



**Проектирование приводов**

**Издание  
11/2001**

**Практика приводной техники**

**1052 3057 / RU**





	1	Введение .....	6	<b>1</b>
	2	Электропривод переменного тока с фиксированной частотой вращения .....	9	<b>2</b>
	3	Электропривод переменного тока с преобразователем частоты .....	26	<b>3</b>
	4	Сервопривод.....	33	<b>4</b>
	5	Электропривод переменного тока с механическим вариатором .....	39	<b>5</b>
	6	Редукторы.....	46	<b>6</b>
	7	Формулы приводной техники .....	56	<b>7</b>
	8	Пример расчета привода транспортного устройства.....	65	<b>8</b>
	9	Пример расчета привода подъемного устройства.....	92	<b>9</b>
	10	Пример расчета привода цепного конвейера с преобразователем частоты.....	103	<b>10</b>
	11	Пример расчета привода роликового конвейера с преобразователем частоты.....	107	<b>11</b>
	12	Пример расчета привода поворотного стола.. ..	112	<b>12</b>
	13	Пример расчета привода ленточного конвейера.....	117	<b>13</b>
	14	Пример расчета привода кривошипно-шатунного механизма .....	122	<b>14</b>
	15	Пример расчета привода ходового винта.....	126	<b>15</b>
	16	Пример расчета сервоприводов портального подъемника .....	131	<b>16</b>
	17	Приложение: таблицы и пояснения к условным обозначениям .....	148	<b>17</b>
	18	Алфавитный указатель .....	153	<b>18</b>



<b>1</b>	<b>Введение .....</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Электропривод переменного тока с фиксированной частотой вращения.....</b>	<b>9</b>
2.1	Принцип работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором .....	9
2.2	Номинальные параметры асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.....	11
2.3	Режимы работы по стандарту IEC 34 (EN 60034) .....	14
2.4	КПД $\eta$ , коэффициент мощности $\cos \varphi$ и температурный класс изоляции.....	15
2.5	Степень защиты .....	17
2.6	Защита обмотки .....	18
2.7	Выбор параметров двигателя .....	19
2.8	Плавный пуск и плавное переключение числа полюсов .....	20
2.9	Двигатели с тормозом .....	23
<b>3</b>	<b>Электропривод переменного тока с преобразователем частоты .....</b>	<b>26</b>
3.1	Преобразователи частоты .....	27
3.2	Мотор-редукторы MOVIMOT® со встроенным преобразователем частоты .....	27
3.3	Работа двигателя от преобразователя частоты .....	28
3.4	Проектирование приводов с преобразователями частоты SEW .....	30
<b>4</b>	<b>Сервопривод.....</b>	<b>33</b>
4.1	Серводвигатели .....	34
4.2	Сервопреобразователи MOVIDYN® .....	36
4.3	Приводные преобразователи MOVIDRIVE® и MOVIDRIVE® compact.....	37
4.4	Блок-схема проектирования.....	38
<b>5</b>	<b>Электропривод переменного тока с механическим вариатором .....</b>	<b>39</b>
5.1	Описание.....	39
5.2	Расчет параметров мотор-редуктора с вариатором .....	40
<b>6</b>	<b>Редукторы.....</b>	<b>46</b>
6.1	Редукторы в стандартном исполнении для мотор-редукторов .....	46
6.2	Выбор параметров для редукторов в стандартном исполнении с учетом эксплуатационного коэффициента .....	49
6.3	Редукторы для сервоприводов.....	52
6.4	Внешние радиальные и осевые нагрузки .....	54
<b>7</b>	<b>Формулы приводной техники .....</b>	<b>56</b>
7.1	Основные виды движения .....	56
7.2	Моменты инерции.....	58
7.3	Статическая и динамическая мощность .....	60
7.4	Силы сопротивления.....	61
7.5	Вращающий момент.....	62
7.6	Мощность .....	62
7.7	КПД.....	62
7.8	Расчет движения ходового винта .....	63
7.9	Специальные формулы.....	64



<b>8</b>	<b>Пример расчета привода транспортного устройства.....</b>	<b>65</b>
8.1	Расчет параметров двигателя.....	66
8.2	Расчет параметров редуктора .....	73
8.3	Привод транспортного устройства с 2-скоростным двигателем.....	75
8.4	Привод транспортного устройства с преобразователем частоты ...	81
<b>9</b>	<b>Пример расчета привода подъемного устройства.....</b>	<b>92</b>
9.1	Двигатель с переключением числа полюсов .....	93
9.2	Двигатель с преобразователем частоты.....	97
<b>10</b>	<b>Пример расчета привода цепного конвейера с преобразователем частоты.....</b>	<b>103</b>
10.1	Расчет параметров двигателя.....	104
10.2	Расчет параметров редуктора .....	106
<b>11</b>	<b>Пример расчета привода роликового конвейера с преобразователем частоты.....</b>	<b>107</b>
11.1	Расчет параметров двигателя.....	108
<b>12</b>	<b>Пример расчета привода поворотного стола с преобразователем частоты.....</b>	<b>112</b>
12.1	Расчет параметров двигателя.....	113
12.2	Расчет параметров редуктора .....	116
<b>13</b>	<b>Пример расчета привода ленточного конвейера.....</b>	<b>117</b>
13.1	Расчет параметров двигателя.....	119
13.2	Расчет параметров редуктора и вариатора.....	121
<b>14</b>	<b>Пример расчета привода кривошипно-шатунного механизма .....</b>	<b>122</b>
14.1	Расчет параметров двигателя.....	124
<b>15</b>	<b>Пример расчета привода ходового винта.....</b>	<b>126</b>
15.1	Расчет.....	127
15.2	Проверочный расчет .....	128
<b>16</b>	<b>Пример расчета сервоприводов портального подъемника .....</b>	<b>131</b>
16.1	Оптимизация диаграмм рабочего цикла.....	132
16.2	Расчет мощности.....	134
16.3	Расчет параметров редукторов .....	136
16.4	Выбор двигателей .....	139
16.5	Выбор приводной электроники .....	143
<b>17</b>	<b>Приложение: таблицы и пояснения к условным обозначениям .....</b>	<b>148</b>
17.1	Таблицы.....	148
17.2	Пояснения к условным обозначениям.....	150
<b>18</b>	<b>Алфавитный указатель .....</b>	<b>153</b>

## 1 Введение

### **Корпорация SEW-EURODRIVE**

SEW-EURODRIVE – это одна из ведущих компаний на мировом рынке электроприводной техники. Полный ассортимент продукции и широкий спектр услуг делают эту компанию идеальным партнером для предприятий, нуждающихся в приводных системах различного назначения.

Штаб-квартира корпорации расположена в Брухзале, Германия. Основу глобального присутствия составляют производственные мощности в Германии, Франции, США, Бразилии и Китае. Приводы комплектуются из готовых компонентов на сборочных предприятиях в более чем 30 промышленно развитых странах мира. Близость сборочного предприятия к заказчику обеспечивает очень короткие сроки поставки приводных систем индивидуальной комбинации с постоянно высоким качеством. Торговые филиалы, технические бюро, центры обслуживания и поставки запасных частей можно найти в более чем 60 странах мира.

### **Ассортимент продукции**

- Мотор-редукторы и редукторы:
  - цилиндрические редукторы (до 18 000 Нм);
  - плоские цилиндрические редукторы (до 18 000 Нм);
  - конические редукторы (до 50 000 Нм);
  - угловые редукторы Spiroplan® (до 70 Нм);
  - червячные редукторы (до 4200 Нм);
  - низколюфтовые планетарные редукторы (до 3000 Нм);
  - планетарно-цилиндрические и планетарно-конические редукторы (до 415 000 Нм);
  - редукторы с параллельными валами (до 65 000 Нм).
- Двигатели с тормозом (до 75 кВт)
- Асинхронные серводвигатели (до 200 Нм)
- Синхронные серводвигатели (до 47 Нм)
- Взрывозащищенные приводные системы по стандарту ATEX 100a
- Мотор-редукторы MOVIMOT® со встроенным преобразователем частоты
- Мотор-редукторы MOVI-SWITCH® с интегрированной функцией автоматического выключения и защиты
- Преобразователи частоты MOVITRAC®, MOVIDRIVE® и MOVIDYN® для плавного регулирования частоты вращения стандартных электроприводов переменного тока и сервоприводов
- Мотор-редукторы с механическими вариаторами VARIBLOC® (до 45 кВт) и VARIMOT® (до 11 кВт)

### **Фиксированная или изменяемая частота вращения**

Если привод должен обеспечивать одну или две ступени частоты вращения, то трехфазный двигатель мотор-редуктора (односкоростной или с переключением числа полюсов) может работать непосредственно от сети переменного тока. Если требуется более двух ступеней частоты вращения или ее плавное изменение, то используются приводы с электронным управлением от преобразователей MOVITRAC®, MOVIDRIVE®, MOVIMOT® и MOVIDYN®. В системах с малым диапазоном регулирования (до 1:8) находят применение приводы с механической регулировкой скорости VARIBLOC® и VARIMOT®.

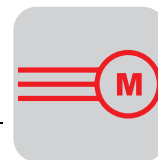
<b>Регулирование</b>	<p>Путем интеграции привода в контур регулирования можно получить приводную систему с электронным управлением. Преимущества таких приводных систем – это большой пусковой момент, особые характеристики разгона и замедления, защита от перегрузок посредством ограничения вращающего момента и тока, многоквadrанный режим работы и т. д. Кроме того, приводы с электронным управлением от преобразователей MOVITRAC®, MOVIDYN® или MOVIDRIVE® можно использовать для работы в синхронном режиме, в режиме позиционирования или в составе системы автоматизации с управлением через сетевой обмен данными.</p>
<b>Условия эксплуатации</b>	<p>Стандартные асинхронные двигатели переменного тока и серводвигатели (с редуктором или без него) имеют простую и прочную конструкцию и высокую степень защиты. Благодаря этому даже при длительной эксплуатации в самых сложных условиях они обеспечивают безопасность и надежность приводной системы. Однако в любом случае решающим фактором успеха являются точное знание и соблюдение условий эксплуатации.</p>
<b>Техническое обслуживание</b>	<p>Стандартные двигатели переменного тока и серводвигатели могут годами работать исправно, не нуждаясь в техническом обслуживании. Обслуживание редукторов ограничивается регулярным контролем уровня и свойств масла и его периодической заменой. При этом следует правильно выбирать марку (разрешенную к применению компанией SEW) и учитывать необходимое количество масла. Запасные части к приводам SEW имеются на складах во всех экономически развитых странах мира.</p>
<b>Проектирование</b>	<p>При существующем огромном разнообразии процессов движения в производстве, кажется, невозможно найти два одинаковых варианта привода. Однако в действительности все варианты привода можно свести к трем стандартным решениям:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>– линейное движение по горизонтали;</li><li>– линейное движение по вертикали;</li><li>– вращательное движение.</li></ul> <p>Сначала записывают данные нагрузки, такие как масса, момент инерции, скорость, усилия, количество включений в час, время работы, размеры шестерен и валов. Исходя из этих данных, рассчитывают потребление мощности с учетом коэффициента полезного действия (КПД) и определяют необходимую частоту вращения выходного вала. По результатам этих расчетов, учитывая конкретные условия эксплуатации, определяют необходимый мотор-редуктор по соответствующему каталогу SEW. При этом тип мотор-редуктора выбирается в соответствии с указанными ниже критериями. Поскольку эксплуатационные характеристики этих мотор-редукторов различаются, в следующих главах они представлены отдельно.</p> <p>Рассматриваются приводы следующих типов:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>– электропривод переменного тока с одной или несколькими фиксированными ступенями частоты вращения;</li><li>– электропривод переменного тока с преобразователем частоты;</li><li>– сервопривод;</li><li>– электропривод переменного тока с механическим вариатором;</li><li>– типы редукторов.</li></ul>

**Программа  
проектирования  
ProDrive**

Программа проектирования ProDrive компании SEW предназначена для быстрого и эффективного выбора привода SEW со всеми необходимыми данными для оценки возможности применения. Для этого в качестве базы данных используется обширная информация электронного каталога EKAT компании SEW.

Пользователь может выбирать между нерегулируемым и регулируемым электроприводом переменного тока и сервоприводом. Для выбора понижающего редуктора предусмотрены цилиндрические, плоские цилиндрические, конические, червячные, планетарные редукторы и редукторы Spiroplan®. Кроме того, можно подобрать соответствующий преобразователь частоты и необходимое для него дополнительное оборудование.

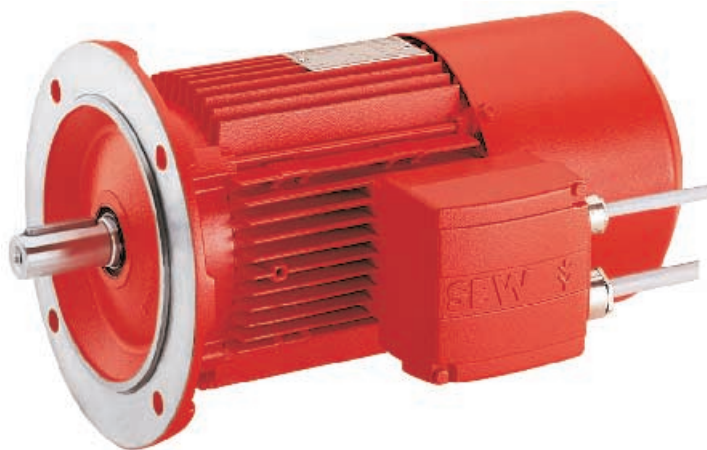




## 2 Электропривод переменного тока с фиксированной частотой вращения

Полная информация по асинхронным двигателям DR/DT/DV с короткозамкнутым ротором содержится в каталогах "Geared Motors" ("Мотор-редукторы") и "Multi-speed Geared Motors" ("Мотор-редукторы с переключением числа полюсов").

2



00624AXX

Рис. 1. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором

### 2.1 Принцип работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Благодаря простой конструкции, высокой надежности и выгодной цене асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором является наиболее распространенным электродвигателем.

#### Пусковая характеристика

Пусковая характеристика двигателя описывается через его механическую характеристику. При разгоне асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором изменяется сопротивление обмотки ротора, а следовательно в зависимости от частоты вращения (от величины скольжения) изменяется и вращающий момент.

#### Двигатели с переключением числа полюсов

На Рис. 2 показаны кривые механической характеристики двигателя с переключением числа полюсов. Переключение числа полюсов – это самый дешевый способ изменения частоты вращения привода, поэтому такие мотор-редукторы часто используются в приводных системах подъемно-транспортного оборудования. При этом высокая частота вращения используется для быстрого хода, а низкая – для позиционирования.

Табл. 1. Наиболее распространенные двигатели с переключением числа полюсов

Число полюсов	Синхронная частота вращения при 50 Гц [об/мин]	Схема включения
4/2	1500/3000	$\Delta$ / $\text{Y}$ (схема Даландера)
8/2	750/3000	$\text{Y}$ / $\text{Y}$ (раздельные обмотки)
6/4	1000/1500	$\text{Y}$ / $\text{Y}$ (раздельные обмотки)
8/4	750/1500	$\Delta$ / $\text{Y}$ (схема Даландера)



## Рабочая точка

При каждом разгоне двигатель проходит эту механическую характеристику до стабильной рабочей точки, в которой кривая момента нагрузки пересекается с кривой момента двигателя. Стабильная рабочая точка достигается в том случае, если момент нагрузки меньше пускового или минимального пускового момента (в седловине).

## Момент двигателя при переключении пар полюсов

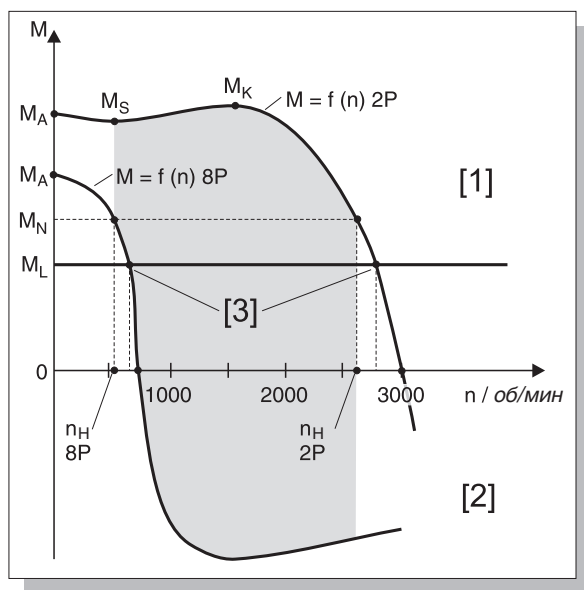
При переключении обмотки статора с 2-полюсного на 8-полюсное включение частота вращения не сразу снижается до синхронной, и двигатель кратковременно работает в генераторном режиме. За счет преобразования кинетической энергии в электрическую торможение от высокой частоты вращения до низкой выполняется без потерь мощности и износа деталей. При этом торможении достигается вращающий момент, величина которого в первом приближении рассчитывается по следующей формуле:

$$M_U \approx (2 \dots 2.5) \cdot M_{A1}$$

$M_U$  = момент при переключении пар полюсов

$M_{A1}$  = пусковой момент двигателя с включением обмотки для меньшей частоты вращения

Момент при переключении пар полюсов  $M_U$  – это средняя разность характеристик для 2-полюсного и 8-полюсного включения обмотки в диапазоне частоты вращения, ограниченном соответствующими номинальными значениями (заштрихованная область).



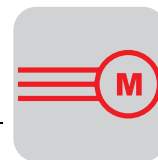
00625BRU

Рис. 2. Механическая характеристика асинхронного двигателя с переключением числа полюсов

$M_{A1}$	= пусковой момент (8-полюсное включение)	[1]	= двигательный режим
$M_{A2}$	= пусковой момент (2-полюсное включение)	[2]	= генераторный режим (торможение)
$M_S$	= минимальный пусковой момент	[3]	= стабильная рабочая точка
$M_K$	= опрокидывающий момент	2P	= 2-полюсное включение обмотки
$M_N$	= номинальный момент	8P	= 8-полюсное включение обмотки
$M_L$	= момент нагрузки		

## Устройство плавного переключения числа полюсов

Для снижения броска момента при переключении пар полюсов используются электронные устройства плавного переключения числа полюсов типа WPU.



## 2.2 Номинальные параметры асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

<b>SEW-EURODRIVE</b>		Bruchsal / Germany			
Typ	DFV 160 M 4 / BM			3 ~ IEC 34	
Nr.	01.3001234568.0001.00			IM	B5
kW	11 S1			cos φ	0.83
50Hz V	220 - 240 Δ / 380 - 415 Y			A	39.0 / 22.5
60Hz V	240 - 266 Δ / 415 - 460 Y			A	35.5 / 20.5
r/min	1440 / 1740			IP	55 KL F
Bremse V	230 AC			Nm	150
Kg	109			Gleichrichter	BGE1.5
Schmierstoff				Made in Germany	184 103 3.16

03214AXX

Рис. 3. Заводская табличка двигателя

Индивидуальные параметры асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:

- типоразмер;
- номинальная мощность;
- режим работы;
- номинальная частота вращения;
- номинальный ток;
- номинальное напряжение;
- коэффициент мощности  $\cos \varphi$ ;
- степень защиты;
- температурный класс изоляции.

Эти и, возможно, некоторые другие данные указаны на заводской табличке двигателя. По стандарту IEC 34 (EN 60034) данные заводской таблички относятся к температуре окружающей среды 40 °C и высоте не более 1000 м над уровнем моря.

### Число полюсов

Для работы с фиксированной частотой вращения наиболее часто используются 4-полюсные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, поскольку 2-полюсные двигатели более шумные и сокращают срок службы редуктора. Двигатели той же мощности, имеющие большее число полюсов (6-, 8-полюсные и т. д.), требуют увеличения типоразмера и менее рентабельны (низкий КПД, неблагоприятный коэффициент мощности  $\cos \varphi$ , высокая цена).

В следующей таблице указаны значения синхронной частоты вращения двигателей с различным числом полюсов при 50 и 60 Гц.

Табл. 2. Синхронная частота вращения  $n_s$  при 50 и 60 Гц

Число полюсов	2	4	6	8	12	16	24
$n_s$ (об/мин при 50 Гц)	3000	1500	1000	750	500	375	250
$n_s$ (об/мин при 60 Гц)	3600	1800	1200	900	600	450	300



## Скольжение

Номинальная частота вращения двигателя  $n_N$  при номинальной мощности в двигательном режиме всегда меньше синхронной частоты вращения  $n_S$ . Скольжение – это разность синхронной и фактической частот вращения, его величина определяется следующим образом:

$$S = \frac{n_S - n_N}{n_S} \cdot 100 \%$$

$S$  = скольжение [%]

$n_S$  = синхронная частота вращения [об/мин]

$n_N$  = номинальная частота вращения [об/мин]

Для приводов малой номинальной мощности (например, 0,25 кВт) скольжение составляет ок. 10 %, для приводов большей номинальной мощности (например, 15 кВт) – ок. 3 %.

## Снижение мощности

Номинальная мощность  $P_N$  двигателя зависит от температуры окружающей среды и высоты над уровнем моря. Номинальная мощность, указанная на заводской табличке, действительна при температуре окружающей среды до 40 °C и высоте не более 1000 м над уровнем моря. При отклонениях от этих данных номинальную мощность следует снизить, пересчитав ее по следующей формуле:

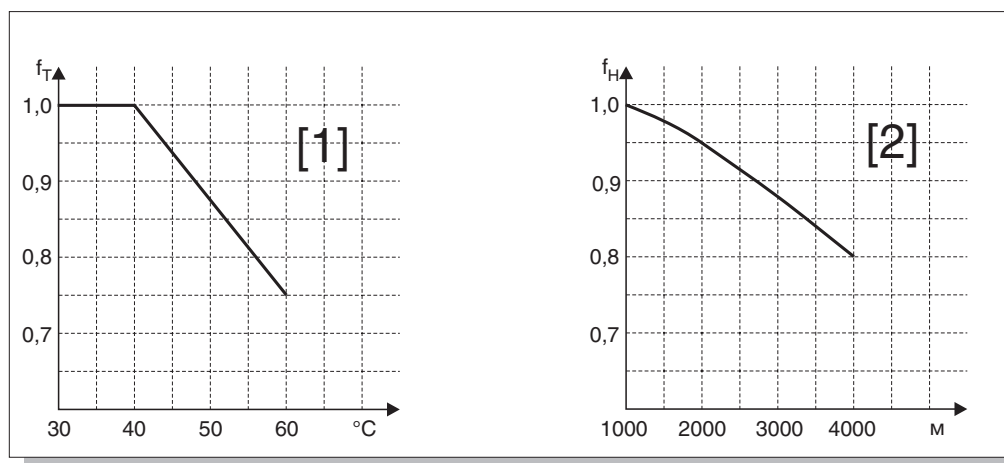
$$P_{N1} = P_N \cdot f_T \cdot f_H$$

$P_{N1}$  = сниженная номинальная мощность [кВт]

$P_N$  = номинальная мощность [кВт]

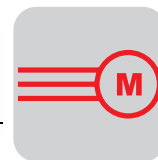
$f_T$  = температурный коэффициент пересчета

$f_H$  = высотный коэффициент пересчета



00627CRU

Рис. 4. Снижение мощности в зависимости от температуры окружающей среды [1] и высоты над уровнем моря [2]



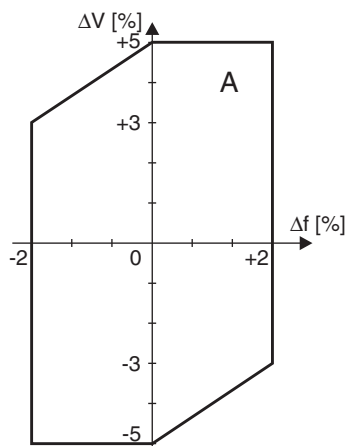
## Допуски

Стандарт IEC 34 (EN 60034) устанавливает следующие допуски для электродвигателей, работающих при номинальном напряжении. Эти допуски действительны и в том случае, если вместо определенного значения указан диапазон номинального напряжения.

Напряжение и частота:		Допуск А
КПД $\eta$ :	при $P_N \leq 50$ кВт:	$-0,15 \times (1 - \eta)$
	при $P_N > 50$ кВт:	$-0,1 \times (1 - \eta)$
Коэффициент мощности $\cos \varphi$ :		$-(1 - \cos \varphi) / 6$
Скольжение S:	при $P_N < 1$ кВт:	$\pm 30 \%$
	при $P_N \geq 1$ кВт:	$\pm 20 \%$
Пусковой ток $I_A$ :		$+20 \%$
Пусковой момент $M_A$ :		$-15...+25 \%$
Опрокидывающий момент $M_K$ :		$-10 \%$
Момент инерции $M_M$ :		$\pm 10 \%$

## Допуск А

Допуск А – это допустимый диапазон, в пределах которого частота и напряжение могут отклоняться от соответствующих номинальных значений. Этот диапазон показан на следующем графике. Началом координат "0" обозначены соответствующие номинальные значения частоты и напряжения.



03210AXX

Рис. 5. Диапазон допуска А

## Просадка напряжения / Недостаточные параметры

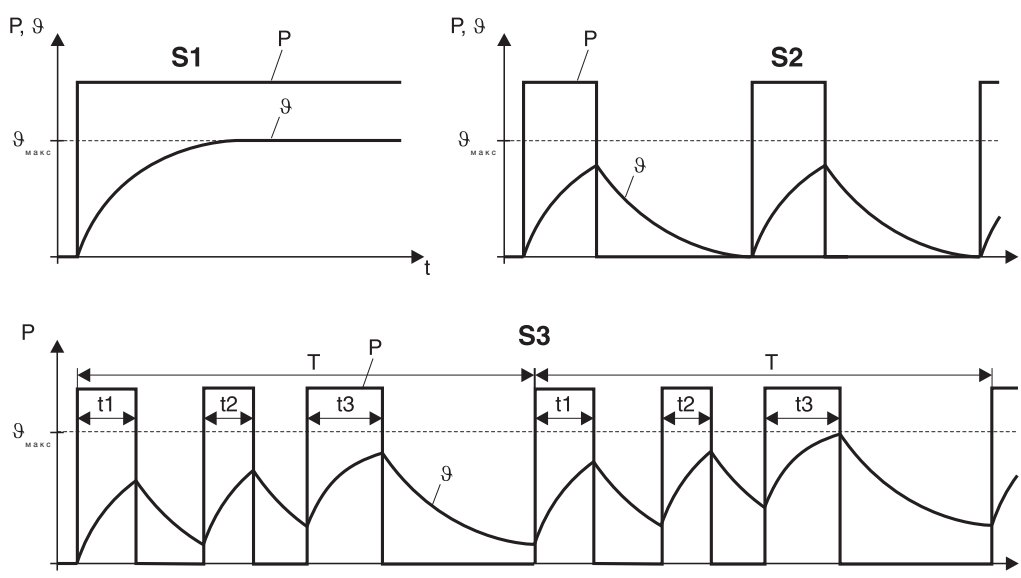
Такие номинальные параметры, как мощность, вращающий момент и частота вращения, невозможно поддерживать на заданном уровне в случае просадки напряжения, обусловленной низкой мощностью сети или недостаточным сечением кабеля питания двигателя. В особенности это относится к случаю запуска двигателя, при котором пусковой ток превышает номинальный в несколько раз.



## 2.3 Режимы работы по стандарту IEC 34 (EN 60034)

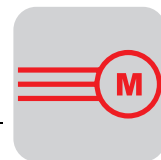
Номинальная мощность всегда зависит от режима работы и продолжительности включения.

- S1** Двигатели стандартного исполнения рассчитаны на продолжительный режим работы S1: эксплуатация в режиме постоянной нагрузки, длительности которого достаточно для работы двигателя в условиях стабильного теплового режима.
- S2** Кратковременный режим S2: эксплуатация в режиме постоянной нагрузки в течение определенного ограниченного периода времени, сопровождаемого паузой с остыванием двигателя до температуры окружающей среды.
- S3** Старт-стопный режим S3: без влияния процесса включения на степень нагрева. Выражается через "относительную продолжительность включения (ПВ)" [%]. Режим S3 идентифицируется как последовательность одинаковых циклов, состоящих из периода работы с постоянной нагрузкой и паузы, при которой двигатель не работает.
- S4** Старт-стопный режим S4: с влиянием процесса включения на степень нагрева, выражается через относительную продолжительность включения (ПВ) и количество включений в час.
- S5 - S10** Дополнительные режимы работы S5...S10: условия отчасти аналогичны условиям режимов S1...S4.



03135ARU

Рис. 6. Режимы работы S1 / S2 / S3



**Увеличение номинальной мощности**

Если двигатель, рассчитанный на работу в режиме S1 (ПВ = 100 %), должен работать с меньшей продолжительностью включения, то в качестве номинальной мощности можно взять большее значение, рассчитав его по следующей таблице.

Табл. 3. Коэффициент увеличения мощности K

Режим работы			Коэффициент увеличения мощности K
S2	Время работы	60 мин	1,1
		30 мин	1,2
		10 мин	1,4
S3	Относительная продолжительность включения (ПВ)	60 %	1,1
		40 %	1,15
		25 %	1,3
		15 %	1,4
S4...S10	Для определения номинальной мощности и режима работы необходимо учитывать следующие данные: количество и характер включений в час, время разгона, время работы под нагрузкой, способ торможения, время торможения, время холостого хода, продолжительность цикла, время простоя и потребление мощности.		По запросу

**Относительная продолжительность включения (ПВ)**

Отношение времени работы под нагрузкой к продолжительности цикла (продолжительность цикла = сумма периодов включенного состояния и пауз без подачи напряжения). Максимальная продолжительность цикла составляет 10 минут.

$$ПВ = \frac{\sum t_e}{t_s} \cdot 100 [\%]$$

ED = ПВ = относительная продолжительность включения [%]  
 $\sum t_e$  = сумма периодов включенного состояния [с]  
 $t_s$  = продолжительность цикла [с]

**2.4 КПД  $\eta$ , коэффициент мощности  $\cos \varphi$  и температурный класс изоляции**

По стандарту EN 60034 на заводской табличке двигателя в качестве номинальной мощности  $P_N$  указывают его выходную мощность, т. е. механическую мощность, создаваемую на валу двигателя. Двигатели большего типоразмера имеют более благоприятный КПД  $\eta$  и коэффициент мощности  $\cos \varphi$ , чем двигатели меньшего типоразмера. КПД и коэффициент мощности изменяются и в зависимости от степени использования двигателя, а именно, снижаются при работе в режиме неполной нагрузки.

Полная мощность

$$P_S = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_P$$

Активная мощность

$$P_1 = P_S \cdot \cos \varphi$$

Номинальная мощность

$$P_N = P_1 \cdot \eta$$

$U_1$  = напряжение сети [В]  
 $I_P$  = фазный ток [А]



## Температурная классификация изоляции по стандарту EN 60034

В настоящее время наиболее распространены двигатели с изоляцией обмотки по классу В. Температура обмотки этих двигателей не должна повышаться более, чем на 80 K (при температуре окружающей среды до 40 °C). Температурная классификация изоляции обмотки двигателей регламентируется стандартом EN 60034-1. Все двигатели SEW с переключением числа полюсов и отдельными обмотками в стандартном исполнении имеют температурный класс изоляции F. В следующей таблице приводятся допустимые значения повышения температуры согласно EN 60034-1.

Табл. 4. Температурные классы изоляции

Температурный класс изоляции	Макс. допуст. повышение температуры при температуре охл. воздуха 40 °C	Температура отключения ПТК-термисторов
<b>B</b>	80 K	130 °C
<b>F</b>	105 K	150 °C
<b>H</b>	125 K	170 °C

## Определение температуры обмотки

При наличии соответствующего омметра повышение температуры двигателя с медной обмоткой можно определить по увеличению сопротивления.

$$\vartheta_2 - \vartheta_{a2} = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (235 + \vartheta_1) + \vartheta_1 - \vartheta_{a1}$$

$\vartheta_1$  = температура холодной обмотки [°C]  
 $\vartheta_2$  = температура обмотки [°C] в конце измерения  
 $\vartheta_{a1}$  = температура охлаждающего воздуха [°C] в начале измерения  
 $\vartheta_{a2}$  = температура охлаждающего воздуха [°C] в конце измерения  
 $R_1$  = сопротивление холодной обмотки [Ом] (при  $\vartheta_1$ )  
 $R_2$  = сопротивление обмотки в конце измерения [Ом] (при  $\vartheta_2$ )

$\vartheta_a = \text{Const.}$

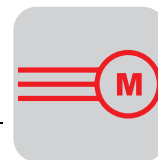
Влиянием температуры окружающей среды  $\vartheta_{a1}$  и  $\vartheta_{a2}$  можно пренебречь, если в ходе измерения она не изменяется. В этом случае формула упрощается:

$$\vartheta_2 = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (235 + \vartheta_1) + \vartheta_1$$

А если исходить из того, что температура холодной обмотки равна температуре окружающей среды, то повышение температуры определяется следующим образом:

$$\Delta\vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1$$





## 2.5 Степень защиты

Для работы в различных условиях окружающей среды – высокая влажность воздуха, агрессивная среда, брызги или струи воды, пыль и т. д. – двигатели и мотор-редукторы переменного тока с тормозом и без него выпускаются со степенью защиты IP54, IP55, IP56 и IP65 согласно EN 60034 (часть 5), EN 60529.

2

IP <sup>1)</sup>	1-я цифра кода Защита от попадания посторонних предметов	2-я цифра кода Защита от попадания воды
0	Нет защиты	Нет защиты
1	Защита от попадания посторонних предметов Ø 50 мм и более	Защита от водяных капель
2	Защита от попадания посторонних предметов Ø 12 мм и более	Защита от водяных капель под углом (до 15° от вертикали)
3	Защита от попадания посторонних предметов Ø 2,5 мм и более	Защита от водяных брызг
4	Защита от попадания посторонних предметов Ø 1 мм и более	Защита от сильных водяных брызг
5	Защита от пыли	Защита от водяных струй
6	Полная защита от пыли (пыленепроницаемый)	Защита от сильных водяных струй
7	-	Защита от попадания воды при кратковременном погружении
8	-	Защита от попадания воды при длительном погружении

1) IP = International Protection

Возможна усиленная антикоррозионная защита металлических узлов и дополнительная пропитка обмотки (защита от влаги и кислот), а также поставка взрывозащищенных двигателей по стандарту ATEX 100a с тормозом и без него.



## 2.6 Защита обмотки

Токовая или тепловая защита

Правильный выбор защитного устройства – это важный фактор в обеспечении безопасной эксплуатации двигателя. Различают защитные устройства, действующие в зависимости от величины тока и в зависимости от температуры двигателя. Токозависимые защитные устройства – это, например, плавкие предохранители или защитные автоматические выключатели. Термочувствительные защитные устройства – это ПТК-термисторы или биметаллические выключатели (термостаты) в обмотке двигателя.

Термочувствительные защитные устройства

Три ПТК-термистора TF расположены в обмотке двигателя. Они включены последовательно и подсоединяются от клеммной коробки к расцепителю в распределительном шкафу. Три<sup>1)</sup> биметаллических выключателя ТН также расположены в обмотке двигателя. Они подключены последовательно и подсоединяются от клеммной коробки непосредственно к схеме контроля двигателя. ПТК-термисторы или биметаллические выключатели срабатывают, если достигается максимально допустимая температура обмотки. Их преимуществом является измерение температуры непосредственно в месте ее повышения.

Плавкие предохранители

Предохранители не защищают двигатель от перегрузок. Они используются исключительно для защиты подводящих кабелей от короткого замыкания.

Защитные автоматические выключатели двигателя

Защитные автоматические выключатели обеспечивают достаточную защиту двигателя от перегрузки при работе в нормальном режиме с малым количеством включений, недолгими запусками и умеренным пусковым током. Защитные автоматические выключатели не следует использовать при работе в старт-стопном режиме с большим количеством включений ( $> 60$  вкл/ч<sup>2)</sup>) и при тяжелом запуске. Если тепловые постоянные времени двигателя и защитного выключателя не совпадают, то при настройке на номинальный ток двигателя выключатель может сработать слишком рано или не распознать режим перегрузки.

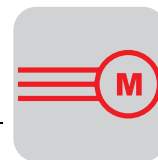
Возможности защитных устройств

В следующей таблице показаны возможности различных защитных устройств в зависимости от причины их срабатывания.

Табл. 5. Возможности защитных устройств

A = полная защита B = ограниченная защита C = нет защиты	Токозависимое защитное устройство		Термочувствительное защитное устройство	
	Предохранитель	Защитный автоматический выключатель	ПТК-термистор (TF)	Биметаллический выключатель (ТН)
Избыточный ток до 200 % $I_N$	C	A	A	A
Тяжелый запуск, реверсирование	C	B	A	B
Старт-стопный режим, до 60 вкл/ч <sup>2)</sup>	C	B	A	A
Опрокидывание	C	B	B	B
Обрыв фазы	C	B	A	A
Нестабильность напряжения	C	A	A	A
Нестабильность частоты	C	A	A	A
Недостаточное охлаждение двигателя	C	C	A	A
Повреждение подшипника	C	C	A	A

1. На двигателях с переключением числа полюсов и отдельными обмотками устанавливается шесть биметаллических выключателей.
2. Вкл/ч  $\triangleq$  количество включений в час



## 2.7 Выбор параметров двигателя

### Режим S1

Определяющим фактором в расчете параметров для режима S1 является момент нагрузки.

Номинальные параметры для любого двигателя задаются в зависимости от его тепловой нагрузки. В большинстве случаев эксплуатация подразумевает однократное включение двигателя (S1 = продолжительный режим работы = 100 % ПВ). Потребление мощности, рассчитанное по моменту нагрузки приводимого механизма, равняется номинальной мощности двигателя.

### Режим S3/S4

Определяющими факторами в расчете параметров для режимов S3 и S4 являются момент инерции и большое количество включений.

Эксплуатация с большим количеством включений и низким моментом нагрузки, наиболее часто встречается, например, в приводах транспортных устройств. В этом случае решающим фактором при выборе типоразмера двигателя является не потребление мощности, а скорее количество его запусков. Частое включение – это повторяющийся большой пусковой ток, ведущий к неравномерному нагреву двигателя. Обмотки перегреваются, если поглощенное ими тепло больше тепла, рассеянного системой охлаждения двигателя. Тепловую нагрузочную способность двигателя можно увеличить, выбрав соответствующий температурный класс изоляции, или посредством принудительного охлаждения.

### Количество включений без нагрузки

Количество включений без нагрузки  $Z_0$  изготовитель определяет как допустимое количество включений двигателя при 50 % ПВ без момента нагрузки и внешних масс. Эта величина означает, сколько раз в час двигатель может разгонять момент инерции своего ротора до максимальной частоты вращения без момента нагрузки при 50 % ПВ.

### Допустимое количество включений

Время разгона двигателя увеличивается, если необходимо разогнать дополнительный момент инерции, или если имеется дополнительный момент нагрузки. В течение времени разгона величина тока увеличивается. Это означает, что двигатель подвергается повышенной тепловой нагрузке, а допустимое количество включений уменьшается.

Приблизительное допустимое количество включений двигателя можно рассчитать по следующей формуле:

$$Z = Z_0 \cdot K_J \cdot K_M \cdot K_P \cdot \left[ \frac{B_{кл}}{ч} \right]$$

$Z$  = допустимое количество включений

$Z_0$  = количество включений двигателя без нагрузки при 50 % ПВ

$K_J = f(J_X, J_Z, J_M)$

коэффициент зависимости от дополнительного момента инерции

$K_M = f(M_L, M_H)$

коэффициент зависимости от момента нагрузки при разгоне

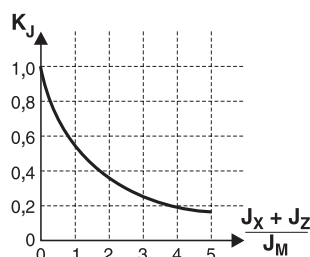
$K_P = f(P_X, P_N, ED)$

коэффициент зависимости от статической мощности и продолжительности включения (ПВ)

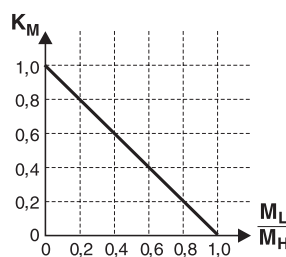


Коэффициенты  $K_J$ ,  $K_M$  и  $K_P$  для конкретных условий эксплуатации можно определить по диаграммам на следующем рисунке.

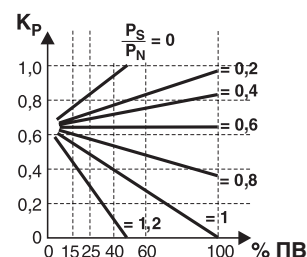
как функция  
дополнительного  
момента инерции



как функция момента  
нагрузки при разгоне



как функция статической  
мощности и  
продолжительности  
включения (ПВ)



$J_X$  = сумма всех внешних моментов инерции, приведенных к валу двигателя  
 $J_Z$  = момент инерции тяжелой крыльчатки  
 $J_M$  = момент инерции ротора двигателя  
 $M_L$  = момент нагрузки при разгоне  
 $M_N$  = динамический момент двигателя  
 $P_S$  = потребление мощности после разгона (статическая мощность)  
 $P_N$  = номинальная мощность двигателя

## 2.8 Плавный пуск и плавное переключение числа полюсов

Переключение  
"звезда -->  
треугольник"

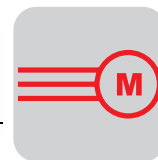
При пуске асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором бросок вращающего момента можно уменьшить с помощью внешних дроссельных или резисторных схем или путем понижения подаваемого напряжения. Простейший способ – так называемое  $\star/\Delta$ -переключение обмотки статора. Если обмотка статора двигателя выполнена по схеме включения треугольником  $\Delta$ , например, для напряжения сети 400 В, и при пуске двигателя это напряжение подается на обмотку, включенную звездой  $\star$ , то вращающий момент составляет только 1/3 часть от пускового момента при включении обмотки треугольником. Значения тока, в частности пускового, также достигают только 1/3 величины тока при соединении треугольником.

Инерционная  
крыльчатка

Для некоторых приводов уменьшение ускорения при пуске и замедления при торможении (= плавность разгона и торможения) достигается путем установки чугунной крыльчатки двигателя, создающей дополнительный момент инерции. При этом следует учитывать количество включений привода в час.

Альтернативы  
переключению  
"звезда -->  
треугольник"

С помощью пускового трансформатора, соответствующих дросселей или резисторов можно добиться подобного же эффекта, что и при использовании  $\star/\Delta$ -переключения, при этом величину вращающего момента можно корректировать, изменяя параметры дросселей и резисторов.



