 \cdot 3 \cdot 0,85} = 367 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

### 2.4. Расчет полного момента

Максимальный момент на валу двигателя при пуске механизма будет равен:

$$M_{max} = \frac{Mst + Md}{ft \cdot fh \cdot fu \cdot f\omega} = \frac{82 + 367}{1 \cdot 1 \cdot 0,81 \cdot 1} = 554 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

### 2.5. Выбор двигателей

В механизме передвижения тележки установлен один двигатель. Двигатель выбирается по номинальному моменту по двум критериям.

Первый критерий – номинальный момент двигателя должен быть больше статического расчетного момента приведенного к валу двигателя:

$$Mn.dv > \frac{Mst \cdot kz}{\text{количество\_двиг.} \cdot \lambda} = \frac{82 \cdot 1,15}{1 \cdot 1,0} = 94 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Второй критерий - номинальный момент двигателя должен быть больше момента, полученного отношением максимального расчетного момента к кратности максимального момента двигателя к номинальному.

Тогда, номинальный момент двигателя должен быть не меньше момента:

$$Mn.dv > \frac{Mmax}{кол-во\_двиг. \cdot Mmax/Mn} = \frac{554}{1 \cdot 1,7} = 325 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Исходя из двух условий  $Mn.dv > 325 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

Для данных условий подходят двигатели, приведенные в таблице 1

Для двигателя существует уравнение равенства механической и электрической энергии:

$$M \cdot \frac{\pi}{30} \cdot n = \sqrt{3} \cdot Imax \cdot U \cdot \cos\varphi \cdot \eta$$

Исходя из этого, максимальный потребляемый ток двигателя вычисляется по формуле:

$$Imax = \frac{\pi \cdot Mk \cdot n_n}{30 \cdot \sqrt{3} \cdot Un \cdot \cos\varphi \cdot \eta} = \frac{3,14 \cdot 611 \cdot 730}{30 \cdot \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,77 \cdot 0,9} = 102 \text{ А},$$

где  $\pi$  - 3,14;

$n_n$  - номинальная частота вращения вала электродвигателя, об/мин (730);

$Un$  - номинальное напряжение сети, В (380);

$\cos\varphi$  - находим по таблицам технических характеристик двигателей (0,77).

Поскольку  $Imax = 150\% \cdot In$ , номинальный ток ПЧ должен быть не менее:

$$I = \frac{Imax}{1,5} = \frac{102}{1,5} = 68 \text{ А}$$

По  $In$  выбираем преобразователь частоты ATV71HD30N4 мощностью 30 кВт в количестве 1 шт (3). Номинальный ток преобразователя 66 А.

С учетом требования ТЗ мощность ПЧ должна превышать мощность двигателя на 20%. Тогда  $P_{пч} \geq 22 \text{ кВт} \cdot 1,2 = 26,4 \text{ кВт}$ . Условие выполняется.

Проверочный расчет из условия, что преобразователи частоты обеспечивают перегрузочный пусковой момент 170% от номинального. Максимальный момент на валу двигателя 5A225M8K при этом равен:

$$M_{170} = 1,7 \cdot M_{ном} \cdot \left( \frac{In.pc}{In.dv} \right) = 1,7 \cdot 338 \cdot \frac{66}{46} = 824 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где  $In.pc$  - номинальный ток преобразователя частоты,  $In.pc = 66 \text{ А}$ ;

$In.dv$  - номинальный ток двигателя,  $In.dv = 46 \text{ А}$

$$M_{170} = 824 \text{ Н} \cdot \text{м} > Mmax = 611 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Окончательно выбираем преобразователь частоты ATV71HD30N4 мощностью 30 кВт.

Таблица 1

### Характеристики электродвигателя

№	Характеристика	Значение K21F 225 M8 TWS HB IGR (VEM)
1	Номинальная мощность, кВт	25
2	Номинальная частота вращения, об/мин	735
3	КПД, %	90
4	Коэффициент мощности	0,77
5	Номинальный ток, А	48,5
6	Номинальный момент, Н · м	338
7	Отношение макс. момента к номинальному	2,6
8	Масса, кг	260

## 2.6. Проверка запаса сцепления колес

Запас сцепления колес должен удовлетворять условию:

$$K\varphi = \frac{J_{pr} \cdot \varphi}{W_{пер}^{без груза} + J_{kr} \cdot \left( \frac{a}{g} - \frac{n_{pr}}{n} \cdot \mu \cdot \frac{d}{Dk} \right)} \geq 1,1,$$

где  $a$  - ускорение тележки,  $a=V/t=1/3=0,33 \text{ м/с}^2$ ;

$J_{pr}$  - суммарное давление на приводные колеса,

$$J_{pr}=(Jt) \cdot (n_{pr}/n)=(31200) \cdot (2/4)=15600 \text{ кг};$$

$J_{kr}$  - суммарное давление на колеса,

$$J_{pr}=(Jt)=(31200)=31200 \text{ кг};$$

$n_{pr}$  - число приводных колес,  $n_{pr} = 2$ ;

$n$  - общее число колес,  $n = 4$ ;

$\varphi$  - коэффициент сцепления с рельсом (на воздухе 0,12; в помещении 0,15; с песком 0,2);

$W_{пер}^{без груза}$  - сопротивление качения колес тележки без груза, которое находится по формуле:

$$W_{пер}^{без груза} = k_p \cdot (Jt) \cdot \frac{\mu \cdot d}{Dk} = 1,5 \cdot 31200 \cdot \frac{0,0006 \cdot 0,15}{0,5} = 8,5 \text{ кг}$$

Запас сцепления равен:

$$K\varphi = \frac{J_{pr} \cdot \varphi}{W_{пер}^{без груза} + J_{kr} \cdot \left( \frac{a}{g} - \frac{n_{pr}}{n} \cdot \mu \cdot \frac{d}{Dk} \right)} = \frac{15600 \cdot 0,15}{8,5 + 31200 \cdot \left( \frac{0,33}{9,81} - \frac{2}{4} \cdot 0,0006 \cdot \frac{0,15}{0,5} \right)} =$$
$$= \frac{2340}{8,5 + 31200 \cdot (0,033 - 0,00009)} = 2,2 \geq 1,1$$

Условие выполняется.

## 3. Механизм перемещения моста

### 3.1. Исходные данные

- Грузоподъемность на крюке, кг	$Q1 = 32000$
- Масса моста, кг	$Jm = 114200$
- Масса тележки с траверсой, кг	$Jt = 3120$
- Скорость передвижения, м/с	$V = 1,67$
- КПД механизма	$\eta = 0,85$
- Диаметр цапфы колеса, м	$d = 0,13$
- Диаметр колеса, м	$Dk = 0,71$
- Коэффициент трения в подшипнике	$f = 0,015$
- Коэффициент трения реборды колеса	$k_p = 2$
- Передаточное число механизма	$i = 19,88$
- Коэффициент трения качения колеса	$\mu = 0,0008$
- Маховый момент ротора двигателя, кг · м <sup>2</sup>	$Jd = 1,84$
- Маховый момент тормозного шкива, кг · м <sup>2</sup>	$Jsh = 1,58$
- Маховый момент муфты, кг · м <sup>2</sup>	$Jmf = 0,76$
- Скорость вращения ротора двигателя, об/мин	$Ndv = 970$
- Время разгона, с	$t = 5$

### 3.2 . Расчет статического момента на валу двигателя

Принимаем следующие условия:

- два электропривода, по одному на каждой торцевой балке;
- тележка с краю (т.е. нагрузка на электропривод от моста делится поровну, а нагрузка от тележки и груза полностью воздействует на один из приводов)

Статический момент на валу наиболее нагруженного двигателя  $M_{st}$  равен:

$$M_{st} = \frac{k_p \cdot (J_m / 2 + J_t + Q_1) \cdot (f \cdot d + 2 \cdot \mu) \cdot g}{2 \cdot i \cdot \eta} =$$
$$\frac{2 \cdot (114200 / 2 + 31200 + 32000) \cdot (0,015 \cdot 0,13 + 2 \cdot 0,0008) \cdot 9,81}{2 \cdot 19,88 \cdot 0,85} = 248 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

### 3.3. Расчет динамического момента на валу двигателя

Динамический момент на валу двигателя  $M_d$  равен:

$$M_d = \frac{\delta \cdot (J_d + J_{sh} + J_{mf}) \cdot N_{dv} \cdot g}{375 \cdot t} + \frac{0,975 \cdot (J_m / 2 + J_t + Q_1) \cdot V^2 \cdot g}{N_{dv} \cdot t \cdot \eta} =$$
$$= \frac{1,1 \cdot (1,84 + 1,58 + 0,76) \cdot 970 \cdot 9,81}{375 \cdot 5} + \frac{0,975 \cdot (114200 / 2 + 31200 + 32000) \cdot 1,67^2 \cdot 9,81}{970 \cdot 5 \cdot 0,85} = 799 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