Снижение  
вращающего  
момента  
двигателей с  
переключением  
числа полюсов

При изменении частоты вращения таких двигателей с высокой на низкую могут понадобиться соответствующие меры по снижению вращающего момента, поскольку его величина при переключении пар полюсов больше величины пускового момента. Этого можно добиться не только с помощью дроссельных и резисторных схем, но и недорогим способом 2-фазного переключения. При таком переключении двигатель в течение определенного времени (регулируемого через реле времени) работает только от двух фаз статорной обмотки для низкой частоты вращения. Благодаря этому симметричное (в нормальном режиме) вращающееся поле искажается, и двигатель создает меньший вращающий момент.

$$M_{U2ph} \approx \frac{1}{2} \cdot M_U$$

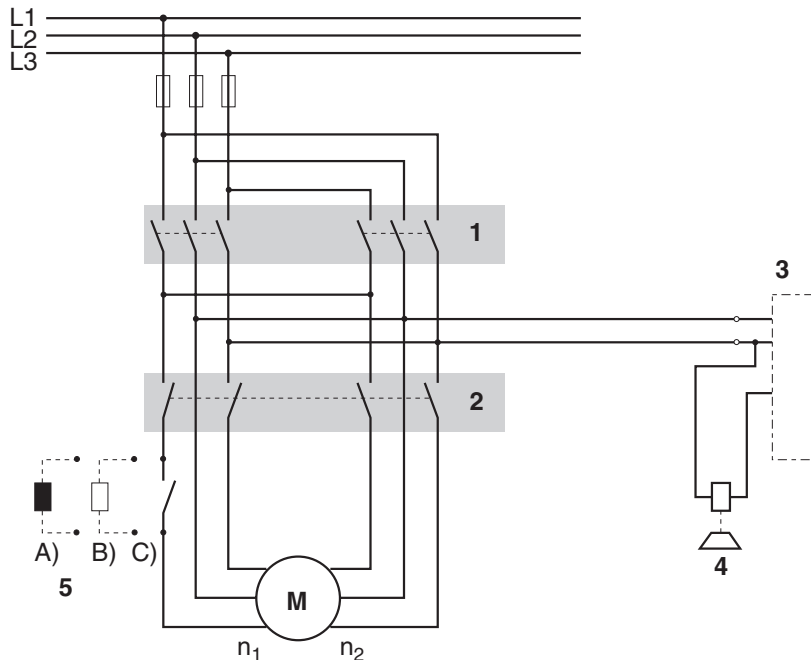
или

$$M_{U2ph} \approx (1 \dots 1,25) \cdot M_{A1}$$

$M_{U2ph}$  = средний момент при 2-фазном переключении пар полюсов  
 $M_U$  = средний момент при 3-фазном переключении пар полюсов  
 $M_{A1}$  = пусковой момент статорной обмотки для низкой частоты вращения



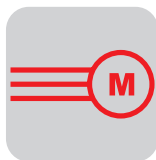
Из соображений безопасности **запрещается** использовать 2-фазное переключение в приводах подъемных устройств!



00629CXX

Рис. 7. Переключение пар полюсов

- |                |                                |   |   |
|----------------|--------------------------------|---|---|
| 1              | Контакты направления           | 5 | Способы снижения броска при переключении: |
| 2              | Контакты переключения скорости | A | Сглаживающий дроссель                     |
| 3              | Тормозной выпрямитель          | B | Резистор плавного пуска                   |
| 4              | Тормоз                         | C | 2-фазное переключение                     |
| n <sub>1</sub> | Низкая частота вращения        |   |   |
| n <sub>2</sub> | Высокая частота вращения       |   |   |



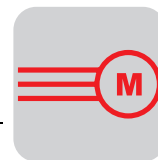
Еще более оптимальный способ – это использование электронного устройства плавного переключения числа полюсов WPU, электронные схемы которого отключают 3-ю фазу при переключении полюсов и снова подключают ее в нужный момент.



1812193

Рис. 8. Устройство плавного переключения числа полюсов WPU

Устройство плавного переключения числа полюсов WPU включается в цепи двух фаз в соответствии с типом и схемой включения обмотки.



## 2.9 Двигатели с тормозом

Полная информация о параметрах тормозных систем в комбинации с различными тормозными выпрямителями и блоками управления содержится в каталогах SEW и в руководстве по тормозным системам (прежние издания: "Drive Engineering – Practical Implementation – SEW Disc Brakes" ("Практика приводной техники. Дисковые тормоза SEW")).



00630BXX

Рис. 9. Трехфазный двигатель с тормозом и дисковый тормоз

### Применение и принцип действия

Во многих приводных системах, используемых для более или менее точного позиционирования, двигатель должен быть оснащен дополнительным механическим тормозом. В таких системах он используется как рабочий тормоз. Двигатели с тормозом применяются и в тех случаях, когда необходима высокая степень безопасности. Например, в приводах подъемных устройств, когда двигатель электрическим способом останавливается при определенном положении привода, для его надежной фиксации налагается "стояночный тормоз". Подобные требования к безопасности действительны и для систем, чувствительных к отказу электросети. В этом случае механические тормоза двигателей являются гарантом экстренной остановки.

- При включении напряжения тормоз освобождается (отпускается) электромагнитным способом.
- При отключении напряжения тормоз автоматически налагается усилием пружин.

### Время реакции тормоза

Благодаря использованию двухсекционных тормозных катушек с электронным управлением двигателя SEW отличаются очень быстрым отпусканием тормоза. Время наложения тормоза зачастую слишком велико, например, потому, что на тормозной выпрямитель в клеммной коробке двигателя питание подается прямо с клеммной панели двигателя. После отключения и до момента остановки вала двигатель находится в генераторном режиме и вырабатывает остаточное напряжение, замедляющее процесс наложения тормоза. Однако и при отключении питания тормоза только лишь по цепи переменного тока он налагается со значительной задержкой из-за самоиндукции в тормозной катушке. Эта проблема решается только одновременным отключением и в цепи постоянного тока, т. е. в цепи тормозной катушки.





### **Тормозной момент**

Величина тормозного момента дисковых тормозов SEW регулируется путем установки различных комплектов пружин. В заказе на двигатель необходимо указывать требуемый тормозной момент, выбранный по каталогу в соответствии с условиями эксплуатации. Например, для подъемных устройств из соображений безопасности следует выбирать тормозной момент приблизительно вдвое больше необходимого номинального момента двигателя. Если в заказе эти данные не указаны, то двигатель комплектуется пружинами, рассчитанными на максимальный тормозной момент.

### **Предельная нагрузка**

При выборе параметров тормоза, особенно для эксплуатации в условиях возможного экстренного торможения, следует учитывать максимально допустимую работу тормоза за один цикл торможения. Соответствующие диаграммы, иллюстрирующие эти значения в зависимости от количества включений в час и частоты вращения двигателя, приводятся в каталогах SEW и в руководстве по тормозным системам (прежние издания: "Drive Engineering – Practical Implementation – SEW Disc Brakes" ("Практика приводной техники. Дисковые тормоза SEW")).

### **Тормозной путь и точность остановки**

Время торможения делится на две отдельные фазы:

- время наложения тормоза  $t_2$ ;
- время механического торможения  $t_B$ .

В фазе механического торможения частота вращения двигателя снижается. В фазе наложения тормоза частота вращения остается более или менее постоянной, и иногда даже повышается, например, при работе подъемных устройств в режиме спуска, когда двигатель уже отключен, а тормоз еще не наложен.

Допуск на длину тормозного пути при неизменных граничных условиях составляет ок.  $\pm 12\%$ . При очень малом времени торможения длина этого пути может существенно увеличиться из-за влияния электрических устройств управления (время срабатывания реле или контакторов). При использовании программируемых контроллеров время торможения может возрасти за счет времени выполнения программы и обработки более приоритетных команд.

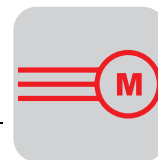
### **Механическое устройство ручного растормаживания**

Отпускание тормоза возможно и механическим способом. Для этого тормоз комплектуется устройством ручного растормаживания с рукояткой (автоматически возвращается в исходное положение) или со стопорным штифтом (фиксируется).

### **Подогрев тормоза**

При эксплуатации двигателя в особых внешних условиях, например, на открытом воздухе при больших перепадах температуры или в зонах отрицательной температуры (промышленные холодильники), необходимо предохранять тормоз от обледенения. Для этого потребуется специальный блок управления (имеется в ассортименте продукции SEW).





### **Тормозные контакторы**

Индуктивная нагрузка (катушка) получает большие импульсы тока и подключается к постоянному напряжению, поэтому для питания цепи тормоза и отключения по цепи постоянного напряжения необходимо использовать либо специальные контакторы постоянного тока, либо соответствующие контакторы переменного тока с контактами класса AC3 по стандарту EN 60947-4-1.

Выбор тормозного контактора для подачи напряжения сети достаточно прост:

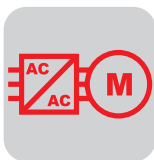
При работе от сети с номинальным напряжением 230 В<sub>~</sub> и 400 В<sub>~</sub> выбирается силовой контактор с номинальной мощностью 2,2 или 4 кВт и контактами класса AC3.

Для цепи питания 24 В<sub>~</sub> используется контактор класса DC3.

### **Торможение противовключе- нием – Торможение постоянным током**

Торможение противовключением или реверсивный режим, т. е. изменение порядка следования фаз двигателя при максимальной частоте вращения, создают большую механическую и тепловую нагрузку на двигатель. **Эта высокая механическая нагрузка воздействует и на подключенный редуктор и передаточные элементы. Соответствующие консультации можно получить у изготовителя этих компонентов привода.**

Для двигателей без тормоза эффективность торможения постоянным током зависит от величины постоянного тока. Поскольку этот способ торможения приводит к дополнительному нагреву асинхронного двигателя, то и в этом случае необходима консультация с изготовителем.



### 3 Электропривод переменного тока с преобразователем частоты

Полная информация по электроприводам переменного тока с преобразователем частоты содержится в каталогах по преобразователям MOVITRAC® и MOVIDRIVE®, в каталоге MOVIMOT®, в системном руководстве "Drive System for Decentralized Installation" ("Приводные системы для децентрализованного монтажа") и в документации "Drive Engineering – Practical Implementation. *Project Planning with Frequency Inverters*" ("Практика приводной техники. Проектирование приводов с преобразователями частоты").



Рис. 10. Преобразователи частоты MOVITRAC® 07, MOVIDRIVE® и MOVITRAC® 31C <sup>04077AXX</sup>  
компании SEW

Оптимальным способом плавного изменения частоты вращения двигателей и мотор-редукторов переменного тока является использование преобразователей частоты. Такой преобразователь выдает регулируемое по частоте напряжение, величина которого изменяется пропорционально изменению частоты.

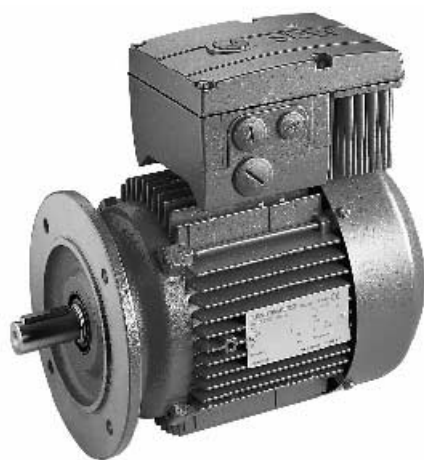
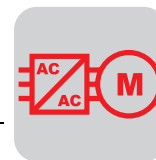


Рис. 11. Мотор-редуктор MOVIMOT® со встроенным преобразователем частоты <sup>04791AXX</sup>

Для децентрализованных приводных систем можно использовать мотор-редукторы MOVIMOT® со встроенным преобразователем частоты.



### 3.1 Преобразователи частоты

#### Приводные преобразователи MOVIDRIVE®

Преобразователи частоты MOVIDRIVE® и MOVIDRIVE® *compact* с диапазоном мощности до 90 кВт отвечают самым высоким требованиям к динамике и точности регулирования.

Эти преобразователи, работающие по принципу векторного управления потоком сцеплением ротора, предназначены для монтажа в распределительном шкафу, их можно устанавливать в ряд, они компактны и требуют минимальной монтажной поверхности шкафа.

#### VFC

Алгоритм управления VFC (Voltage mode flux control) с обратной связью по частоте вращения или без нее обеспечивает высокую точность регулирования параметров приводов с асинхронными двигателями.

#### CFC

MOVIDRIVE® с алгоритмом управления CFC (Current mode flux control) соответствует самым высоким требованиям к точности и динамике. Приводы с асинхронными двигателями, управляемые преобразователями MOVIDRIVE® по алгоритму CFC, достигают характеристик сервопривода.

#### Преобразователи частоты MOVITRAC®

Преобразователи частоты MOVITRAC® обеспечивают плавное электронное управление частотой вращения мотор-редукторов и двигателей переменного тока с тормозом и без него. Преобразователи MOVITRAC® предназначены для монтажа в распределительном шкафу.

Удобные способы управления и отображения информации с помощью персонального компьютера (ПК) обеспечивают быстрый ввод в эксплуатацию и диагностику.

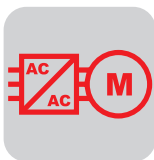
#### Сервопреобразователи MOVIDYN®

Модульные сервопреобразователи MOVIDYN® для управления синхронными серводвигателями монтируются в распределительном шкафу и обладают высокой динамикой и широким диапазоном регулирования.

### 3.2 Мотор-редукторы MOVIMOT® со встроенным преобразователем частоты

Мотор-редукторы MOVIMOT® – это компактные, готовые к подключению приводы с электронным регулированием частоты вращения (с механическим тормозом или без него).

Приводы MOVIMOT® выпускаются в различном исполнении для любых монтажных позиций и оснащаются цилиндрическими, плоскими цилиндрическими, коническими, планетарными, червячными редукторами и редукторами Spiroplan®.



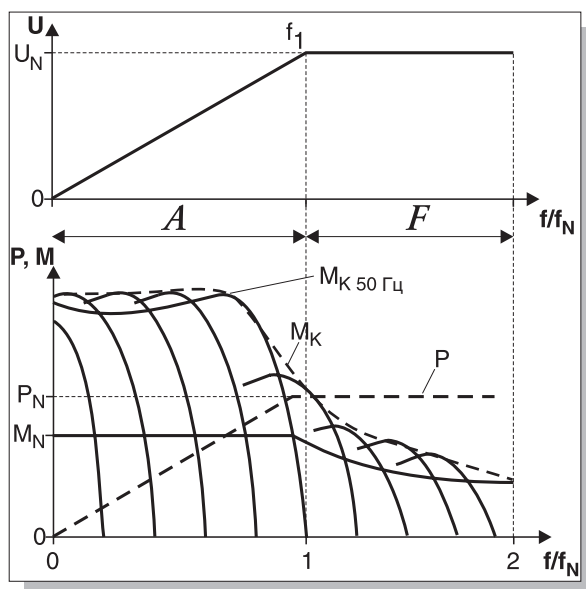
### 3.3 Работа двигателя от преобразователя частоты

#### Рабочие характеристики

Постоянный  
вращающий  
момент  
в диапазоне  
до частоты сети

Изменяя частоту и напряжение, можно сдвигать механическую характеристику асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором над осью частоты вращения (см. рисунок). На участке пропорционального изменения  $U$  и  $f$  (диапазон А) двигатель работает с постоянным магнитным потоком и создает постоянный вращающий момент. Если напряжение достигает максимального значения, а частота продолжает повышаться, то магнитный поток ослабевает, а вместе с ним снижается и вращающий момент (ослабление поля, диапазон F). В диапазоне (А) пропорционального изменения характеристики двигателя могут работать с постоянным вращающим моментом, а в диапазоне (F) ослабления поля – с постоянной мощностью. Величина опрокидывающего момента  $M_K$  уменьшается в квадратичной зависимости. Начиная с определенного значения частоты величина  $M_K$  становится меньше создаваемого вращающего момента, например, если базовая частота  $f_1 = 50$  Гц, то:

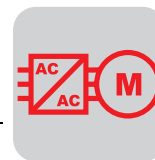
- при частоте 100 Гц:  $M_K = 2 \times M_N$ ;
- при частоте 125 Гц:  $M_K = 2,5 \times M_N$ .



00640BRU

Рис. 12. Рабочие характеристики с постоянным вращающим моментом и постоянной мощностью (диапазон ослабления поля)

- $f_1$  = базовая частота  
 А = диапазон пропорционального изменения  $U/f$   
 F = диапазон ослабления поля

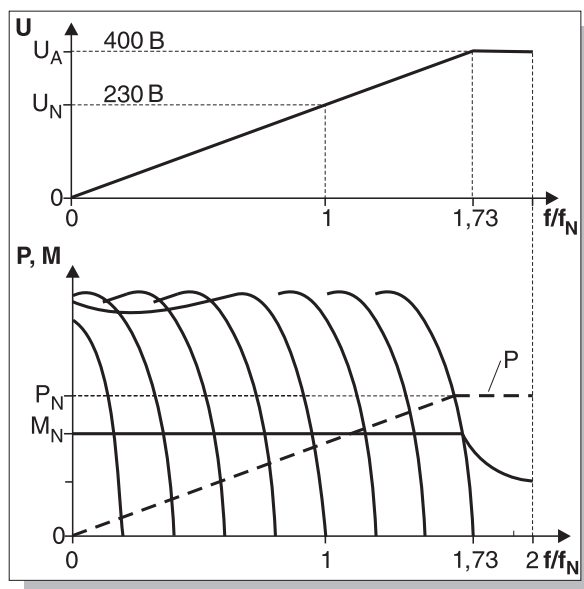


Постоянный  
номинальный  
момент в  
диапазоне до  $\sqrt{3}$  х  
частота сети

Еще одним вариантом является работа с напряжением и частотой выше номинальных значений, например:

Двигатель: 230 В / 50 Гц (схема включения  $\Delta$ )

Преобразователь:  $U_A = 400$  В при  $f_{\max} = 400/230 \times 50$  Гц = 87 Гц



00642BRU

Рис. 13. Рабочие характеристики с постоянным номинальным моментом

За счет повышения частоты двигатель мог бы отдавать в 1,73 раза больше мощности.

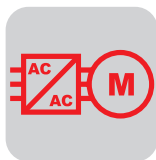
Однако из-за большой тепловой нагрузки на двигатель в продолжительном режиме SEW рекомендует использовать двигатель следующего типоразмера (температурного класса изоляции F!) на номинальной мощности.

Например: номинальная мощность двигателя  $P_N = 4$  кВт, отдаваемая мощность при схеме включения  $\Delta$  и частоте  $f_{\max} = 87$  Гц:  $P_N' = 5,5$  кВт.

В таких условиях этот двигатель постоянно работает с мощностью в 1,37 раза больше номинальной. Диапазон ослабления поля не достигается, поэтому в таком режиме работы опрокидывающий момент остается на том же уровне, что и при работе на частоте сети.

Учитывать следует повышенный уровень шума двигателя (из-за повышения частоты вращения крыльчатки), а также возрастание усилия, передаваемого через редуктор (коэффициент  $f_B$  должен быть достаточно большим).

Преобразователь следует выбирать для более высокой мощности (в данном случае 5,5 кВт), потому что рабочий ток двигателя при схеме включения  $\Delta$  больше, чем при схеме включения  $\text{Y}$ .



## Выбор параметров двигателя

### Охлаждение

Условием стабильности вращающего момента является сохранение эффективности охлаждения двигателя даже в нижнем диапазоне частоты вращения. Для двигателей с самоохлаждением это невозможно, поскольку со снижением частоты вращения уменьшается и эффективность вентиляции. Если не используется вентилятор принудительного охлаждения, то вращающий момент необходимо снизить. Работать с постоянным вращающим моментом и без принудительного охлаждения можно только в том случае, если выбрать двигатель большего типоразмера. При той же полезной мощности, но при большей площади поверхности двигателя тепловые потери будут эффективно отводиться даже на низкой частоте вращения. В определенных условиях проблемы могут возникнуть из-за повышенного момента инерции.

### Соблюдение всех условий

При выборе максимальной частоты следует учитывать и условия работы редуктора. При высокой окружной скорости входной ступени увеличиваются потери от перемешивания масла, возрастает трение в подшипниках и манжетах, повышается уровень шума. Эти факторы ограничивают максимально допустимую частоту вращения двигателя. Нижняя граница диапазона частоты определяется параметрами самой приводной системы.

### Плавность вращения / Точность регулирования

Плавность вращения двигателя на низких скоростях зависит от качества синусоидального напряжения на выходе преобразователя. Стабильность частоты вращения под нагрузкой определяется либо параметрами компенсации скольжения и IxR-компенсации, либо качеством регулирования частоты вращения, если на двигателе установлен соответствующий датчик.

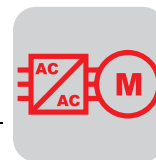
## 3.4 Проектирование приводов с преобразователями частоты SEW

Применяемые компанией SEW рабочие характеристики мотор-редуктора переменного тока описаны в главе *Работа двигателя от преобразователя частоты / Рабочие характеристики*. Подробные инструкции по проектированию содержатся в каталогах и системных руководствах MOVIDRIVE® и MOVITRAC®, а также в документации "Drive Engineering – Practical Implementation. – *Project Planning with Frequency Inverters*" ("Практика приводной техники. Проектирование приводов с преобразователями частоты").

### Рекомендации SEW по выбору параметров

Для работы с преобразователем двигателя должны иметь изоляцию обмотки по классу F. Кроме того, они должны быть оборудованы датчиками температуры TF или термостатами TH.

Рабочую мощность такого двигателя следует снизить до номинальной мощности двигателя, меньшего на один типоразмер, в противном случае следует использовать принудительное охлаждение.



С учетом диапазона регулирования частоты вращения, КПД и  $\cos \varphi$  рекомендуется использовать 4-полюсные двигатели. Возможные варианты:

Табл. 6. Исполнение двигателя

Диапазон регулирования частоты вращения при $f_{\max} = 50$ Гц	Мощность	Рекомендуемое исполнение двигателя		
		Тип охлаждения <sup>1)</sup>	Температурный класс изоляции	Датчик температуры TF / термостат TH
1 : 5	$P_C$	Самоохлаждение	F	да
1 : 20 и более	$P_N$	Принудительное охлаждение	F	да

1) Если двигатель оборудован тормозом, следует обеспечить достаточное охлаждение тормозной катушки (см. Руководство по тормозным системам (прежние издания: "Drive Engineering – Practical Implementation – SEW Disc Brakes" ("Практика приводной техники. Дисковые тормоза SEW"))).

$P_N$  = номинальная мощность двигателя (без снижения)

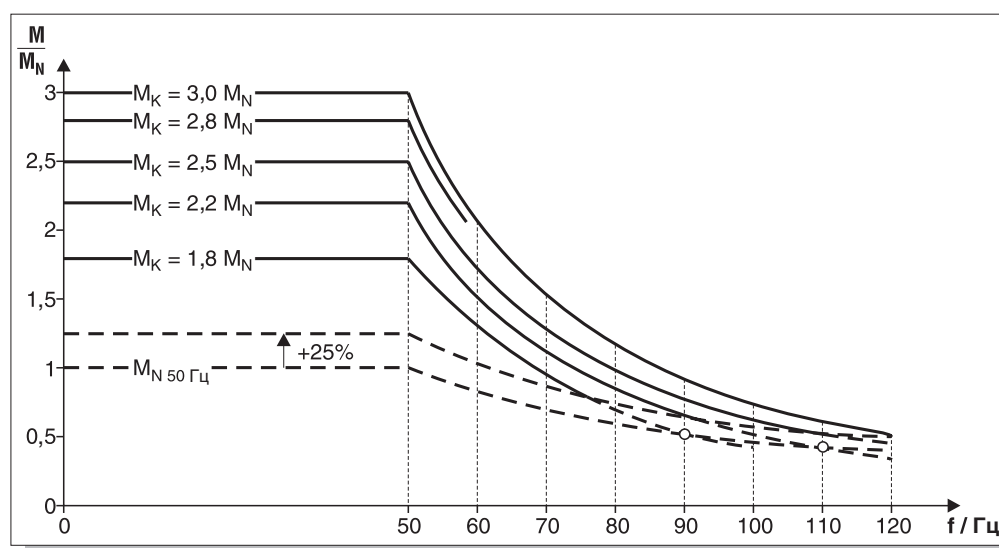
$P_C$  = сниженная мощность = номинальная мощность двигателя, меньшего на один типоразмер

Диапазон регулирования частоты вращения

Опрокидывающий момент

Это диапазон, в пределах которого двигатель работает в длительном режиме. Если на низких скоростях двигатель работает лишь кратковременно (например, при пуске или позиционировании), то при определении диапазона регулирования их можно не учитывать.

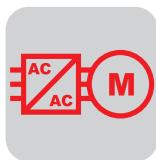
Если частота, соответствующая необходимой максимальной частоте вращения, находится в диапазоне ослабления поля, то следует учитывать, что номинальный вращающий момент  $M_{N50\text{Гц}}$  (при номинальной частоте) в этом диапазоне уменьшается обратно пропорционально, а опрокидывающий момент  $M_K$  – обратно пропорционально квадрату частоты. Для обеспечения защиты от опрокидывания соотношение  $M_K/M_N$  должно оставаться  $> 1$  (рекомендуемое соотношение: не менее 1,25, см. рисунок).



00643BRU

Рис. 14. Снижение опрокидывающего момента обратно пропорционально квадрату частоты





## Режим параллельного включения

Параллельное подключение нескольких двигателей к одному преобразователю не гарантирует равномерности или синхронности их работы. Нагрузка на отдельные двигатели не одинакова, и из-за различного скольжения частота вращения двигателей без нагрузки и с номинальной нагрузкой может отличаться почти на 100 об/мин. Это отклонение остается достаточно постоянным на всем диапазоне частоты вращения и не поддается корректировке даже через компенсацию скольжения и IxR-компенсацию на преобразователе. Ведь настройка параметров на преобразователе действительна для всех подключенных двигателей, а значит и для работающих без нагрузки.

## Защита кабелей питания двигателей предохранителями

Для параллельной работы от одного преобразователя кабель питания каждого отдельного двигателя должен быть подключен через перегрузочное термореле или защитный автоматический выключатель (комбинированная линейная защита), поскольку функция преобразователя по ограничению тока – общая для всех параллельно подключенных двигателей.

## Сборная шина

Подключение и отключение отдельных двигателей к сборной шине питания от преобразователя SEW возможно без ограничений. Суммарный номинальный ток двигателей, работающих от одной сборной шины, не должен превышать номинального тока преобразователя (или 125 % этого значения при квадратичной нагрузке и при работе с постоянным вращающим моментом без перегрузки).

## Работа двигателей с переключением числа полюсов от преобразователя частоты

Если используются двигатели с переключением числа полюсов, и при работе их обмотки переключаются, то следует учитывать, что при переходе с малого числа полюсов на большое двигатель работает в генераторном режиме. На этот случай преобразователь должен быть оборудован тормозным резистором с достаточными параметрами, иначе возможно отключение из-за слишком высокого напряжения промежуточного звена. При переключении двигателя с большого числа полюсов на малое преобразователь нагружается дополнительным током. Он должен иметь достаточный резерв на перегрузку по току, в противном случае из-за нее происходит аварийное отключение.

## Дополнительное оборудование

При необходимости набор функций преобразователей частоты можно расширить. Использование с преобразователями частоты SEW разнообразного дополнительного оборудования позволяет решать самые различные прикладные задачи.

Имеются следующие устройства:

- Технологическое дополнительное оборудование:
  - регулятор частоты вращения;
  - устройство расширения входов/выходов;
  - устройство синхронного управления;
  - устройство управления позиционированием;
  - прикладной модуль "Управление в режиме кулачкового контроллера";
  - прикладной модуль "Летучая пила";
  - прикладной модуль "Управление приводом намоточно-размоточных устройств".
- Дополнительное оборудование для обмена данными:
  - клавишные панели управления;
  - панели последовательных портов;
  - сетевые интерфейсные модули.



## 4 Сервопривод

Полная информация по сервоприводам содержится в каталогах "Geared Servomotors" ("Серводвигатели с редуктором"), в системном руководстве "MOVIDRIVE® Drive Inverters" ("Приводные преобразователи MOVIDRIVE®"), в каталоге "MOVIDYN® Servo Controllers" ("Сервопреобразователи MOVIDYN®") и в документации "Drive Engineering - Practical Implementation. Servo Drives" ("Практика приводной техники. Сервоприводы").

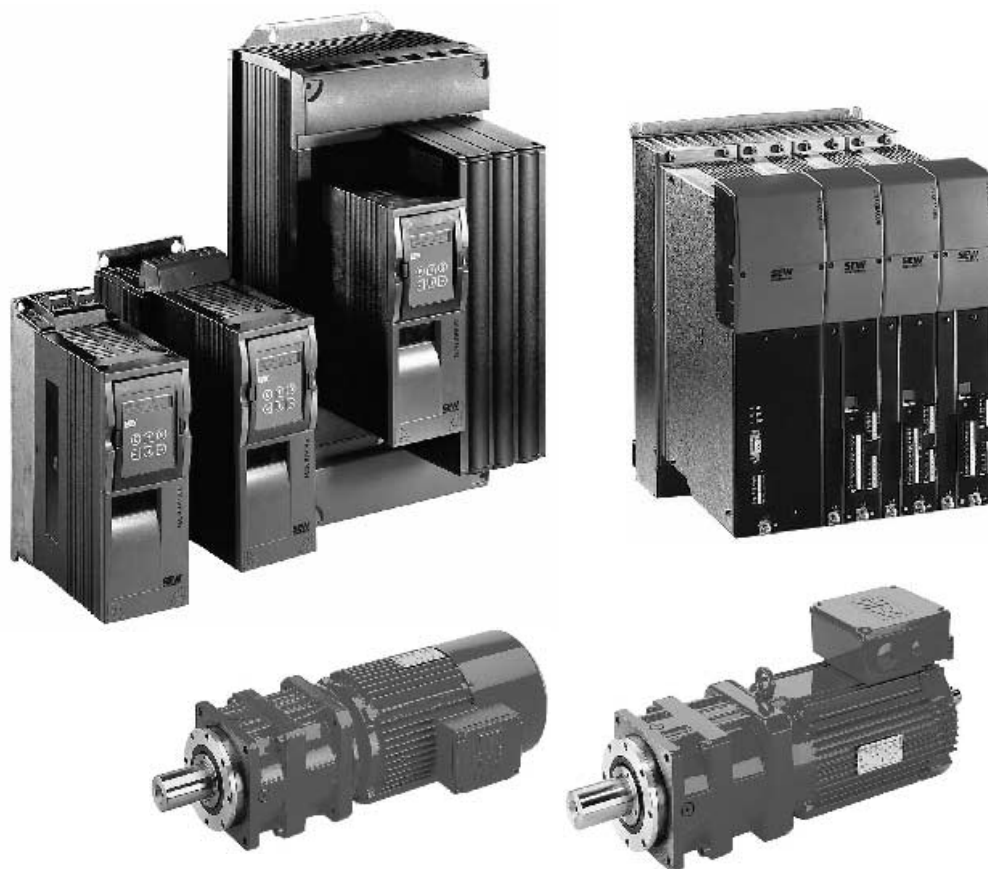
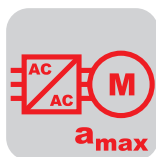


Рис. 15. Приводные преобразователи MOVIDRIVE®, сервопреобразователь MOVIDYN®, асинхронный и синхронный серводвигатели

**Определение**

В различных сферах применения современной приводной техники высокие требования предъявляются к следующим характеристикам:

- динамика;
- точность позиционирования;
- точность частоты вращения;
- диапазон регулирования;
- стабильность вращающего момента;
- перегрузочная способность.

**Динамика**

Требования к динамике, т. е. к временным характеристикам привода, обусловлены все более ускоряющимися технологическими процессами, сокращением длительности/увеличением количества циклов, что и определяет производительность рабочей машины.

**Точность**

Возможности применения приводной системы очень часто зависят от точности ее работы. Современная динамичная приводная система должна соответствовать требованиям высокой точности.

**Диапазон регулирования частоты вращения**

Сервоприводными называются системы, обладающие высокой динамикой, точностью и перегрузочной способностью в широком диапазоне регулирования частоты вращения.

**4.1 Серводвигатели****Конструкция**

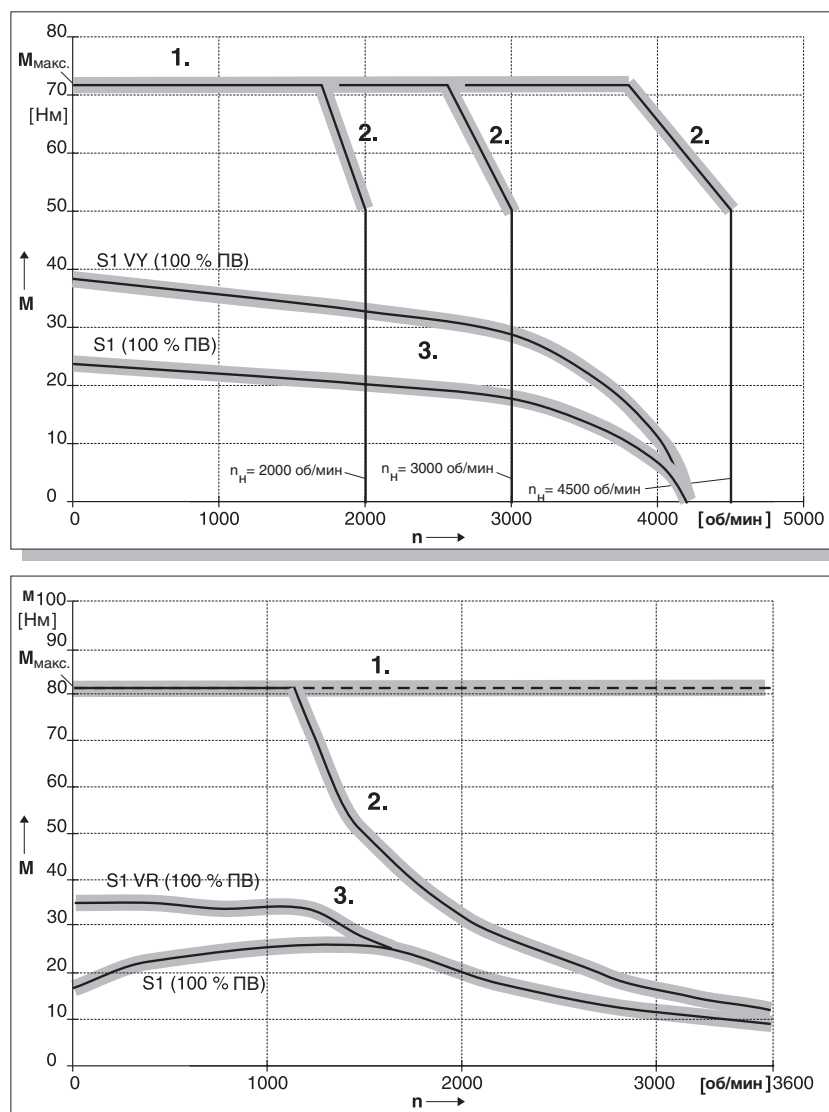
Компания SEW предлагает асинхронные и синхронные серводвигатели. Конструкция статора этих двигателей принципиально одинакова, но их роторы различаются:

- Асинхронный серводвигатель имеет короткозамкнутый ротор, магнитное поле в котором создается за счет индукции.
- На роторе синхронного серводвигателя закреплены магниты, создающие в нем постоянное магнитное поле.

### Механические характеристики

На графике механической характеристики серводвигателя можно различить три ограничения, которые следует учитывать при проектировании привода:

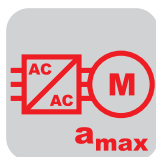
1. Максимальный вращающий момент двигателя определяется его механической конструкцией. Для синхронного серводвигателя величина момента ограничивается еще и нагрузочной способностью постоянных магнитов.
2. Ограничение вращающего момента в верхнем диапазоне частоты вращения обусловлено падением напряжения на клеммах. Это напряжение зависит от напряжения промежуточного звена и падения напряжения на кабелях. В результате влияния противо-эдс (индуцированное напряжение на роторе двигателя) ток в обмотке статора больше не достигает максимальной величины.
3. Еще одно ограничение – это степень использования двигателя по нагреву. При проектировании рассчитывается эффективный вращающий момент. Он не должен превышать значений механической характеристики для продолжительного режима S1. Превышение ограничения по нагреву может привести к повреждению изоляции обмотки.



00226BRU

Рис. 16. Пример механических характеристик синхронного и асинхронного серводвигателя

VY = вентилятор принудительного охлаждения для синхронных двигателей  
VR = вентилятор принудительного охлаждения для асинхронных двигателей



## 4.2 Сервопреобразователи MOVIDYN®

### Описание

Сервопреобразователи серии MOVIDYN® – это преобразователи модульной конструкции, питающие синусоидальным током синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов. Они могут работать от сети с напряжением 380...500 В<sub>~</sub> и частотой 50/60 Гц, обеспечивая выходной ток от 5 до 60 А<sub>~</sub>. Сервопреобразователи MOVIDYN® используются для управления синхронными двигателями с резольвером.

### Силовые модули MPB... и MPR...

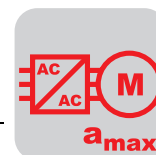
Силовые модули предназначены для силового питания подключенных координатных модулей через промежуточное звено и для питания электронных схем управления через импульсный блок питания. Кроме того, они оснащены центральным тормозным прерывателем или устройством рекуперации энергии в сеть, всеми необходимыми устройствами защиты и интерфейсами передачи данных RS-232 и RS-485.

### Координатные модули MAS...

Для подключения координатных модулей к промежуточному звену и контуру защитного заземления используются токоведущие шины. Питающее напряжение на электронные схемы управления подается по отдельной шине питания 24 В<sub>~</sub>. Для обмена данными между модулями на их нижних панелях проложен кабель шины данных.

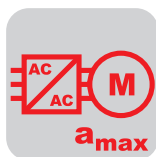
### Дополнительное оборудование:

- сетевые интерфейсные модули PROFIBUS, INTERBUS, CAN и DeviceNet;
- устройство управления позиционированием;
- устройство расширения входов-выходов;
- устройство сопряжения с датчиками абсолютного отсчета;
- съемная клавишная панель для диагностики, оснащенная памятью параметров;
- тормозные резисторы;
- сетевые фильтры, сетевые дроссели, выходные дроссели и выходные фильтры.



### 4.3 Приводные преобразователи **MOVIDRIVE®** и **MOVIDRIVE® compact**

<b>Описание</b>	<p>MOVIDRIVE® – это целое семейство приводных преобразователей для индивидуального решения разнообразных прикладных задач с помощью различных алгоритмов управления.</p> <p>Съемные дополнительные устройства и прикладные модули используются только с MOVIDRIVE®, но не с MOVIDRIVE® compact.</p>
<b>Типы преобразователей</b>	<p>Для управления сервоприводами используются преобразователи MOVIDRIVE® следующего типа:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• MOVIDRIVE® MDV: для управления асинхронными серводвигателями с датчиком (инкодером) и без него. Возможные алгоритмы управления: VFC (Voltage mode flux control) или CFC (Current mode flux control).</li> <li>• MOVIDRIVE® MDS: для управления синхронными серводвигателями с датчиком. Алгоритм управления CFC.</li> </ul>
<b>Системная шина</b>	<p>С помощью стандартной системной шины (SBus) возможно соединение в сеть нескольких преобразователей MOVIDRIVE®. Тем самым обеспечивается быстрый обмен данными между устройствами.</p>
<b>Дополнительное оборудование:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– сетевые интерфейсные модули PROFIBUS, INTERBUS, CAN и DeviceNet;</li> <li>– устройство синхронного управления;</li> <li>– устройство управления позиционированием;</li> <li>– устройство расширения входов-выходов;</li> <li>– устройство сопряжения с датчиками абсолютного отсчета;</li> <li>– съемная клавишная панель управления с текстовым дисплеем и памятью параметров;</li> <li>– устройство рекуперации энергии в сеть;</li> <li>– прикладные модули.</li> </ul>



#### 4.4 Блок-схема проектирования

На следующей блок-схеме представлена процедура проектирования позиционного привода.

<b>Необходимая информация о приводном механизме:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• технические данные и условия окружающей среды;</li> <li>• точность позиционирования / диапазон регулирования;</li> <li>• расчет рабочего цикла.</li> </ul>
<b>Расчет необходимых прикладных данных:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• мощность в статическом, динамическом и генераторном режимах;</li> <li>• значения частоты вращения;</li> <li>• значения вращающего момента;</li> <li>• нагрузочная диаграмма (полезная нагрузка).</li> </ul>
<b>Выбор редуктора:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• определение типоразмера, передаточного числа и варианта исполнения;</li> <li>• проверка точности позиционирования;</li> <li>• проверка нагрузочной способности (<math>M_{a \max} \geq M_a(t)</math>).</li> </ul>
<b>Выбор системы по следующим параметрам:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• точность позиционирования;</li> <li>• диапазон регулирования;</li> <li>• параметр регулирования (положение / частота вращения / вращающий момент).</li> </ul>
<b>Выбор типа привода (асинхронный или синхронный):</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ускорение;</li> <li>• максимальный вращающий момент;</li> <li>• минимальная рабочая частота вращения двигателя.</li> </ul>
<b>Выбор двигателя:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• максимальный вращающий момент <math>&lt; 300 \% M_N</math>;</li> <li>• эффективный вращающий момент <math>&lt; M_N</math> при средней частоте вращения;</li> <li>• относительный момент инерции <math>J_L / J_M</math>;</li> <li>• максимальная частота вращения;</li> <li>• тепловая нагрузка (диапазон регулирования / относительная продолжительность включения);</li> <li>• дополнительное оборудование двигателя;</li> <li>• соответствие редуктора двигателю.</li> </ul>
<b>Выбор преобразователя:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• соответствие двигателя преобразователю;</li> <li>• длительная и пиковая мощность;</li> <li>• выбор тормозного резистора или устройства рекуперации;</li> <li>• выбор дополнительного оборудования (управление / обмен данными / специальные функции).</li> </ul>
<b>Проверка выполнения всех условий</b>

## 5 Электропривод переменного тока с механическим вариатором

Полная информация содержится в каталоге "Variable Speed Geared Motors" ("Мотор-редукторы с вариатором").