### 3.4. Расчет полного момента

Максимальный момент на валу двигателя при пуске механизма будет равен:

$$M_{max} = \frac{M_{st} + M_d}{f_t \cdot f_h \cdot f_u \cdot f_\omega} = \frac{248 + 799}{1 \cdot 1 \cdot 0,81 \cdot 1} = 1292 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

### 3.5. Выбор двигателей

Двигатель выбирается по номинальному моменту по двум критериям.

Первый критерий – номинальный момент двигателя должен быть больше статического расчетного момента приведенного к валу одного двигателя:

$$M_n \cdot dv > \frac{M_{st} \cdot k_z}{\text{кол-во\_двиг.} \cdot \lambda} = \frac{248 \cdot 1,15}{1 \cdot 1,0} = 285 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Для электродвигателей принимаем кратность максимального момента по отношению к номинальному 2,0

Тогда, согласно второму критерию, номинальный момент одного двигателя должен быть не меньше момента:

$$M_n \cdot dv > \frac{M_{max}}{M_{max} / M_n} = \frac{1292}{2} = 646 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Исходя из двух условий  $M_n \cdot dv > 646 \text{ Н} \cdot \text{м}$

Для данных условий подходят двигатели, приведенные в таблице 2

Для двигателя существует уравнение равенства механической и электрической энергии:

$$M_k \cdot \frac{\pi}{30} \cdot n_n = \sqrt{3} \cdot I_{max} \cdot U_n \cdot \cos \varphi \cdot \eta$$

Исходя из этого, максимальный потребляемый ток двигателя вычисляется по формуле:

$$I_{max} = \frac{\pi \cdot M_k \cdot n_n}{30 \cdot \sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{3,14 \cdot 1132 \cdot 985}{30 \cdot \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,84 \cdot 0,92} = 230 \text{ А},$$

где  $\pi$  - 3,14;

$n_n$  - номинальная частота вращения вала электродвигателя, об/мин (985);

$U_n$  - номинальное напряжение сети, В (380);

$\cos\varphi$  - находим по таблицам технических характеристик двигателей (0,84).

Поскольку  $I_{max} = 150\% \cdot I_n$ , номинальный ток ПЧ должен быть не менее:

$$I_n = \frac{I_{max}}{1,5} = \frac{230}{1,5} = 153 \text{ A}$$

По  $I_n$  выбираем преобразователь частоты ATV71HD75N4 мощностью 75 кВт в количестве 2 шт. Номинальный ток преобразователя = 160 А.

С учетом требования ТЗ мощность ПЧ должна превышать мощность двигателя на 20%. Тогда  $P_{пч} \geq 64 \text{ кВт} \cdot 1,2 = 76 \text{ кВт}$ . Условие принимается.

Проверочный расчет из условия, что преобразователи частоты обеспечивают перегрузочный пусковой момент 170% от номинального. Максимальный момент на валу двигателя А280М6К при этом равен:

$$M_{170} = 1,7 \cdot M_{ном} \cdot \left( \frac{I_n.pс}{I_n.dv} \right) = 1,7 \cdot 625 \cdot \frac{160}{102} = 1666 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где  $I_n.pс$  - номинальный ток преобразователя частоты,  $I_n.pс = 160 \text{ А}$ ;

$I_n.dv$  - номинальный ток двигателя,  $I_n.dv = 102 \text{ А}$ .

$$M_{170} = 1666 \text{ Н} \cdot \text{м} \geq M_{max} = 1132 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Окончательно выбираем преобразователь частоты ATV71HD75N4 мощностью 75 кВт

Таблица 2

### Характеристики электродвигателя

№	Характеристика	Значение K21F 225 M8 TWS HB IGR (VEM)
1	Номинальная мощность, кВт	64
2	Номинальная частота вращения, об/мин	985
3	КПД, %	92,5
4	Коэффициент мощности	0,84
5	Номинальный ток, А	102
6	Номинальный момент, Н · м	625
7	Отношение макс. момента к номинальному	2,0
8	Масса, кг	460

При этих параметрах механизма (при  $V = 1,67$ ):

$$n_{dv} = (V \cdot i \cdot 60) / (Dk \cdot \pi) = (1,67 \cdot 19,88 \cdot 60) / (0,71 \cdot 3,14) = 893 \text{ об/мин}, \text{ а не } 970 \text{ об/мин (!)}.$$

Это значит, что двигатель и ПЧ будут перегружены по току на 8%. Чтобы это исключить, необходимо увеличить передаточное отношение редуктора до 21,5.