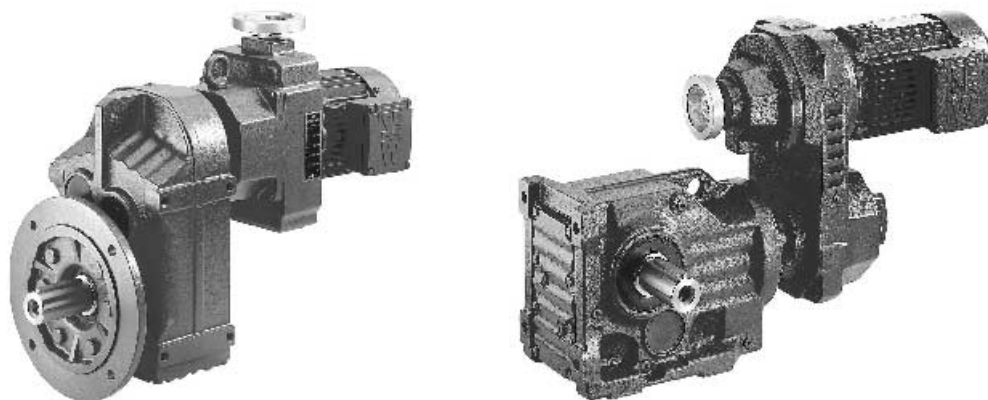


Рис. 17. Мотор-редукторы с фрикционным вариатором VARIMOT® (плоский цилиндрический редуктор) и клиноременным вариатором VARIBLOC® (конический редуктор)

04083AXX

### 5.1 Описание

Для многих технологических процессов достаточным является использование приводов с малым диапазоном регулирования частоты вращения без особых требований к ее стабильности (например, ленточные конвейеры, мешалки, миксеры и т. д.). В таких случаях применяются вариаторы, с помощью которых частота вращения отдельных агрегатов устанавливается на нужное значение.

Механические вариаторы зачастую комбинируются с понижающим редуктором (на выходе). На вход вариаторов устанавливают асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

#### Распространенные вариаторы

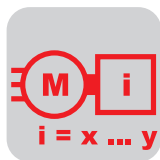
Большое распространение получили:

- фрикционные вариаторы с ограниченным диапазоном регулирования до 1 : 5;
- клиноременные вариаторы с ограниченным диапазоном регулирования до 1 : 8.

Диапазон регулирования этих вариаторов можно расширить за счет применения двигателей с переключением числа полюсов (например, 4/8-полюсные).

#### Регулируемость, время регулирования

Время регулирования этих механических вариаторов достаточно велико (20...40 секунд в зависимости от диапазона регулирования), частота вращения изменяется очень медленно. Поэтому такие приводы используются только для работы с постоянной частотой вращения.



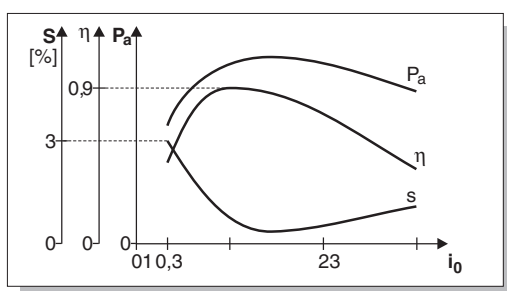
## 5.2 Расчет параметров мотор-редуктора с вариатором

Для выбора параметров вариатора необходимо кроме требуемой мощности и диапазона регулирования частоты вращения знать высоту над уровнем моря и режим работы. На следующем рисунке показана зависимость выходной мощности  $P_a$ , КПД  $\eta$  и проскальзывания  $s$  от передаточного числа  $i$ .

### Критерии выбора параметров

Механические вариаторы преобразуют не только частоту вращения, но и вращающий момент, поэтому выбирать их следует по различным критериям:

- постоянный вращающий момент;
- постоянная мощность;
- постоянный вращающий момент и постоянная мощность (на соответствующих участках диапазона частоты вращения).



00633BRU

Рис. 18. Характеристики вариаторов

$P_a$  = мощность  
 $\eta$  = КПД  
 $s$  = проскальзывание  
 $i_0$  = передаточное число вариатора

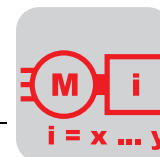
Передаточное  
число

$$i_0 = \frac{n_{a0}}{n_{e0}}$$

$n_{a0}$  = частота вращения выходного вала без нагрузки  
 $n_{e0}$  = частота вращения на входе без нагрузки

На графике показан характер изменения показателей  $P_a$ ,  $s$  и  $\eta$ , измеренных при работе вариаторов под нагрузкой. Эта диаграмма иллюстрирует явную зависимость величины КПД и проскальзывания от установленного передаточного числа. Эта зависимость нелинейная, что обусловлено особенностями механической конструкции, например, максимальное трение между ремнем (фрикционным диском) и ведущим элементом при максимальной окружной скорости, а также зависимость коэффициентов трения от частоты вращения. Поэтому для оптимальной эксплуатации вариатора необходимо отдельно рассмотреть различные случаи применения.





**Расчет параметров для работы с постоянным вращающим моментом**

Вращающий момент на выходном валу

Большинство вариантов привода для своего диапазона регулирования требуют достаточно постоянного вращающего момента на выходном валу. Работающие в таком режиме вариаторы создают вращающий момент, рассчитанный по следующей формуле:

$$M_a = \frac{P_{a\max} \cdot 9550}{n_{a\max}} = \text{const.} \quad [H\cdot m]$$

$M_a$  = вращающий момент на выходном валу [Нм]

$P_{a\max}$  = максимальная выходная мощность [кВт]

$n_{a\max}$  = максимальная частота вращения выходного вала [об/мин]

5

В этих условиях (в этом режиме работы) подключенный понижающий редуктор равномерно нагружается во всем диапазоне регулирования. Максимальная степень использования вариатора достигается только при максимальной частоте вращения. При малых значениях частоты вращения требуемая мощность меньше допустимой. По следующему уравнению рассчитывается минимальная мощность при минимальной частоте вращения вариатора:

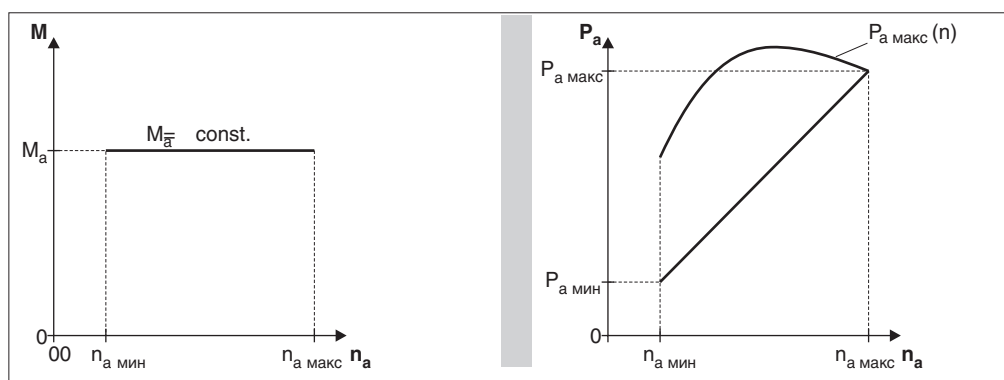
Выходная мощность

$$P_{a\min} = \frac{1}{R} \cdot P_{a\max} \quad [кВт]$$

$P_{a\min}$  = минимальная выходная мощность [кВт]

$R$  = диапазон регулирования частоты вращения

На следующих графиках показана зависимость вращающего момента и мощности от частоты вращения:

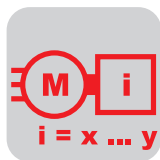


00634CRU

Рис. 19. Характеристики вариаторов при постоянном вращающем моменте

$P_{a\max}(n)$  = максимальная мощность по результатам испытаний

Заданный момент  $M_a$  = предельный момент  $M_{a\max}$  понижающего редуктора



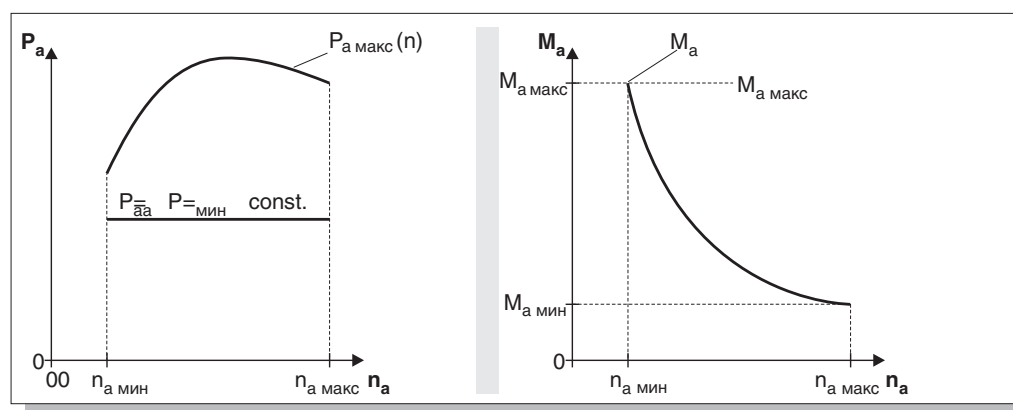
## Расчет параметров для работы с постоянной мощностью

Выходная мощность

Выходную мощность  $P_a$  можно снизить на всем диапазоне регулирования и рассчитать по следующей формуле:

$$P_a = \frac{M_{a\max} \cdot n_{a\min}}{9550} = \text{const.} \quad [\text{кВт}]$$

Вариатор используется только при минимальной частоте вращения выходного вала. Подключенный понижающий редуктор должен быть рассчитан на передачу вращающего момента, достигающего величины на 200...600 % больше, чем в расчете параметров для постоянного момента (см. характеристики).



00635BRU

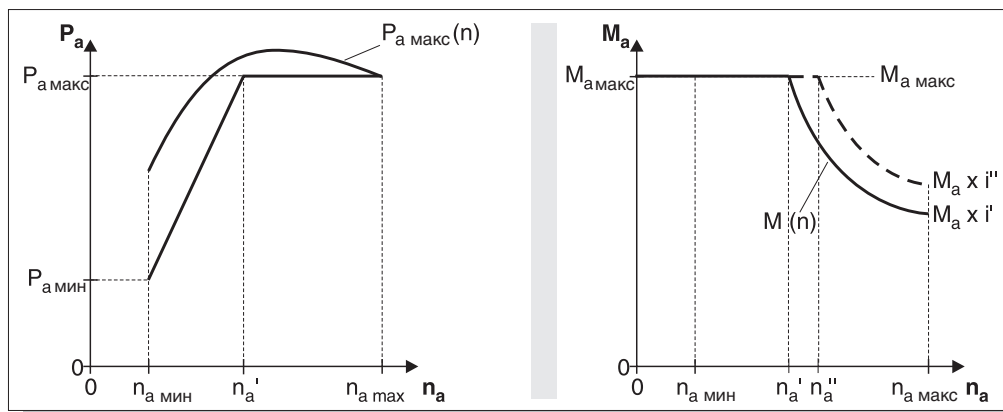
Рис. 20. Характеристики вариаторов при постоянной мощности

$P_{a\max}(n)$  = максимальная мощность по результатам испытаний  
 Заданный момент  $M_a$  = предельный момент  $M_{a\max}$  понижающего редуктора

**Расчет параметров для работы с постоянной мощностью и постоянным вращающим моментом**

При таком характере нагрузки степень использования вариатора – оптимальная. Понижающий редуктор должен быть способен передавать максимальный вращающий момент, создаваемый на выходе вариатора. В диапазоне  $n_a' \dots n_{a\max}$  мощность остается постоянной. В диапазоне  $n_{a\min} \dots n_a'$  постоянным остается вращающий момент.

Если вариатор будет работать не на всем диапазоне частоты вращения, то для получения оптимального КПД рекомендуется использовать верхнюю часть этого диапазона. При такой частоте вращения проскальзывание вариатора минимально, а передаваемая мощность – максимальна.



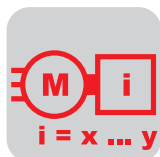
00636BRU

Рис. 21. Характеристики вариаторов при постоянном вращающем моменте и постоянной мощности

$P_{a\max}(n)$  = максимальная мощность по результатам испытаний  
Заданный момент  $M_a$  = предельный момент  $M_{a\max}$  понижающего редуктора  
 $M(n)$  = допустимая механическая характеристика

Выходная мощность

$$P_{a\min} = \frac{n_{a\min}}{n_a'} \cdot P_{a\max}$$



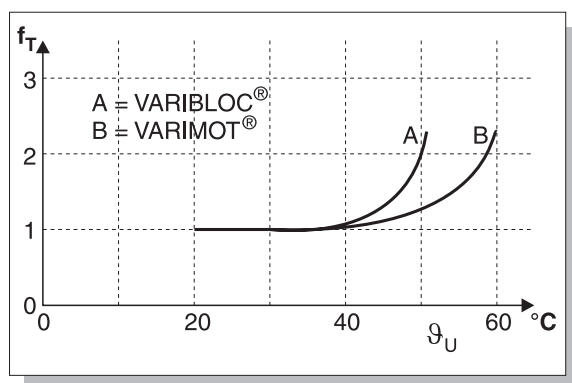
## Эксплуатационные коэффициенты

В таблицах параметров для выбора вариатора указаны следующие эксплуатационные коэффициенты:

- $f_B$  = коэффициент для учета характера нагрузки (см. таблицу)
- $f_T$  = коэффициент для учета температуры окружающей среды (см. рисунок)

Общий эксплуатационный коэффициент получается из произведения  $f_B \times f_T$ .

Характер нагрузки	$f_B$	Пояснение	Примеры
I	1,0	Равномерная нагрузка без толчков	Вентиляторы, легкие ленточные конвейеры, разливные машины
II	1,25	Неравномерная нагрузка с умеренными толчками	Грузовые лифты, балансировочные станки, крановые тележки
III	1,5	Очень неравномерная нагрузка с сильными толчками	Тяжелые миксеры, рольганги, штампы, камнедробилки



00637BXX

Рис. 22. Эксплуатационные коэффициенты  $f_T$

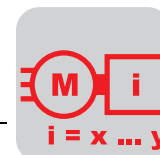
## Защита от перегрузки

### Электронная защита от перегрузки

Любая система защиты двигателя не защищает подключенные к нему передаточные механизмы.

Чтобы защитить от перегрузки редуктор, подключенный к механическому вариатору, можно использовать электронную систему контроля. Она измеряет мощность двигателя и частоту вращения выходного вала вариатора. При постоянном вращающем моменте мощность изменяется в линейной зависимости от частоты вращения, т. е. при снижении частоты вращения должна уменьшаться и мощность двигателя. Если это не так, то регистрируется перегрузка, и привод отключается. Такая защита не используется в качестве защиты от опрокидывания.

Для защиты от опрокидывания можно использовать предохранительные муфты.



**Инструкции по проектированию**

Расчет параметров вариатора, как упоминалось выше, зависит от различных факторов. В следующей таблице приводятся основные инструкции по проектированию приводов с вариатором VARIBLOC® и VARIMOT®.

Критерий	VARIBLOC® (ременная передача)	VARIMOT® (фрикционный диск)
Диапазон мощности	0,25...45 кВт	0,25...11 кВт
Диапазон регулирования	1:3, 1:4, 1:5, 1:6, 1:7, 1:8 (в зависимости от числа полюсов и мощности двигателя).	1:4, 1:5 (в зависимости от числа полюсов и мощности двигателя).
Регулирование на остановленном вариаторе	Не допускается, поскольку натяжение ремня автоматически устанавливается только при работающем приводе.	Допускается, но не должно использоваться слишком часто.
Характер нагрузки	Допускается неравномерная нагрузка (толчки при подаче материала и т. п.), демпфирование через ремень.	Допускается только равномерная нагрузка (например, ленточные конвейеры), при толчках со стороны нагрузки возможно проскальзывание фрикционного диска и повреждение его поверхности.
Взрывобезопасность	Определение степени взрывобезопасности механических вариаторов см. "Drive Engineering – Practical Implementation – Explosion-Protected Drives" ("Практика приводной техники. Взрывозащищенные приводные системы"). Все приводные ремни обладают электрической проводимостью и снимают статический заряд с вращающихся деталей. Для контроля минимальной частоты вращения используется датчик действительных значений с блоком контроля и отключения при частоте вращения ниже минимальной. Во взрывоопасных зонах рекомендуется применять приводы с управлением от преобразователя.	Определение степени взрывобезопасности механических вариаторов см. "Drive Engineering – Practical Implementation – Explosion-Protected Drives" ("Практика приводной техники. Взрывозащищенные приводные системы"). Фрикционный диск обладает электрической проводимостью и снимает статический заряд с вращающихся деталей. Для контроля минимальной частоты вращения используется датчик действительных значений с блоком контроля и отключения при частоте вращения ниже минимальной. Во взрывоопасных зонах рекомендуется применять приводы с управлением от преобразователя.
Износ	Ремень подвержен износу и подлежит замене через 6000 часов работы при номинальной нагрузке. При меньшей нагрузке срок службы ремня значительно больше.	Диск износостойкий, конкретные данные по периодичности замены не указываются.
Способы регулирования	Маховичок или звездочка, электромеханическое или гидравлическое устройство дистанционного управления.	Маховичок, электромеханическое устройство дистанционного управления.
Индикаторные приборы	Аналоговые или цифровые индикаторы (обычно, аналоговые индикаторы со специальной шкалой).	Аналоговые или цифровые индикаторы (обычно, аналоговые индикаторы со специальной шкалой), индикатор положения на корпусе.



## 6 Редукторы

### 6.1 Редукторы в стандартном исполнении для мотор-редукторов

Полная информация по редукторам SEW содержится в каталогах "Gear Units" ("Редукторы"), "Geared Motors" ("Мотор-редукторы") и "Planetary Geared Motors" ("Планетарные мотор-редукторы").

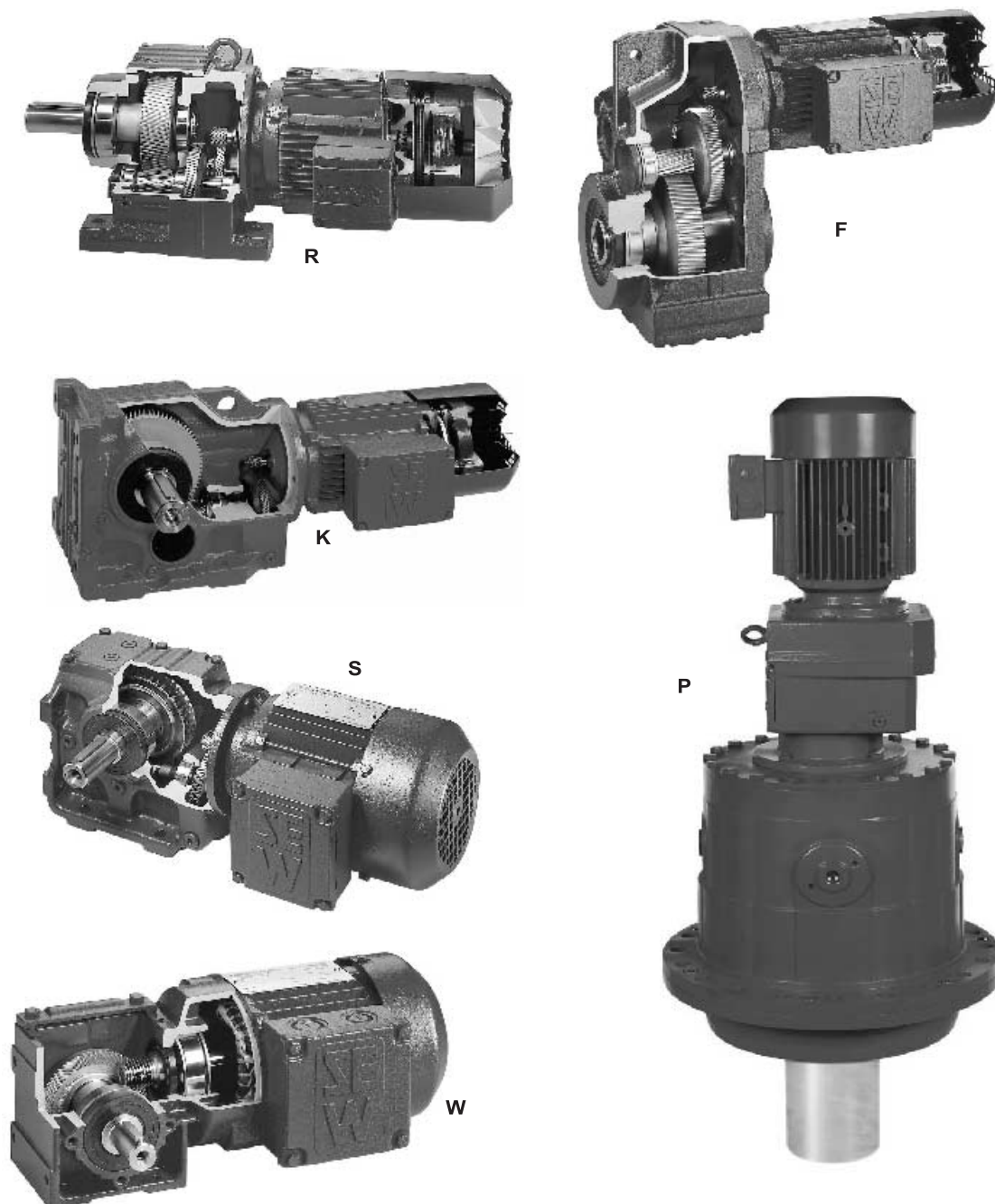
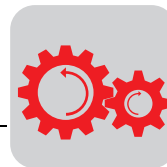


Рис. 23. Мотор-редукторы SEW

04094AXX

Цилиндрический мотор-редуктор **R**  
 Конический мотор-редуктор **K**  
 Планетарный мотор-редуктор **P**

Плоский цилиндрический мотор-редуктор **F**  
 Червячный мотор-редуктор **S**  
 Мотор-редуктор Spiroplan® **W**

**Описание**

Мотор-редуктор SEW состоит из электродвигателя (см. выше) и понижающего редуктора, образующих единую конструкцию. Редуктор соответствующего типа выбирается, в частности, и по таким критериям, как монтажное пространство, способы крепления и соединение с приводимым механизмом. Выпускаются цилиндрические, плоские цилиндрические, конические редукторы в стандартном исполнении и со сниженным люфтом, а также червячные редукторы, редукторы Spiroplan®, планетарные и низколюфтовые планетарные редукторы.

**Цилиндрические  
редукторы с  
удлиненным  
корпусом  
подшипника**

Редукторы особого типа – цилиндрические с удлиненным корпуса подшипника. Они имеют обозначение RM и применяются, главным образом, в приводе перемешивающих устройств. Редукторы RM рассчитаны на эксплуатацию в условиях высоких внешних нагрузок (радиальных и осевых) и изгибающих моментов. Остальные данные соответствуют данным стандартных цилиндрических редукторов.

**Сдвоенные  
редукторы**

Для получения очень низкой частоты вращения выходного вала модульная система SEW позволяет устанавливать на вход одного редуктора соответствующий цилиндрический редуктор.

**Частота  
вращения  
выходного вала,  
вращающий  
момент на  
выходном валу**

Типоразмер редуктора зависит от вращающего момента на его выходном валу. Величина этого момента  $M_a$  рассчитывается по номинальной мощности двигателя  $P_N$  и частоте вращения на выходе редуктора  $n_a$ .

$$M_a = P_N \cdot \eta \cdot \frac{9550}{n_a} \quad [Hm]$$

$P_N$  = номинальная мощность двигателя [кВт]

$n_a$  = частота вращения на выходе редуктора [об/мин]

$\eta$  = КПД редуктора

**Выбор мотор-  
редуктора**

Мотор-редукторы SEW, представленные в соответствующем каталоге, описываются либо через отдаваемую мощность, либо через создаваемый вращающий момент при заданной частоте вращения выходного вала. При этом дополнительным параметром является эксплуатационный коэффициент.

**КПД редуктора****Потери**

Типичные потери мощности в понижающих редукторах – это потери на трение в зубчатом зацеплении, в подшипниках и манжетах, а также потери от перемешивания масла при смазке погружением. Повышенные потери характерны для редукторов Spiroplan® и червячных редукторов.

Чем выше частота вращения на входе редуктора, тем больше и потери мощности.

**КПД зубчатой передачи**

В цилиндрических, плоских цилиндрических, конических и планетарных редукторах КПД зубчатой передачи различных ступеней составляет 97...98 %. В редукторах Spiroplan® и червячных редукторах различного исполнения этот КПД может составлять от 30 до 90 %. В период обкатки КПД редукторов Spiroplan® и червячных редукторов может снижаться до 15 %. Если КПД менее 50 %, то редуктор подвержен эффекту статического самоторможения. Такие приводы можно применять только в том случае, если нагрузка не создает обратного момента, или он настолько мал, что не может вызвать повреждения редуктора.

**Потери от перемешивания масла**

При некоторых монтажных позициях первая ступень редуктора полностью погружена в смазочный материал. Для редукторов большего типоразмера с высокой окружной скоростью входной ступени потери от перемешивания масла являются фактором, который нельзя игнорировать.

**Минимизация потерь от перемешивания масла**

Для снижения потерь от перемешивания масла для конических, цилиндрических, плоских цилиндрических и червячных редукторов рекомендуется использовать основную монтажную позицию M1.

**Допустимая механическая мощность на входе**

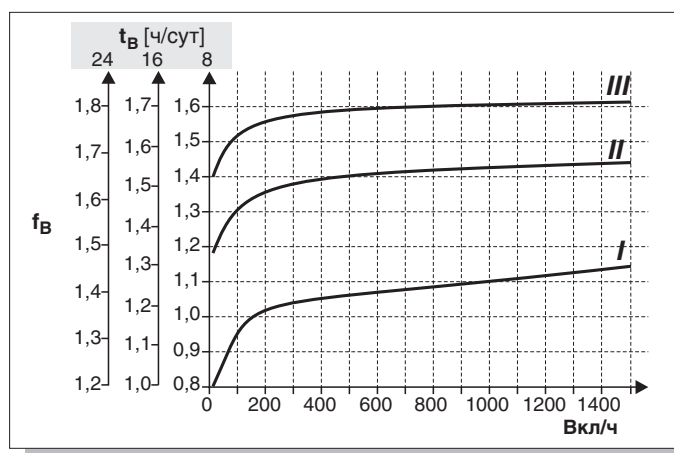
В зависимости от условий эксплуатации (высота над уровнем моря, продолжительность включения, температура окружающей среды и т. п.) для редукторов в критичной монтажной позиции и с высокой частотой вращения входного вала необходимо проверять уровень допустимой механической мощности на входе. В этом случае обратитесь в центр обслуживания SEW.





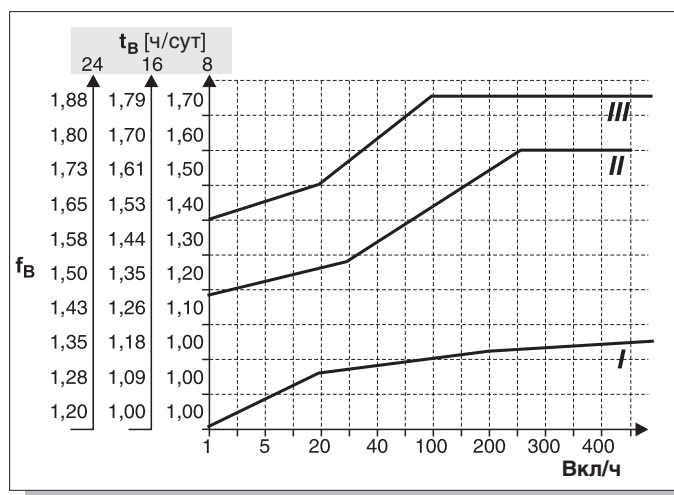
## 6.2 Выбор параметров для редукторов в стандартном исполнении с учетом эксплуатационного коэффициента

Эти редукторы рассчитаны на эксплуатацию с равномерной нагрузкой и малой частотой включения. При отклонениях от этих условий вычисленные теоретические значения вращающего момента или мощности на выходном валу следует умножить на эксплуатационный коэффициент (т. наз. сервис фактор). Этот коэффициент существенно зависит от количества включений в час, коэффициента инерции и ежедневного времени работы. С достаточной точностью (в первом приближении) можно использовать следующие диаграммы. Если учитывать конкретные особенности приводной системы, то получаются более высокие эксплуатационные коэффициенты. По результату расчета вращающего момента на выходном валу можно выбрать соответствующий редуктор. Допустимый вращающий момент на выходном валу редуктора должен быть больше либо равен расчетному.



00656CRU

Рис. 24. Необходимый эксплуатационный коэффициент  $f_B$  для редукторов типа R, F, K, W и S



04793ARU

Рис. 25. Необходимый эксплуатационный коэффициент  $f_B$  для редукторов типа P

$t_B$  = ежедневное время работы [ч/сут]

вкл/ч = количество включений в час

В данном количестве включений учитываются все процессы запуска и торможения, а также переходы с низкой частоты вращения на высокую и наоборот.



### Характер нагрузки

- I Равномерная нагрузка, допустимый коэффициент инерции  $\leq 0,2$
- II Умеренная ударная нагрузка, допустимый коэффициент инерции  $\leq 3$
- III Значительная ударная нагрузка, допустимый коэффициент инерции  $\leq 10$

$$f_a = \frac{J_X}{J_M}$$

$f_a$  = коэффициент инерции  
 $J_X$  = сумма всех внешних моментов инерции  
 $J_M$  = момент инерции ротора двигателя

### Пример

Характер нагрузки I, количество включений 200 вкл/ч и ежедневное время работы 24 ч/сут: в результате  $f_B = 1,35$ .

### Эксплуатационный коэффициент

$f_B > 1,8$

В определенных условиях эксплуатационный коэффициент может быть  $> 1,8$ . Это возможно при большом коэффициенте инерции ( $> 10$ ), большом люфте в передающих элементах приводимого механизма или при значительных внешних радиальных нагрузках. В этом случае обратитесь в центр обслуживания SEW.

### Определение характера нагрузки

Характер нагрузки (I...III) определяется с учетом самых неблагоприятных значений моментов инерции, как внешних, так и со стороны двигателя. Возможна интерполяция между кривыми I...III.

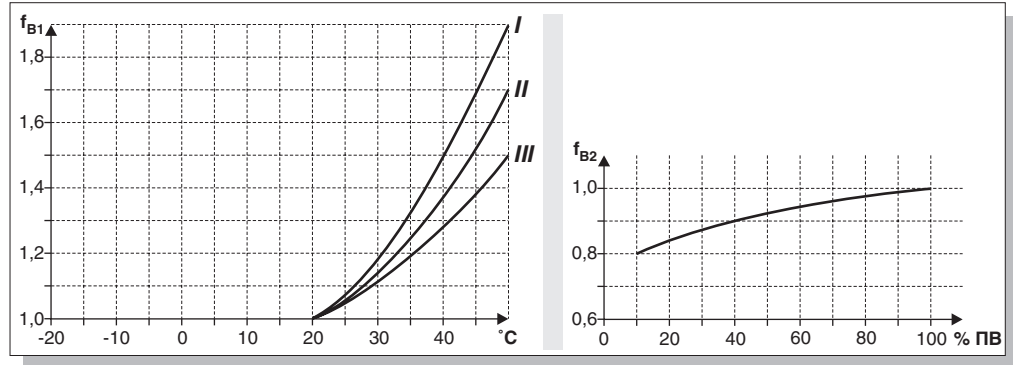
### Эксплуатационный коэффициент SEW

В каталоге SEW для каждого мотор-редуктора указан соответствующий эксплуатационный коэффициент. Этот эксплуатационный коэффициент представляет собой отношение номинальной мощности редуктора к номинальной мощности двигателя. Метод определения эксплуатационных коэффициентов не нормирован. Поэтому данные по эксплуатационным коэффициентам у разных изготовителей существенно различаются и не подлежат сопоставлению.



### Дополнительные эксплуатационные коэффициенты для червячных редукторов

При выборе червячных редукторов следует дополнительно учитывать влияние температуры окружающей среды и продолжительности включения. На рисунке показаны дополнительные эксплуатационные коэффициенты для червячных редукторов.



00657DRU

Рис. 26. Дополнительные эксплуатационные коэффициенты  $f_{B1}$  и  $f_{B2}$  для червячных редукторов

$$ПВ[\%] = \frac{t_B}{60} \cdot 100$$

ПВ = продолжительность включения  
 $t_B$  = время работы под нагрузкой [мин/ч]

Если планируется эксплуатация при температуре воздуха  $< -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , обратитесь в центр обслуживания SEW.

### Общий эксплуатационный коэффициент для червячного редуктора

Общий эксплуатационный коэффициент  $f_{BT}$  для выбора червячного редуктора рассчитывается следующим образом:

$$f_{BT} = f_B \cdot f_{B1} \cdot f_{B2}$$

$f_B$  = эксплуатационный коэффициент по графику "Необходимый эксплуатационный коэффициент  $f_B$ "  
 $f_{B1}$  = эксплуатационный коэффициент, учитывающий температуру окружающей среды  
 $f_{B2}$  = эксплуатационный коэффициент, учитывающий продолжительность включения



### 6.3 Редукторы для сервоприводов

Серводвигатель с редуктором – это комбинация из синхронного или асинхронного серводвигателя и одного из следующих редукторов:

- редукторы в стандартном исполнении: цилиндрические (R), плоские цилиндрические (F), конические (K), червячные (S);
- редукторы со сниженным люфтом: цилиндрические (R), плоские цилиндрические (F), конические (K);
- низколюфтовые планетарные (PS).

Дополнительная информация содержится в каталоге "Geared Servomotors" ("Серводвигатели с редуктором").

#### Низколюфтовые планетарные мотор-редукторы

##### • Низколюфтовые планетарные мотор-редукторы серии PSF

Редукторы серии PSF выпускаются в типоразмерах от 211/212 до 901/902. Они оснащаются квадратным фланцем B5 и сплошным выходным валом.

##### • Низколюфтовые планетарные мотор-редукторы серии PSB

Редукторы серии PSB выпускаются в типоразмерах от 311/312 до 611/612. Выходной вал особой конструкции (с фланцевым креплением вала приводного механизма) соответствует стандарту EN ISO 9409. Этот стандарт устанавливает требования к оборудованию промышленных роботов. Редукторы серии PSB применяются, главным образом, в приводе промышленных установок, где требуется высокая устойчивость к большим внешним радиальным нагрузкам и опрокидыванию.

##### • Низколюфтовые планетарные мотор-редукторы серии PSE

Редукторы серии PSE выпускаются в типоразмерах от 211/212 до 611/612. Они оснащаются круглым фланцем B14 и сплошным выходным валом. Редукторы этой серии отличаются от редукторов серии PSF более дешевой конструкцией. Технические данные (угловой люфт, вращающий момент и передаточные числа) сопоставимы с данными редукторов серии PSF/PSB.

#### Данные для выбора параметров

Для выбора параметров серводвигателей с редуктором необходимы следующие данные:

- |   |                                       |
|---|---------------------------------------|
| – Вращающий момент на выходном валу   | $M_{\text{амакс}}$                    |
| – Частота вращения выходного вала   | $n_{\text{амакс}}$                    |
| – Внешняя радиальная/осевая нагрузка  | $F_{Ra} / F_{Aa}$                     |
| – Угловой люфт  | $\alpha < 1', 3', 5', 6', 10', > 10'$ |
| – Монтажная позиция   | M1 ... M6                             |
| – Температура окружающей среды  | $\vartheta_U$                         |
| – Точный цикл нагрузки, т. е. все необходимые данные по вращающему моменту, времени работы и внешнему моменту инерции (при разгоне и торможении). |                                       |



Люфт редуктора  
(исполнение N  
и R)

Редукторы серии PS. выпускаются в исполнении N (нормальный люфт) или R (сниженный люфт):

Редуктор	N	R
PS. 211...901	$\alpha < 6'$	$\alpha < 3'$
PS. 212...902	$\alpha < 10'$	$\alpha < 5'$

Редукторы с угловым люфтом  $< 1'$  – по запросу

Опора двигателя

Если на редуктор PS. устанавливается большой двигатель, то при следующих соотношениях масс необходимо использование дополнительной опоры двигателя:

PS. одноступенчатые:  $m_M / m_{PS} > 4$

PS. двухступенчатые:  $m_M / m_{PS} > 2,5$

Дополнительные инструкции по проектированию приводов с редукторами PS. содержатся в каталогах "Low Backlash Planetary Gear Units" ("Низколюфтовые планетарные редукторы") и "Geared Servomotors" ("Серводвигатели с редуктором").

**Серводвигатели  
с редуктором  
R/F/K со  
сниженным  
люфтом**

Конические, цилиндрические и плоские цилиндрические мотор-редукторы со сниженным люфтом, оснащенные синхронным или асинхронным серводвигателем и работающие в диапазоне вращающего момента  $M_{\text{амакс}} = 200 \dots 3000 \text{ Нм}$ , являются дополнением к линейке низколюфтовых планетарных мотор-редукторов компании SEW.

В исполнении со сниженным люфтом выпускаются редукторы следующих типоразмеров:

- R37 ... R97
- F37 ... F87
- K37 ... K87

Проектирование

Монтажные размеры и диапазоны передаточных чисел такие же, как у редукторов в стандартном исполнении.

Значения углового люфта в зависимости от типоразмера редуктора указаны в соответствующих каталогах.



#### 6.4 Внешние радиальные и осевые нагрузки

##### Точка приложения усилия

Дополнительным критерием выбора типоразмера редуктора является величина предполагаемых внешних радиальных и осевых нагрузок. Величина внешних радиальных нагрузок ограничивается прочностью вала и несущей способностью подшипников. Указанные в каталоге максимально допустимые значения всегда относятся к случаю приложения усилия к середине вала в неблагоприятном направлении.

Если усилие прилагается не в середине вала, то допустимые значения внешних радиальных нагрузок могут быть больше или меньше. Чем ближе к выступу вала находится точка приложения усилия, тем больше величина допустимых внешних радиальных нагрузок, и наоборот. Соответствующие формулы пересчета приводятся в каталоге "Мотор-редукторы", гл. "Порядок выбора редуктора". Точный расчет величины допустимой осевой нагрузки возможен только при известной радиальной нагрузке.

Внешняя радиальная нагрузка на выходной вал при передаче усилия через звездочку или шестерню вычисляется по величине вращающего момента на этом валу и радиусу звездочки или шестерни.

$$F = \frac{M}{r} \quad [H]$$

F = внешняя радиальная нагрузка [H]  
M = вращающий момент на выходном валу [Нм]  
r = радиус [м]

##### Определение внешней радиальной нагрузки

При определении внешней радиальной нагрузки необходимо учитывать коэффициенты запаса  $f_z$ . Их величина зависит от используемых передающих элементов (шестерни, цепи, клиновые, плоские или зубчатые ремни). При использовании ременной передачи следует учитывать влияние предварительного натяжения ремня на шкив. Вычисленные с учетом коэффициентов запаса внешние радиальные нагрузки не должны превышать величины, допустимой для данного редуктора.

Передающий элемент	Коэффициент запаса $f_z$	Примечания
Прямая передача	1,0	–
Шестерни	1,0	$\geq 17$ зубьев
Шестерни	1,15	$< 17$ зубьев
Звездочки цепной передачи	1,0	$\geq 20$ зубьев
Звездочки цепной передачи	1,25	$< 20$ зубьев
Клиновые ремни	1,75	В зависимости от предварительного натяжения
Плоские ремни	2,50	В зависимости от предварительного натяжения
Зубчатые ремни	1,50	В зависимости от предварительного натяжения
Зубчатая рейка	1,15	$< 17$ зубьев (шестерня)

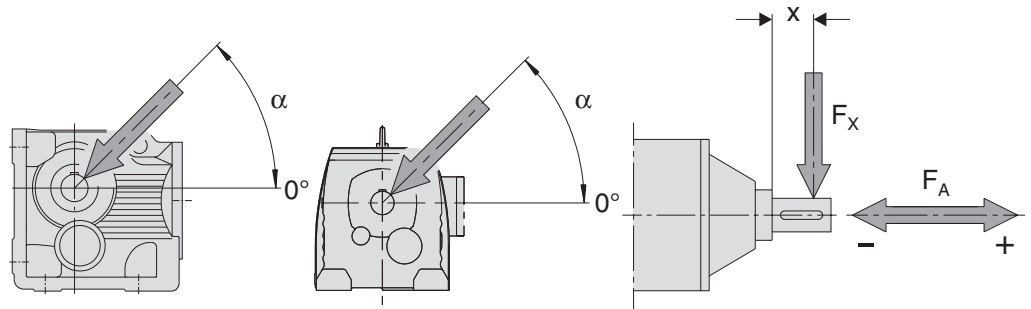


$$F_R = \frac{M_d \cdot 2000}{d_0} \cdot f_Z$$

$F_R$  = внешняя радиальная нагрузка [Н]  
 $M_d$  = вращающий момент на выходном валу [Нм]  
 $d_0$  = средний диаметр [мм]  
 $f_Z$  = коэффициент запаса

Определение  
точки и  
направления  
приложения  
усилия

Точка и направление приложения усилия определяются по следующей диаграмме:



02355CXX

Рис. 27. Определение точки и направления приложения усилия

$F_X$  = допустимая внешняя радиальная нагрузка в точке X [Н]  
 $F_A$  = допустимая осевая нагрузка [Н]

## 7 Формулы приводной техники

### 7.1 Основные виды движения

В работе всех приводных систем можно выделить два основных вида движения:

Линейное движение (приводы транспортных и подъемных устройств)		Вращательное движение (поворотный стол)	
Расстояние	s [м]	Угловое расстояние	φ [рад] или [°] рад – это радианная мера единичного круга и указывается без единицы измерения [рад] = 1 360° ≙ 6,28 рад
Скорость	v [м/с]	Угловая скорость	ω [рад/с] или [1/с]
		Частота вращения	n [об/мин] ω = 2 · π · n
Ускорение	a [м/с <sup>2</sup> ]	Угловое ускорение	α [рад/с <sup>2</sup> ] или [1/с <sup>2</sup> ]
Сила	F [Н]	Вращающий момент	M [Нм]
Масса	m [кг]	Момент инерции	J [кгм <sup>2</sup> ]
		Радиус	r [м]
		Диаметр	D [м]

#### Уравнения кинематики

Для линейного и прямолинейного движения действительно:

$$v = \text{Const.}$$

$$a = \text{Const.}$$

Расстояние	$s = v \cdot t$	$s = \frac{v \cdot t}{2} = \frac{a \cdot t^2}{2} = \frac{v^2}{2 \cdot a}$
Скорость	$v = \frac{s}{t}$	$v = \sqrt{2 \cdot a \cdot s} = \frac{2 \cdot s}{t} = a \cdot t$
Ускорение	$a = 0$	$a = \frac{v}{t} = \frac{2 \cdot s}{t^2} = \frac{v^2}{2 \cdot s}$
Время	$t = \frac{s}{v}$	$t = \sqrt{\frac{2 \cdot s}{a}} = \frac{v}{a} = \frac{2 \cdot s}{v}$



Для вращательного движения действительно:

$$\omega = \text{Const.}$$

$$\alpha = \text{Const.}$$

Расстояние	$\varphi = \omega \cdot t$	
Скорость	$\omega = \frac{\varphi}{t}$	$\omega = \sqrt{2 \cdot \alpha \cdot \varphi} = \frac{2 \cdot \varphi}{t} = \alpha \cdot t$
Ускорение	$\alpha = 0$	$\alpha = \frac{\omega}{t} = \frac{2 \cdot \varphi}{t^2} = \frac{\omega^2}{2 \cdot \varphi}$
Время	$t = \frac{\varphi}{\omega}$	$t = \sqrt{\frac{2 \cdot \varphi}{\alpha}} = \frac{\omega}{\alpha} = \frac{2 \cdot \varphi}{\omega}$

**Пересчет:  
линейное /  
вращательное  
движение**

Поскольку основа работы любой приводной системы – это вращательное движение мотор-редуктора, необходимо пересчитывать параметры линейного движения в параметры вращательного, и наоборот.

Угол	$\varphi = \frac{s}{r} = \frac{2 \cdot s}{D}$	$\varphi [^\circ] = \frac{2 \cdot 180}{\pi} \cdot \frac{s [MM]}{D [MM]} = 115 \frac{s [MM]}{D [MM]}$
Скорость	$\omega = \frac{v}{r} = \frac{2 \cdot v}{D}$	$n [\text{об/мин}] = \frac{60 \cdot 1000}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{2 \cdot v [M/C]}{D [MM]} = 19100 \frac{v [M/C]}{D [MM]}$
Ускорение	$\alpha = \frac{a}{r} = \frac{2 \cdot a}{D}$	$\alpha [1/c^2] = 2000 \frac{a [M/C^2]}{D [MM]}$

**7.2 Моменты инерции****Приведение  
внешних  
моментов  
инерции**

Для правильного расчета условий разгона и торможения привода необходимо учитывать все внешние моменты инерции, приведя их к валу двигателя. При этом согласно закону сохранения энергии все передаточные числа возводятся в квадрат.

**Внешний  
момент  
инерции**

$$J_X = \frac{J_L}{i_T^2}$$

$J_L$  = момент инерции нагрузки  
 $J_X$  = внешний момент инерции, приведенный к валу двигателя  
 $i_T$  = полное передаточное число

Отсюда для вращательного движения следует:

**Вращательное  
движение**

$$J_X [кгм^2] = J_L [кгм^2] \cdot \left( \frac{n}{n_M} \right)^2$$

$n$  = частота вращения с учетом полного передаточного числа (промежуточная передача и редуктор)  
 $n_M$  = частота вращения двигателя









Таким же образом можно привести к валу двигателя и момент инерции линейно перемещаемой массы:

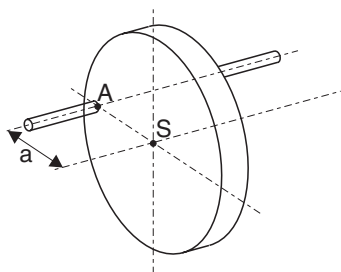
**Линейное  
движение**

$$J_X [кгм^2] = 91,2 \cdot m [кг] \cdot \left( \frac{v [м/с]}{n_M [об/мин]} \right)^2$$

**Вращающиеся  
тела**

Моменты инерции типичных вращающихся тел

Тело	Расположение оси вращения	Символ	Момент инерции J
Круглое кольцо, тонкое Полый цилиндр, тонкостенный	Перпендикулярно плоскости кольца		$J = m \cdot r^2$
Сплошной цилиндр	Продольная ось		$J = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2$
Полый цилиндр, толстостенный	Продольная ось		$J = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_1^2 + r_2^2)$
Круглый диск	Перпендикулярно плоскости диска		$J = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2$
Круглый диск	Ось симметрии в плоскости диска		$J = \frac{1}{4} \cdot m \cdot r^2$
Шар	Через центр		$J = \frac{2}{5} \cdot m \cdot r^2$
Сфера	Через центр		$J = \frac{2}{3} \cdot m \cdot r^2$
Стержень, тонкий (длина l)	Перпендикулярно стержню, в середине		$J = \frac{1}{12} \cdot m \cdot l^2$



**Закон  
Штейнера**

$$J_A = J_S + m \cdot a^2$$

$J_S$  = момент инерции тела, если ось вращения проходит через центр тяжести S

$J_A$  = момент инерции того же тела, если ось вращения проходит через точку A

a = расстояние между параллельными осями

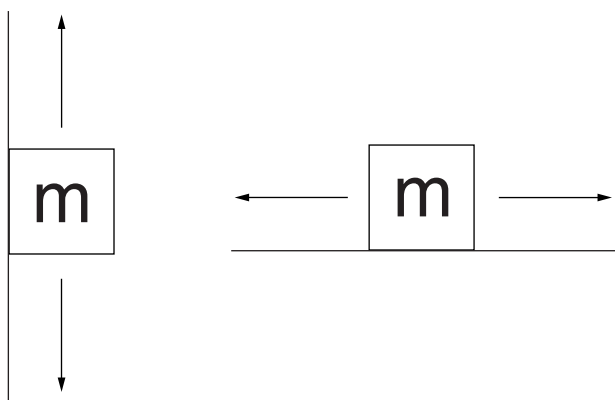
m = масса тела

### 7.3 Статическая и динамическая мощность

Полная мощность любой приводной системы складывается из статической и динамической мощности. Статическая мощность – это мощность, необходимая для перемещения с постоянной скоростью. Она зависит прежде всего от сил трения и тяжести. В отличие от этого динамическая мощность – это мощность, расходуемая на ускорение и замедление. Обе эти составляющие в различных приводных системах проявляются по-разному.

#### Горизонтальное/ вертикальное движение

Это взаимодействие можно пояснить на примере вертикального и горизонтального движения:



Для наглядности сравнения будем исходить из того, что масса, скорость и ускорение в обоих примерах одинаковы.

Сила	Вертикальное движение	Горизонтальное движение
Сила тяжести	большая	нуль
Ускоряющая сила	одинаково большая	
Сила трения	в данном примере опускается	

Из этого примера следует, что подъемное устройство потребляет в целом больше мощности, чем транспортное. Кроме того, в приводе подъемного устройства 90% мощности двигателя расходуется на преодоление силы тяжести (статическая мощность).

В отличие от этого в приводе транспортного устройства 90 % мощности двигателя расходуется на создание ускоряющей силы (динамическая мощность).

Еще один вариант применения – подъемное устройство с противовесом. При 100%-ном равновесии влияние силы тяжести отсутствует, но мощность на ускорение удваивается, поскольку удвоилась ускоряемая масса. Тем не менее, полная мощность меньше, чем в случае подъемного устройства без противовеса.

#### Подъемное устройство с противовесом

## 7.4 Силы сопротивления

Силы сопротивления – это силы, которые противодействуют движению.

### Силы статического сопротивления

Трение сцепления и трение скольжения

Сила трения

$$F_R = \mu \cdot F_N$$

$F_R$  = сила трения [Н]

$\mu$  = коэффициент трения

$F_N$  = нормальная составляющая силы тяжести [Н]

Сила тяжести

$$F_N = m \cdot g \cdot \cos \alpha$$

$m$  = масса [кг]

$g$  = ускорение свободного падения [ $\text{м/с}^2$ ]

$\alpha$  = угол наклона [ $^\circ$ ]

Сила сопротивления качению

$$F_F = m \cdot g \cdot \left( \frac{2}{D} \cdot \left( \mu_L \cdot \frac{d}{2} + f \right) + c \right)$$

$F_F$  = сила сопротивления качению [Н]

$D$  = диаметр колеса [мм]

$\mu_L$  = коэффициент трения в подшипнике

$d$  = диаметр подшипника [мм]

$f$  = плечо силы трения качения [мм]

$c$  = коэффициент трения обода и реборды колеса

Сила сопротивления качению складывается из следующих составляющих:

Сила трения качения

$$F = m \cdot g \cdot \frac{2 \cdot f}{D}$$

Сила трения в подшипниках

$$F = m \cdot g \cdot \mu_L \cdot \frac{d}{D}$$

Сила трения в колее

$$F = m \cdot g \cdot c$$

Сила тяжести

Вертикальное подъемное устройство

$$F = m \cdot g$$

Наклонное подъемное устройство

$$F = m \cdot g \cdot \sin \alpha$$

**Силы  
динамического  
сопротивления**

Ускоряющая сила

Линейное  
движение

$$F = m \cdot a$$

Вращательное  
движение

$$M = J \cdot \alpha$$

**7.5 Вращающий момент**Линейное  
движение

$$M = F \cdot r = \frac{F \cdot D}{2} \quad M [\text{Нм}] = \frac{F [\text{Н}] \cdot D [\text{мм}]}{2000}$$

Вращательное  
движение

$$M = J \cdot \alpha \quad M [\text{Нм}] = J [\text{кгм}^2] \cdot \frac{n [\text{об/мин}]}{9,55 \cdot t_A [\text{с}]}$$

**7.6 Мощность**Линейное  
движение

$$P = F \cdot v \quad P [\text{кВт}] = \frac{F [\text{Н}] \cdot v [\text{м/с}]}{1000}$$

Вращательное  
движение

$$P = M \cdot \omega \quad P [\text{кВт}] = \frac{M [\text{Нм}] \cdot n [\text{об/мин}]}{9550}$$

**7.7 КПД**

Общий КПД приводной системы – это произведение КПД всех ее отдельных участков. Как правило, это:

- КПД редуктора  $\eta_G$
- КПД нагрузки  $\eta_L$

Общий КПД  $\eta_T = \eta_G \cdot \eta_L$

При расчете статической и динамической мощности эти составляющие общего КПД следует рассматривать отдельно.

## 7.8 Расчет движения ходового винта

Частота вращения ходового винта

$$n = \frac{v}{P} \quad n [\text{об/мин}] = \frac{v \left[ \frac{\text{м}}{\text{с}} \right] \cdot 60 \cdot 10^3}{P [\text{мм}]}$$

n = частота вращения ходового винта  
v = скорость подачи нагрузки  
P = шаг ходового винта

Угловое расстояние

$$\varphi = \frac{2\pi \cdot s}{P} \quad \varphi [^\circ] = \frac{360 \cdot s [\text{мм}]}{P [\text{мм}]}$$

φ = угловой ход ходового винта  
s = ход подачи нагрузки  
P = шаг ходового винта

Угловое ускорение

$$\alpha = \frac{2\pi \cdot a}{P} \quad \alpha \left[ \frac{\text{рад}}{\text{с}^2} \right] = \frac{2\pi \cdot a \left[ \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right] \cdot 1000}{P [\text{мм}]}$$

α = угловое ускорение ходового винта  
a = ускорение подачи нагрузки  
P = шаг ходового винта

Статический вращающий момент

$$M = \frac{F \cdot P}{2\pi \cdot \eta} \quad M [\text{Нм}] = \frac{F [\text{Н}] \cdot P [\text{мм}]}{2\pi \cdot 1000 \cdot \eta}$$

F = сила сопротивления нагрузки, например, сила трения  
P = шаг ходового винта  
M = статический вращающий момент  
η = КПД ходового винта (см. таблицу в Приложении)

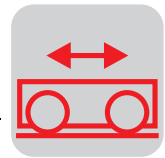
Динамический вращающий момент рассчитывается по формулам линейного движения.

**7.9 Специальные формулы**

Пояснения к отдельным условным обозначениям см. в Приложении.

Величина	Горизонтальное и вращательное движение, вертикальное движение вверх	Вертикальное движение вниз (упрощенный расчет с синхронной частотой вращения)
Время разгона [с]	$t_A = \frac{\left(J_M + \frac{J_X}{\eta}\right) \cdot n_M}{9,55 \cdot \left(M_H - \frac{M_L}{\eta}\right)}$	$t_A = \frac{\left(J_M + \frac{J_X}{\eta}\right) \cdot n_S}{9,55 \cdot (M_H - M_L \cdot \eta)}$
Время переключения [с]	$t_U = \frac{(J_M + J_X \cdot \eta) \cdot (n_2 - n_1)}{9,55 \cdot (M_U + M_L \cdot \eta)}$	$t_U = \frac{(J_M + J_X \cdot \eta) \cdot (n_{S2} - n_{S1})}{9,55 \cdot (M_U - M_L \cdot \eta)}$
Время торможения [с]	$t_B = \frac{(J_M + J_X \cdot \eta) \cdot n}{9,55 \cdot (M_B + M_L \cdot \eta)}$	$t_B = \frac{(J_M + J_X \cdot \eta) \cdot n_S}{9,55 \cdot (M_B - M_L \cdot \eta)}$
Длина пути разгона [мм]	$s_A = \frac{1}{2} \cdot t_A \cdot v \cdot 1000$	$s_A = \frac{1}{2} \cdot t_A \cdot \frac{n_S}{n_M} \cdot v \cdot 1000$
Длина пути переключения [мм]	$s_U = \frac{1}{2} \cdot t_U \cdot v_2 \cdot 1000 \cdot \left(1 + \frac{n_1}{n_2}\right)$	$s_U = \frac{1}{2} \cdot t_U \cdot \frac{n_{S2}}{n_2} \cdot v_2 \cdot 1000 \cdot \left(1 + \frac{n_{S1}}{n_{S2}}\right)$
Длина тормозного пути [мм]	$s_B = v \cdot 1000 \cdot \left(t_2 + \frac{1}{2} \cdot t_B\right)$	$s_B = v \cdot 1000 \cdot \left(t_2 + \frac{1}{2} \cdot t_B\right)$
Точность остановки	$X_B \approx \pm 0,12 \cdot s_B$	$X_B \approx \pm 0,12 \cdot s_B$
Ускорение при разгоне [м/с <sup>2</sup> ]	$a_A = \frac{v}{t_A}$	$a_A = \frac{v}{t_A} \cdot \frac{n_S}{n_M}$
Замедление при переключении [м/с <sup>2</sup> ]	$a_U = \frac{v_2}{t_U} \cdot \left(1 - \frac{n_{M1}}{n_{M2}}\right)$	$a_U = \frac{v_2}{t_U} \cdot \left(1 - \frac{n_{M1}}{n_{M2}}\right) \cdot \frac{n_{S2}}{n_{M2}}$
Замедление при торможении [м/с <sup>2</sup> ]	$a_B = \frac{v}{t_B}$	$a_B = \frac{v}{t_B}$
Количество включений [вкл/ч]	$Z_P = Z_0 \cdot \frac{1 - \frac{M_L}{M_H \cdot \eta}}{\frac{J_M + J_Z + \frac{J_X}{\eta}}{J_M}} \cdot K_P$	$Z_P = Z_0 \cdot \frac{1 - \frac{M_L \cdot \eta}{M_H}}{\frac{J_M + J_Z + J_X \cdot \eta}{J_M}} \cdot K_P$
Энергия торможения [Дж]	$W_B = \frac{M_B}{M_B + M_L \cdot \eta} \cdot \frac{(J_M + J_Z + J_X \cdot \eta) \cdot n_M^2}{182,5}$	$W_B = \frac{M_B}{M_B - M_L \cdot \eta} \cdot \frac{(J_M + J_Z + J_X \cdot \eta) \cdot n_M^2}{182,5}$
Срок службы тормоза [ч]	$L_B = \frac{W_N}{W_B \cdot Z_N}$	$L_B = \frac{W_N}{W_B \cdot Z_N}$





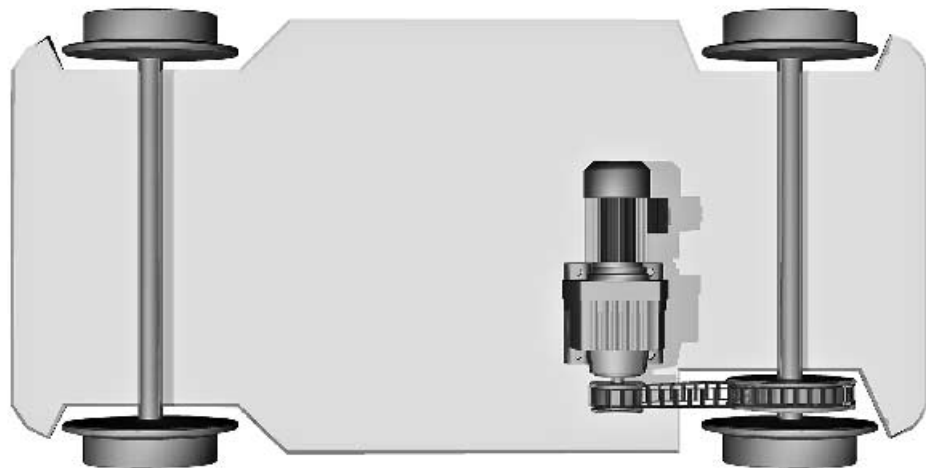
## 8 Пример расчета привода транспортного устройства

### Условия

По следующим данным необходимо рассчитать параметры асинхронного двигателя с тормозом и цилиндрического редуктора:

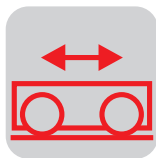
Масса тележки:	$m_0 = 1500 \text{ кг}$
Масса груза:	$m_L = 1500 \text{ кг}$
Скорость:	$v = 0,5 \text{ м/с}$
Диаметр колеса:	$D = 250 \text{ мм}$
Диаметр цапфы:	$d = 60 \text{ мм}$
Пара трения:	сталь/сталь
Плечо силы трения качения:	сталь/сталь, $f = 0,5 \text{ мм}$
Коэффициент трения обода и реборды колеса:	(с опорой в подшипниках качения) $c = 0,003$
Коэффициент трения в подшипниках:	(подшипники качения) $\mu_L = 0,005$
Промежуточная передача:	цепная, $i_V = 27/17 = 1,588$
Диаметр звездочки (ведомой):	$d_0 = 215 \text{ мм}$
КПД нагрузки:	$\eta_L = 0,90$
Продолжительность включения:	40 % ПВ
Количество включений в час:	75 ездов в час с грузом и 75 ездов в час без груза, 8 часов в сутки

Привод на 2 колеса. При трогании с места пробуксовка этих колес не допускается.



00777AXX

Рис. 28. Привод транспортного устройства



### 8.1 Расчет параметров двигателя

Сила  
сопротивления  
качению

$$F_F = m \cdot g \cdot \left( \frac{2}{D} \cdot \left( \mu_L \cdot \frac{d}{2} + f \right) + c \right) [H]$$

с грузом

$$\underline{F_F} = 3000 \text{ кг} \cdot 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot \left( \frac{2}{250 \text{ мм}} \cdot \left( 0,005 \cdot \frac{60 \text{ мм}}{2} + 0,5 \text{ мм} \right) + 0,003 \right) = \underline{241 \text{ Н}}$$

без груза

$$\underline{F_F} = 1500 \text{ кг} \cdot 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot \left( \frac{2}{250 \text{ мм}} \cdot \left( 0,005 \cdot \frac{60 \text{ мм}}{2} + 0,5 \text{ мм} \right) + 0,003 \right) = \underline{120,5 \text{ Н}}$$

Для расчета сопротивления качению не существенно, сколько используется колес.

**Статическая  
мощность**

Статическая мощность  $P_S$  учитывает все силы, действующие при движении без ускорения. Основные из них:

- сила трения качения;
- силы трения различных элементов;
- сила тяжести на подъемах;
- сила аэродинамического сопротивления.

$$P_S = \frac{F_F \cdot v}{\eta}$$

**КПД**

$\eta_T$  – это общий КПД приводной системы, состоящий из КПД редуктора  $\eta_G$  и КПД внешних передающих элементов  $\eta_L$ . Значения КПД различных передающих элементов указаны в таблице (см. Приложение).

**Цилиндрическая  
и коническая  
зубчатая  
передача**

КПД редуктора с цилиндрическими или коническими шестернями можно принять за  $\eta_G = 0,98$  для каждой ступени (например, 3-ступенчатый редуктор:  $\eta_G = 0,94$ ). КПД червячных редукторов с учетом передаточного числа можно взять из каталога SEW "Мотор-редукторы".

Поскольку на данном этапе расчета редуктор еще не выбран, принимается среднее значение для 2- или 3-ступенчатого редуктора  $\eta_G = 0,95$ .

**КПД нагрузки**

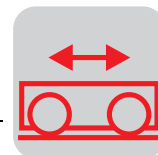
КПД нагрузки зависит от вида передающих элементов после редуктора (например, цепи, ремни, тросы, зубчатые элементы и т. п.).

По таблице в Приложении: КПД цепной передачи  $\eta_L = 0,90 \dots 0,96$ .

При отсутствии более точных данных принимается минимальное значение ( $\eta_L = 0,90$ ).

Общий КПД

$$\underline{\eta_T} = \eta_G \cdot \eta_L = 0,95 \cdot 0,9 = \underline{0,85}$$



КПД при  
обратной  
нагрузке

Значения КПД при наличии обратной нагрузки можно рассчитать по следующей формуле:

$$\eta' = 2 - \frac{1}{\eta}$$

Отсюда следует, что при КПД 50 % (0,5) и меньше обратная нагрузка сводит КПД редуктора к 0 (эффект статического самоторможения!).

Статическая  
мощность

с грузом

$$P_S = \frac{241 \text{ N} \cdot 0,5 \frac{\text{M}}{\text{C}}}{0,85} = 142 \text{ Вт} = \underline{0,142 \text{ кВт}}$$

без груза

$$P_S = \frac{120,5 \text{ N} \cdot 0,5 \frac{\text{M}}{\text{C}}}{0,85} = 71 \text{ Вт} = \underline{0,071 \text{ кВт}}$$

Вычисленная статическая мощность относится к валу двигателя.

Эта мощность – только часть необходимой мощности двигателя, поскольку для приводов горизонтального перемещения определяющей является мощность на ускорение (= динамическая мощность).

Динамическая  
мощность

Динамической называется мощность, расходуемая на ускорение всей системы (нагрузка, передающие элементы, редуктор и двигатель). В нерегулируемых приводах двигатель создает динамический момент, который и ускоряет эту систему. Чем выше этот момент, тем больше ускорение.

В общем случае моментом инерции передающих элементов и редуктора можно пренебречь. Момент инерции ротора двигателя не известен, так как его параметры еще не определены. Поэтому мощность двигателя можно лишь приблизительно рассчитать по динамической мощности на ускорение нагрузки. Однако поскольку в приводах обычных транспортных устройств соотношение моментов инерции нагрузки и ротора двигателя очень велико, полная мощность двигателя весьма точно рассчитывается и по уже имеющимся данным. Тем не менее, необходима последующая проверка.

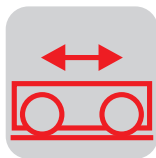
Полная мощность

$$P_T = P_{DL} + P_{DM} + P_S$$

$$P_T = \frac{m \cdot a \cdot v}{\eta} + P_{DM} + \frac{F_F \cdot v}{\eta}$$

$P_T$  = полная мощность  
 $P_{DL}$  = динамическая мощность на ускорение нагрузки  
 $P_{DM}$  = динамическая мощность двигателя  
 $P_S$  = статическая мощность  
 $\eta$  = общий КПД

Значение допустимого ускорения при разгоне  $a_p$  пока неизвестно и подлежит расчету. Условие расчета этого значения – отсутствие пробуксовки ведущих колес.



Допустимое ускорение при разгоне

Пробуксовка имеет место в том случае, если окружное усилие  $F_U$  на колесе превышает силу трения  $F_R$ .

Окружное усилие

Предельный случай:  $F_U = m \cdot a = F_R = m' \cdot g \cdot \mu_0$

$m'$  = масса нагрузки на ведущие колеса, в случае с 2 ведущими колесами  $m' = m/2$   
 $\mu_0 = 0,15$  (коэффициент трения сцепления пары сталь/сталь, см. таблицу в Приложении)

Допустимое ускорение

$$a_p = \frac{1}{2} \cdot g \cdot \mu_0 = \frac{1}{2} \cdot 9,81 \frac{M}{c^2} \cdot 0,15 = 0,74 \frac{M}{c^2}$$

Если ускорение "а" меньше допустимого ускорения "а<sub>р</sub>", то колеса не пробуксовывают.

Полная мощность

(без учета динамической мощности двигателя)

с грузом

$$\underline{P_T} = \frac{3000 \text{ кг} \cdot 0,74 \frac{M}{c^2} \cdot 0,5 \frac{M}{c}}{0,85} + \frac{241 \text{ Н} \cdot 0,5 \frac{M}{c}}{0,85} = 1448 \text{ Вт}$$

без груза

$$\underline{P_T} = \frac{1500 \text{ кг} \cdot 0,74 \frac{M}{c^2} \cdot 0,5 \frac{M}{c}}{0,85} + \frac{120,5 \text{ Н} \cdot 0,5 \frac{M}{c}}{0,85} = 724 \text{ Вт}$$

Плавное ускорение

Пробуксовка ведущих колес при больших ускорениях недопустима. Поэтому выбирается 2-полюсный двигатель. Соотношение моментов инерции внешней нагрузки и ротора такого двигателя меньше, поэтому на разгон двигателя до высокой частоты вращения требуется больше энергии. Таким образом, процесс ускорения проходит более плавно.

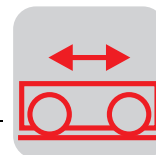
Динамический момент

Для 2-полюсных двигателей этого класса мощности динамический момент  $M_H$  в 2 раза больше номинального момента. Использованное в расчетах значение ускорения является максимально допустимым, поэтому выбираем двигатель, номинальная мощность которого меньше полной мощности  $P_t$ , полученной для случая движения без груза.

Выбранный двигатель

DT71D2 /BM  
 $P_N = 0,55 \text{ кВт}$   
 $n_N = 2700 \text{ об/мин}$   
 $M_H/M_N = 1,9$   
 $J_M = 5,51 \cdot 10^{-4} \text{ кгм}^2$

Данные каталога "Мотор-редукторы"



### Проверочный расчет

Предыдущие вычисления проводились без учета данных двигателя. Поэтому необходим подробный проверочный расчет с использованием этих данных.

#### Режим разгона

Внешний момент инерции, приведенный к валу двигателя (движение без груза):

Внешний момент инерции

$$J_X = 91,2 \cdot m \cdot \left( \frac{v}{n_M} \right)^2 = 91,2 \cdot 1500 \text{ кг} \cdot \left( \frac{0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{2700 \text{ об/мин}} \right)^2 = 0,0047 \text{ кгм}^2$$

### Вращающий момент

Номинальный момент

$$M_N = \frac{P_N \cdot 9550}{n_M} = \frac{0,55 \text{ кВт} \cdot 9550}{2700 \text{ об/мин}} = 1,95 \text{ Нм}$$

Динамический момент

$$M_H = 1,9 \cdot M_N = 3,7 \text{ Нм}$$

$M_H$  – значение по каталогу, подлежит пересчету.

Момент нагрузки при движении без груза

$$M_L = \frac{F_F \cdot v \cdot 9,55}{n_M} = \frac{120,5 \text{ Н} \cdot 0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 9,55}{2700 \text{ об/мин}} = 0,22 \text{ Нм}$$

$M_L$  – расчетная величина без учета КПД.

Момент нагрузки при движении с грузом

$$M_L = \frac{F_F \cdot v \cdot 9,55}{n_M} = \frac{241 \text{ Н} \cdot 0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 9,55}{2700 \text{ об/мин}} = 0,43 \text{ Нм}$$

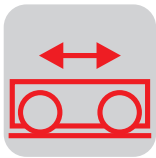
#### Время разгона без груза

$$t_A = \frac{\left( J_M + \frac{J_X}{\eta} \right)}{9,55 \cdot (M_H - M_L)} = \frac{\left( 0,000551 \text{ кгм}^2 + \frac{0,0047 \text{ кгм}^2}{0,85} \right) \cdot 2700 \text{ об/мин}}{9,55 \cdot (3,7 \text{ Нм} - 0,25 \text{ Нм})} = 0,49 \text{ с}$$

#### Ускорение при разгоне без груза

$$\frac{a_A}{\frac{v}{t_A}} = \frac{0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{0,49 \text{ с}} = 1,02 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

Ускорение при разгоне без груза недопустимо большое. Путем повышения момента инерции ротора двигателя (например, установка инерционной крыльчатки) это ускорение можно уменьшить. Однако при этом снижается допустимое количество включений в час. Кроме того, ускорение можно уменьшить, если выбрать двигатель меньшей мощности.



Инерционная  
крыльчатка

Повторный проверочный расчет для двигателя с инерционной крыльчаткой (движение без груза) ( $J_Z = 0,002 \text{ кгм}^2$ ):

Время разгона

$$t_A = \frac{\left( J_M + J_Z + \frac{J_X}{\eta} \right) \cdot n_M}{9,55 \cdot \left( M_H - \frac{M_L}{\eta} \right)}$$

$$= \frac{\left( (0,000551 + 0,002) \text{ кгм}^2 + \frac{0,0047 \text{ кгм}^2}{0,85} \right) \cdot 2700 \text{ об/мин}}{9,55 \cdot \left( 3,7 \text{ Нм} - \frac{0,22 \text{ Нм}}{0,85} \right)} = 0,71 \text{ с}$$

Ускорение при  
разгоне

$$a_A = \frac{v}{t_A} = \frac{0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{0,71 \text{ с}} = 0,70 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

Ускорение при разгоне без груза – в допустимом диапазоне, поэтому выбранный двигатель – пригоден.

Время и ускорение при разгоне без груза

Время разгона

$$t_A = \frac{\left( J_M + J_Z + \frac{J_X}{\eta} \right) \cdot n_M}{9,55 \cdot \left( M_H - \frac{M_L}{\eta} \right)}$$

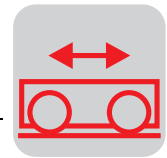
$$= \frac{\left( (0,000551 + 0,002) \text{ кгм}^2 + \frac{0,0094 \text{ кгм}^2}{0,85} \right) \cdot 2700 \text{ об/мин}}{9,55 \cdot \left( 3,7 \text{ Нм} - \frac{0,43 \text{ Нм}}{0,85} \right)} = 1,2 \text{ с}$$

Ускорение при  
разгоне

$$a_A = \frac{v}{t_A} = \frac{0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{1,2 \text{ с}} = 0,41 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

Длина пути разгона

$$s_A = \frac{1}{2} \cdot t_A \cdot v \cdot 1000 = \frac{1}{2} \cdot 1,2 \text{ с} \cdot 0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 1000 = 300 \text{ мм}$$



Допустимое  
количество  
включений в час

с грузом

$$Z_{PL} = Z_0 \cdot \frac{1 - \frac{M_L}{M_H \cdot \eta}}{J_M + J_Z + \frac{J_X}{\eta}} \cdot K_P$$

$$Z_0 = 4600 \frac{\text{Вкл}}{\text{ч}}$$

Количество включений двигателя с тормозным выпрямителем BGE по каталогу (движение без груза).

$$\frac{P_S}{P_N} = \frac{0,142 \text{ кВт}}{0,55 \text{ кВт}} \approx 0,25 \quad 40 \% \text{ ПВ} \rightarrow K_P = 0,7$$

$$Z_{PL} = 4600 \frac{\text{Вкл}}{\text{ч}} \cdot \frac{1 - \frac{0,43 \text{ Нм}}{3,7 \text{ Нм} \cdot 0,85}}{(0,000551 + 0,002) \frac{\text{кгм}^2}{\text{с}^2} + \frac{0,0094 \frac{\text{кгм}^2}{\text{с}^2}}{0,85}} \cdot 0,7 = 112 \frac{\text{Вкл}}{\text{ч}}$$

без груза

$$\frac{P_S}{P_N} = \frac{0,071 \text{ кВт}}{0,55 \text{ кВт}} \approx 0,13 \quad 40 \% \text{ ПВ} \rightarrow K_P = 0,85$$

$$Z_{PE} = 4600 \frac{\text{Вкл}}{\text{ч}} \cdot \frac{1 - \frac{0,22 \text{ Нм}}{3,7 \text{ Нм} \cdot 0,85}}{(0,000551 + 0,002) \frac{\text{кгм}^2}{\text{с}^2} + \frac{0,0047 \frac{\text{кгм}^2}{\text{с}^2}}{0,85}} \cdot 0,85 = 247 \frac{\text{Вкл}}{\text{ч}}$$

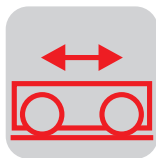
По следующей формуле можно получить допустимое количество включений за один цикл для комбинации одинакового количества ездов с грузом и без груза:

с грузом и без груза

$$Z_C = \frac{Z_{PL} \cdot Z_{PE}}{Z_{PL} + Z_{PE}} = \frac{112 \cdot 247}{112 + 247} = 77 \frac{\text{Вкл}}{\text{ч}}$$

$Z_C$  = количество включений за цикл  
 $Z_{PL}$  = допустимое количество включений с грузом  
 $Z_{PE}$  = допустимое количество включений без груза

Необходимое условие – 75 ездов в час – выполняется.



### Режим торможения

#### Тормозной момент

Ускорение и замедление по абсолютной величине одинаковы. При этом следует учитывать, что тормозной момент поддерживается сопротивлением качению и соответствующим моментом нагрузки.

Тормозной момент

$$M_B \approx M_H - 2 \cdot M_L \cdot \eta = 3,7 \text{ Нм} - 2 \cdot 0,43 \text{ Нм} \cdot 0,85 \approx 2,8 \text{ Нм}$$

Время торможения

$$t_B = \frac{(J_M + J_Z + J_X \cdot \eta) \cdot n_M}{9,55 \cdot (M_B + M_S \cdot \eta)} = \frac{(0,000551 + 0,002 + 0,0094 \cdot 0,85) \text{ кгм}^2 \cdot 2700 \text{ об/мин}}{9,55 \cdot (2,5 + 0,43 \cdot 0,85) \text{ Нм}} = 1,0 \text{ с}$$

Замедление при  
торможении

$$a_B = \frac{v}{t_B} = \frac{0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{1,0 \text{ с}} = 0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

Длина тормозного  
пути

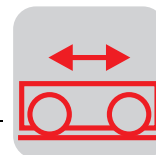
$$s_B = v \cdot 1000 \cdot \left( t_2 + \frac{1}{2} \cdot t_B \right) = 0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 1000 \cdot \left( 0,005 \text{ с} + \frac{1}{2} \cdot 1,0 \text{ с} \right) = 252,5 \text{ мм}$$

$t_2 = t_{2II} = 0,005 \text{ с}$  время реакции тормоза при отключении по цепям постоянного и переменного тока (см. каталог "Мотор-редукторы", гл. "Порядок выбора трехфазных двигателей").

Точность  
торможения

$$X_B = \pm 0,12 \cdot s_B = \pm 0,12 \cdot 252,5 \text{ мм} = \pm 30,3 \text{ мм}$$





Энергия  
торможения

Энергия торможения преобразуется в тепловую энергию при трении тормозных накладок и является мерой их износа.

с грузом	$W_{BL} = \frac{M_B}{M_B + M_L \cdot \eta} \cdot \frac{(J_M + J_Z + J_X \cdot \eta) \cdot n_M^2}{182,5}$
	$W_{BL} = \frac{2,5 \text{ Нм}}{(2,5 + 0,43 \cdot 0,85) \text{ Нм}} \cdot \frac{(0,000551 + 0,002 + 0,0094 \cdot 0,85) \text{ кгм}^2 \cdot 2700^2 \text{ об/мин}^2}{182,5}$ $= 368 \text{ Дж}$
без груза	$W_{BE} = \frac{2,5 \text{ Нм}}{(2,5 + 0,22 \cdot 0,85) \text{ Нм}} \cdot \frac{(0,000551 + 0,002 + 0,0047 \cdot 0,85) \text{ кгм}^2 \cdot 2700^2 \text{ об/мин}^2}{182,5}$ $= 244 \text{ Дж}$

Движение тележки с грузом чередуется с ее движением без груза, поэтому для расчета срока службы тормоза берется среднее значение энергии торможения  $W_B$ .

Энергия  
торможения

$$W_B = \frac{W_{BL} + W_{BE}}{2} = \frac{368 \text{ Дж} + 244 \text{ Дж}}{2} = 306 \text{ Дж}$$

Срок службы  
тормоза

$$\frac{L_B}{W_B \cdot Z} = \frac{W_N}{306 \text{ Дж} \cdot 150 \frac{\text{Вкл}}{\text{ч}}} = \frac{120 \cdot 10^6 \text{ Дж}}{2600 \text{ ч}}$$

$W_N$  = номинальная работа тормоза  
(см. таблицу в Приложении)

После 2600 отработанных часов (ок. 1 года при работе 8 часов в сутки) необходима, как минимум, регулировка тормоза и проверка тормозного диска.

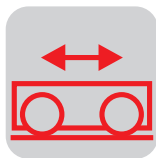
## 8.2 Расчет параметров редуктора

Частота вращения  
выходного вала

$$n_a = 19,1 \cdot 10^3 \cdot \frac{v}{D} \cdot i_V = 19,1 \cdot 10^3 \cdot \frac{0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{250 \text{ мм}} \cdot \frac{27}{17} = 60,7 \text{ об/мин}$$

Передаточное число  
редуктора

$$i = \frac{n_M}{n_a} = \frac{2700 \text{ об/мин}}{60,7 \text{ об/мин}} = 44,5$$



Эксплуатационный коэффициент

Для эксплуатации 8 часов в сутки при 150 езках в час (т. е. 300 процессов разгона и торможения в час) по диаграмме "Необходимый эксплуатационный коэффициент  $f_B$ " в главе "Редукторы" определяем эксплуатационный коэффициент:

$\frac{J_X}{J_M + J_Z} = \frac{0,0094 \text{ кгм}^2}{(0,000551 + 0,002) \text{ кгм}^2} = 3,68 \Rightarrow \text{Характер нагрузки 3}$
$f_B = 1,45$

При коэффициенте инерции  $> 20$ , что для транспортных устройств не редкость, люфт в приводной системе должен быть как можно меньше. В противном случае при работе от электросети возможно повреждение редуктора.

Базовая величина

Базовой величиной для расчета параметров редуктора всегда является номинальная мощность двигателя.

Вращающий момент на выходном валу

$$M_a = \frac{P_N \cdot 9550}{n_a} = \frac{0,55 \text{ кВт} \cdot 9550}{60,7 \text{ об/мин}} = 86,5 \text{ Нм}$$

**Соответствующий редуктор: R27 с  $n_a = 60$  об/мин и  $M_{amax} = 130$  Нм**

При этом вращающий момент на выходном валу  $M_a$  (рассчитанный по номинальной мощности двигателя), эксплуатационный коэффициент  $f_B$  и внешняя радиальная нагрузка  $F_Q$  составляют:

Вращающий момент на выходном валу

$$M_a = \frac{0,55 \text{ кВт} \cdot 9550}{60 \text{ об/мин}} = 87,5 \text{ Нм}$$

Эксплуатационный коэффициент

$$f_B = \frac{130 \text{ Нм}}{87,5 \text{ Нм}} = 1,48$$

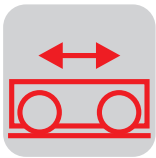
Внешняя радиальная нагрузка

$$F_Q = \frac{M_a \cdot 2000}{\frac{d_0}{i_V}} \cdot f_Z = \frac{87,5 \text{ Нм} \cdot 2000}{\frac{215 \text{ мм}}{1,59}} \cdot 1,25 = 1617 \text{ Н}$$

Число зубьев  $< 20$ , поэтому  $f_Z = 1,25$  (см. таблицу "Внешние радиальные и осевые нагрузки" в Приложении).

Для ременного привода следует дополнительно учитывать усилие предварительного натяжения ремня:  $F_{Ra\_zul} = 3530 \text{ Нм}$ .

**Таким образом, привод выбран: R27DT71D2 /BMG.**



8.3 Привод транспортного устройства с 2-скоростным двигателем

Предположим, что транспортное устройство из предыдущего примера перемещается в режиме наладки со скоростью, меньшей в 4 раза (8/2-полюсный двигатель). Кроме того, необходимая точность остановки повышена до ±5 мм. Статические параметры остаются без изменений.

Условия	Масса тележки:	$m_0 = 1500 \text{ кг}$
	Масса груза:	$m_L = 1500 \text{ кг}$
	Скорость:	$v = 0,5 \text{ м/с}$
	Диаметр колеса:	$D = 250 \text{ мм}$
	Из предыдущего примера:	
	Сила сопротивления качению:	$F_F = 241 \text{ Н}$
	Статическая мощность:	$P_S = 0,14 \text{ кВт}$
	Общий КПД:	$\eta_T = 0,85$

Замедление при переключении

Порядок действий такой же, как и в предыдущем примере расчета, однако для двигателей с переключением числа полюсов критичным фактором является не ускорение при разгоне, а замедление при переключении с высокой частоты вращения на низкую. Вращающий момент такого двигателя при переключении пар полюсов приблизительно в 2,5 раза больше динамического момента при работе на обмотке низкой скорости.

Динамический момент обмотки низкой скорости для двигателей предполагаемого диапазона мощности приблизительно в 1,7 раза больше их номинального момента. Поэтому ожидаемый момент при переключении пар полюсов составляет:

Момент при переключении пар полюсов

$$M_U = 2,5 \cdot 1,7 \cdot M_{N8P} = 4,25 \cdot M_{N8P}$$

$M_{N8P}$  = номинальный момент в режиме 8-полюсной обмотки

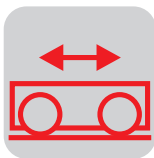
Выбор двигателя

Поэтому сначала выбирается двигатель, номинальная мощность которого при работе на 8-полюсной обмотке в 4,25 раза меньше динамической мощности, рассчитанной по нагрузке с учетом допустимого ускорения.

Динамическая мощность	$P_{DL} = \frac{3000 \text{ кг} \cdot 0,74 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{0,85} = 1300 \text{ Вт}$
Полная мощность	$P_T = P_{DL} + P_S = 1300 \text{ Вт} + 140 \text{ Вт} = 1440 \text{ Вт}$
	$P_{TU} = \frac{1440 \text{ Вт}}{4,25} = 340 \text{ Вт}$

Выбранный двигатель	DT71D8/2 /BM $P_N = 0,06/0,25 \text{ кВт}$ $n_N = 675/2670 \text{ об/мин}$ $M_H/M_N = 1,4/1,8$ $J_M = 5,3 \cdot 10^{-4} \text{ кгм}^2$
---------------------	--

Данные каталога "Мотор-редукторы"



## Номинальный момент двигателя в режиме 2-полюсной обмотки

Номинальный момент	$M_N = \frac{P_N \cdot 9550}{n_N} = \frac{0,25 \text{ кВт} \cdot 9550}{2670 \text{ об/мин}} = 0,9 \text{ Нм}$	
Динамический момент	$M_H = 1,8 \cdot M_N = 1,6 \text{ Нм}$	
Момент нагрузки	$M_L = \frac{F_F \cdot v \cdot 9550}{n_N} = \frac{241 \text{ Н} \cdot 0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 9,55}{2670 \text{ об/мин}} = 0,43 \text{ Нм}$	$M_L$ – расчетная величина без учета КПД.