### 3.6 . Проверка запаса сцепления колес

Запас сцепления колес должен удовлетворять условию:

$$K\varphi = \frac{J_{пр} \cdot \varphi}{W_{пер}^{без\ груза} + J_{кр} \cdot \left( \frac{a}{g} - \frac{n_{пр}}{n} \cdot \mu \cdot \frac{d}{Dk} \right)} \geq 1,1,$$

где  $a$  – ускорение моста,  $a = V/t = 1,67/5 = 0,334 \text{ м/с}^2$ ;

$J_{пр}$  – суммарное давление на приводные колеса при условии, что тележка находится посередине моста и без груза

$$J_{pr} = (J_t + J_m) / 2 \cdot (n_{pr} / n) = (31200 + 114200) / 2 \cdot (2 / 8) = 18175 \text{ кг};$$

$J_{kr}$  – суммарное давление на колеса при условии, что тележка находится посередине моста и без груза

$$J_{kr} = (J_t + J_m) / 2 = (31200 + 114200) / 2 = 72700 \text{ кг};$$

$n_{pr}$  – число приводных колес,  $n_{pr} = 2$ ;

$n$  – общее число колес,  $n = 8$ ;

$\phi$  – коэффициент сцепления с рельсом (на воздухе 0,12; в помещении 0,15; с песком 0,2);

$W_{пер}^{без груза}$  – сопротивление качения колес моста без груза, находится по формуле:

$$W_{пер}^{без груза} = k_p \cdot (J_t + J_m) \cdot \frac{\mu \cdot d}{D_k} = 2 \cdot (31200 + 114200) \cdot \frac{0,0008 \cdot 0,13}{0,71} = 42,6 \text{ кг}$$

Запас сцепления равен:

$$K_{\phi} = \frac{J_{pr} \cdot \phi}{W_{пер}^{без груза} + J_{kr} \cdot \left( \frac{a}{g} - \frac{n_{pr}}{n} \cdot \mu \cdot \frac{d}{D_k} \right)} = \frac{18175 \cdot 0,15}{42,6 + 72700 \cdot \left( \frac{0,334}{9,81} - \frac{2}{8} \cdot 0,0008 \cdot \frac{0,13}{0,71} \right)} =$$

$$= \frac{2726,25}{42,6 + 72700 \cdot (0,034 - 0,000036)} = 1,08 \geq 1,1.$$

Условие не выполняется.

## 4. Расчет и выбор тормозных сопротивлений

### 4.1. Механизм подъема

Средняя мощность торможения при спуске груза равна:

$$P_f = (Q_1 + Q_2) \cdot g \cdot V = (32000 + 3150) \cdot 9,81 \cdot 0,33 = 113791 \text{ Вт} = 114 \text{ кВт}$$

Максимальная мощность торможения:

$$P_{f \max} = (Q_1 + Q_2) \cdot (g + a) \cdot V + \frac{(J_d + J_{sh} + J_{mf}) \cdot 0,011 \cdot Ndv^2}{t} =$$

$$= (32000 + 3150) \cdot (9,81 + 0,165) \cdot 0,33 + \frac{(3,25 + 2,33 + 0,5) \cdot 0,011 \cdot 960^2}{2} =$$

$$= 146523 \text{ Вт} = 146,5 \text{ кВт},$$

где  $Q_1$  – вес груза;

$Q_2$  – вес траверсы;

$a$  – ускорение,  $a = V/t = 0,33/2 = 0,165 \text{ м/с}^2$ ;

$V$  – линейная скорость спуска;

$t$  – время торможения при спуске,  $t = 2 \text{ с}$

Средняя тормозная мощность вычисляется по формуле:

$$P_{fr} = P_f (\eta_{bl} \cdot \eta \cdot \eta_{fc} \cdot \eta_{dv}) / \text{кол-во\_ПЧ} = 114 \cdot (0,87 \cdot 0,903 \cdot 0,98 \cdot 0,94) / 2 = 41 \text{ кВт}$$