Внешний момент инерции	$J_X = 91,2 \cdot m \cdot \left( \frac{v}{n_M} \right)^2 = 91,2 \cdot 3000 \text{ кг} \cdot \left( \frac{0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{2670 \text{ об/мин}} \right)^2 = 0,0096 \text{ кгм}^2$
------------------------	--

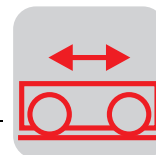
Время разгона	$t_A = \frac{\left( J_M + \frac{J_X}{\eta} \right) \cdot n_M}{9,55 \cdot \left( M_H - \frac{M_L}{\eta} \right)} = \frac{\left( 0,00053 \text{ кгм}^2 + \frac{0,0096 \text{ кгм}^2}{0,85} \right) \cdot 2670 \text{ об/мин}}{9,55 \cdot \left( 1,6 \text{ Нм} - \frac{0,43 \text{ Нм}}{0,85} \right)} = 3,0 \text{ с}$
---------------	---

Ускорение при разгоне	$a_A = \frac{v}{t_A} = \frac{0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{3,0 \text{ с}} = 0,17 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$
-----------------------	--

## Замедление при переключении

Решающим фактором для двигателей с переключением числа полюсов является замедление при переключении:

Время переключения	$t_U = \frac{(J_M + J_X \cdot \eta) \cdot (n_2 - n_1)}{9,55 \cdot (M_U + M_L \cdot \eta)}$
Момент при переключении пар полюсов	$M_U = 2,5 \cdot M_{H8P} = 3 \text{ Нм}$
Время переключения	$t_U = \frac{(0,00053 + 0,0096 \cdot 0,85) \text{ кгм}^2 \cdot (2670 - 675) \text{ об/мин}}{9,55 \cdot (3 + 0,43 \cdot 0,85) \text{ Нм}} = 0,54 \text{ с}$
Ускорение при переключении	$a_U = \frac{v \cdot \left( 1 - \frac{n_{M1}}{n_{M2}} \right)}{t_U} = \frac{0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \left( 1 - \frac{675 \text{ об/мин}}{2670 \text{ об/мин}} \right)}{0,54 \text{ с}} = 0,69 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$



При переключении без нагрузки это значение составляет  $1,22 \text{ м/с}^2$ . Однако по результатам вычислений в предыдущем примере максимально допустимым ускорением является  $a_p = 0,74 \text{ м/с}^2$ . Следовательно, необходимо оптимизировать процесс переключения. Рассмотрим два возможных решения этой проблемы.

*Инерционная  
крыльчатка*

Такая крыльчатка за счет своей большой инерционной массы увеличивает время переключения. Однако при этом существенно снижается допустимое количество включений в час.

*Устройство  
плавного  
переключения  
числа полюсов  
(WPU)*

Устройство WPU обеспечивает снижение момента при переключении пар полюсов (приблизительно на 50 %) за счет 2-фазного переключения. Третья фаза подключается автоматически.

Поскольку снижение количества включений нежелательно, принимаем решение в пользу устройства WPU. В критических условиях возможно использование обоих способов.

При этом для движения тележки без груза действительно:

Время  
переключения

$$t_U = \frac{(0,00053 + 0,0047 \cdot 0,85) \text{ кгм}^2 \cdot (2670 - 675) \text{ об/мин}}{9,55 \cdot (1,5 + 0,22 \cdot 0,85) \text{ Нм}} = 0,56 \text{ с}$$

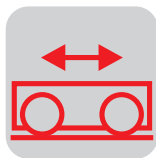
Ускорение при  
переключении

$$a_U = \frac{0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \left(1 - \frac{675 \text{ об/мин}}{2670 \text{ об/мин}}\right)}{0,56 \text{ с}} = 0,67 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

Допустимое  
количество  
включений при  
движении с грузом

$$Z_P = Z_0 \frac{1 - \frac{M_L}{M_H \cdot \eta}}{\frac{J_M + J_Z + \frac{J_X}{\eta}}{J_M}} \cdot K_P$$

$$Z_P = 9000 \frac{\text{Вкл}}{\text{ч}} \cdot \frac{1 - \frac{0,43 \text{ Нм}}{1,6 \text{ Нм} \cdot 0,85}}{\frac{0,00053 \text{ кгм}^2 + \frac{0,0096 \text{ кгм}^2}{0,85}}{0,00053 \text{ кгм}^2}} \cdot 0,65 = 180 \frac{\text{Вкл}}{\text{ч}}$$



### Дополнительный нагрев при переключении

Кроме того, из-за дополнительного нагрева обмоток при переключении необходимо ввести в расчет коэффициент 0,7. С учетом этого привод будет способен перемещать полностью загруженную тележку с количеством включений  $Z_{PL} = 180 \cdot 0,7 = 126$  раз в час.

Допустимое количество включений повышается, если использовать двигатель класса изоляции H или с вентилятором принудительного охлаждения.

Еще один способ повышения допустимого количества включений – это запуск на низкой скорости (на многополюсной обмотке).

При запуске с низкой частотой вращения и последующем переключении на высокую частоту вращения расчетное количество включений в час увеличивается приблизительно на 25 %.

Однако при этом возникает дополнительный толчок нагрузки, в некоторых случаях нежелательный. Кроме того, увеличивается длительность цикла.

### Количество включений за несколько циклов

В одном направлении тележка движется с грузом, обратно – без груза. В результате расчета допустимое количество включений для движения с грузом составило 126 вкл/ч. Теперь по тем же формулам, но с учетом отсутствия груза можно рассчитать количество включений для тележки в незагруженном состоянии.

Сила  
сопротивления  
качению

$$F_F = m \cdot g \cdot \left( \frac{2}{D} \cdot \left( \mu_L \cdot \frac{d}{2} + f \right) + c \right)$$

$$F_F = 1500 \text{ кг} \cdot 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot \left( \frac{2}{250 \text{ мм}} \cdot \left( 0,005 \cdot \frac{60 \text{ мм}}{2} + 0,5 \text{ мм} \right) + 0,003 \right) = 120 \text{ Н}$$

Статический  
момент

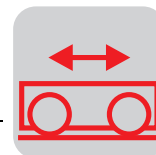
$$M_L = \frac{F_F \cdot v \cdot 9550}{n_M} = \frac{120 \text{ Нм} \cdot 0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 9550}{2670 \text{ об/мин}} = 0,22 \text{ Нм}$$

$M_L$  – расчетная величина без учета КПД.

Допустимое  
количество  
включений в час

$$z_E = 9000 \frac{\text{вкл}}{\text{ч}} \cdot \frac{1 - \frac{0,22 \text{ Нм}}{1,6 \text{ Нм} \cdot 0,85}}{0,00053 \text{ кгм}^2 + \frac{0,0048 \text{ кгм}^2}{0,85}} \cdot 0,7 \cdot 0,7 = 320 \frac{\text{вкл}}{\text{ч}}$$

Тепловая перегрузка двигателя наступает после 126 вкл/ч при движении с грузом или после 320 вкл/ч при движении без груза.



Чтобы выразить это в количестве циклов, необходимо вычислить среднее значение по следующей формуле.

Допустимое  
количество  
включений в час

$$Z_P = \frac{Z_{PE} \cdot Z_{PL}}{Z_{PE} + Z_{PL}} = \frac{320 \frac{\text{Вкл}}{\text{ч}} \cdot 126 \frac{\text{Вкл}}{\text{ч}}}{320 \frac{\text{Вкл}}{\text{ч}} + 126 \frac{\text{Вкл}}{\text{ч}}} = 90 \frac{\text{Вкл}}{\text{ч}}$$

### Более 2 вариантов нагрузки

Предположение:

При более сложном характере нагрузки (более 2 различных вариантов) необходимо пересчитать количество отдельных включений в соответствующее количество включений без нагрузки.

транспортное устройство движется по наклонной плоскости.

Рабочий цикл:

1. 1-я ездка: с грузом вверх
2. 2-я ездка: с грузом вниз
3. 3-я ездка: с грузом вверх
4. 4-я ездка: без груза вниз

Затем цикл начинается сначала.

Количество  
включений для  
отдельных ездов

Значения выбраны произвольно.

Количество включений	с грузом вверх	с грузом вниз	без груза вверх	без груза вниз
Количество включений [вкл/ч]	49	402	289	181

Количество  
включений  
без нагрузки

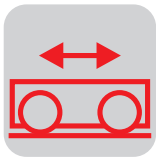
Допустимое количество включений двигателя без нагрузки по каталогу: 1200 вкл/ч. Сначала вычислим, сколько включений без нагрузки соответствует одному включению с нагрузкой для каждого режима движения.

$$\begin{aligned}
 1200/49 &= 24,5 \text{ с грузом вверх (24,5 включений без нагрузки} \\
 &\text{соответствуют одному включению с нагрузкой)} \\
 + 1200/402 &= 3,0 \text{ с грузом вниз} \\
 + 1200/49 &= 24,5 \text{ с грузом вверх} \\
 + 1200/181 &= 6,6 \text{ без груза вниз} \\
 &\underline{58,6}
 \end{aligned}$$

Таким образом

Из допустимых для ненагруженного двигателя 1200 включений в час за один цикл "используется" 58,6 включений без нагрузки.

Следовательно, количество циклов движения за один час составляет  $1200/58,6 = 20,5$ .

**Расчет точности остановки**

Эти вычисления относятся к режиму движения с грузом, поскольку в этом случае тормозной путь больше, а значит, и точность остановки ниже, чем при движении без груза.

**Тормозной момент**

Тормозной момент, как и в предыдущем примере, принимается за 2,5 Нм.

Время торможения

$$t_B = \frac{(J_M + J_Z + J_X \cdot \eta) \cdot n_M}{9,55 \cdot (M_B + M_L \cdot \eta)}$$

$$t_B = \frac{(0,00053 + 0,0096 \cdot 0,85) \text{ кгм}^2 \cdot 675 \text{ об/мин}}{9,55 \cdot (2,5 + 0,43 \cdot 0,85) \text{ Нм}} = 0,21 \text{ с}$$

Замедление при торможении

$$a_B = \frac{v}{t_B} = \frac{0,13 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{0,21 \text{ с}} = 0,62 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

Длина тормозного пути

$$s_B = v \cdot 1000 \cdot \left( t_2 + \frac{1}{2} \cdot t_B \right)$$

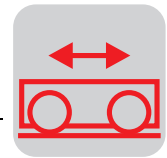
$t_2 = t_{2II} = 0,005 \text{ с}$  время реакции тормоза при отключении по цепям постоянного и переменного тока.

$$s_B = 0,13 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 1000 \cdot \left( 0,005 \text{ с} + \frac{1}{2} \cdot 0,21 \text{ с} \right) = 14 \text{ мм}$$

Точность остановки

$$X_B \approx \pm 0,12 \cdot s_B = \pm 0,12 \cdot 14 \text{ мм} = \pm 1,7 \text{ мм}$$



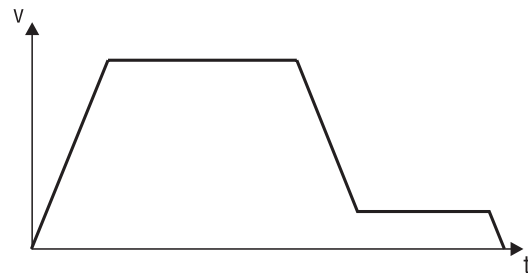


#### 8.4 Привод транспортного устройства с преобразователем частоты

##### Условия

Тележка с собственной массой  $m_0 = 500$  кг перемещает груз массой  $m_L = 5$  т на расстояние  $s_T = 10$  м за время  $t_T = 15$  с. Обратный путь тележка проходит без груза, а потому с удвоенной скоростью.

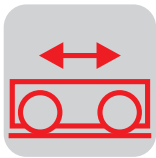
За величину ускорения принимается  $a = 0,5$  м/с<sup>2</sup>. Кроме того, после торможения для повышения точности остановки необходимо позиционирование в течение 0,5 с.



00780AXX

Рис. 29. Диаграмма рабочего цикла

Диаметр колеса:	$D = 315$ мм
Диаметр цапфы:	$d = 60$ мм
Пара трения:	сталь/сталь
Плечо силы трения качения:	сталь/сталь, $f = 0,5$ мм
Коэффициент трения обода и реборды колеса:	(с опорой в подшипниках качения) $c = 0,003$
Коэффициент трения в подшипниках:	(подшипники качения) $\mu_L = 0,005$
Промежуточная передача:	цепная, $i_V = 27/17 = 1,588$
Диаметр звездочки (ведомой):	$d_0 = 215$ мм
КПД нагрузки:	$\eta_L = 0,90$
КПД редуктора:	$\eta_G = 0,95$
Продолжительность включения:	60 % ПВ
Коэффициент запаса (радиальная нагрузка):	$f_Z = 1,25$
Диапазон регулирования:	1 : 10
Количество включений в час:	50 ездов в час



### Оптимизация диаграммы рабочего цикла

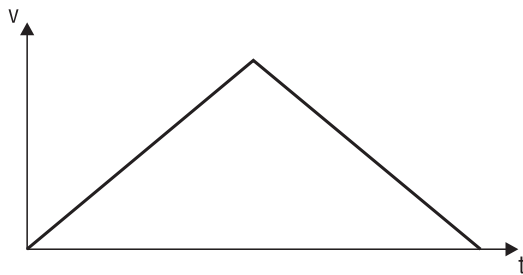
Оптимизация по минимальному ускорению.

$$a = \frac{4 \cdot s}{t^2}$$

$$v = \frac{2 \cdot s}{t}$$

$$t_A = \frac{t}{2}$$

$$s_A = \frac{s}{2}$$

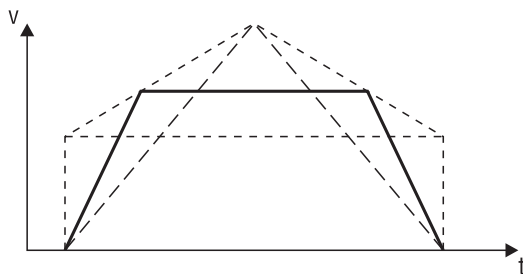


00781AXX

Рис. 30. Оптимизация по ускорению

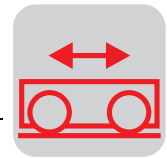
Оптимизация по скорости при заданном ускорении.

$$v = \frac{a \cdot t - \sqrt{(a \cdot t)^2 - 4 \cdot a \cdot s}}{2}$$



00782AXX

Рис. 31. Оптимизация по скорости

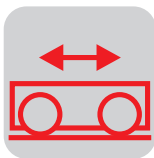


Время позиционирования

Даже если пренебречь временем позиционирования, результат получается достаточно точным.

Скорость	$\underline{v} = \frac{0,5 \frac{M}{c^2} \cdot 14,5 c - \sqrt{\left(0,5 \frac{M}{c^2} \cdot 14,5 c\right)^2 - 4 \cdot 0,5 \frac{M}{c^2} \cdot 10 M}}{2} = 0,77 \frac{M}{c}$
Время разгона	$t_A = \frac{v}{a} = \frac{0,77 \frac{M}{c}}{0,5 \frac{M}{c^2}} = 1,54 c$
Длина пути разгона	$s_A = \frac{1}{2} \cdot v \cdot t_A = \frac{1}{2} \cdot 0,77 \frac{M}{c} \cdot 1,54 c = 0,593 M$
Время переключения	$t_U = \frac{\Delta v}{a} = \frac{(0,77 - 0,077) \frac{M}{c}}{0,5 \frac{M}{c^2}} = 1,39 c$
Длина пути переключения	$s_U = t_U \cdot \left(\frac{\Delta v}{2} + v_1\right) = 1,39 c \cdot \left(\frac{(0,77 - 0,077) \frac{M}{c}}{2} + 0,077 \frac{M}{c}\right) = 0,588 M$
Длина пути позиционирования	$s_P = v \cdot t = 0,077 \frac{M}{c} \cdot 0,5 c = 0,0385 M$
Длина пути с постоянной скоростью	$s_F = s_T - s_A - s_U - s_1 = 8,78 M$
Время движения с постоянной скоростью	$t_F = \frac{s}{v} = \frac{8,78 M}{0,77 \frac{M}{c}} = 11,4 c$
Общее время	$t_T = t_A + t_F + t_U + t_1 = 14,8 c$

Таким образом, рабочий цикл рассчитан.

**Расчет мощности**Сила  
сопротивления  
качению

$$F_F = m \cdot g \cdot \left( \frac{2}{D} \cdot \left( \mu_L \cdot \frac{d}{2} + f \right) + c \right)$$

$$F_F = 5500 \text{ кг} \cdot 9,81 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot \left( \frac{2}{315} \cdot \left( 0,005 \cdot \frac{60 \text{ мм}}{2} + 0,5 \text{ мм} \right) + 0,003 \right) = 385 \text{ Н}$$

Статическая  
мощность

$$P_S = \frac{F_F \cdot v}{1000 \cdot \eta} = \frac{385 \text{ Н} \cdot 0,77 \frac{\text{М}}{\text{с}}}{1000 \cdot 0,85} = 0,35 \text{ кВт}$$

Момент нагрузки

$$M_L = \frac{F_F \cdot v \cdot 9550}{n_N} = \frac{385 \text{ Н} \cdot 0,77 \frac{\text{М}}{\text{с}} \cdot 9,55}{1400 \text{ об/мин}} = 2,02 \text{ Нм}$$

 $M_L$  – расчетная величина  
без учета КПД.

Динамическая мощность без учета момента инерции ротора двигателя для определения номинальной мощности последнего.

Динамическая  
мощность

$$P_{DL} = \frac{m \cdot a \cdot v}{1000 \cdot \eta} = \frac{5500 \text{ кг} \cdot 0,5 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot 0,77 \frac{\text{М}}{\text{с}}}{1000 \cdot 0,85} = 2,49 \text{ кВт}$$

Полная мощность без учета мощности на ускорение ротора двигателя, которая еще не определена.

Полная мощность

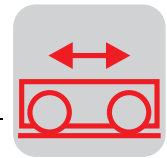
$$P_T = P_S + P_{DL} = 0,35 \text{ кВт} + 2,49 \text{ кВт} = 2,84 \text{ кВт}$$

Поскольку для ускорения привода преобразователь частоты способен выдавать ток величиной в 150 % от номинального, выбираем двигатель мощностью 2,2 кВт.

**Выбранный двигатель**

DV100M4/BMG

 $P_N = 2,2 \text{ кВт}$  $n_N = 1410 \text{ об/мин}$  $J_M = 59 \cdot 10^{-4} \text{ кгм}^2$  (с учетом тормоза)Данные каталога  
"Мотор-редукторы"



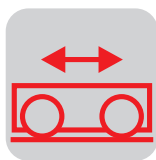
Мощность на ускорение

Динамический момент	$M_H = \frac{\left( J_M + \frac{1}{\eta} \cdot J_X \right) \cdot n_M}{9,55 \cdot t_A} + \frac{M_L}{\eta}$
Внешний момент инерции	$J_X = 91,2 \cdot m \cdot \left( \frac{v}{n_M} \right)^2 = 91,2 \cdot 5500 \text{ кг} \cdot \left( \frac{0,77 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{1400 \text{ об/мин}} \right)^2 = 0,1517 \text{ кгм}^2$
Динамический момент	$M_H = \frac{\left( 0,00481 \text{ кгм}^2 + \frac{1}{0,85} \cdot 0,1517 \text{ кгм}^2 \right) \cdot 1400 \text{ об/мин}}{9,55 \cdot 1,54 \text{ с}} + \frac{2,02 \text{ Нм}}{0,85} = 19,8 \text{ Нм}$
Номинальный момент	$M_N = \frac{2,2 \text{ кВт} \cdot 9550}{1400 \text{ об/мин}} = 15 \text{ Нм}$
Отношение $M_H / M_N$	$\frac{M_H}{M_N} = \frac{19,8 \text{ Нм}}{15 \text{ Нм}} = 132 \%$



В нижнем диапазоне частоты вращения (< 25 % от номинальной) создаваемый двигателем вращающий момент не пропорционален току двигателя, поэтому при токе двигателя 150 % от номинального (с соответствующим преобразователем) вращающий момент двигателя составляет около 130 % от  $M_N$ .

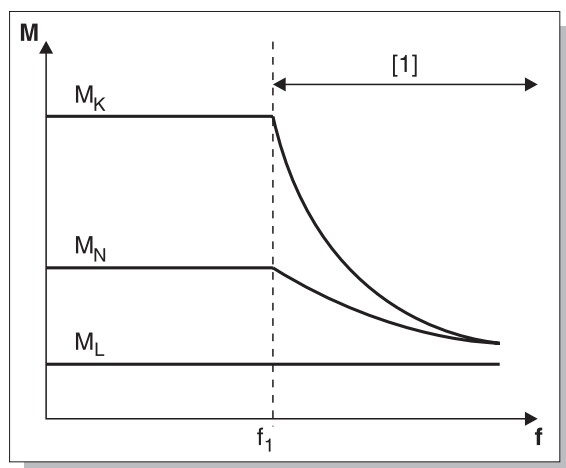
В нашем примере расчета требуется 132 %  $M_N$ , что является допустимым.



### Диапазон регулирования

#### Диапазон ослабления поля

Если двигатель работает на частоте выше базовой  $f_1$  (в так называемом диапазоне ослабления поля), то необходимо, чтобы не только номинальный момент (снижающийся обратно пропорционально частоте), но и опрокидывающий момент (снижающийся обратно пропорционально квадрату частоты) превышали необходимый момент нагрузки.



00783BXX

Рис. 32. Диапазон ослабления поля

[1] = диапазон ослабления поля  
 $f_1$  = базовая частота

#### Сниженная частота вращения в диапазоне постоянного вращающего момента

В двигателях с самоохлаждением при работе на сниженной частоте вращения тепло от нагреваемых обмоток отводится не полностью из-за низкой скорости вращения крыльчатки. В этом случае решающим фактором для правильного выбора параметров является точное знание максимальной продолжительности включения и вращающего момента нагрузки в данном диапазоне. В большинстве случаев приходится использовать принудительное охлаждение или выбирать двигатель большего типоразмера (поверхность больше – отвод тепла лучше).

#### Рекомендации по выбору параметров для работы в диапазоне регулирования

- Температурный класс изоляции не ниже F
- Оснащение двигателя датчиком температуры (TF) или биметаллическими выключателями (TH)
- С учетом диапазона частоты вращения, КПД  $\eta$  и коэффициента  $\cos \varphi$ : использование 4-полюсных двигателей

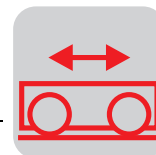
Соответствующие подробные инструкции по проектированию содержатся в документации "Drive Engineering – Practical Implementation. Project Planning with Frequency Inverters" ("Практика приводной техники. Проектирование приводов с преобразователями частоты").

#### Диапазон ослабления поля

При быстром обратном движении нагрузка на привод очень мала, поэтому двигатель работает в диапазоне ослабления поля с частотой 100 Гц. Это требует проверки вращающего момента.

Номинальный момент двигателя при базовой частоте:  $M_N = 15 \text{ Нм}$

Опрокидывающий момент при базовой частоте:  $M_K = 35 \text{ Нм}$



При работе с частотой 100 Гц

Номинальный момент

$$M_{N(100 \text{ Гц})} = 15 \text{ Нм} \cdot \frac{50 \text{ Гц}}{100 \text{ Гц}} = 7,5 \text{ Нм}$$

Опрокидывающий момент

$$M_{K(100 \text{ Гц})} = 35 \text{ Нм} \cdot \left( \frac{50 \text{ Гц}}{100 \text{ Гц}} \right)^2 = 8,75 \text{ Нм}$$

Момент нагрузки при  $m_0 = 500 \text{ кг}$  (движение без груза) с учетом резерва на ускорение и КПД составляет  $0,22 \text{ Нм} + 1,5 \text{ Нм} = 1,72 \text{ Нм}$ . Следовательно, работа в диапазоне ослабления поля допускается.

**Частотная характеристика 87 Гц**

Если использовать частотную характеристику 87 Гц, то для привода из предыдущего примера можно выбрать двигатель на один типоразмер меньше.

**Выбранный двигатель**

DT 90 L4 BMG

$P_N = 1,5 \text{ кВт}$  при  $n_N = 1400 \text{ об/мин}$

$P_N = 2,2 \text{ кВт}$  при  $n_N = 2440 \text{ об/мин}$

$J_M = 39,4 \cdot 10^{-4} \text{ кгм}^2$  (с учетом тормоза)

Данные каталога "Мотор-редукторы"

8

При использовании частотной характеристики 87 Гц этот двигатель в комбинации с преобразователем на 2,2 кВт в продолжительном режиме работы способен отдавать мощность 2,2 кВт.

Момент нагрузки при новой номинальной частоте вращения  $n_N = 2440 \text{ об/мин}$  составляет:

**$M_L = 1,16 \text{ Нм}$ .**

Новый номинальный момент двигателя при  $n_N = 2440 \text{ об/мин}$  и  $P_N = 2,2 \text{ кВт}$  составляет:

**$M_N = 8,6 \text{ Нм}$ .**

Внешний момент инерции

$$J_X = 91,2 \cdot m \cdot \left( \frac{v}{n_M} \right)^2 = 91,2 \cdot 5500 \text{ кг} \cdot \left( \frac{0,77 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{2440 \text{ об/мин}} \right)^2 = 0,0497 \text{ кгм}^2$$

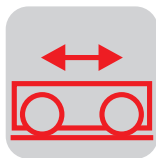
Динамический момент

$$M_H = \frac{\left( J_M + \frac{J_X}{\eta} \right) \cdot n_M}{9,55 \cdot t_a} + \frac{M_L}{\eta} = 11,72 \text{ Нм}$$

Отношение  $M_H / M_N$

$$\frac{M_H}{M_N} = \frac{11,72 \text{ Нм}}{8,6 \text{ Нм}} = 136 \%$$

Эксплуатация с частотной характеристикой 87 Гц допускается.



### Регулирование частоты вращения

Оптимизация параметров двигателя переменного тока, работающего от преобразователя частоты, обеспечивается функцией "Регулирование частоты вращения".

- Для этого необходимы следующие дополнительные компоненты:
  - установленный на двигатель импульсный датчик частоты вращения;
  - встроенный в преобразователь регулятор частоты вращения.
- За счет регулирования частоты достигаются следующие параметры привода:
  - диапазон регулирования частоты вращения до 1:100 при  $f_{\text{макс}} = 50$  Гц;
  - зависимость частоты вращения от нагрузки  $< 0,3\%$  при  $n_N$  и скачке нагрузки  $\Delta M = 80\%$ ;
  - сокращение времени регулирования при изменении нагрузки до 0,3...0,6 с.

При соответствующем подборе преобразователя двигатель может на короткое время создавать вращающий момент, который превышает опрокидывающий момент этого же двигателя, работающего непосредственно от сети.

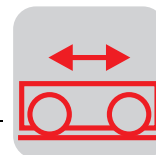
Максимальные динамические показатели достигаются в том случае, если привод рассчитан на  $f_{\text{макс}} < 40$  Гц, а базовая частота установлена на 50 Гц.

### Режим синхронного управления

Функция "синхронного управления" позволяет группе асинхронных двигателей работать в режиме угловой синхронизации друг с другом или в режиме регулируемого пропорционального соотношения.

- Для этого необходимы следующие дополнительные компоненты:
  - установленный на двигатель импульсный датчик частоты вращения;
  - встроенный в преобразователь регулятор синхронного управления / регулятор частоты вращения.
- Возможно решение следующих задач:
  - работа от 2 до 10 приводов в режиме угловой синхронизации ("Электрический вал");
  - работа в режиме пропорционального соотношения (синхронно регулируемое передаточное число, "Электронный редуктор");
  - периодический синхронный режим работы с интегрированной функцией определения угловой разности в автономном режиме ("Летучая пила");
  - синхронный режим работы со смещением и без новой точки отсчета (стенды для испытания на скручивание, создание дисбаланса в вибраторах);
  - синхронный режим работы со смещением и с новой точкой отсчета (перегрузочные конвейеры).





"Летучая пила"	Непрерывно движущаяся пластмассовая заготовка нарезается на бруски длиной ровно в один метр.	
Условия	Скорость подачи:	0,2 м/с
	Макс. ход пилы:	1 м
	Масса пилы:	50 кг
	Длительность процесса резки:	1 с / 0,4 м

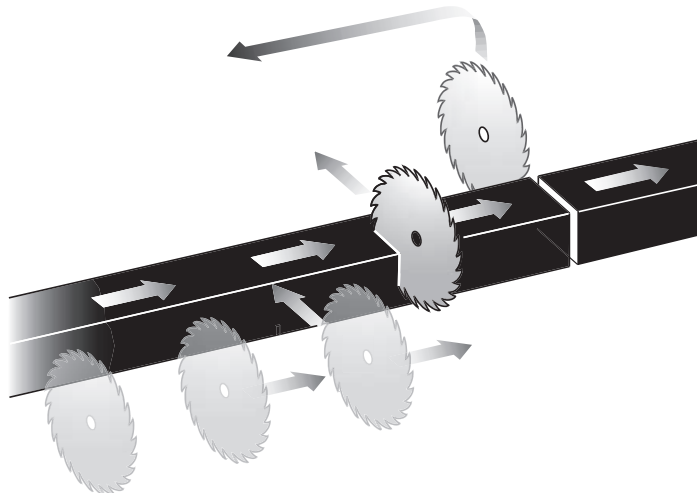


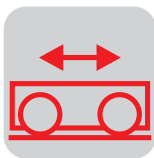
Рис. 33. "Летучая пила"

50306AXX

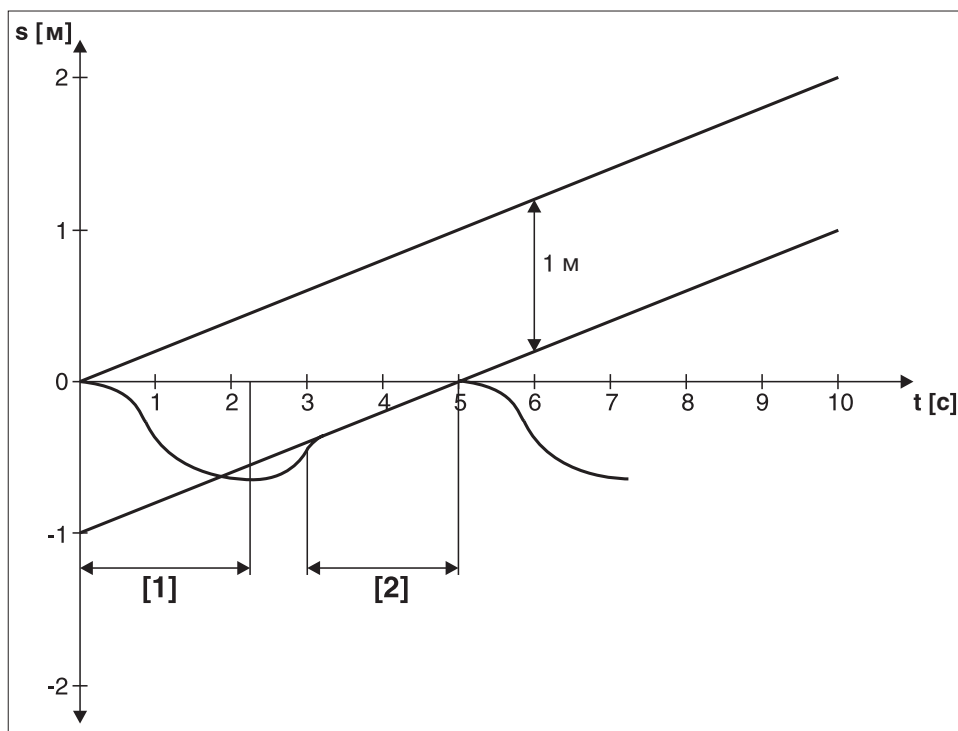
Для упрощения расчетов возьмем тот же диаметр звездочки (215 мм). Привод конвейера R63 DT71D4 ( $i = 42,98$ ) работает от преобразователя на частоте 30 Гц. По возможности следует использовать такой же редуктор и для привода пилы.

Пояснение	Частота 30 Гц для привода конвейера выбрана для того, чтобы пила при таком же передаточном числе редуктора могла быстро догонять конвейер. Но такое решение задачи – не единственное. Если выбран редуктор с другим передаточным числом, то необходимое согласование можно запрограммировать в системе управления синхронным режимом.
-----------	---

Принцип действия	После отрезания, выполненного при синхронной работе приводов пилы и заготовки, привод пилы на ограниченное время переходит в автономный режим. Однако отсчет расстояния между осями этих приводов продолжается. Кроме того, можно запрограммировать так называемый счетчик ведомого. Этот счетчик по заданному числу импульсов рассчитывает новую точку отсчета, смещенную от предыдущей точно на длину отрезаемого бруска.
------------------	---



Автономный режим используется приводом пилы для возврата в исходное положение. Установленный там оптический датчик заканчивает автономный режим двоичным сигналом на регулятор синхронного управления. Привод пилы выходит в новую точку отсчета. По программируемому сигналу выходного реле в преобразователе ("Ведомый в позиции") активизируется процесс резки.



00785BRU

Рис. 34. Временная диаграмма движения "летучей пилы"

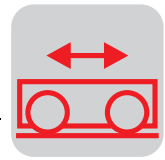
- [1] = возврат в исходное положение  
[2] = участок синхронного движения

Через 2 секунды обратный ход пилы (800 мм, 200 мм резерв) должен быть закончен.

Частота  
преобразователя

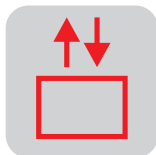
По уже известным формулам (см. "Формулы приводной техники") получаем, что при ускорении  $1 \text{ м/с}^2$  привод пилы движется со скоростью  $0,55 \text{ м/с}$ , что соответствует следующей частоте на выходе преобразователя:

$$f = \frac{0,55 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{0,2 \frac{\text{м}}{\text{с}}} \cdot 30 \text{ Гц} \approx 85 \text{ Гц}$$

*Временная  
диаграмма  
движения*

Это означает, что можно использовать такой же привод, что и для конвейера подачи заготовки, но в режиме частотной характеристики 87 Гц. Расчет мощности выполняется аналогично вычислениям в предыдущих примерах. В процессе сокращения отставания, занимающем около 1 секунды, привод работает на частоте  $f_{\text{макс}}$  от преобразователя. Величина ускорения определяется установленным коэффициентом регулирования  $K_p$ . После этого остается еще 2 секунды на резку, что означает наличие некоторого резерва.

Как видно из временной диаграммы движения, выбор параметров при проектировании должен обеспечивать минимальный интервал между завершением обратного хода пилы и началом процесса резки, с тем чтобы участок сокращения отставания не был слишком большим.



## 9 Пример расчета привода подъемного устройства

### Условия

Основную часть своего вращающего момента приводы подъемных устройств расходуют уже в режиме движения без ускорения (квазистационарный режим). Поэтому для ускорения масс необходима лишь небольшая составляющая вращающего момента (исключение: подъемное устройство с противовесом).

Масса подъемного стола:	$m_0 = 200 \text{ кг}$
Масса груза:	$m_L = 300 \text{ кг}$
Скорость подъема:	$v = 0,3 \text{ м/с}$
Диаметр звездочки:	$D = 250 \text{ мм}$
КПД нагрузки:	$\eta_L = 0,90$
КПД редуктора:	$\eta_G = 0,95$
Общий КПД:	$\eta = \eta_L \cdot \eta_G \approx 0,85$
Продолжительность включения:	50 % ПВ
1 привод, прямая передача	

Используется двигатель с переключением числа полюсов и отношением низкой и высокой частот вращения 1:4.

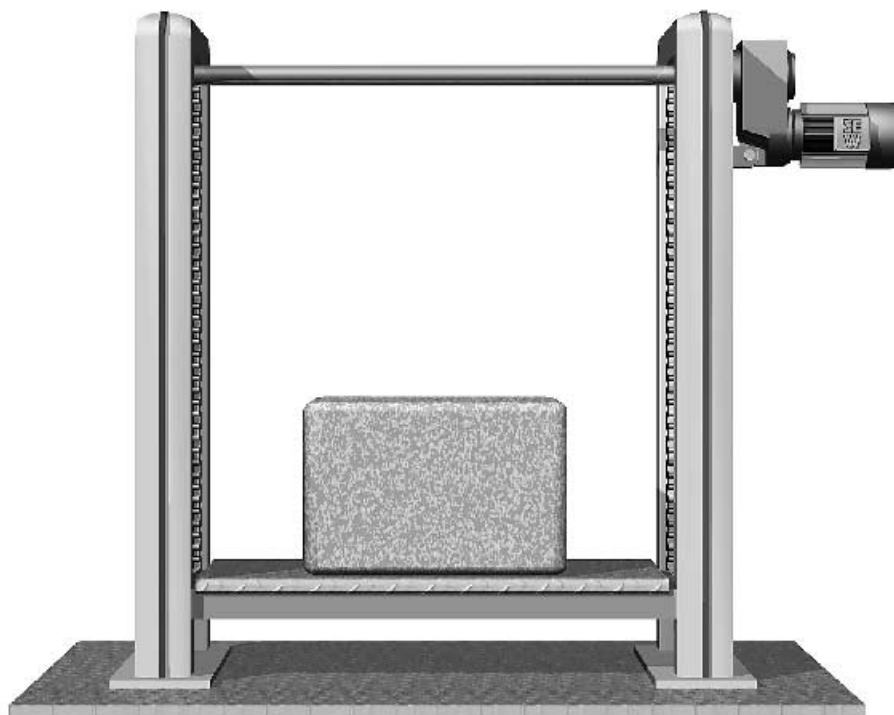
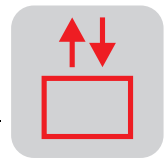


Рис. 35. Подъемное устройство

00786AXX



### 9.1 Двигатель с переключением числа полюсов

Мощность выбираемого двигателя должна быть больше вычисленной статической мощности (в квазистационарном режиме).

Статическая  
мощность

$$P_S = \frac{m \cdot g \cdot v}{1000 \cdot \eta} = \frac{500 \text{ кг} \cdot 9,81 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot 0,3 \frac{\text{М}}{\text{с}}}{1000 \cdot 0,85} = 1,73 \text{ кВт}$$

Двигатель выбирается по потреблению мощности при наибольшей скорости. Отношение частот вращения 1:4 оптимально для 8/2-полюсного двигателя.

**Выбранный  
двигатель**

DT100LS8/2 /BMG  
 $P_N = 0,45/1,8 \text{ кВт}$   
 $n_M = 630/2680 \text{ об/мин}$   
 $M_H = 10,9/14,1 \text{ Нм}$   
 $J_M = 48,1 \cdot 10^{-4} \text{ кгм}^2$   
 $Z_0 = 2600/9000$   
 $M_B = 20 \text{ Нм}$   
 $M_U = 2,5 \cdot M_H \text{ (8-полюсный)} = 27,3 \text{ Нм}$

Внешний момент  
инерции

$$J_X = 91,2 \cdot m \cdot \left( \frac{v}{n_M} \right)^2 = 91,2 \cdot 500 \text{ кг} \cdot \left( \frac{0,3 \frac{\text{М}}{\text{с}}}{2680 \text{ об/мин}} \right)^2 = 0,00057 \text{ кгм}^2$$

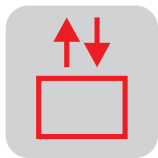
Статический  
вращающий  
момент двигателя

$$M_L = \frac{m \cdot g \cdot v \cdot 9,55}{n_M} = \frac{500 \text{ кг} \cdot 9,81 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot 0,3 \frac{\text{М}}{\text{с}} \cdot 9,55}{2680 \text{ об/мин}} = 5,2 \text{ Нм}$$

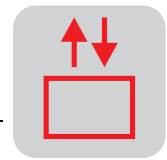


#### ВНИМАНИЕ!

Нагрузка содействует работе двигателя при движении вниз и противодействует при движении вверх. Поэтому используемые ниже формулы расчета движения вверх и вниз имеют некоторые различия (гл. "Формулы приводной техники").

**Вверх**

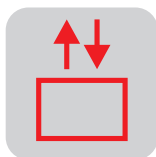
Время разгона	$t_A = \frac{\left( J_M + \frac{J_X}{\eta} \right) \cdot n_M}{9,55 \cdot \left( M_H - \frac{M_L}{\eta} \right)} = \frac{\left( 0,00481 + \frac{0,00057}{0,85} \right) \text{ кгм}^2 \cdot 2680 \text{ об/мин}}{9,55 \cdot \left( 14,1 - \frac{5,2}{0,85} \right) \text{ Нм}} = 0,19 \text{ с}$
Ускорение при разгоне	$a_A = \frac{v}{t_A} = \frac{0,3 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{0,19 \text{ с}} = 1,58 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$
Длина пути разгона	$s_A = \frac{1}{2} \cdot t_A \cdot v \cdot 1000 = \frac{1}{2} \cdot 0,19 \text{ с} \cdot 0,3 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 1000 = 28,5 \text{ мм}$
Время переключения с 2- на 8-полюсную обмотку	$t_U = \frac{(J_M + J_X \cdot \eta)(n_2 - n_1)}{9,55 \cdot (M_U + M_L \cdot \eta)}$ $= \frac{(0,00481 + 0,00057 \cdot 0,85) \text{ кгм}^2 \cdot (2680 - 630) \text{ об/мин}}{9,55 \cdot (27,3 + 5,2 \cdot 0,85) \text{ Нм}} = 0,036 \text{ с}$
Замедление при переключении	$a_U = \frac{v \cdot \left( 1 - \frac{n_{M1}}{n_{M2}} \right)}{t_U} = \frac{0,3 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \left( 1 - \frac{630 \text{ об/мин}}{2680 \text{ об/мин}} \right)}{0,036 \text{ с}} = 6,4 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$
Длина пути переключения	$s_U = \frac{1}{2} \cdot t_U \cdot v_2 \cdot 1000 \cdot \left( 1 + \frac{n_1}{n_2} \right) = \frac{1}{2} \cdot 0,036 \text{ с} \cdot 0,3 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 1000 \cdot \left( 1 + \frac{630 \text{ об/мин}}{2680 \text{ об/мин}} \right) = 6,7 \text{ мм}$



Параметры  
торможения

При расчете параметров торможения необходимо учитывать изменение частоты вращения, возникающее из-за запаздывания. Это запаздывание обусловлено наличием паузы между отключением двигателя и наложением тормоза.

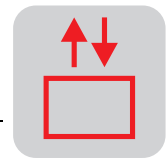
Изменение частоты вращения и запаздывание	$\Delta n = \frac{9,55 \cdot M_L \cdot \eta \cdot t_2}{J_M + J_X \cdot \eta}$
	$t_2 = 0,015 \text{ с}$
	$\Delta n = \frac{9,55 \cdot 5,2 \text{ Нм} \cdot 0,85 \cdot 0,015 \text{ с}}{0,00481 \text{ кгм}^2 + 0,00057 \text{ кгм}^2 \cdot 0,85} = 121 \text{ об/мин}$
Время торможения	$t_B = \frac{(J_M + J_X \cdot \eta)(n - \Delta n)}{9,55 \cdot (M_B + M_L \cdot \eta)} = \frac{(0,00481 + 0,00057 \cdot 0,85) \text{ кгм}^2 \cdot (630 - 121) \text{ об/мин}}{9,55 \cdot (20 + 5,2 \cdot 0,85) \text{ Нм}} = 0,011 \text{ с}$
Замедление при торможении	$a_B = \frac{v \frac{n_{M1} - \Delta n}{n_{M2}}}{t_B} = \frac{0,3 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \frac{(630 - 121) \text{ об/мин}}{2680 \text{ об/мин}}}{0,011 \text{ с}} = 5,2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$
Длина тормозного пути	$s_B = 10^3 \cdot v \cdot \frac{n_{M1}}{n_{M2}} \cdot \left( t_2 \cdot \frac{n_{M1} - \frac{\Delta n}{2}}{n_{M1}} + \frac{1}{2} \cdot t_B \cdot \frac{n_{M1} - \Delta n}{n_{M1}} \right)$
	$s_B = 10^3 \cdot 0,3 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \frac{630}{2680} \cdot \left( 0,015 \text{ с} \cdot \frac{630 - \frac{121}{2}}{630} + \frac{1}{2} \cdot 0,011 \text{ с} \cdot \frac{630 - 121}{630} \right) = 1,3 \text{ мм}$
Точность остановки	$X_B \approx \pm 0,12 \cdot s_B = \pm 0,12 \cdot 1,3 \text{ мм} = \pm 0,16 \text{ мм}$
Коэффициент зависимости от статической мощности и продолжительности включения (ПВ)	$\frac{P_S}{P_N} = \frac{1,73 \text{ кВт}}{1,8 \text{ кВт}} = 0,96 \quad \text{ПВ} = 50 \% \quad \rightarrow \quad K_P \approx 0,32$
	$Z_P = Z_0 \cdot \frac{1 - \frac{M_L}{M_H \cdot \eta}}{\frac{J_M + J_Z + \frac{J_X}{\eta}}{J_M}} \cdot K_P = 2600 \frac{\text{Вкл}}{\text{ч}} \cdot \frac{1 - \frac{5,2 \text{ Нм}}{14,1 \text{ Нм} \cdot 0,85}}{\frac{\left( 0,00481 + \frac{0,00057}{0,85} \right) \text{ кгм}^2}{0,00481 \text{ кгм}^2}} \cdot 0,32 = 413 \frac{\text{Вкл}}{\text{ч}}$

**Вниз**

Поскольку двигатель находится в генераторном режиме, в расчетах движения вниз используются значения синхронной частоты вращения двигателя 3000 об/мин и 750 об/мин.

Время разгона	$t_A = \frac{\left(J_M + \frac{J_X}{\eta}\right) \cdot n_M}{9,55 \cdot (M_H - M_L \cdot \eta)} = \frac{\left(0,00481 + \frac{0,00057}{0,85}\right) \text{ кгм}^2 \cdot 3000 \text{ об/мин}}{9,55 \cdot (14,1 - 5,2 \cdot 0,85) \text{ Нм}} = 0,09 \text{ с}$
Ускорение при разгоне	$a_A = \frac{v \cdot \frac{n_{S2}}{n_{M2}}}{t_A} = \frac{0,3 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \frac{3000 \text{ об/мин}}{2680 \text{ об/мин}}}{0,09 \text{ с}} = 3,7 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$
Длина пути разгона	$s_A = \frac{1}{2} \cdot t_A \cdot \frac{n_{S2}}{n_{M2}} \cdot v \cdot 1000 = \frac{1}{2} \cdot 0,09 \text{ с} \cdot \frac{3000}{2680} \cdot 0,3 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 1000 = 15 \text{ мм}$
Время переключения	$t_U = \frac{(J_M + J_X \cdot \eta)(n_{S2} - n_{S1})}{9,55 \cdot (M_U - M_L \cdot \eta)} = \frac{(0,00481 + 0,00057 \cdot 0,85) \text{ кгм}^2 \cdot (3000 - 750) \text{ об/мин}}{9,55 \cdot (27,3 - 5,2 \cdot 0,85) \text{ Нм}} = 0,055 \text{ с}$
Замедление при переключении	$a_U = \frac{\frac{n_{S2}}{n_{M2}} \cdot v \cdot \left(1 - \frac{n_{S1}}{n_{S2}}\right)}{t_U} = \frac{\frac{3000}{2680} \cdot 0,3 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \left(1 - \frac{750}{3000}\right)}{0,055 \text{ с}} = 4,6 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$
Длина пути переключения	$s_U = \frac{1}{2} \cdot t_U \cdot \frac{n_{S2}}{n_{M2}} \cdot v \cdot 1000 \cdot \left(1 + \frac{n_{S1}}{n_{S2}}\right) = \frac{1}{2} \cdot 0,055 \text{ с} \cdot \frac{3000}{2680} \cdot 0,3 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 1000 \cdot \left(1 + \frac{750}{3000}\right) = 11,5 \text{ мм}$
Время торможения	$t_B = \frac{(J_M + J_X \cdot \eta)(n_{S1} - \Delta n)}{9,55 \cdot (M_B - M_L \cdot \eta)} = \frac{(0,00481 + 0,00057 \cdot 0,85) \text{ кгм}^2 \cdot (750 - 121) \text{ об/мин}}{9,55 \cdot (20 - 5,2 \cdot 0,85) \text{ Нм}} = 0,03 \text{ с}$
Замедление при торможении	$a_B = \frac{\frac{n_{S2}}{n_{M2}} \cdot v \cdot \frac{n_{S1} + \Delta n}{n_{S2}}}{t_B} = \frac{\frac{3000}{2680} \cdot 0,3 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \frac{750 + 121}{3000}}{0,03 \text{ с}} = 3,2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$
Длина тормозного пути	$s_B = 10^3 \cdot v \cdot \frac{n_{S2}}{n_{M2}} \cdot \frac{n_{S1}}{n_{S2}} \cdot \left(t_2 \cdot \frac{n_{S1} + \frac{\Delta n}{2}}{n_{S1}} + \frac{1}{2} \cdot t_B \cdot \frac{n_{S1} + \Delta n}{n_{S1}}\right)$
	$s_B = 10^3 \cdot 0,3 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \frac{3000}{2680} \cdot \frac{750}{3000} \cdot \left(0,015 \text{ с} \cdot \frac{750 + \frac{121}{2}}{750} + \frac{1}{2} \cdot 0,03 \text{ с} \cdot \frac{750 + 121}{750}\right) = 2,8 \text{ мм}$
Точность остановки	$X_B \approx \pm 0,12 \cdot s_B = \pm 0,12 \cdot 2,8 \text{ мм} = \pm 0,3 \text{ мм}$





Коэффициент зависимости от статической мощности и продолжительности включения (ПВ)

$$\frac{P_S \cdot \eta^2}{P_N} = \frac{1,73 \text{ кВт} \cdot 0,85^2}{1,8 \text{ кВт}} = 0,69 \quad \text{ПВ} = 50 \% \quad \rightarrow \quad K_P \approx 0,55$$

Количество включений в час

$$Z_P = Z_0 \cdot \frac{1 - \frac{M_L \cdot \eta}{M_H}}{\frac{J_M + J_Z + J_X \cdot \eta}{J_M}} \cdot K_P = 2600 \frac{\text{Вкл}}{\text{ч}} \cdot \frac{1 - \frac{5,2 \text{ Нм} \cdot 0,85}{14,1 \text{ Нм}}}{\frac{(0,00481 + 0,00057 \cdot 0,85) \text{ кгм}^2}{0,00481 \text{ кгм}^2}} \cdot 0,55 = 885 \frac{\text{Вкл}}{\text{ч}}$$

Допустимое число циклов  $Z_C$  рассчитывается следующим образом:

Число циклов

$$\underline{Z_C} = \frac{Z_{1P} \cdot Z_{2P}}{Z_{1P} + Z_{2P}} = \frac{413 \cdot 885}{413 + 885} \cdot \frac{\text{Вкл}}{\text{ч}} = 281 \frac{\text{Вкл}}{\text{ч}}$$

Дополнительный нагрев при переключении с высокой частоты вращения на низкую сокращает допустимое количество включений в зависимости от типа двигателя. В нашем случае этот коэффициент уменьшения = 0,7.

Таким образом, допускается не более 196 циклов (цикл = движение вверх + движение вниз).

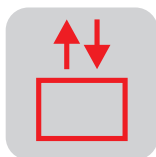
Расчет параметров редуктора см. предыдущий пример.

## 9.2 Двигатель с преобразователем частоты

### Условия

Привод подъемного устройства управляется преобразователем частоты.

Масса подъемного стола:	$m_0 = 200 \text{ кг}$
Масса груза:	$m_L = 300 \text{ кг}$
Скорость подъема:	$v = 0,3 \text{ м/с}$
Диаметр звездочки:	$D = 250 \text{ мм}$
Базовая частота:	$f_1 = 50 \text{ Гц}$
Максимальная частота:	$f_{\text{макс}} = 70 \text{ Гц}$
Ускорение:	$a = 0,3 \text{ м/с}^2$
Диапазон регулирования:	$1 : 10$
КПД нагрузки:	$\eta_L = 0,90$
КПД редуктора:	$\eta_G = 0,92$
Общий КПД:	$\eta = \eta_L \cdot \eta_G \approx 0,83$
Продолжительность включения:	$50 \% \text{ ПВ}$
Редуктор:	конический, без промежуточной передачи

**Статическая мощность**

Мощность выбираемого двигателя должна быть больше вычисленной статической мощности (в квазистационарном режиме).

$$P_S = \frac{m \cdot g \cdot v}{1000 \cdot \eta} = \frac{500 \text{ кг} \cdot 9,81 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot 0,3 \frac{\text{М}}{\text{с}}}{1000 \cdot 0,83} = 1,77 \text{ кВт}$$



**При расчете параметров для привода подъемного устройства с преобразователем частоты за максимальную частоту следует обязательно принимать 70 Гц.** Если привод достигает максимальной скорости при 70 Гц вместо 50 Гц, то передаточное число редуктора, а значит и создаваемый вращающий момент, становится больше в 1,4 (70/50) раза. Если теперь установить базовую частоту на 50 Гц, то при таком расчете вращающий момент на выходном валу в диапазоне до базовой частоты увеличивается в 1,4 раза и затем в диапазоне до 70 Гц снижается до номинального значения. Такая настройка параметров обеспечивает резерв вращающего момента в 40 % в диапазоне до базовой частоты. Этим обеспечивается увеличенный пусковой момент и повышенная надежность подъемного устройства.

**Определение параметров двигателя**

При том условии, что динамическая мощность привода подъемных устройств без противовеса относительно мала (< 20 % от статической мощности), достаточно определить статическую мощность двигателя  $P_S$ .

**Статическая мощность**

$$P_S = 1,77 \text{ кВт}$$

$$\text{Номинальная мощность двигателя } P_N = 2,2 \text{ кВт}$$

$$\text{Номинальная мощность преобразователя } P_N = 2,2 \text{ кВт}$$

**Тепловой режим**

Чтобы обеспечить стабильный тепловой режим и оптимальное намагничивание, рекомендуется для привода подъемных устройств выбирать двигатель на 1 типоразмер больше. Это необходимо особенно в том случае, если статическая мощность близка к номинальной мощности двигателя. В данном примере этот интервал достаточно велик, так что выбор двигателя большего типоразмера не обязателен.

**Выбор двигателя**

С учетом вышеизложенного выбираем двигатель:

DV100M 4 BMG

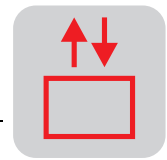
$$P_N = 2,2 \text{ кВт}$$

$$n_M = 1400 \text{ об/мин при } 50 \text{ Гц} / 1960 \text{ об/мин при } 70 \text{ Гц}$$

$$J_M = 59 \cdot 10^{-4} \text{ кгм}^2$$

$$M_B = 40 \text{ Нм}$$

Данные каталога  
"Мотор-редукторы"



Внешний момент инерции

$$J_X = 91,2 \cdot m \cdot \left( \frac{v}{n_M} \right)^2 = 91,2 \cdot 500 \text{ кг} \cdot \left( \frac{0,3 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{1960 \text{ об/мин}} \right)^2 = 0,001 \text{ кгм}^2$$

Момент нагрузки

$$M_L = \frac{m \cdot g \cdot v \cdot 9,55}{n_M} = \frac{500 \text{ кг} \cdot 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 0,3 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 9,55}{1960 \text{ об/мин}} = 7,2 \text{ Нм}$$

Динамический момент

$$M_H = \frac{\left( J_M + \frac{J_X}{\eta} \right) \cdot n_M}{9,55 \cdot t_A} + \frac{M_L}{\eta}$$

С учетом заданного ускорения  $0,3 \text{ м/с}^2$  получаем время разгона  $t_A = 1 \text{ с}$ .

Динамический момент для данного времени разгона

$$M_H = \frac{\left( 0,00481 + \frac{0,001}{0,83} \right) \text{ кгм}^2 \cdot 1960 \text{ об/мин}}{9,55 \cdot 1 \text{ с}} + \frac{7,2 \text{ Нм}}{0,83} = 9,8 \text{ Нм}$$

Очевидно, что для приводов подъемных устройств динамический момент достаточно мал по сравнению со статическим моментом нагрузки.

Как уже упоминалось, динамический момент должен быть меньше, чем 130 % номинального момента, обеспечиваемого преобразователем и рассчитанного по номинальной мощности.

Номинальный вращающий момент

$$M_N = \frac{P_N \cdot 9550}{n_M} = \frac{2,2 \text{ кВт} \cdot 9550}{1960 \text{ об/мин}} = 10,7 \text{ Нм}$$

Отношение  $M_H / M_N$

$$\frac{M_H}{M_N} = \frac{9,8 \text{ Нм}}{10,7 \text{ Нм}} = 92 \% < 130 \%$$

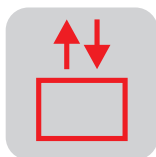
Мощность при разгоне

$$P = \frac{M_H \cdot n_M}{9550} = \frac{9,8 \text{ Нм} \cdot 1960 \text{ об/мин}}{9550} = 2,02 \text{ кВт}$$

Мощность в различных режимах работы

Аналогичным образом рассчитывается мощность для всех режимов работы. При этом следует учитывать направление действия нагрузки и направление движения (вверх/вниз)!

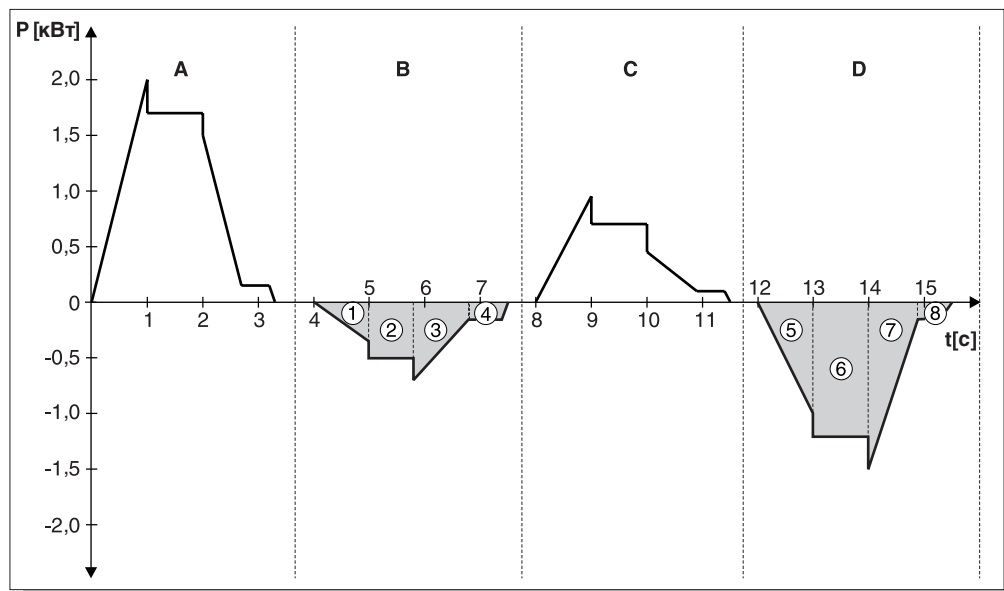
Вид мощности	без груза вверх	с грузом вверх	без груза вниз	с грузом вниз
Статическая мощность	0,71 кВт	1,77 кВт	– 0,48 кВт	– 1,20 кВт
Статическая и динамическая пусковая мощность	0,94 кВт	2,02 кВт	– 0,25 кВт	– 0,95 кВт
Статическая и динамическая мощность торможения	0,48 кВт	1,52 кВт	– 0,71 кВт	– 1,45 кВт



### Тормозные резисторы

Для определения необходимой номинальной мощности тормозного резистора следует подробнее рассмотреть рабочий цикл привода.

Допустим, что рабочий цикл (дважды в минуту = 4 фазы торможения за 120 с):



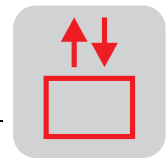
00795BRU

Рис. 36. Рабочий цикл привода: A = с грузом вверх / B = без груза вниз /  
C = без груза вверх / D = с грузом вниз

### Средняя мощность торможения

Заштрихованные площади соответствуют торможению в генераторном режиме. **Продолжительность включения тормозного резистора рассчитывается по базовой продолжительности рабочего цикла 120 с.** В нашем случае тормозной резистор находится в работе 7 с за один цикл, т. е. 28 с за цикл базовой продолжительности. Таким образом, продолжительность его включения составляет 23 %. Средняя мощность торможения рассчитывается по значениям мощности отдельных режимов торможения:

$$P_B = \frac{|P_1| \cdot t_1 + |P_2| \cdot t_2 + \dots + |P_n| \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}$$



Промежуточный расчет выполняется в соответствии с диаграммой (см. рисунок):

$$|P_1| \cdot t_1 = \frac{0,25}{2} \text{ кВт} \cdot 1 \text{ с} = 0,125 \text{ кВт} \cdot \text{с}$$

$$|P_2| \cdot t_2 = 0,48 \text{ кВт} \cdot 1 \text{ с} = 0,48 \text{ кВт} \cdot \text{с}$$

$$|P_3| \cdot t_3 = \left( 0,045 + \frac{0,71 - 0,045}{2} \right) \text{ кВт} \cdot 0,9 \text{ с} = 0,34 \text{ кВт} \cdot \text{с}$$

$$|P_4| \cdot t_4 = 0,048 \text{ кВт} \cdot 0,5 \text{ с} = 0,024 \text{ кВт} \cdot \text{с}$$

$$|P_5| \cdot t_5 = \frac{0,95}{2} \text{ кВт} \cdot 1 \text{ с} = 0,475 \text{ кВт} \cdot \text{с}$$

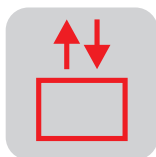
$$|P_6| \cdot t_6 = 1,2 \text{ кВт} \cdot 1 \text{ с} = 1,2 \text{ кВт} \cdot \text{с}$$

$$|P_7| \cdot t_7 = \left( 0,12 + \frac{1,45 - 0,12}{2} \right) \text{ кВт} \cdot 0,9 \text{ с} = 0,707 \text{ кВт} \cdot \text{с}$$

$$|P_8| \cdot t_8 = 0,12 \text{ кВт} \cdot 0,5 \text{ с} = 0,06 \text{ кВт} \cdot \text{с}$$

Средняя мощность торможения составляет:

$$P_B = \frac{3,41 \text{ кВт} \cdot \text{с}}{6,8 \text{ с}} = 0,5 \text{ кВт}$$



Максимальная  
мощность  
торможения

Максимальная мощность торможения составляет  $P_{\text{макс}} = 1,5 \text{ кВт}$ . Это значение не должно превышать табличного значения для выбранного тормозного резистора при 6 % ПВ.

Для преобразователя частоты MOVITRAC® 31C022, используемого в комбинации с двигателем мощностью 2,2 кВт, таблица параметров тормозных резисторов выглядит следующим образом:

Выдержка из таблицы "Тормозные резисторы BW... для MOVITRAC® 31C...-503"

Тип тормозного резистора Номер	BW100-002 821 700 9	BW100-006 821 701 7	BW068-002 821 692 4	BW068-004 821 693 2
Нагрузочная способность при 100 % ПВ <sup>1)</sup>	0,2 кВт	0,6 кВт	0,2 кВт	0,4 кВт
50 % ПВ	0,4 кВт	1,1 кВт	0,4 кВт	0,7 кВт
25 % ПВ	0,6 кВт	1,9 кВт	0,6 кВт	1,2 кВт
12 % ПВ	1,2 кВт	3,5 кВт	1,2 кВт	2,4 кВт
6 % ПВ	1,9 кВт	5,7 кВт	1,9 кВт	3,8 кВт
Значение сопротивления	100 Ом ± 10 %		68 Ом ± 10 %	
Ток отключения	0,72 A <sub>~</sub>	1,8 A <sub>~</sub>	0,8 A <sub>~</sub>	1,4 A <sub>~</sub>
Конструкция	Проволочный резистор на керамической трубке			
Подключение	Керамические клеммы для проводов сечением 2,5 мм <sup>2</sup> (AWG 14)			
Степень защиты	IP 20 (NEMA 1) (в подключенном состоянии)			
Температура окружающей среды	-20...+45 °C			
Тип охлаждения	Самоохлаждение			
Для использования с MOVITRAC®	31C022 ... 31C030			

1) Продолжительность включения тормозного резистора относительно базовой продолжительности рабочего цикла  $T_D \leq 120 \text{ с}$ .

В строке для 25 % ПВ по эффективной мощности 0,6 кВт находим соответствующий тормозной резистор: BW100-002 или BW068-002.

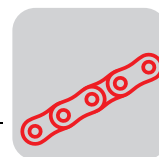
Прочие технические данные и инструкции по выбору тормозных резисторов при проектировании содержатся в каталоге "Преобразователи частоты MOVITRAC® 31C" и в документации "Drive Engineering – Practical Implementation. Project Planning with Frequency Inverters" ("Практика приводной техники. Проектирование приводов с преобразователями частоты").

Расчет параметров редуктора см. предыдущий пример.

**Преимущества  
преобразователя  
частоты**

Если сравнивать привод, регулируемый по частоте, и двигатель с переключением числа полюсов, то очевидны следующие преимущества работы с преобразователем частоты:

- Допускается очень большое количество включений.
- Точность остановки выше благодаря более низкой скорости позиционирования.
- Существенная оптимизация и возможность регулирования параметров движения (ускорение и замедление).

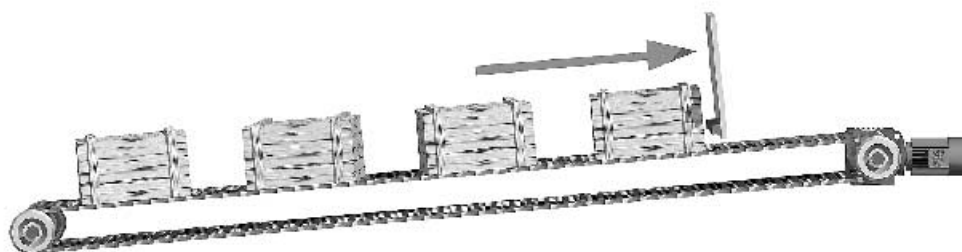


## 10 Пример расчета привода цепного конвейера с преобразователем частоты

### Условия

Цепной конвейер подает деревянные ящики вверх по наклонной плоскости под углом  $\alpha = 5^\circ$  со скоростью 0,5 м/с. На конвейере помещается не более 4 ящиков по 500 кг каждый. Собственная масса конвейерной цепи составляет 300 кг. Заданный коэффициент трения между цепью и подкладкой составляет  $\mu = 0,2$ . В конце цепного конвейера установлен механический упор, который выравнивает ящики перед сталкиванием их на второй конвейер. При этом цепь под деревянным ящиком проскальзывает с коэффициентом трения  $\mu = 0,7$ . Используется червячный мотор-редуктор, регулируемый по частоте в диапазоне приблизительно до 50 Гц.

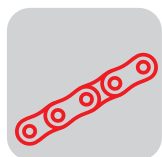
Скорость	$v = 0,5 \text{ м/с}$
Угол наклона	$\alpha = 5^\circ$
Масса перемещаемого груза	$m_L = 2000 \text{ кг}$
Масса цепи	$m_D = 300 \text{ кг}$
Коэффициент трения между цепью и подкладкой	$\mu_1 = 0,2$
Коэффициент трения между ящиком и цепью	$\mu_2 = 0,7$
Необходимое ускорение	$a = 0,25 \text{ м/с}^2$
Диаметр звездочки	$D = 250 \text{ мм}$
Количество включений	10 вкл/ч и 16 ч/сут



10

Рис. 37. Цепной конвейер

00796AXX



## 10.1 Расчет параметров двигателя

### Силы сопротивления

Описание

Подъем груза с учетом силы трения, направленной вверх! Сила тяжести определяется массой 4 ящиков и половиной массы цепи.

$$F_S = F_G \cdot \frac{\sin(\alpha + \rho)}{\cos \rho} \quad \mu = \tan \rho / \rho = \arctan 0,2$$

$$F_S = (2000 + 150) \text{ кг} \cdot 9,81 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot \frac{\sin(5^\circ + 11,3^\circ)}{\cos 11,3^\circ} = 6040 \text{ Н}$$

Выравнивание

Скольжение (пара "ящик - цепь") по наклонной плоскости, сила трения направлена вниз!

$$F_S = F_G \cdot \frac{\sin(\rho - \alpha)}{\cos \rho} = 4900 \text{ Н} \cdot \frac{\sin(35^\circ - 5^\circ)}{\cos 35^\circ} = 2990 \text{ Н} \quad \rho = \arctan 0,7$$

КПД червячного редуктора

КПД червячного редуктора зависит от передаточного числа и может быть самым различным. Поэтому на данном этапе расчета, когда необходимый вращающий момент и передаточное число еще не определены, рекомендуется принять КПД за 70 %. В этом случае понадобится проверочный расчет.

КПД цепной передачи принимается за 0,9 (см. таблицу в Приложении).

Статическая  
мощность

$$P_S = \frac{F \cdot v}{\eta} = \frac{9030 \text{ Н} \cdot 0,5 \frac{\text{М}}{\text{с}}}{0,7 \cdot 0,9 \cdot 1000} = 7,17 \text{ кВт}$$

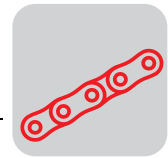
Поскольку цепной конвейер эксплуатируется в продолжительном режиме, следует выбрать двигатель, номинальная мощность которого больше максимальной статической мощности. В кратковременном режиме, как правило, можно использовать и менее мощный двигатель. Однако при этом потребуются дополнительный проверочный расчет теплового режима (выполняется специалистами SEW).

Выбор  
двигателя

С учетом вышеизложенного выбираем двигатель:

DV 132M 4 BM  
 $P_N = 7,5 \text{ кВт}$   
 $n_M = 1430 \text{ об/мин}$   
 $J_M = 0,03237 \text{ кгм}^2$   
 $M_B = 100 \text{ Нм}$





Внешний момент инерции

$$J_X = 91,2 \cdot m \cdot \left( \frac{v}{n_M} \right)^2 = 91,2 \cdot (2000 + 300) \text{ кг} \cdot \left( \frac{0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{1430 \text{ об/мин}} \right)^2 = 0,026 \text{ кгм}^2$$

Момент нагрузки

$$M_L = \frac{F \cdot v \cdot 9550}{n_M} = \frac{9030 \text{ Н} \cdot 0,5 \cdot 9,55}{1430 \text{ об/мин}} = 30,2 \text{ Нм}$$

Динамический момент

$$M_H = \frac{\left( J_M + \frac{J_X}{\eta} \right) \cdot n_M}{9,55 \cdot t_A} + \frac{M_L}{\eta}$$

С учетом заданного ускорения  $0,25 \text{ м/с}^2$  получаем время разгона  $t_A = 2 \text{ с}$ .

$$M_H = \frac{\left( 0,03237 + \frac{0,026}{0,63} \right) \text{ кгм}^2 \cdot 1430 \text{ об/мин}}{9,55 \cdot 2 \text{ с}} + \frac{30,2 \text{ Нм}}{0,9 \cdot 0,7} = 53,4 \text{ Нм}$$

Это значение динамического момента рассчитано для самых неблагоприятных условий, т. е. когда на цепи находится 4 ящика, и один из них дошел до упора.

Номинальный момент

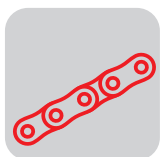
Как уже упоминалось, динамический момент должен быть меньше, чем 130 % номинального момента, обеспечиваемого преобразователем и рассчитанного по номинальной мощности.

$$M_N = \frac{P_N \cdot 9550}{n_M} = \frac{7,5 \text{ кВт} \cdot 9550}{1430 \text{ об/мин}} = 50,1 \text{ Нм}$$

Отношение  $M_H / M_N$

$$\frac{M_H}{M_N} = \frac{53,4 \text{ Нм}}{50,1 \text{ Нм}} = 107 \% < 130 \%$$

Выбор преобразователя частоты: например, MOVIDRIVE® MDF 0075.



## 10.2 Расчет параметров редуктора

Частота вращения  
выходного вала

$$n_a = 19,1 \cdot 10^3 \cdot \frac{v}{D} \cdot i_V = 19,1 \cdot 10^3 \cdot \frac{0,5 \frac{M}{C}}{250 \text{ мм}} \cdot 1 = 38,2 \text{ об/мин}$$

Передаточное  
число редуктора

$$i = \frac{n_M}{n_a} = \frac{1430 \text{ об/мин}}{38,2 \text{ об/мин}} = 37,4$$

Эксплуатационный  
коэффициент

Для эксплуатации 16 часов в сутки при 10 включениях в час определяем эксплуатационный коэффициент (гл. "Редукторы", диаграмма "Необходимый эксплуатационный коэффициент  $f_B$ "):

$$f_M = \frac{J_X}{J_M} = \frac{0,026 \text{ кгм}^2}{0,032 \text{ кгм}^2} = 0,8$$

С учетом коэффициента инерции  $f_M = 0,8$  получаем характер нагрузки II и эксплуатационный коэффициент  $f_B = 1,2$ .

Выбор редуктора

В данном случае можно выбрать редуктор S97 с  $n_a = 39$  об/мин,  $M_{\text{амакс}} = 3300$  Нм при  $f_B = 2,0$ .

Проверка КПД

В каталоге "Мотор-редукторы" для этого редуктора указан КПД = 86 %. Поскольку в начале расчета для КПД было принято значение 70 %, необходимо проверить, будет ли достаточным использование менее мощного привода.

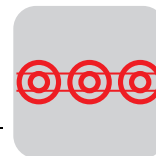
Статическая  
мощность

$$P_S = \frac{9030 \text{ Н} \cdot 0,5 \frac{M}{C}}{0,86 \cdot 0,9 \cdot 1000} = 5,83 \text{ кВт}$$

Номинальная мощность двигателя, меньшего на один типоразмер, составляет 5,5 кВт, а значит слишком мала.

**Выбранный  
привод**

Таким образом, выбран привод: **S97 DV132M 4 BMG**.



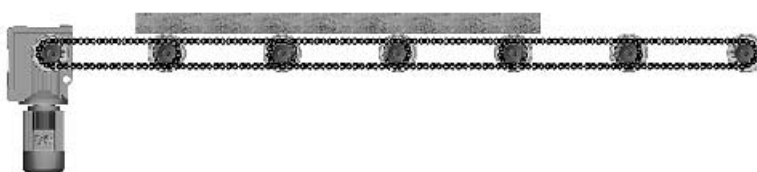
## 11 Пример расчета привода роликового конвейера с преобразователем частоты

### Условия

По звеньям роликового конвейера подаются стальные плиты. Размеры каждой плиты 3000 x 1000 x 100 мм. Каждое звено конвейера имеет 8 стальных роликов диаметром 89 мм и длиной 1500 мм. Приводы всех 3 звеньев работают от одного преобразователя частоты. Звездочки цепной передачи имеют 13 зубьев и модуль = 5. Диаметр опорных цапф роликов составляет  $d = 20$  мм. На одном звене конвейера может находиться только одна плита.

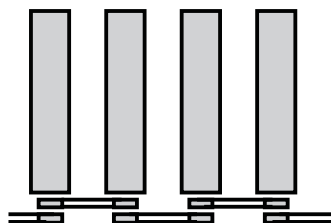
Максимальная скорость 0,5 м/с, максимально допустимое ускорение 0,5 м/с<sup>2</sup>.

Скорость	$v = 0,5$ м/с
Необходимое ускорение	$a = 0,5$ м/с <sup>2</sup>
Наружный диаметр роликов	$D_2 = 89$ мм
Внутренний диаметр роликов	$D_1 = 40$ мм
Диаметр звездочек	$D_K = 65$ мм
Масса стальной плиты	$m = 2370$ кг



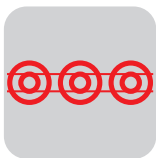
00797AXX

Рис. 38. Роликовый конвейер с многодвигательным приводом



00798BXX

Рис. 39. Расположение цепей



## 11.1 Расчет параметров двигателя

**Сила  
сопротивления  
качению**

Масса плиты  $m = 2370$  кг, плотность  $7,9$  кг/дм<sup>3</sup> (сталь), и объем  $300$  дм<sup>3</sup>. Сила сопротивления качению рассчитывается так же, как и для привода транспортного устройства. Значения "с" и "f" можно взять из таблицы в Приложении.

$$F_F = m \cdot g \cdot \left( \frac{2}{D_2} \cdot \left( \mu_L \cdot \frac{1}{2} \cdot d + f \right) + c \right)$$

$$F_F = 2370 \text{ кг} \cdot 9,81 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot \left( \frac{2}{89 \text{ мм}} \cdot \left( 0,005 \cdot \frac{1}{2} \cdot 20 \text{ мм} + 0,5 \text{ мм} \right) + 0 \right) = 287 \text{ Н}$$

**Статическая  
мощность**

Существенное значение в этом случае имеет КПД.

По данным таблицы КПД цепной передачи  $\eta_1 = 0,9$  для каждого полностью охваченного элемента. Как видно из расположения цепей, в нашем случае имеется 7 полностью охваченных звездочек.

Таким образом, с учетом  $x$  = число обхватов = 7 получаем общий КПД цепной передачи  $\eta_2$ :

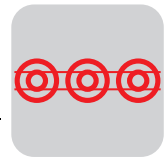
КПД цепной  
передачи

$$\eta_2 = \eta_1^x = 0,9 \cdot 7 = 0,48$$

При этом необходимая статическая мощность двигателя при КПД редуктора  $\eta_G = 0,95$ :

Статическая  
мощность

$$P_S = \frac{F_F \cdot v}{\eta_G \cdot \eta_2} = \frac{287 \text{ Н} \cdot 0,5 \frac{\text{М}}{\text{с}}}{0,95 \cdot 0,48 \cdot 1000} = 0,31 \text{ кВт}$$



**Внешний  
момент инерции  
и моменты  
двигателя**

В данном случае внешний момент инерции состоит из моментов инерции плиты и роликов. В таких условиях моментом инерции цепей можно пренебречь.

Момент инерции  
плиты

$$J_X = 91,2 \cdot m \cdot \left( \frac{v}{n_M} \right)^2 = 91,2 \cdot 2370 \text{ кг} \cdot \left( \frac{0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{1400 \text{ об/мин}} \right)^2 = 0,0276 \text{ кгм}^2$$

Объем ролика

$$V = \left( \frac{\pi}{4} \cdot D_2^2 \cdot l \right) - \left( \frac{\pi}{4} \cdot D_1^2 \cdot l \right)$$

$$V = \left( \frac{\pi}{4} \cdot 89^2 \text{ мм}^2 \cdot 1500 \text{ мм} \right) - \left( \frac{\pi}{4} \cdot 40^2 \text{ мм}^2 \cdot 1500 \text{ мм} \right) = 7446752 \text{ мм}^3 = 7,45 \text{ дм}^3$$

Масса ролика

$$m = V \cdot \rho = 7,45 \text{ дм}^3 \cdot 7,9 \frac{\text{кг}}{\text{дм}^3} = 58,9 \text{ кг}$$

Момент инерции  
ролика

$$J = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r_2^2 + r_1^2)$$

$$J = \frac{1}{2} \cdot 58,9 \text{ кг} \cdot (0,0445^2 + 0,020^2) \text{ м}^2 = 0,07 \text{ кгм}^2$$

Чтобы привести момент инерции ротора двигателя и внешний момент инерции к общей базе отсчета, последний необходимо пересчитать с учетом передаточного числа редуктора.

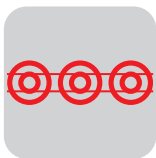
Внешний момент  
инерции

$$J_X = J \cdot \left( \frac{n_a}{n_M} \right)^2$$

Частота вращения выходного вала рассчитывается по скорости подачи плиты и диаметру роликов.

Частота вращения  
выходного вала

$$n_a = \frac{v \cdot 1000 \cdot 60}{\pi \cdot D_2} = \frac{0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 1000 \cdot 60}{\pi \cdot 89 \text{ мм}} = 107,3 \text{ об/мин}$$



Таким образом, приведенный к валу двигателя момент инерции одного ролика:

Приведенный  
момент инерции

$$J_X = 0,07 \text{ кгм}^2 \cdot \left( \frac{107,3 \text{ об/мин}}{1400 \text{ об/мин}} \right)^2 = 0,00041 \text{ кгм}^2$$

В этом случае общий внешний момент инерции:

Внешний момент  
инерции

$$J_{XT} = J_{XP} + J_{XR} = 0,0276 \text{ кгм}^2 + 7 \cdot 0,00041 \text{ кгм}^2 = 0,03047 \text{ кгм}^2$$

Динамический момент на входе редуктора, необходимый для разгона нагрузки (без учета массы ротора).

Динамический  
момент

$$M_{DL} = \frac{J_X \cdot n_M}{9,55 \cdot t_A} = \frac{0,03047 \text{ кгм}^2 \cdot 1400 \text{ об/мин}}{0,95 \cdot 0,48} = 9,8 \text{ Нм}$$

Динамическая  
мощность

$$P_{DL} = \frac{M_{DL} \cdot n_M}{9550} = \frac{9,8 \text{ Нм} \cdot 1400 \text{ об/мин}}{9550} = 1,44 \text{ кВт}$$

Полная потребляемая мощность (без учета мощности на ускорение ротора двигателя, которая еще не определена) составляет:

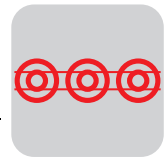
Полная мощность

$$P_T = P_S + P_{DL} = 0,31 \text{ кВт} + 1,44 \text{ кВт} = 1,75 \text{ кВт}$$

### Выбор двигателя

Выбираем двигатель мощностью 2,2 кВт.

DV 100M4 /BMG  
 $P_N = 2,2 \text{ кВт}$   
 $n_N = 1410 \text{ об/мин}$   
 $J_M = 59,1 \cdot 10^{-4} \text{ кгм}^2$



Динамический момент	$M_H = \frac{\left(0,0059 + \frac{0,03047}{0,95 \cdot 0,48}\right) \text{ кгм}^2 \cdot 1410 \text{ об/мин}}{9,55 \cdot 1 \text{ с}} + 2,09 \text{ Нм} = 12,8 \text{ Нм}$
Номинальный момент	$M_N = \frac{P_N \cdot 9550}{n_M} = \frac{2,2 \text{ кВт} \cdot 9550}{1410 \text{ об/мин}} = 15,0 \text{ Нм}$
Отношение $M_H / M_N$	$\frac{M_H}{M_N} = \frac{12,8 \text{ Нм}}{15,0 \text{ Нм}} = 85 \% < 130 \%$

### Многодвигатель- ный привод

При работе с многодвигательным приводом учитывайте следующее:

- Для компенсации электрической емкости кабелей при эксплуатации группового привода рекомендуется использовать выходной фильтр.
- Преобразователь частоты выбирается по величине суммарного тока двигателей.

### Выбор привода

Согласно данным каталога номинальный ток выбранного двигателя составляет 4,9 А. Следовательно, необходим преобразователь частоты с номинальным выходным током  $3 \cdot 4,9 \text{ А} = 14,7 \text{ А}$  или больше.

Выбираем MOVIDRIVE® MDF 60A 0075-5A3-4-00 (16 А).

Выбор редуктора см. предыдущий пример. С учетом этого выбираем следующий привод:

KA47DV100M4 /BMG

$i = 13,65$

$P_N = 2,2 \text{ кВт}$

1410/103 об/мин

$M_a = 205 \text{ Нм}$

$f_B = 1,75$

$M_B = 40 \text{ Нм}$



## 12 Пример расчета привода поворотного стола с преобразователем частоты

### Условия

Для обработки заготовок (4 штуки) стол поворачивается через каждые 30 секунд на  $90^\circ$ . Каждый процесс перемещения занимает 5 секунд, максимальное ускорение не должно превышать  $0,5 \text{ м/с}^2$ . Допустимое отклонение положения составляет  $\pm 2 \text{ мм}$  по окружности стола.

Диаметр стола:	2000 мм
Масса стола:	400 кг
Масса заготовки:	70 кг (расстояние от центра тяжести до оси вращения: $l_S = 850 \text{ мм}$ )
Передаточное число промежуточной передачи (шестерня – зубчатый венец):	$i_V = 4,4$
Диаметр опорного элемента (сталь/сталь):	900 мм
Коэффициент трения качения $\mu_L$ :	0,01
Позиционирование через переключение "быстрый ход / замедленный ход":	R 1:10

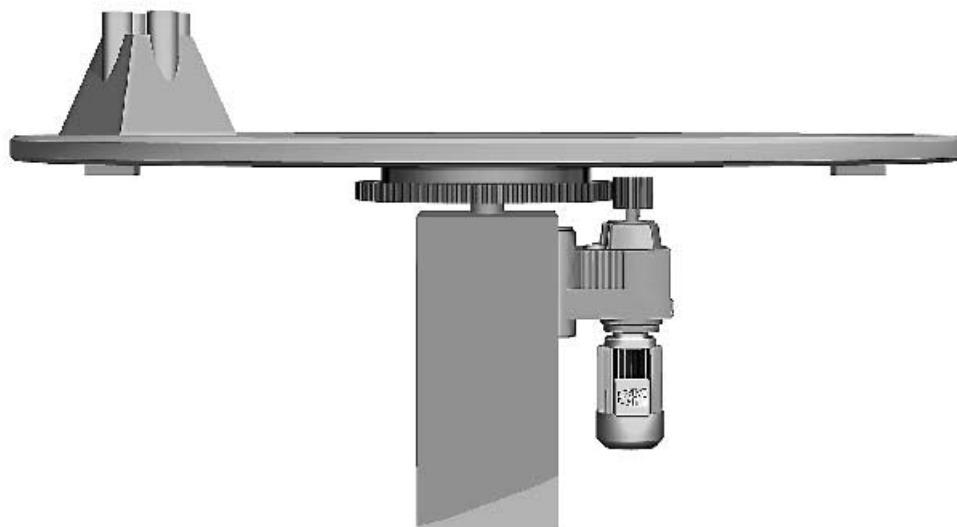


Рис. 40. Привод поворотного стола

00800AXX





## 12.1 Расчет параметров двигателя

### Момент инерции

Стол

$$J_T = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 = \frac{1}{2} \cdot 400 \text{ кг} \cdot 1^2 \text{ м}^2 = 200 \text{ кгм}^2$$

Заготовка

$$J_W = 4 \cdot J_S + m \cdot l_S^2$$

$J_S$  = собственный момент инерции заготовки по закону Штейнера  
 $l_S$  = расстояние "центр тяжести заготовки – центр вращения"

### Упрощенный расчет

Поскольку заготовки расположены на столе симметрично, возможен упрощенный расчет по следующей формуле:

Заготовка

$$J_W = 4 \cdot m \cdot r^2 = 4 \cdot 70 \text{ кг} \cdot 0,85^2 \text{ м}^2 = 202,3 \text{ кгм}^2$$

В данном случае моментом инерции зубчатого венца можно пренебречь. При этом общий внешний момент инерции:

Общий момент инерции

$$J_X = J_T + J_W = 200 \text{ кгм}^2 + 202,3 \text{ кгм}^2 = 402,3 \text{ кгм}^2$$

### Частота вращения и время разгона

Заданное ускорение  $a = 0,5 \text{ м/с}^2$

Скорость

$$v = \frac{a \cdot t - \sqrt{(a \cdot t)^2 - 4 \cdot a \cdot s}}{2}$$

Расстояние

$$s = \frac{\pi D}{4} = \frac{6,283 \text{ м}}{4} = 1,57 \text{ м}$$

Скорость

$$v = \frac{0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 4,5 \text{ с} - \sqrt{\left(0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 4,5 \text{ с}\right)^2 - 4 \cdot 0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 1,57 \text{ м}}}{2} = 0,43 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Частота вращения

$$n = \frac{v \cdot 60}{\pi D} = \frac{0,43 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 60}{6,283 \text{ м}} = 4,1 \text{ об/мин}$$

Время разгона

$$t_A = \frac{v}{a} = \frac{0,43 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}} = 0,86 \text{ с}$$



## Мощность

Момент инерции поворотного стола, как правило, значительно выше момента инерции ротора двигателя, поэтому в расчете пусковой мощности последнюю величину можно не учитывать.