Максимальная тормозная мощность:

$$P_{fr \max} = P_{f \max} (\eta_{bl} \cdot \eta \cdot \eta_{fc} \cdot \eta_{dv}) / \text{кол-во\_ПЧ} = 146,5 \cdot (0,87 \cdot 0,903 \cdot 0,98 \cdot 0,94) / 2 = 53 \text{ кВт}$$

где  $\eta_{bl}$  – КПД блоков подвески;

$\eta$  – КПД механизма;

$\eta_{fc}$  – КПД преобразователя частоты;

$\eta_{dv}$  – КПД двигателя

Постоянная мощность резистора, рассчитываемая с учетом цикла работы механизма:

$$Pr = \frac{Pfr \cdot t1 + (Pfr \max \cdot t) / 2}{tc} = \frac{41,25 \cdot 51 + (53 \cdot 2) / 2}{106} = 20,3 \text{ кВт},$$

где  $t1$  - время спуска груза;

$t$  - время торможения при спуске груза;

$tc$  - время цикла подъем/спуск (за основу взяли самый нагруженный вариант — подъем/спуск номинального груза, высота подъема 15м, при скорости подъема/спуска 0,28 м/с время подъема/спуска 53 с)

Значение выбранного сопротивления не должно быть больше:

$$R \max = \frac{Udc^2}{Pfr \max} = \frac{774^2}{30750} = 19,5 \text{ Ом}$$

В итоге, необходим резистор с сопротивлением в диапазоне 3,3 - 19,5 Ом с постоянной мощностью 20,3 кВт при условии, что резистор рассеет 41 кВт в течение 51 с и 53 кВт в течение 2 с

Выбираем резистор (3) типа VW3 A7 805 с параметрами:

Сопротивление, Ом 8,1

Средняя мощность, кВт 44

#### 4.2. Механизм передвижения тележки

Тормозная мощность тележки определяется по формуле:

$$Pf = \frac{(Q1 + Jt) \cdot V^2}{2 \cdot t} = \frac{(32000 + 31200) \cdot 1^2}{2 \cdot 3} = 10533 \text{ Вт} = 11 \text{ кВт}$$

Требуемая тормозная мощность равна:

$$Pfr = Pf \cdot (\eta \cdot \eta fc \cdot \eta dv) / \text{кол-во\_ПЧ} = 11 \cdot (0,85 \cdot 0,98 \cdot 0,87) / 1 = 8 \text{ кВт}$$

Постоянная мощность резистора, рассчитываемая с учетом цикла работы механизма:

$$Pr = \frac{Pfr \cdot t}{tc} = \frac{8 \cdot 3}{20} = 1,2 \text{ кВт}$$

где  $t$  - время торможения тележки;

$tc$  - время цикла передвижения тележки (за основу взяли режим передвижения тележки на величину половины пролета 17 м, при скорости передвижения 0,85 м/с время передвижения 20 с)

Значение выбранного сопротивления не должно быть больше:

$$R \max = \frac{Udc^2}{Pfr \max} = \frac{774^2}{3470 \cdot 2} = 86 \text{ Ом}$$

В итоге, необходим резистор с сопротивлением в диапазоне 12 - 86 Ом с постоянной мощностью 1,2 кВт при условии, что резистор рассеет 8 кВт в течение 3 с

Выбираем два резистора (соединенных последовательно) типа VW3 A7 704 с параметрами:

Сопротивление, Ом 15

Средняя мощность, кВт 1

Рассеиваемая мощность за 5 с, кВт 8

#### 4.3. Механизм передвижения моста

Тормозная мощность моста определяется по формуле:

$$Pf = \frac{(Q1 + Jt + Jm / 2) \cdot V^2}{2 \cdot t} = \frac{(32000 + 31200 + 114200 / 2) \cdot 1,66^2}{2 \cdot 5} = 33149 \text{ Вт} = 33 \text{ кВт}$$

Требуемая тормозная мощность равна:

$$P_{fr} = P_f \cdot (\eta \cdot \eta_{fc} \cdot \eta_{dv}) / \text{кол-во\_ПЧ} = 33 \cdot (0,85 \cdot 0,98 \cdot 0,9) / 1 = 24,7 \text{ кВт}$$