Полная мощность

$$P_T = P_{DL} + P_S$$

Динамическая мощность

$$P_{DL} = \frac{J_X \cdot n_T^2}{91200 \cdot t_A \cdot \eta} = \frac{402,3 \text{ кгм}^2 \cdot 4,1^2 \text{ об/мин}^2}{91200 \cdot 0,86 \text{ с} \cdot 0,9} = 0,096 \text{ кВт}$$

Статическая мощность

$$P_S = \frac{\Sigma m \cdot g \cdot \mu_L \cdot d \cdot n_T}{2 \cdot 1000 \cdot 9550 \cdot \eta} = \frac{680 \text{ кг} \cdot 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 0,01 \cdot 900 \text{ мм} \cdot 4,1 \text{ об/мин}}{2 \cdot 1000 \cdot 9550 \cdot 0,9} = 0,014 \text{ кВт}$$

Полная мощность

$$P_T = 0,096 \text{ кВт} + 0,014 \text{ кВт} = 0,11 \text{ кВт}$$

## Выбранный двигатель

DR63S4 /B03

$P_N = 0,12 \text{ кВт}$

$n_M = 1380 \text{ об/мин}$

$J_M = 0,00048 \text{ кгм}^2$

$M_B = 2,4 \text{ Нм}$

Внешний момент инерции

$$J_X = J_X \cdot \left( \frac{n}{n_M} \right)^2 = 402,3 \text{ кгм}^2 \cdot \left( \frac{4,1 \text{ об/мин}}{1380 \text{ об/мин}} \right)^2 = 0,00355 \text{ кгм}^2$$

Статический вращающий момент

$$M_S = \frac{P_S \cdot 9550 \cdot \eta}{n_M} = 0,09 \text{ Нм}$$

Динамический момент

$$M_H = \frac{\left( J_M + \frac{J_X}{\eta} \right) \cdot n_M}{9,55 \cdot t_A} + M_S$$

$$M_H = \frac{\left( 0,00048 + \frac{0,00355}{0,9} \right) \text{ кгм}^2 \cdot 1380 \text{ об/мин}}{9,55 \cdot 0,86 \text{ с}} + \frac{0,09 \text{ Нм}}{0,1} = 0,84 \text{ Нм}$$

Номинальный вращающий момент

$$M_N = \frac{0,12 \text{ кВт} \cdot 9550}{1380 \text{ об/мин}} = 0,83 \text{ Нм}$$

При этом обеспечивается надежный разгон.



**Проверка  
точности  
остановки**

Двигатель при определенной частоте вращения, соответствующей частоте 5 Гц ( $R = 1:10$ ), останавливается механическим тормозом. Торможение производится на минимальной скорости  $v = 0,043 \text{ м/с} \Rightarrow n_M = 138 \text{ об/мин}$ .

Время торможения

$$t_B = \frac{(J_M + J_X \cdot \eta) \cdot n_M}{9,55 \cdot (M_B + M_S \cdot \eta)}$$

$$t_B = \frac{(0,00048 + 0,00355 \cdot 0,9) \text{ кгм}^2 \cdot 138 \text{ об/мин}}{9,55 \cdot (2,4 + 0,09 \cdot 0,9) \text{ Нм}} = 0,021 \text{ с}$$

Замедление при  
торможении

$$a_B = \frac{v}{t_B} = \frac{0,043 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{0,021 \text{ с}} = 2,0 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

Длина тормозного  
пути

$$s_B = v \cdot 1000 \cdot \left( t_2 + \frac{1}{2} \cdot t_B \right) = 0,043 \frac{\text{мм}}{\text{с}} \cdot 1000 \cdot \left( 0,003 \text{ с} + \frac{1}{2} \cdot 0,021 \text{ с} \right) = 0,6 \text{ мм}$$

Точность остановки

$$X_B \approx \pm 0,12 \cdot s_B = \pm 0,12 \cdot 0,6 \text{ мм} = \pm 0,072 \text{ мм}$$

В этом значении учитывается время наложения тормоза, но не учитываются внешние причины возможной задержки (например, время на вычисления в контроллере (ПЛК)).



## 12.2 Расчет параметров редуктора

Передаточное  
число

$$i = \frac{n_M}{n_a \cdot i_V} = \frac{1380 \text{ об/мин}}{4,1 \text{ об/мин} \cdot 4,4} = 76,5$$

**Вращающий  
момент на  
выходном валу**

Эксплуатация в режиме 16 ч/сут и при  $Z = 120$  вкл/ч (при этом из-за запусков, переключений на низкую скорость и торможений происходит 360 изменений нагрузки в час).

Относительный  
момент инерции

$$\frac{J_X}{J_M} = \frac{0,00355 \text{ кгм}^2}{0,00048 \text{ кгм}^2} = 7,4$$

С учетом этого получаем характер нагрузки III и необходимый эксплуатационный коэффициент  $f_B = 1,6$ .

Вращающий  
момент на  
выходном валу

$$M_a = \frac{P_N \cdot 9550}{n_a} \cdot f_B = \frac{0,12 \text{ кВт} \cdot 9550}{4,1 \text{ об/мин} \cdot 4,4} \cdot 1,6 = 102 \text{ Нм}$$

**Выбранный  
привод**

R27DR63S4 /B03

$i = 74,11$

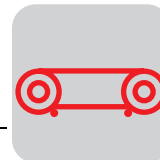
$f_B = 2,1$

$M_a = 62 \text{ Нм}$

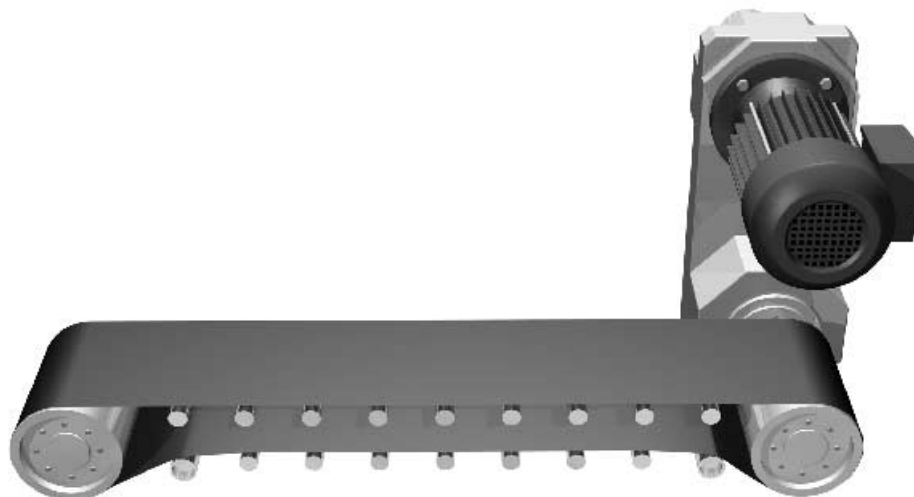
**Люфт редуктора**

Для этого редуктора угловой люфт выходного вала составляет  $0,21^\circ$ . В пересчете на длину окружности поворотного стола это соответствует расстоянию 0,85 мм.

Следовательно, наибольшая часть общего люфта установки в значительной мере создается люфтом в промежуточной передаче.



## 13 Пример расчета привода ленточного конвейера



05234AXX

Рис. 41. Ленточный конвейер

### Расчет по стандарту DIN 22101 "Роликовые ленточные конвейеры"

Силы  
сопротивления

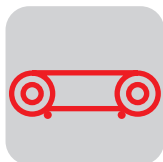
Чтобы определить величину сил сопротивления движению и соответствующую мощность привода, силы действующие на ленточный конвейер делятся на следующие группы:

- Основные силы сопротивления  $F_H$
- Вторичные силы сопротивления  $F_N$
- Силы сопротивления подъему  $F_{St}$
- Прочие силы сопротивления  $F_S$

Основная сила сопротивления  $F_H$  верхней и нижней ветви конвейера определяется сразу для обеих ветвей. Предположение: линейная зависимость между силой сопротивления и перемещаемой нагрузкой.

$$F_H = L \cdot f \cdot g \cdot \left( \frac{m_R}{L} + (2 \cdot m_G' + m_L') \cdot \cos \alpha \right)$$

- $L$  = длина ленточного конвейера [м]  
 $f$  = произвольный коэффициент трения (см. таблицу в Приложении); предположение:  $f = 0,02$   
 $g$  =  $9,81 \text{ м/с}^2$   
 $m_R$  = общая масса роликов [м]  
 $m_L'$  = максимальная нагрузка [кг/м]  
 $m_G'$  = масса ленты [кг/м]  
 $\alpha$  = средний угол подъема конвейера



### Вторичные силы сопротивления

- Сила инерции груза и сила трения между грузом и лентой в месте загрузки конвейера
- Сила трения между грузом и боковыми направляющими
- Сила трения между лентой и скребком
- Сила сопротивления изгибу ленты

Сумма вторичных сил сопротивления  $F_N$  учитывается коэффициентом  $C$ :

$$C = 1 + \frac{F_N}{F_H}$$

Если в общем сопротивлении движению составляющая вторичных сил мала, то коэффициент  $C$  можно взять из следующей таблицы:

Табл. 7. Коэффициенты  $C$  вторичных сил сопротивления в зависимости от длины конвейера  $L$

L [м]	< 20	20	40	60	80	100	150	200	300
C	3	2,5	2,28	2,1	1,92	1,78	1,58	1,45	1,31
L [м]	400	500	600	700	800	900	1000	2000	> 2000
C	1,25	1, 2	1,17	1,14	1,12	1,1	1,09	1,06	1,05

Сила сопротивления подъему перемещаемого груза рассчитывается по следующей формуле:

$$F_{St} = L \cdot g \cdot m_L' \cdot \sin \alpha$$

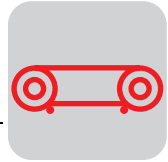
- $L$  = длина ленточного конвейера [м]  
 $g$  = 9,81 м/с<sup>2</sup>  
 $m_L'$  = максимальная нагрузка [кг/м]  
 $\alpha$  = средний угол подъема конвейера

### Прочие силы сопротивления

Прочими являются все не указанные выше вторичные силы сопротивления.

### Условия

Ленточный конвейер перемещает 650 т песка (сухого) в час. Максимальная скорость подачи составляет 0,6 м/с. Необходимо регулирование этой скорости в диапазоне 1:3 до минимального значения 0,2 м/с. Длина конвейера равна 30 м. Лента шириной в 500 мм имеет удельную массу 20 кг/м. Масса роликов составляет ок. 500 кг. Диаметр барабанов  $D = 315$  мм.



### 13.1 Расчет параметров двигателя

#### Основные силы сопротивления

Основная сила сопротивления  $F_H$  верхней и нижней ветви конвейера определяется сразу для обеих ветвей.

Предположение:

линейная зависимость между силой сопротивления и перемещаемой нагрузкой.

Основная сила сопротивления

$$F_H = L \cdot f \cdot g \cdot \left( \frac{m_R}{L} + (2 \cdot m_G + m_L) \cdot \cos \alpha \right)$$

$$F_H = 30 \text{ м} \cdot 0,02 \cdot 9,81 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot \left( \frac{500 \text{ кг}}{30 \text{ м}} + \left( 2 \cdot 20 \frac{\text{кг}}{\text{м}} + 300 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \right) \cdot \cos 0^\circ \right) = 2100 \text{ Н}$$

Вторичная сила сопротивления

$$C = 1 + \frac{F_N}{F_H}$$

$$F_N = (C - 1) \cdot F_H = (2,4 - 1) \cdot 2100 \text{ Н} = 2940 \text{ Н}$$

Силы сопротивления подъему и прочие

отсутствуют.

Статическая мощность

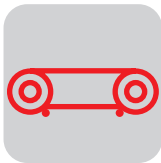
$$P_S = \frac{(F_H + F_N + F_{St} + F_S) \cdot v}{\eta}$$

Без учета КПД редуктора и вариатора получаем:

$$P_S = \frac{(2100 \text{ Н} + 2940 \text{ Н} + 0 + 0) \cdot 0,6 \frac{\text{М}}{\text{с}}}{0,9} = 3360 \text{ Вт}$$

Выбранный двигатель

DV 112M 4 BMG  
 $P_N = 4,0 \text{ кВт}$   
 $n_N = 1420 \text{ об/мин}$   
 $M_H/M_N = 2,1$   
 $J_M = 110,2 \cdot 10^{-4} \text{ кгм}^2$

**Внешний  
момент инерции**

Момент инерции прямолинейно движущихся компонентов (груз и лента)

Груз / лента

$$J_{X1} = 91,2 \cdot m \cdot \left( \frac{v}{n_M} \right)^2$$

$$J_{X1} = 91,2 \cdot 30 \text{ м} \cdot \left( 2 \cdot 20 \frac{\text{кг}}{\text{м}} + 300 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \right) \cdot \left( \frac{0,6 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{1400 \text{ об/мин}} \right)^2 = 0,171 \text{ кгм}^2$$

Ролики (полые цилиндры:  $m_R = 500 \text{ кг}$ ,  $r_A = 108 \text{ мм}$ ,  $r_l = 50 \text{ мм}$ )

Ролики

$$J_{X2} = \frac{1}{2} \cdot m_R \cdot (r_A^2 + r_l^2)$$

$$J_{X2} = \frac{1}{2} \cdot 500 \text{ кг} \cdot (0,108^2 + 0,050^2) \text{ м}^2 = 3,54 \text{ кгм}^2$$

Чтобы привести момент инерции ротора двигателя и внешний момент инерции к общей базе отсчета, последний необходимо пересчитать с учетом передаточного числа редуктора.

Приведенный  
момент инерции

$$J_{X2} = J_{X2} \cdot \left( \frac{n_R}{n_M} \right)^2$$

$$n_R = \frac{v \cdot 1000 \cdot 60}{\pi \cdot d_A} = \frac{0,6 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 1000 \cdot 60}{\pi \cdot 108 \text{ мм}} = 106 \text{ об/мин}$$

$$J_{X2} = 3,54 \text{ кгм}^2 \cdot \left( \frac{106 \text{ об/мин}}{1420 \text{ об/мин}} \right)^2 = 0,02 \text{ кгм}^2$$

Общий момент  
инерции

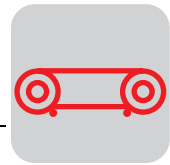
$$J_X = J_{X1} + J_{X2} = 0,171 \text{ кгм}^2 + 0,02 \text{ кгм}^2 = 0,191 \text{ кгм}^2$$

Номинальный  
вращающий  
момент /  
динамический  
момент

$$M_N = \frac{P_N \cdot 9550}{n_N} = \frac{4,0 \text{ кВт} \cdot 9550}{1420 \text{ об/мин}} = 26,9 \text{ Нм}$$

$$M_H = 2,1 \cdot M_N = 2,1 \cdot 26,9 \text{ Нм} = 56,5 \text{ Нм}$$





Время разгона	$t_A = \frac{\left( J_M + J_Z + \frac{J_X}{\eta} \right) \cdot n_M}{9,55 \cdot \left( M_H - \frac{M_S}{\eta} \right)}$ $t_A = \frac{\left( 0,01102 + \frac{0,191}{0,76} \right) \text{ кгм}^2 \cdot 1420 \text{ об/мин}}{9,55 \cdot \left( 56,5 \text{ Нм} - \frac{22,6 \text{ Нм}}{0,9} \right)} = 1,25 \text{ с}$
Ускорение при разгоне	$a_A = \frac{v}{t_A} = \frac{0,6 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{1,25 \text{ с}} = 0,48 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$

### 13.2 Расчет параметров редуктора и вариатора

Частота вращения выходного вала	$n_a = \frac{v \cdot 60000}{\pi \cdot D} \cdot i_V = \frac{0,6 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 60000}{\pi \cdot 315 \text{ мм}} = 36,4 \text{ об/мин}$
---------------------------------	--

#### Выбор редуктора

Выдержка из каталога "Variable Speed Geared Motors" ("Мотор-редукторы с вариатором"), VARIBLOC® с цилиндрическим редуктором:

$P_n/P_{a2}$ [кВт]	$n_{a1} - n_{a2}$ [об/мин]	$i$	$M_{a1}$ [Нм]	$M_{a2}$ [Нм]	Тип	$m$ [кг]
4,0/3,3	6,2 - 37	81,92	1450	870	R 87/VU/VZ31 DV 112M4	155

Исходя из максимальной частоты вращения  $n_{a2}$ , выбираем:

**R87 VU31 DV112M4 с передаточным числом  $i = 81,92$ .**

#### Номинальная мощность

$P_{a2}$  – это номинальная мощность на выходном валу. Она должна быть больше вычисленной мощности нагрузки.

#### Вращающий момент / частота вращения

Вращающий момент не должен превышать максимально допустимой величины на всем диапазоне частоты вращения.

Если эти условия выполняются, то привод выбран.



## 14 Пример расчета привода кривошипно-шатунного механизма

С помощью кривошипно-шатунных механизмов можно механическим способом реализовать сложнейшие процессы движения, обеспечивающие максимальную динамику и стабильную повторяемость.

### Шарнирные механизмы

Такие "шарнирные механизмы" требуют очень трудоемкого расчета, для выполнения которого почти всегда используются специальные компьютерные программы. Поэтому в данной главе мы специально рассмотрим расчет кривошипно-шатунного механизма.

### Вращательное движение / поступательное движение

Кривошипно-шатунный механизм используется для преобразования вращательного движения в поступательное. Главное отличие привода такого механизма от приводов, рассмотренных выше, состоит в том, что динамические параметры кривошипно-шатунного механизма постоянно изменяются. Теоретически это можно сравнить с промежуточной передачей, которая постоянно изменяет свое передаточное число.

### Приближенные формулы

Приближенные формулы, используемые для наших расчетов, действительны при условии постоянной угловой скорости:

$$s = r \cdot (1 - \cos \varphi) + \frac{\lambda}{2} \cdot r \cdot \sin^2 \varphi$$

$$v = \omega \cdot r \cdot \sin \varphi \cdot (1 + \lambda \cdot \cos \varphi)$$

$$a = \omega^2 \cdot r \cdot (\cos \varphi + \lambda \cdot \cos 2\varphi)$$

$\omega$  = угловая скорость =  $\pi \cdot n_a / 30$  [об/мин]

$n_a$  = частота вращения выходного вала [об/мин]

$\lambda$  = отношение радиуса кривошипа к длине шатуна

$\varphi$  = угол поворота кривошипа [градус]

$r$  = радиус кривошипа [м]

$s$  = текущий ход подачи груза [м]

$v$  = текущая скорость подачи груза [м/с]

$a$  = текущее ускорение подачи груза [м/с<sup>2</sup>]

### Статическая / динамическая мощность

$$P_S = \frac{F_F \cdot v}{1000 \cdot \eta_L \cdot \eta_G}$$

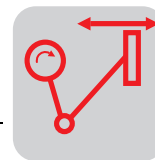
$$P_D = \frac{m \cdot a \cdot v}{1000 \cdot \eta_L \cdot \eta_G}$$

$P_S$  = текущая статическая мощность [кВт]

$P_D$  = текущая динамическая мощность [кВт]

### Расчет рабочего цикла

Для точного вычисления параметров нагрузки необходим последовательный и многократный – градус за градусом – расчет рабочего цикла. Эта задача, разумеется, решается компьютерной программой. Таким же образом работает и программа проектирования SEW.



Частота  
вращения  $\neq$   
Const.

Расчет еще более усложняется, если учитывать, что частота вращения изменяется. Это происходит, например, при запуске привода. Если при запуске кривошип находится в одной из мертвых точек, то при расчете мощности его положением, как правило, можно пренебречь. Но если при запуске кривошип находится в каком-либо ином положении, то процесс запуска следует рассматривать отдельно из-за наложения динамики кривошипно-шатунного механизма на динамику двигателя.

В нашем примере будет показан лишь упрощенный расчет параметров мощности. Для решения более сложных задач рекомендуется использовать специальные компьютерные программы.

#### Условия

Передающее устройство сталкивает палеты массой в 500 кг с одного роликового конвейера на другой. Заданная скорость работы: 30 палет в минуту.

С учетом паузы, запуска и остановки привода получаем частоту вращения его выходного вала 42 об/мин.

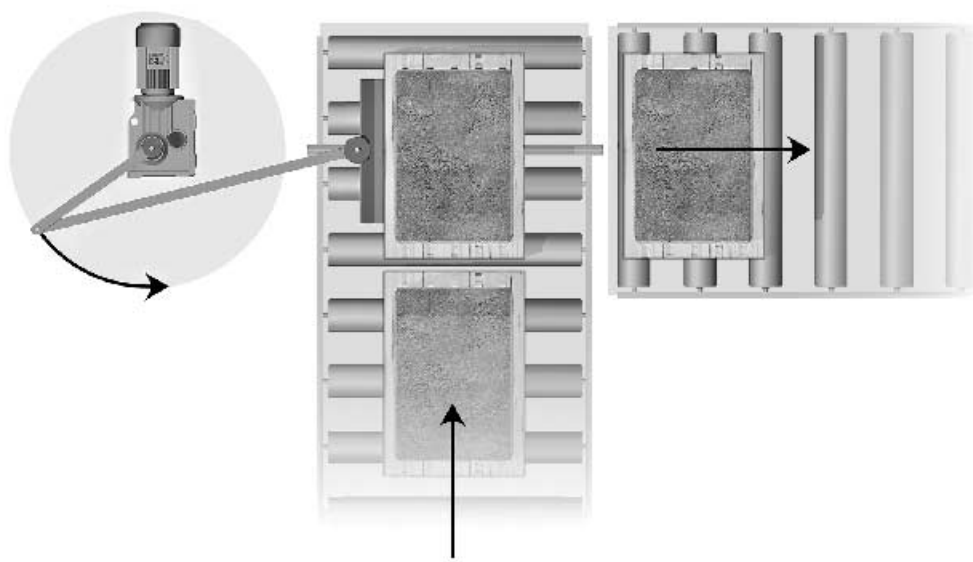


Рис. 42. Привод кривошипно-шатунного механизма

00810AXX

Плечо силы трения качения (дерево/сталь):  $f = 1,2$

Радиус кривошипа:  $r = 0,5 \text{ м}$

Длина шатуна:  $l = 2 \text{ м}$



### 14.1 Расчет параметров двигателя

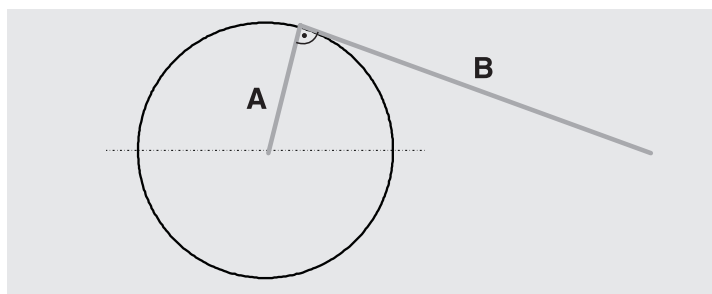
Чтобы не проводить вычисления во множестве отдельных точек цикла, определяют два граничных значения.

- Угловое положение для **максимальной статической мощности**  
(макс. скорость, поскольку  $P \approx m \cdot g \cdot \mu \cdot v$ )
- Угловое положение для **максимальной динамической мощности**  
( $P \approx m \cdot a \cdot v$ )

По соответствующей составляющей мощности выбирается необходимый привод. Как правило, для приводов подъемных устройств – это статическая составляющая, а для приводов горизонтального перемещения – динамическая.

#### Максимальная статическая мощность

В обычных условиях максимальная статическая мощность достигается при максимальной скорости. Это имеет место в тот момент, когда кривошип и шатун образуют прямой угол.



00811BXX

Рис. 43. Точка максимальной скорости

Определим величину скорости в этой точке.

По приближенному расчету она составляет:

Скорость

$$v = \omega \cdot r \cdot \sin \varphi \cdot (1 + \lambda \cdot \cos \varphi)$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n = 2 \cdot \pi \cdot 0,7 \text{ c}^{-1} = 4,4 \text{ c}^{-1}$$

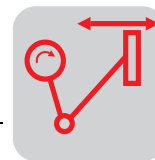
$$\varphi = \arctan\left(\frac{l}{r}\right) = 76^\circ$$

$$v = 2,26 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Сила  
сопротивления  
качению

$$F_F = m \cdot g \cdot \left( \frac{2}{D} \cdot \left( \mu_L \cdot \frac{1}{2} \cdot d + f \right) + c \right)$$

$$F_F = 500 \text{ кг} \cdot 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot \left( \frac{2}{250 \text{ мм}} \cdot \left( 0,005 \cdot \frac{1}{2} \cdot 60 \text{ мм} + 1,2 \text{ мм} \right) + 0,003 \right) = 70 \text{ Н}$$

Статическая  
мощность

$$P = \frac{F \cdot v}{\eta}$$

$$P_S = \frac{70 \text{ Н} \cdot 2,26 \frac{\text{М}}{\text{с}}}{0,85 \cdot 1000} = 0,19 \text{ кВт}$$

**Максимальная  
динамическая  
мощность**

Максимальная динамическая мощность достигается в тот момент, когда произведение ускорения и скорости составляет максимальную величину. Продифференцировав по углу и приравняв функцию к нулю, получаем эту величину при:

Угол

$$4 \cdot \lambda^2 \cdot \cos(4\varphi) + 9 \cdot \lambda \cdot \cos(3\varphi) + 4 \cdot \cos(2\varphi) - \lambda \cdot \cos \varphi = 0$$

$$\lambda = \frac{r}{l} = \frac{0,5 \text{ м}}{2 \text{ м}} = 0,25 \quad \Rightarrow \quad \varphi = 37^\circ$$

В этом случае  $P_{\text{макс}}$  (для упрощения – без учета момента инерции роликов) достигается при  $\varphi = 37^\circ$ :

Динамическая  
мощность

$$P_D = \frac{m \cdot a \cdot v}{1000 \cdot \eta_L \cdot \eta_G}$$

$$v = \omega \cdot r \cdot \sin \varphi \cdot (1 + \lambda \cdot \cos \varphi) = 1,6 \frac{\text{М}}{\text{с}}$$

$$a = \omega^2 \cdot r \cdot (\cos \varphi + \lambda \cdot \cos(2\varphi)) = 8,44 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$$

$$P_D = \frac{500 \text{ кг} \cdot 8,44 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot 1,6 \frac{\text{М}}{\text{с}}}{1000 \cdot 0,9 \cdot 0,95} = 7,9 \text{ кВт}$$

Очевидно, что в данном примере статическая составляющая мощности существенного значения не имеет.

**Выбор  
двигателя**

Выбираем двигатель DV132M4BM мощностью 7,5 кВт, поскольку, как уже говорилось, данный метод расчета годится только для приближенной оценки. Для получения точных результатов рекомендуется использовать программу проектирования ProDrive.

**Расчет  
параметров  
редуктора**

Расчет параметров редуктора см. предыдущие примеры.

При этом действительно:

- необходимое передаточное число – ок. 33;
- необходимая частота вращения выходного вала – ок. 43 об/мин.



## 15 Пример расчета привода ходового винта

КПД ходового винта: см. таблицу в Приложении.

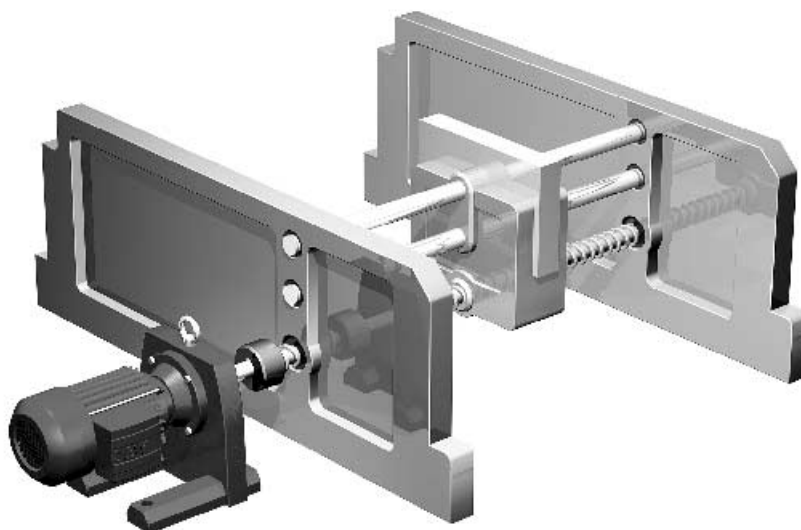


Рис. 44. Привод ходового винта

05276AXX

### Условия

Для разрезания пластмассовые заготовки подаются на пилу приводом ходового винта. Скорость подачи и шаг ходового винта выбраны такими, что можно использовать двигатель с переключением числа полюсов (8/2-полюсный) без редуктора.

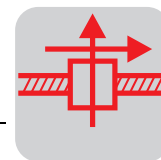
При этом процесс резки выполняется при низкой частоте вращения, а обратный ход – при высокой. Кроме того, двигатель должен быть оснащен тормозом.

Масса заготовки:	$m_1 = 40 \text{ кг}$
Масса подводящего механизма:	$m_2 = 150 \text{ кг}$
Сила сопротивления резанию:	$F_1 = 450 \text{ Н}$
Сила трения в направляющих:	$F_2 = 70 \text{ Н}$
Скорость подачи:	$v_1 = 10 \text{ м/мин}$
Скорость обратного хода:	$v_2 = 40 \text{ м/мин}$
Расстояние:	$s = 500 \text{ мм}$

### Данные ходового винта

Необходимая производительность пилы – 420 заготовок в час.

Шаг ходового винта:	$P = 15 \text{ мм}$
Длина ходового винта:	$l = 1000 \text{ мм}$
Диаметр ходового винта:	$d = 40 \text{ мм}$
Плотность стали:	$\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$
КПД:	$\eta = 35 \%$



## 15.1 Расчет

Частота вращения  
ходового винта

$$n_1 = \frac{v_1}{P} = \frac{10 \frac{\text{М}}{\text{МИН}}}{15 \text{ ММ}} = \frac{0,167 \frac{\text{М}}{\text{С}} \cdot 60 \cdot 10^3}{15 \text{ ММ}} = 668 \text{ об/мин}$$

$$n_2 = \frac{v_2}{P} = \frac{40 \frac{\text{М}}{\text{МИН}}}{15 \text{ ММ}} = \frac{0,67 \frac{\text{М}}{\text{С}} \cdot 60 \cdot 10^3}{15 \text{ ММ}} = 2680 \text{ об/мин}$$

Можно использовать 8/2-полюсный двигатель без редуктора.

### Статическая мощность

Статическая мощность при резке на низкой частоте вращения (с учетом только силы сопротивления резанию):

Процесс резки

$$P_{S1A} = \frac{F_1 \cdot v_1}{\eta} = \frac{450 \text{ Н} \cdot 0,167 \frac{\text{М}}{\text{С}}}{0,35} = 214 \text{ Вт}$$

Статическая мощность при резке на низкой частоте вращения (с учетом только силы трения):

Сила трения в  
8-полюсном режиме

$$P_{S1B} = \frac{F_2 \cdot v_1}{\eta} = \frac{70 \text{ Н} \cdot 0,167 \frac{\text{М}}{\text{С}}}{0,35} = 33 \text{ Вт}$$

Статическая мощность при обратном ходе на высокой частоте вращения (с учетом только силы трения):

Сила трения в  
2-полюсном режиме

$$P_{S2} = \frac{F_2 \cdot v_2}{\eta} = \frac{70 \text{ Н} \cdot 0,67 \frac{\text{М}}{\text{С}}}{0,35} = 134 \text{ Вт}$$

Динамическая мощность двигателя зависит от его типоразмера, поэтому на данном этапе расчета выбирается двигатель, номинальная мощность которого выше статической. Для проверки динамической мощности понадобится дополнительный расчет допустимого количества включений в час.

### Выбранный двигатель

SDT90L 8/2 BMG  
 $P_N = 0,3 / 1,3 \text{ кВт}$   
 $n_N = 630 / 2680 \text{ об/мин}$   
 $M_H/M_N = 1,6 / 2,4$   
 $J_M = 39,4 \cdot 10^{-4} \text{ кгм}^2$   
 $Z_0 = 20000/3300 \text{ с}$  использованием BGE  
 ПВ = S3 40/60 %



## 15.2 Проверочный расчет

### Продолжительность включения

Двигатель в стандартном исполнении рассчитан на эксплуатацию в режиме S3.

Время прямого хода

$$t_1 = \frac{s}{v_1} = \frac{0,5 \text{ м}}{0,167 \frac{\text{м}}{\text{с}}} = 3 \text{ с}$$

Время обратного хода

$$t_2 = \frac{s}{v_2} = \frac{0,5 \text{ м}}{0,67 \frac{\text{м}}{\text{с}}} = 0,74 \text{ с}$$

### Продолжительность цикла

При производительности 420 заготовок в час получаем общую продолжительность цикла  $t_T = 8,5 \text{ с}$ .

Общая продолжительность включения

$$ПВ = \frac{t_1 + t_2}{t_T} = 44 \% \Rightarrow \text{ОК}$$

### Допустимое количество включений $Z_P$

Для определения количества включений необходимо дополнительно рассчитать:

- момент нагрузки  $M_L$ ;
- динамический момент  $M_H$ ;
- расчетный коэффициент  $k_P$ ;
- внешний момент инерции  $J_X$ .

$$Z_P = Z_0 \cdot \frac{1 - \frac{M_L}{M_H \cdot \eta}}{\frac{J_M + \frac{J_X}{\eta}}{J_M}} \cdot k_P$$

### Момент нагрузки $M_L$

Расчет момента нагрузки без учета КПД:

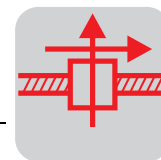
- в результате действия силы сопротивления резанию  $F_1$

Момент нагрузки в результате сопротивления резанию создается уже после запуска, поэтому при расчете количества включений он не учитывается.

- в результате действия силы трения  $F_2$

$$M_{L2} = \frac{F_2 \cdot P}{2\pi \cdot 1000} = \frac{70 \text{ Н} \cdot 15 \text{ мм}}{2\pi \cdot 1000} = 0,2 \text{ Нм}$$





**Динамический момент  $M_H$**

Низкая частота вращения

$$M_{H1} = \frac{0,3 \text{ кВт} \cdot 9550}{630 \text{ об/мин}} \cdot 1,6 = 7,2 \text{ Нм}$$

Высокая частота вращения

$$M_{H2} = \frac{1,3 \text{ кВт} \cdot 9550}{2680 \text{ об/мин}} \cdot 2,4 = 11,1 \text{ Нм}$$

**Расчетный коэффициент  $k_P$**

Низкая частота вращения

$$\frac{P_{S1B}}{P_N} = \frac{0,033 \text{ кВт}}{0,3 \text{ кВт}} = 0,11 \quad ПВ = 44 \% \quad \Rightarrow \quad k_{P1} = 0,9$$

Высокая частота вращения

$$\frac{P_{S2}}{P_N} = \frac{0,134 \text{ кВт}}{1,3 \text{ кВт}} = 0,1 \quad ПВ = 44 \% \quad \Rightarrow \quad k_{P2} = 0,9$$

**Внешний момент инерции**

Для подводящего механизма / заготовки

$$J_{X1} = 91,2 \cdot m \cdot \left(\frac{v}{n}\right)^2 = 91,2 \cdot (m_1 + m_2) \cdot \left(\frac{v_1}{n_1}\right)^2 = 12,1 \cdot 10^{-4} \text{ кгм}^2$$

Внешний момент инерции  $J_{X2}$  ходового винта. Для упрощения расчета ходовой винт рассматривается как сплошной цилиндр, вращающийся вокруг своей продольной оси.

Для ходового винта

$$J_{X2} = \frac{1}{2} m_S \cdot r^2$$

Радиус ходового винта

$$r = \frac{d}{2} = 20 \text{ мм} = 0,02 \text{ м}$$

Масса ходового винта

$$m_S = \pi \cdot r^2 \cdot l \cdot \rho = \pi \cdot 0,02^2 \text{ м}^2 \cdot 1 \text{ м} \cdot 7850 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = 9,86 \text{ кг}$$

Момент инерции ходового винта

$$J_{X2} = \frac{1}{2} \cdot 9,86 \text{ кг} \cdot 0,02^2 \text{ м}^2 = 20 \cdot 10^{-4} \text{ кгм}^2$$



Допустимое  
количество  
включений в час

Допустимое количество включений при низкой частоте вращения.

Низкая частота  
вращения

$$Z_{P1} = Z_{01} \cdot \frac{1 - \frac{M_{L2}}{M_{H1} \cdot \eta}}{\frac{J_M + \frac{J_{X1} + J_{X2}}{\eta}}{J_M}} \cdot k_{P1} = 20000 \frac{\text{Вкл}}{\text{ч}} \cdot \frac{1 - \frac{0,2 \text{ Нм}}{7,2 \text{ Нм} \cdot 0,35}}{\frac{\left(39,4 + \frac{12,1 + 20}{0,35}\right) \cdot 10^{-4}}{39,4 \cdot 10^{-4}}} \cdot 0,9 = 4979 \frac{\text{Вкл}}{\text{ч}}$$

Допустимое количество включений при высокой частоте вращения.

Высокая частота  
вращения

$$Z_{P2} = Z_{02} \cdot \frac{1 - \frac{M_{L2}}{M_{H2} \cdot \eta}}{\frac{J_M + \frac{J_{X1} + J_{X2}}{\eta}}{J_M}} \cdot k_{P2} = 3300 \frac{\text{Вкл}}{\text{ч}} \cdot \frac{1 - \frac{0,2 \text{ Нм}}{11,1 \text{ Нм} \cdot 0,35}}{\frac{\left(39,4 + \frac{12,1 + 20}{0,35}\right) \cdot 10^{-4}}{39,4 \cdot 10^{-4}}} \cdot 0,9 = 846 \frac{\text{Вкл}}{\text{ч}}$$

Допустимое количество включений в полном цикле работы.

Полный цикл

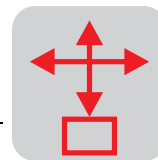
$$Z_P = \frac{Z_{P1} \cdot Z_{P2}}{Z_{P1} + Z_{P2}} = \frac{4979 \cdot 846}{4979 + 846} = 723 \frac{\text{Вкл}}{\text{ч}} \Rightarrow \text{OK}$$

**Выбор привода**

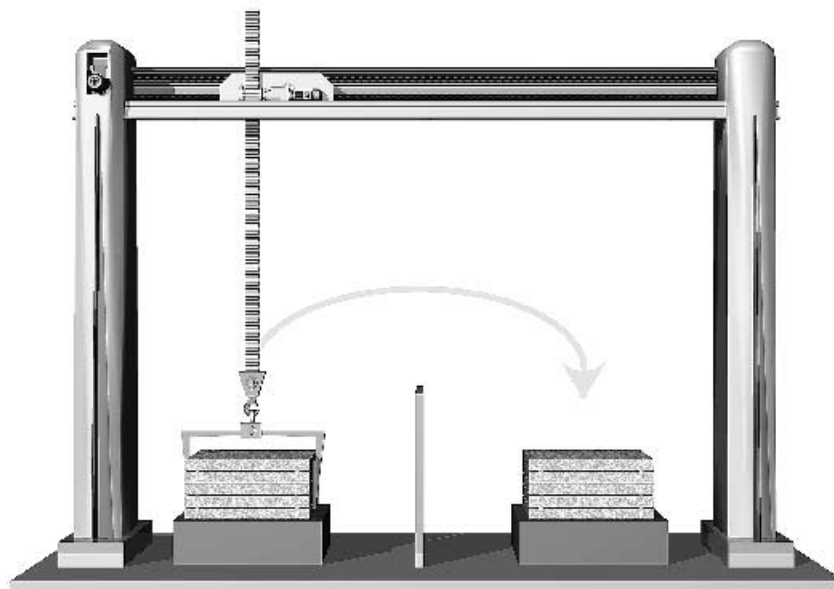
Таким образом, привод выбран:

**SDT90L8/2 /BMG**

Расчет режимов разгона, переключения полюсов и торможения см. в главе "Пример расчета привода транспортного устройства".



## 16 Пример расчета сервоприводов портального подъемника



00818AXX

Рис. 45. Портальный подъемник с сервоприводами

### Условия

Двухкоординатный портальный подъемник оснащен сервоприводами.