Постоянная мощность резистора, рассчитываемая с учетом цикла работы механизма:

$$P_r = \frac{P_{fr} \cdot t}{tc} = \frac{24,7 \cdot 5}{20} = 6,2 \text{ кВт},$$

где  $t$  – время торможения тележки;

$tc$  - время цикла передвижения тележки (за основу взяли режим передвижения крана: 5 с – разгон, 10 с – постоянная скорость, 5 с - торможение)

Значение выбранного сопротивления не должно быть больше:

$$R_{max} = \frac{U_{dc}^2}{P_{fr \max}} = \frac{774^2}{7950 \cdot 2} = 37,6 \text{ Ом}$$

В итоге, необходим резистор с сопротивлением в диапазоне 6,7 - 37,6 Ом с постоянной мощностью 6,2 кВт при условии, что резистор рассеет 24,7 кВт в течение 5 с.

Выбираем резистор типа VW3 A7 804 с параметрами:

Сопротивление, Ом	14
Средняя мощность, кВт	22,4
Рассеиваемая мощность за 10 с, кВт	25

## Список литературы

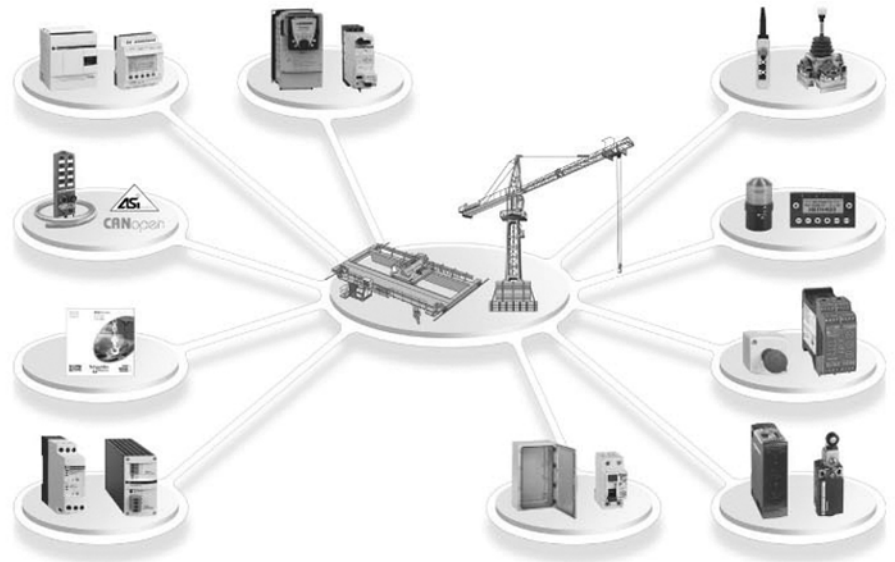
1. Порядок выбора асинхронных двигателей. Sew Eurodrive
2. Асинхронные двигатели. ВЭМЗ
3. Преобразователи частоты Altivar 71 для асинхронных двигателей мощностью от 0,37 до 500 кВт. Каталог. Декабрь 2006





Компания *Schneider Electric* производит широкий спектр современных средств автоматизации и электрооборудования, предназначенных для применения в системах управления подъемно-транспортным оборудованием:

- Программируемые логические контроллеры и средства распределенного ввода/вывода;
- Средства человеко-машинного интерфейса и супервизорного управления (SCADA);
- Преобразовательная техника для электродвигателей переменного тока;
- Пускозащитная и коммутационная аппаратура;
- Датчики и концевые выключатели;
- Корпуса аппаратных шкафов и устройства для их вентиляции и обогрева.



\* Вся продукция отвечает международным требованиям по безопасности и гарантирует оптимальное функционирование подъемных механизмов

# Преобразователи частоты **Altivar 71** К НОВЫМ *ВЫСОТАМ*

*Подъемно-транспортное оборудование  
Скорость и безопасность*

- **Управление тормозом**, адаптированное для приводов перемещения, подъема и поворота с целью исключения ударов.
- **Измерение нагрузки** с помощью весового датчика: обеспечение плавности хода при снятии тормоза.
- **Подъем с повышенной скоростью:** оптимизация циклограммы работы при небольшой нагрузке.
- **Контроль состояния тормоза:** определение неисправности тормоза.
- **Управление с помощью концевых выключателей:** контроль траектории движения механизма.
- **И много других возможностей:** импульс снятия тормоза, управление окончанием хода, выравнивание нагрузки, управление моментом, переключение двигателей и конфигураций.

*Типы кранов:*

- мостовые;
- козловые;
- порталные.



## Schneider Electric в странах СНГ

### Азербайджан

**Баку**  
AZ 1008, ул. Гарабах, 22  
Тел.: (99412) 496 93 39  
Факс: (99412) 496 22 97

### Беларусь

**Минск**  
220004, пр-т Победителей, 5, офис 502  
Тел.: (37517) 203 75 50  
Факс: (37517) 203 97 61

### Казахстан

**Алматы**  
050050, ул. Табачнозаводская, 20  
Швейцарский Центр  
Тел.: (327) 295 44 20  
Факс: (327) 295 44 21

### Россия

**Воронеж**  
394000, ул. Степана Разина, 38  
Тел.: (4732) 39 06 00  
Тел./факс: (4732) 39 06 01

### Екатеринбург

620219, ул. Первомайская, 104  
Офисы 311, 313  
Тел.: (343) 217 63 37, 217 63 38  
Факс: (343) 349 40 27

### Иркутск

664047, ул. Советская, 3 Б, офис 312  
Тел./факс: (3952) 29 00 07

### Казань

420107, ул. Спартакoвская, 6, этаж 7  
Тел.: (843) 526 55 84, 526 55 85, 526 55 86,  
526 55 87, 526 55 88

### Калининград

236040, Гвардейский пр., 15  
Тел.: (4012) 53 59 53  
Факс: (4012) 57 60 79

### Краснодар

350020, ул. Коммунаров, 268  
Офисы 316, 314  
Тел./факс: (861) 210 06 38, 210 06 02

### Москва

129281, ул. Енисейская, 37  
Тел.: (495) 797 40 00  
Факс: (495) 797 40 02

### Нижний Новгород

603000, пер. Холодный, 10 А, офис 1.5  
Тел.: (8312) 78 97 25  
Тел./факс: (8312) 78 97 26

### Новосибирск

630005, Красный пр-т, 86, офис 501  
Тел.: (383) 358 54 21, 227 62 54  
Тел./факс: (383) 227 62 53

### Самара

443096, ул. Коммунистическая, 27  
Тел./факс: (846) 266 50 08, 266 41 41, 266 41 11

### Санкт-Петербург

198103, ул. Циолковского, 9, корпус 2 А  
Тел.: (812) 320 64 64  
Факс: (812) 320 64 63

### Уфа

450064, ул. Мира, 14, офисы 518, 520  
Тел.: (347) 279 98 29  
Факс: (347) 279 98 30

### Хабаровск

680011, ул. Металлистов, 10, офис 4  
Тел.: (4212) 78 33 37  
Факс: (4212) 78 33 38

### Туркменистан

**Ашгабат**  
744017, Мир 2/1, ул. Ю. Эмре, «Э.М.Б.Ц.»  
Тел.: (99312) 45 49 40  
Факс: (99312) 45 49 56

### Украина

**Днепропетровск**  
49000, ул. Глинки, 17, 4 этаж  
Тел.: (380567) 90 08 88  
Факс: (380567) 90 09 99

### Донецк

83023, ул. Лабутенко, 8  
Тел./факс: (38062) 345 10 85, 345 10 86

### Киев

04070, ул. Набережно-Крещатицкая, 10 А  
Корпус Б  
Тел.: (38044) 490 62 10  
Факс: (38044) 490 62 11

### Львов

79000, ул. Грабовского, 11, к. 1, офис 304  
Тел./факс: (380322) 97 46 14

### Николаев

54030, ул. Никольская, 25  
Бизнес-центр «Александровский», офис 5  
Тел./факс: (380512) 48 95 98

### Одесса

65079, ул. Куликово поле, 1, офис 213  
Тел./факс: (38048) 728 65 55

### Симферополь

95013, ул. Севастопольская, 43/2, офис 11  
Тел./факс: (380652) 44 38 26

### Харьков

61070, ул. Ак. Проскуры, 1  
Бизнес-центр «Telesens», офис 569  
Тел.: (380577) 19 07 49  
Факс: (380577) 19 07 79



### ЦЕНТР ПОДДЕРЖКИ КЛИЕНТОВ

Тел.: 8 (800) 200 64 46 (многоканальный)  
(495) 797 32 32  
Факс: (495) 797 40 02  
ru.csc@ru.schneider-electric.com  
www.schneider-electric.ru