### Ось X

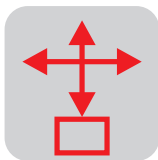
#### Привод перемещения, передача усилия через зубчатый ремень

$m_L = 100$  кг (суммарная перемещаемая масса)  
 $D = 175$  мм (диаметр шкива)  
 $\mu = 0,1$  (коэффициент трения в направляющих по данным изготовителя)  
 $s = 3$  м (расстояние перемещения)  
 $a_{\text{макс}} = 10 \text{ м/с}^2$  (максимальное ускорение)  
 $t_z = 4$  с (длительность цикла)  
 $t = 2$  с (время перемещения)  
 $\eta_L = 0,9$  (КПД нагрузки)

### Ось Y

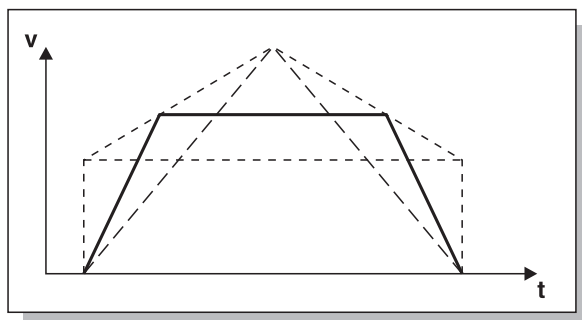
#### Привод подъема, передача усилия через зубчатую рейку

$m_L = 40$  кг (масса груза)  
 $D = 50$  мм (диаметр шестерни)  
 $s = 1$  м (расстояние перемещения)  
 $a_{\text{макс}} = 10 \text{ м/с}^2$  (максимальное ускорение)  
 $t_z = 2$  с (длительность цикла)  
 $t = 0,75$  с (время подъема)  
 $\eta_L = 0,9$  (КПД нагрузки)



### 16.1 Оптимизация диаграмм рабочего цикла

Диаграмма  
рабочего цикла  
привода  
перемещения



Скорость

$$v = \frac{a_{\text{макс}} \cdot t - \sqrt{(a_{\text{макс}} \cdot t)^2 - 4 \cdot a_{\text{макс}} \cdot s}}{2}$$

$$v = \frac{10 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot 2 \text{ с} - \sqrt{\left(10 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot 2 \text{ с}\right)^2 - 4 \cdot 10 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot 3 \text{ м}}}{2} = 1,64 \frac{\text{М}}{\text{с}}$$

Время разгона

$$t_A = \frac{v}{a_{\text{макс}}} = \frac{1,64 \frac{\text{М}}{\text{с}}}{10 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}} = 0,16 \text{ с}$$

Длина пути разгона

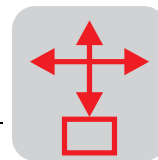
$$s_A = \frac{1}{2} \cdot a_{\text{макс}} \cdot t_A^2 = \frac{1}{2} \cdot 10 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot 0,16^2 \text{ с}^2 = 0,128 \text{ м}$$

Длина пути  
с постоянной  
скоростью

$$s_F = s - 2 \cdot s_A = 2,744 \text{ м}$$

Время движения  
с постоянной  
скоростью

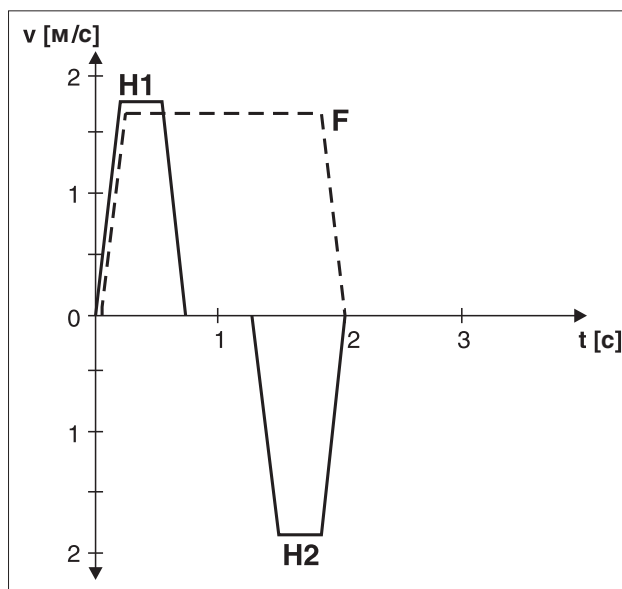
$$t_F = \frac{s_F}{v} = \frac{2,744 \text{ м}}{1,64 \frac{\text{М}}{\text{с}}} = 1,67 \text{ с}$$



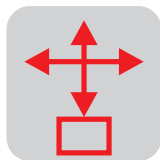
**Диаграмма  
рабочего цикла  
привода  
подъема**

Скорость	$v = \frac{a_{\text{макс}} \cdot t - \sqrt{(a_{\text{макс}} \cdot t)^2 - 4 \cdot a_{\text{макс}} \cdot s}}{2}$ $v = \frac{10 \frac{M}{c^2} \cdot 0,75 c - \sqrt{\left(10 \frac{M}{c^2} \cdot 0,75 c\right)^2 - 4 \cdot 10 \frac{M}{c^2} \cdot 1 M}}{2} = 1,73 \frac{M}{c}$
Время разгона	$t_A = \frac{v}{a_{\text{макс}}} = \frac{1,73 \frac{M}{c}}{10 \frac{M}{c^2}} = 0,17 c$
Длина пути разгона	$s_A = \frac{1}{2} \cdot a_{\text{макс}} \cdot t_A^2 = \frac{1}{2} \cdot 10 \frac{M}{c^2} \cdot 0,17^2 c^2 = 0,145 M$
Время движения с постоянной скоростью	$s_F = s - 2 \cdot s_A = 0,71 M$
Длина пути с постоянной скоростью	$t_F = \frac{s_F}{v} = \frac{0,71 M}{1,73 \frac{M}{c}} = 0,41 c$

**Диаграммы  
рабочего цикла  
приводов  
перемещения  
и подъема**



H1 = привод подъема вверх  
H2 = привод подъема вниз  
F = привод перемещения



## 16.2 Расчет мощности

### Привод перемещения

Сила  
сопротивления  
качению

$$F_{F1} = m_L \cdot g \cdot \mu_L = 100 \text{ кг} \cdot 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 0,1 = 98,1 \text{ Н}$$

Статический  
вращающий  
момент

$$M_{S1} = F_{F1} \cdot \frac{D}{2} \cdot \frac{1}{\eta_L} = 98,1 \text{ Н} \cdot \frac{0,175 \text{ м}}{2} \cdot \frac{1}{0,9} = 9,5 \text{ Нм}$$

### Ускорение

Ускоряющая сила

$$F_{A1} = m_L \cdot a_{\text{макс}} = 100 \text{ кг} \cdot 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = 1000 \text{ Н}$$

Динамический  
момент

$$M_{A1} = F_{A1} \cdot \frac{D}{2} \cdot \frac{1}{\eta_L} = 1000 \text{ Н} \cdot \frac{0,175 \text{ м}}{2} \cdot \frac{1}{0,9} = 97,2 \text{ Нм}$$

Суммарный момент

$$M_{AT} = M_{A1} + M_{S1} = 97,2 \text{ Нм} + 9,5 \text{ Нм} = 106,7 \text{ Нм}$$

### Замедление

Динамический  
момент при  
торможении

$$M_{BT} = M_{B1} + M_{S1} = -78,8 \text{ Нм} + 9,5 \text{ Нм} = -69,3 \text{ Нм}$$

Суммарный момент

$$M_{BT} = M_{B1} + M_{S1} = -78,8 \text{ Нм} + 9,5 \text{ Нм} = -69,3 \text{ Нм}$$

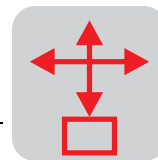
### Привод подъема, движение вверх

Статическая сила  
тяжести при  
подъеме

$$F_{H2} = m_L \cdot g = 40 \text{ кг} \cdot 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = 392 \text{ Н}$$

Статический  
момент при  
подъеме

$$M_{S2} = F_{H2} \cdot \frac{D}{2} \cdot \frac{1}{\eta_L} = 392 \text{ Н} \cdot \frac{0,05 \text{ м}}{2} \cdot \frac{1}{0,9} = 10,9 \text{ Нм}$$



### Ускорение

Ускоряющая сила	$F_{A2} = m_L \cdot a_{\text{макс}} = 40 \text{ кг} \cdot 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = 400 \text{ Н}$
Динамический момент	$M_{A2} = F_{A2} \cdot \frac{D}{2} \cdot \frac{1}{\eta_L} = 400 \text{ Н} \cdot \frac{0,05 \text{ м}}{2} \cdot \frac{1}{0,9} = 11,1 \text{ Нм}$
Суммарный момент	$M_{AT2} = M_{A2} + M_{S2} = 11,1 \text{ Нм} + 10,9 \text{ Нм} = 22 \text{ Нм}$

### Замедление

Динамический момент при торможении	$M_{B2} = -F_{A2} \cdot \frac{D}{2} \cdot \eta_L = -400 \text{ Н} \cdot \frac{0,05 \text{ м}}{2} \cdot 0,9 = -9 \text{ Нм}$
Суммарный момент	$M_{BT2} = M_{B2} + M_{S2} = -9 \text{ Нм} + 10,9 \text{ Нм} = 1,9 \text{ Нм}$

### Привод подъема, движение вниз

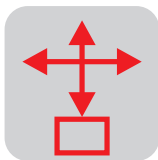
Статическая сила тяжести при опускании	$F_{H3} = m_L \cdot a_{\text{макс}} = 40 \text{ кг} \cdot 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = 392 \text{ Н}$
Статический момент при опускании	$M_{S3} = F_{H3} \cdot \frac{D}{2} \cdot \eta_L = -392 \text{ Н} \cdot \frac{0,05 \text{ м}}{2} \cdot 0,9 = -8,8 \text{ Нм}$

### Ускорение

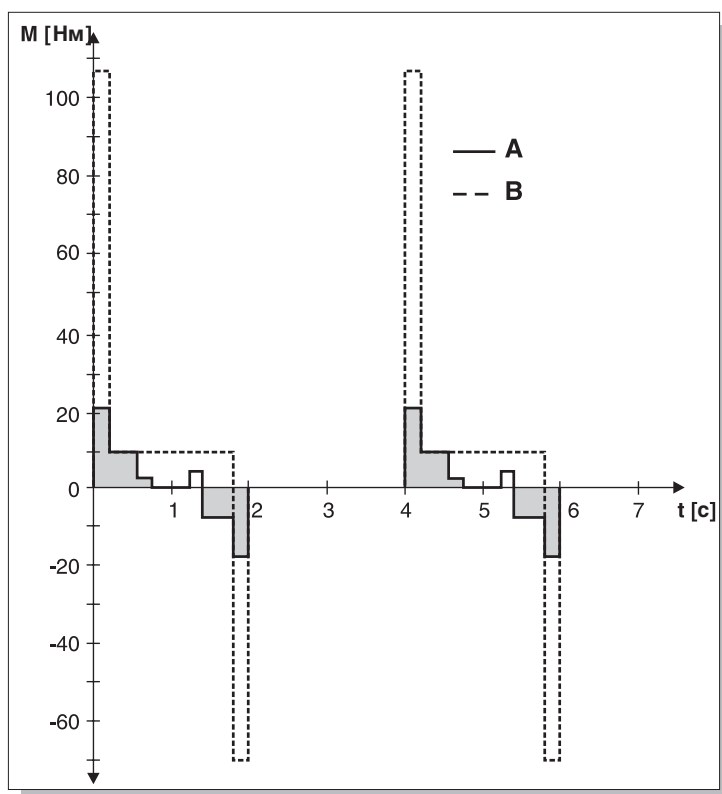
Ускоряющая сила	$F_{A3} = m_L \cdot a = 40 \text{ кг} \cdot 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = 400 \text{ Н}$
Динамический момент	$M_{A3} = F_{A3} \cdot \frac{D}{2} \cdot \frac{1}{\eta_L} = 400 \text{ Н} \cdot \frac{0,05 \text{ м}}{2} \cdot \frac{1}{0,9} = 11,1 \text{ Нм}$
Суммарный момент	$M_{AT3} = M_{A3} + M_{S3} = 11,1 \text{ Нм} - 8,8 \text{ Нм} = 2,3 \text{ Нм}$

### Замедление

Динамический момент при торможении	$M_{B3} = -F_{A3} \cdot \frac{D}{2} \cdot \eta_L = -400 \text{ Н} \cdot \frac{0,05 \text{ м}}{2} \cdot 0,9 = -9 \text{ Нм}$
Суммарный момент	$M_{BT3} = M_{B3} + M_{S3} = -9 \text{ Нм} - 8,8 \text{ Нм} = -17,8 \text{ Нм}$



В результате получается следующая кривая изменения вращающего момента на выходе обоих приводов:



00820BRU

Рис. 46. Кривая изменения вращающего момента: A = привод подъема  
и B = привод перемещения

### 16.3 Расчет параметров редукторов

Типоразмер низколюфтовых планетарных редукторов зависит от максимального вращающего момента на выходном валу (в отличие от стандартных редукторов SEW, типоразмер которых определяется коэффициентами  $f_B$ ).

Следовательно, на данном этапе расчета типоразмеры планетарных редукторов уже определены:

Привод перемещения:  $M_{\text{макс}} = 106,7 \text{ Нм} \rightarrow \text{PSF 41x}$  с допустимым вращающим моментом  $M_P = 150 \text{ Нм}$ .

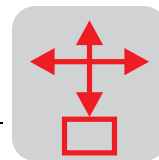
Привод подъема:  $M_{\text{макс}} = 22 \text{ Нм} \rightarrow \text{PSF21x}$  с допустимым вращающим моментом  $M_P = 40 \text{ Нм}$ .



Указанные в каталоге значения максимального вращающего момента для низколюфтовых планетарных редукторов являются **допустимыми пиковыми значениями**, тогда как для стандартных редукторов SEW приводятся значения допустимого длительного момента. Поэтому редукторы этих типов **нельзя сравнивать** по результатам данных расчетов.

Если необходимо использовать стандартный редуктор SEW, то расчет его параметров выполняется так же, как и для приводов, регулируемых по частоте (коэффициенты  $f_B$ ).





**Частота вращения двигателя**

Чтобы определить передаточное число редуктора, сначала необходимо выбрать частоту вращения двигателя.

Если привод должен быть минимального типоразмера и обеспечивать очень высокую точность регулирования и позиционирования, то частота вращения двигателя должна быть высокой. Преимущество такого решения – в передаточном числе редуктора. Чем выше частота вращения двигателя, тем больше передаточное число редуктора, а значит и вращающий момент на выходном валу. Кроме того, при более высоком передаточном числе повышается и разрешение позиционирования.

Недостатком повышения частоты вращения двигателя является сокращение срока службы его подшипников и иногда увеличение необходимого пускового момента, поскольку такому двигателю приходится за то же самое время разгонять свой вал до более высокой скорости.

**Выбор частоты вращения**

SEW выпускает серводвигатели в следующих вариантах исполнения: 2000, 3000 и 4500 об/мин.

С учетом вышеназванных преимуществ и недостатков выбираем двигатели с частотой вращения 3000 об/мин.

**Резерв на регулирование**

Чтобы иметь резерв на регулирование, передаточное число выбирается таким образом, чтобы максимальная частота вращения на выходе редуктора достигалась по возможности при 90 % номинальной частоты вращения двигателя (в данном случае 2700 об/мин).

**Привод перемещения**

Частота вращения

$$n_a = \frac{v \cdot 60}{D \cdot \pi} = \frac{1,64 \frac{м}{с} \cdot 60}{0,175 м \cdot \pi} = 179 \text{ об/мин}$$

Передаточное число

$$i = \frac{n_M}{n_a} = \frac{2700 \text{ об/мин}}{170 \text{ об/мин}} = 15,1$$

Выбранный редуктор

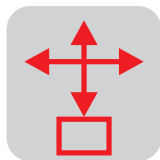
PSF 412

$i = 16$

$M_{\text{амакс}} = 160 \text{ Нм}$

$\alpha < 10$  угловых минут (в стандартном исполнении)

$\eta = 0,94$



## Привод подъема

Частота вращения

$$n_a = \frac{v \cdot 60}{D \cdot \pi} = \frac{1,73 \frac{м}{с} \cdot 60}{0,05 м \cdot \pi} = 660,8 \text{ об/мин}$$

Передаточное  
число

$$i = \frac{n_M}{n_a} = \frac{2700 \text{ об/мин}}{660,8 \text{ об/мин}} = 4,1$$

Выбранный  
редуктор

PSF 311

 $i = 4$  $M_{\text{амакс}} = 110 \text{ Нм}$  $\alpha < 6$  угловых минут (в стандартном исполнении) $\eta = 0,97$ **Точность  
позициониро-  
вания**

Имея эти значения, на данном этапе расчета уже можно вычислить статическую точность позиционирования. Стандартная дискретность датчика: 1024x4.

Привод  
перемещения

$$\Delta s = \pm \frac{D \cdot \pi \cdot \frac{\alpha}{2}}{360^\circ} \pm \frac{D \cdot \pi}{4096 \cdot i}$$

$$\Delta s = \pm \frac{175 \text{ мм} \cdot \pi \cdot \frac{10' \cdot 1^\circ}{2 \cdot 60'}}{360^\circ} \pm \frac{175 \text{ мм} \cdot \pi}{4096 \cdot 16} = \pm 0,14 \text{ мм}$$

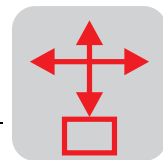
Кроме того, необходимо учитывать люфт в других узлах установки.

В случае привода подъема можно исходить из того, что зубья шестерни и рейки прилегают друг к другу всегда одной и той же стороной. Поэтому редукторную составляющую люфта учитывать не следует.

Привод подъема

$$\Delta s = \pm \frac{D \cdot \pi}{4096 \cdot i} = \pm \frac{50 \text{ мм} \cdot \pi}{4096 \cdot 4} = \pm 0,01 \text{ мм}$$

Кроме того, необходимо учитывать люфт в других узлах установки.



## 16.4 Выбор двигателей

Выбираемый двигатель должен соответствовать 3 условиям:

1. Пиковый момент не должен превышать утроенного значения пускового момента  $M_0$ .
2. Вычисленный эффективный вращающий момент при работе без принудительного охлаждения не должен превышать значения  $M_0$ .
3. Отношение внешнего момента инерции к моменту инерции ротора двигателя (активная составляющая без учета массы тормоза) должно быть меньше 10.

Соответствующие точные значения можно получить только для известного двигателя, но для приблизительного расчета параметров имеющихся данных вполне достаточно.

### Привод перемещения

1. Расчетный пиковый момент нагрузки (без учета момент инерции ротора двигателя).

$$M_A = 106,7 \text{ Нм}$$

После приведения к валу двигателя получаем предварительное значение максимального динамического момента:

Динамический  
момент

$$M_H = \frac{M_A}{i} = \frac{106,7 \text{ Нм}}{15} = 6,67 \text{ Нм}$$

Согласно 1-му условию пусковой момент  $M_0$  должен быть не меньше значения  $6,67 \text{ Нм}/3 = 2,22 \text{ Нм}$ .

2. Эффективный вращающий момент рассчитывается по следующей формуле:

Эффективный  
вращающий  
момент

$$M_F = \sqrt{\frac{1}{t_z} \cdot (M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + \dots + M_n^2 \cdot t_n)}$$

По диаграмме изменения вращающего момента (см. рис. 46) и с учетом передаточного числа редуктора 16 и паузы в 2 секунды получаем:

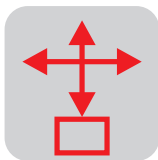
$$M_F = \sqrt{\frac{1}{4 \text{ с}} \cdot (6,67^2 \cdot 0,16 + 0,6^2 \cdot 1,67 + 4,3^2 \cdot 0,16)} \text{ Нм}^2 \text{с} = 1,6 \text{ Нм}$$

Согласно 2-му условию пусковой момент  $M_0$  должен быть не меньше значения 1,6 Нм.

3. Внешний момент инерции:

Внешний момент  
инерции

$$J_X = 91,2 \cdot m_L \cdot \left( \frac{v}{n_M} \right)^2 = 91,2 \cdot 100 \text{ кг} \cdot \left( \frac{1,64 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{2864 \text{ об/мин}} \right)^2 = 0,003 \text{ кгм}^2$$

**Выбор двигателя**

Согласно 3-му условию отношение  $J_X/J_M$  должно быть не больше 10, поэтому необходимо выбрать двигатель с моментом инерции ротора двигателя  $J_M > 0,0003 \text{ кгм}^2$ . Таким образом, типоразмер двигателя должен быть не меньше DY 71S ( $J_M = 0,000342 \text{ кгм}^2$ ).

**Выбранный двигатель**

DY71SB  
 $n_N = 3000 \text{ об/мин}$   
 $M_0 = 2,5 \text{ Нм}$   
 $J_M = 0,000546 \text{ кгм}^2$   
 $I_0 = 1,85 \text{ А}$

**Привод подъема**

1. Расчетный пиковый момент нагрузки (без учета момент инерции ротора двигателя).

$$M_A = 22 \text{ Нм}$$

После приведения к валу двигателя получаем предварительное значение максимального динамического момента:

**Динамический момент**

$$M_H = \frac{M_A}{i} = \frac{22 \text{ Нм}}{4} = 5,5 \text{ Нм}$$

Согласно 1-му условию пусковой момент  $M_0$  должен быть не меньше значения  $5,5 \text{ Нм}/3 = 1,83 \text{ Нм}$ .

2. Эффективный вращающий момент при движении вверх и вниз:

**Эффективный вращающий момент**

$$M_F = \sqrt{\frac{1}{4 \cdot c} (5,5^2 \cdot 0,17 + 2,7^2 \cdot 0,41 + 0,5^2 \cdot 0,17 + 0,6^2 \cdot 0,17 + 2,2^2 \cdot 0,41 + 4,5^2 \cdot 0,17)} \text{ Нм}^2 \cdot c$$

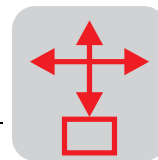
$$= 1,85 \text{ Нм}$$

Согласно 2-му условию пусковой момент  $M_0$  должен быть не меньше значения  $1,85 \text{ Нм}$ .

3. Внешний момент инерции:

**Внешний момент инерции**

$$J_X = 91,2 \cdot m_L \cdot \left( \frac{v}{n_M} \right)^2 = 91,2 \cdot 40 \text{ кг} \cdot \left( \frac{1,73 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{2643 \text{ об/мин}} \right)^2 = 0,0016 \text{ кгм}^2$$



**Выбор двигателя** Согласно 3-му условию отношение  $J_X/J_M$  должно быть не больше 10, поэтому необходимо выбрать двигатель с моментом инерции ротора двигателя  $J_M > 0,00016 \text{ кгм}^2$ . Таким образом, типоразмер двигателя должен быть больше DY 56L ( $J_M = 0,00012 \text{ кгм}^2$ ).

**Выбранный двигатель**

DY71SB  
 $n_N = 3000 \text{ об/мин}$   
 $M_0 = 2,5 \text{ Нм}$   
 $J_M = 0,000546 \text{ кгм}^2$  (с учетом момента инерции тормоза)  
 $I_0 = 1,85 \text{ А}$

**Проверка параметров выбранного двигателя**

Теперь момент инерции ротора двигателя известен, и можно проверить динамическую нагрузочную способность с учетом полученных значений.

**Привод перемещения**

Динамический момент

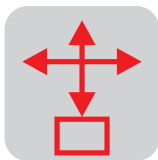
$$M_H = \frac{\left( J_M + \frac{1}{\eta_L} \cdot J_X \right) \cdot n_M}{9,55 \cdot t_A} + M_S$$

$$M_H = \frac{\left( 0,000546 + \frac{1}{0,9} \cdot 0,003 \right) \text{ кгм}^2 \cdot 2864 \text{ об/мин}}{9,55 \cdot 0,16 \text{ с}} + 0,6 \text{ Нм} = 7,9 \text{ Нм}$$

Динамический момент нагрузки больше утроенного номинального момента двигателя DY71SB ( $M_0 = 2,5 \text{ Нм}$ ) и будет вызывать перегрузку. Следовательно, этот двигатель слишком мал.

**Выбор двигателя** По результатам проверки выбираем двигатель: DY 71MB

$n_N = 3000 \text{ об/мин}$   
 $M_0 = 3,7 \text{ Нм}$   
 $J_M = 0,000689 \text{ кгм}^2$  (с учетом момента инерции тормоза)  
 $I_0 = 2,7 \text{ А}$

**Привод подъема**

Динамический момент

$$M_H = \frac{\left( J_M + \frac{1}{\eta_L} \cdot J_X \right) \cdot n_M}{9,55 \cdot t_A} + M_S$$

$$M_H = \frac{\left( 0,000546 + \frac{1}{0,9} \cdot 0,0016 \right) \text{ кгм}^2 \cdot 2643 \text{ об/мин}}{9,55 \cdot 0,17 \text{ с}} + 2,7 \text{ Нм} = 6,5 \text{ Нм}$$

Динамический момент нагрузки меньше утроенного номинального момента двигателя DY71SB ( $M_0 = 2,5 \text{ Нм}$ ) и не будет вызывать перегрузки. Следовательно, этот двигатель подходит.

**Выбор двигателя**

По результатам проверки подтверждаем выбор: DY 71SB

$n_N = 3000 \text{ об/мин}$   
 $M_0 = 2,5 \text{ Нм}$   
 $J_M = 0,000546 \text{ кгм}^2$  (с учетом момента инерции тормоза)  
 $I_0 = 1,85 \text{ А}$

**Эффективный вращающий момент**

В заключение с учетом измененных значений момента инерции ротора двигателя заново рассчитаем величину эффективного вращающего момента. Порядок вычислений был показан достаточно подробно, поэтому ограничимся только результатами.

**Привод перемещения**

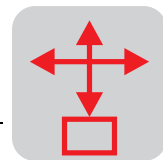
Суммарный динамический момент:  $M_{A1} = 8,1 \text{ Нм}$   
 Суммарный динамический момент при торможении:  $M_{B1} = -5,8 \text{ Нм}$   
 Статический момент нагрузки:  $M_{S1} = 0,6 \text{ Нм}$   
 Эффективный вращающий момент двигателя:  $M_{M1} = 2,0 \text{ Нм}$

**Привод подъема (движение вверх)**

Суммарный динамический момент:  $M_{A2} = 6,5 \text{ Нм}$   
 Суммарный динамический момент при торможении:  $M_{B2} = -0,5 \text{ Нм}$   
 Статический момент нагрузки:  $M_{S2} = 2,7 \text{ Нм}$

**Привод подъема (движение вниз)**

Суммарный динамический момент:  $M_{A3} = 1,6 \text{ Нм}$   
 Суммарный динамический момент при торможении:  $M_{B3} = -5,4 \text{ Нм}$   
 Статический момент нагрузки:  $M_{S3} = -2,2 \text{ Нм}$   
 Эффективный вращающий момент двигателя:  $M_{M3} = 2,1 \text{ Нм}$



## 16.5 Выбор приводной электроники

Возможны два варианта:

- **Модульная техника**, т. е. один силовой модуль питает 2 координатных модуля, управляющих приводами.
- Два **компактных контроллера** (состоящих из силового и координатного модулей), каждый управляет одним из двух приводов.

Полная информация содержится в каталоге MOVIDYN®.

Какой из этих вариантов оптимальнее и выгоднее, зависит от конкретных условий эксплуатации. В данном случае исключительно для большей наглядности выбирается первый вариант. Выбор параметров компактного контроллера выполняется аналогично выбору параметров преобразователя частоты.

### Выбор координатных модулей

Критерии выбора координатных модулей:

- Пиковый выходной ток. Для координатных модулей MOVIDYN® типа MAS это значение больше номинального выходного тока в 1,5 раза.
- Средняя величина тока двигателя. Она не должна превышать номинальный выходной ток соответствующего координатного модуля.

Эти значения тока можно получить непосредственно по уже рассчитанным значениям вращающего момента.

### Привод перемещения

Выбранный двигатель DFY 71MB работает на номинальном токе 2,7 А при  $M_0 = 3,7$  Нм.

По результатам расчетов максимальный пусковой момент составляет 8,1 Нм, что соответствует потреблению тока:

Максимальный ток

$$I_{\text{макс}} = \frac{M_{\text{макс}} \cdot I_0}{M_0} = \frac{8,1 \text{ Нм} \cdot 2,7 \text{ А}}{3,7 \text{ Нм}} = 5,9 \text{ А}$$

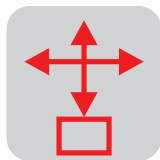
В отличие от выбора параметров двигателя, где учитываются эффективные значения, параметры координатных модулей выбираются по среднему значению вращающего момента, т. е. по средней величине тока.

Средняя величина тока

$$\begin{aligned} \overline{M} &= \frac{M_1 \cdot t_1 + M_2 \cdot t_2 + \dots + M_n \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} \\ \overline{M}_M &= \frac{8,1 \text{ Нм} \cdot 0,16 \text{ с} + 0,6 \text{ Нм} \cdot 1,67 \text{ с} + 5,8 \text{ Нм} \cdot 0,16 \text{ с}}{4 \text{ с}} = 0,8 \text{ Нм} \\ \overline{I}_M &= \frac{\overline{M}_M \cdot I_0}{M_0} = \frac{0,8 \text{ Нм} \cdot 2,7 \text{ А}}{3,7 \text{ Нм}} = 0,6 \text{ А} \end{aligned}$$

Выбранный координатный модуль:

MOVIDYN® MAS 51A 005-503-00 с  $I_0 = 5$  А и  $I_{\text{макс}} = 7,5$  А.

**Привод подъема**

Выбранный двигатель DFY 71SB работает на номинальном токе 1,85 А при  $M_0 = 2,5 \text{ Нм}$ .

По результатам расчетов максимальный пусковой момент составляет 6,5 Нм, что соответствует потреблению тока:

Максимальный ток

$$I_{\text{макс}} = \frac{M_{\text{макс}} \cdot I_0}{M_0} = \frac{6,5 \text{ Нм} \cdot 1,85 \text{ А}}{2,5 \text{ Нм}} = 4,8 \text{ А}$$

Средняя величина  
тока

$$\overline{M_M} = \frac{(6,5 \cdot 0,17 + 2,7 \cdot 0,41 + 0,5 \cdot 0,17 + 1,6 \cdot 0,17 + 2,2 \cdot 0,41 + 5,4 \cdot 0,17) \text{ Нм} \cdot \text{с}}{4 \text{ с}} = 1,1 \text{ Нм}$$

$$\overline{I_M} = \frac{\overline{M_M} \cdot I_0}{M_0} = \frac{1,1 \text{ Нм} \cdot 1,85 \text{ А}}{2,5 \text{ Нм}} = 0,8 \text{ А}$$

Выбранный координатный модуль:

MOVIDYN® MAS 51A 005-503-00 с  $I_0 = 5 \text{ А}$  и  $I_{\text{макс}} = 7,5 \text{ А}$ .

**Выбор силового модуля**

Критерии выбора силовых модулей:

- Пиковый выходной ток. Для силовых модулей MOVIDYN® (например, типа МРВ) это значение составляет  $2,0 \cdot$  номинальный выходной ток в течение 5 секунд.
- Средняя величина тока координатного модуля. Она не должна превышать номинальный выходной ток соответствующего силового модуля.

Эти значения тока складываются из значений выходного тока координатных модулей:

Суммарный ток

$$I_{\text{макс}}(NM) = I_{\text{макс\_M(F)}} + I_{\text{макс\_M(H)}} = 5,9 \text{ А} + 4,8 \text{ А} = 10,7 \text{ А}$$

$$\overline{I_{NM}} = \overline{I_{M(F)}} + \overline{I_{M(H)}} = 0,6 \text{ А} + 0,8 \text{ А} = 1,4 \text{ А}$$

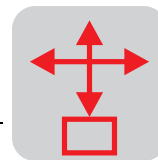
$I_{\text{макс\_M(F)}}$  = максимальный ток двигателя в приводе перемещения  
 $I_{\text{макс\_M(H)}}$  = максимальный ток двигателя в приводе подъема  
 $I_{M(F)}$  = ток двигателя в приводе перемещения  
 $I_{M(H)}$  = ток двигателя в приводе подъема  
 $I_{\text{макс}}(NM)$  = максимальный ток силового модуля  
 $I_{NM}$  = ток силового модуля

Выбранный силовой модуль:

MOVIDYN® МРВ 51А 011-503-00 с  $I_N = 20 \text{ А}$ .

Кроме того, необходим сетевой дроссель ND 045-013.





### Выбор тормозного резистора

Тормозной резистор нагружается только тогда, когда вращающий момент двигателя становится отрицательным (генераторный режим). Из диаграммы изменения вращающего момента на выходных валах очевидно, что продолжительность включения (ПВ) составляет ок. 20 %. Максимальный вращающий момент генераторного режима возникает в том случае, когда привод подъема замедляется при опускании, и одновременно затормаживается привод перемещения.

Сначала необходимо перевести значения тормозного момента в значения мощности.

### Пиковая мощность торможения

Привод перемещения

$$\hat{P}_{B1} = \frac{M_{B1} \cdot n_M}{9550} = \frac{5,8 \text{ Нм} \cdot 2864 \text{ об/мин}}{9550} = 1,74 \text{ кВт}$$

При постоянной величине замедления средняя мощность торможения соответствует половине пиковой мощности торможения.

Следовательно,  $P_{B1} = 0,87 \text{ кВт}$ .

Привод подъема

$$\hat{P}_{B3} = \frac{M_{B3} \cdot n_M}{9550} = \frac{5,4 \text{ Нм} \cdot 2643 \text{ об/мин}}{9550} = 1,50 \text{ кВт}$$

Следовательно,  $P_{B3} = 0,75 \text{ кВт}$ .

Полная мощность торможения

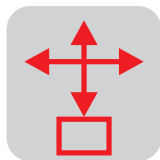
$$P_{BT} = P_{B1} + P_{B3} = 1,62 \text{ кВт}$$

Выдержка из таблицы "Тормозные резисторы для силового модуля MOVIDYN® типа MPB 51A 011-503-00".

Тип силового модуля	MPB 51A 011-503-00 ( $P_{BRCMAX} = 14 \text{ кВт}$ )				
Тип тормозного резистора	BW047-004	BW147	BW247	BW347	BW547
Нагрузочная способность при					
100 % ПВ	0,4 кВт	1,2 кВт	2,0 кВт	4,0 кВт	6,0 кВт
50 % ПВ	0,7 кВт	2,2 кВт	3,8 кВт	7,6 кВт	10,8 кВт
25 % ПВ	1,2 кВт	3,8 кВт	6,4 кВт	12,8 кВт	18,0 кВт <sup>1)</sup>
12 % ПВ	2,4 кВт	7,2 кВт	12,0 кВт	24,0 кВт <sup>1)</sup>	30,0 кВт <sup>1)</sup>
6 % ПВ	3,8 кВт	11,4 кВт	19,0 кВт <sup>1)</sup>	38,0 кВт <sup>1)</sup>	45,0 кВт <sup>1)</sup>
Значение сопротивления	47 Ом $\pm$ 10 %				
Ток отключения (в F16)	1,5 А <sub>~</sub>	3,8 А <sub>~</sub>	5,3 А <sub>~</sub>	8,2 А <sub>~</sub>	10 А <sub>~</sub>
Конструкция	Проволочный резистор				Резистор из стальной сетки
Подключение	Керамические клеммы для проводов сечением 2,5 мм <sup>2</sup> (AWG 14)				Резьбовые шпильки M8
Масса	1,9 кг	4,3 кг	6,1 кг	13,2 кг	12 кг

1) Ограничение мощности в генераторном режиме

В строке для 25 % ПВ по эффективной мощности 3,8 кВт находим соответствующий тормозной резистор: **BW 147**



### Выбор радиатора

При использовании радиаторов DKE следует учитывать, что установка модуля на стык двух радиаторов не допускается. Поэтому сначала необходимо перевести ширину отдельных модулей в специальные единицы TE.

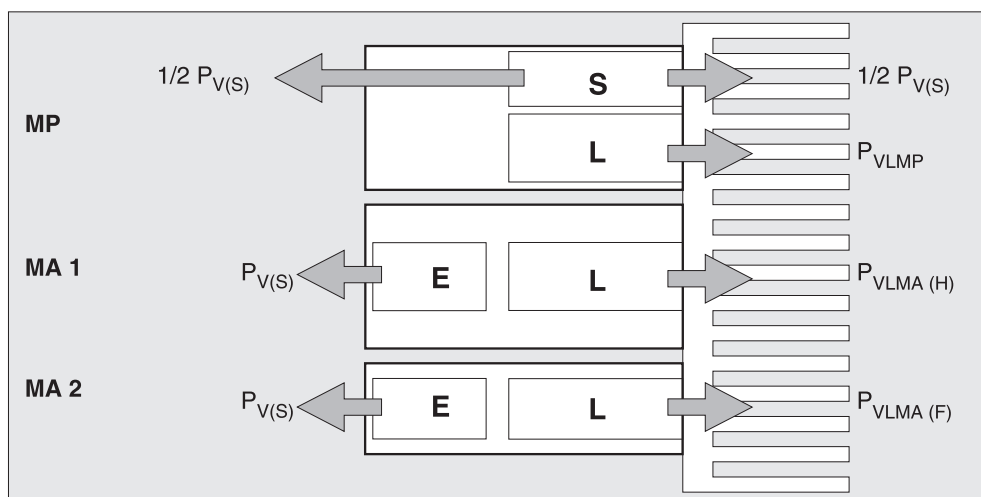
Привод перемещения	MAS 51A-005-503-00	2 TE
Привод подъема	MAS 51A-005-503-00	2 TE
Силовой модуль	MPB 51A-011-503-00	3 TE
Общая ширина		7 TE

Следовательно, выбираем радиатор DKE 07 шириной 7 TE.

### Тепловое сопротивление

По данным таблицы тепловое сопротивление составляет 0,4 К/Вт. Эта величина представляет собой превышение температуры окружающей среды в кельвинах относительно мощности потерь смонтированных модулей в ваттах. При этом максимально допустимая температура составляет 80 °C.

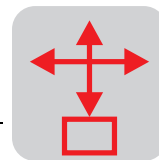
### Проверка теплового режима



00224CXX

Рис. 47. Схема потерь мощности

MP	= силовой модуль	S	= импульсный блок питания
MA 1	= координатный модуль привода перемещения	L	= силовая часть
MA 2	= координатный модуль привода подъема	E	= электронные схемы управления
$P_{V(S)}$	= потери мощности в импульсном блоке питания		
$P_{VLMP}$	= потери мощности в силовом модуле		
$P_{VLMA(H)}$	= потери мощности в координатном модуле привода подъема		
$P_{VLMA(F)}$	= потери мощности в координатном модуле привода перемещения		



Потери мощности

Импульсный блок питания

$$P_{V(S)} = 12 \text{ Вт} + 13 \text{ Вт} \cdot a = 12 \text{ Вт} + 13 \text{ Вт} \cdot 2 = 38 \text{ Вт}$$

$a$  = количество приводов

Привод перемещения

$$P_{VLMA(F)} = 14 \frac{\text{Вт}}{\text{А}} \cdot I_{\text{eff}} = 14 \frac{\text{Вт}}{\text{А}} \cdot 1,5 \text{ А} = 21 \text{ Вт}$$

Силовая часть координатного модуля

Привод подъема

$$P_{VLMA(H)} = 14 \frac{\text{Вт}}{\text{А}} \cdot 1,1 \text{ А} = 15,4 \text{ Вт}$$

Силовая часть координатного модуля

Силовой модуль

$$P_{VLMP} = 2 \frac{\text{Вт}}{\text{А}} \cdot I_{F(T)} = 2 \frac{\text{Вт}}{\text{А}} \cdot (1,5 + 1,1) \text{ А} = 5,2 \text{ Вт}$$

Радиатор

$$P_{KK} = \frac{1}{2} P_{V(S)} + P_{VLMP} + \Sigma P_{VLMA} = 60,6 \text{ Вт}$$

$$\Delta \vartheta = P_{KK} \cdot R_{KK} = 60,6 \text{ Вт} \cdot 0,4 \frac{\text{К}}{\text{Вт}} = 24,2 \text{ К}$$

Таким образом, обеспечивается безопасный тепловой режим в диапазоне до теоретической температуры окружающей среды  $80^\circ\text{C} - 24,2 \text{ К} = 55,8^\circ\text{C}$ .

## 17 Приложение: таблицы и пояснения к условным обозначениям

### 17.1 Таблицы

#### КПД передающих элементов

Передающий элемент	Условия	КПД
Стальные тросы	для каждого полностью охваченного блока (подшипники скольжения или качения)	0,91 – 0,95
Клиновые ремни	для каждого полностью охваченного шкива (нормальное натяжение ремня)	0,88 – 0,93
Полимерные ленты	для каждого полного обхвата/барабаны на подшипниках качения (нормальное натяжение ленты)	0,81 – 0,85
Резиновые ленты	для каждого полного обхвата/барабаны на подшипниках качения (нормальное натяжение ленты)	0,81 – 0,85
Зубчатые ремни	для каждого полного обхвата/шкивы на подшипниках качения (нормальное натяжение ремня)	0,90 – 0,96
Цепи	для каждого полного обхвата/звездочки на подшипниках качения (в зависимости от размера цепи)	0,90 – 0,96
Редукторы	смазка маслом, 3 ступени (цилиндр.шестерни), в зависимости от качества изготовления; для червячных и кон.-цил. редукторов: см. данные изготовителя	0,94 – 0,97

#### Коэффициенты трения в подшипниках

Тип подшипника	Коэффициент трения
Подшипник качения	$\mu_L = 0,005$
Подшипник скольжения	$\mu_L = 0,08^{-1}$

#### Коэффициенты трения обода и реборды колеса

Трение обода и реборды колеса	Коэффициент
Колеса на подшипниках качения	$c = 0,003$
Колеса на подшипниках скольжения	$c = 0,005$
Боковые направляющие ролики	$c = 0,002$

#### Коэффициенты трения в парах различных материалов

Пара	Вид трения	Коэффициент трения
Сталь/сталь	Трение покоя (без смазки)	$\mu_0 = 0,12 - 0,60$
	Трение скольжения (без смазки)	$\mu = 0,08 - 0,50$
	Трение покоя (со смазкой)	$\mu_0 = 0,12 - 0,35$
	Трение скольжения (со смазкой)	$\mu = 0,04 - 0,25$
Дерево/сталь	Трение покоя (без смазки)	$\mu_0 = 0,45 - 0,75$
	Трение скольжения (без смазки)	$\mu = 0,30 - 0,60$
Дерево/дерево	Трение покоя (без смазки)	$\mu_0 = 0,40 - 0,75$
	Трение скольжения (без смазки)	$\mu = 0,30 - 0,50$
Полимерный ремень/сталь	Трение покоя (без смазки)	$\mu_0 = 0,25 - 0,45$
	Трение скольжения (без смазки)	$\mu = 0,25$
Сталь/пластмасса	Трение скольжения (без смазки)	$\mu_0 = 0,20 - 0,45$
	Трение скольжения (со смазкой)	$\mu = 0,18 - 0,35$

**Трение качения (плечо силы трения качения)**

Пара		Плечо	
Сталь/сталь		$f \approx 0,5 \text{ мм}$	
Дерево/сталь (роликовый конвейер)		$f \approx 1,2 \text{ мм}$	
Пластмасса/сталь		$f \approx 2 \text{ мм}$	
Эбонит/сталь		$f \approx 7 \text{ мм}$	
Пластмасса/бетон		$f \approx 5 \text{ мм}$	
Эбонит/бетон		$f \approx 10 - 20 \text{ мм}$	
Резина средней жесткости/бетон		$f \approx 15 - 35 \text{ мм}$	
Vulkollan®/сталь	Ø 100 мм	$f \approx 0,75 \text{ мм}$	<b>Внимание!</b> Плечо силы трения качения в значительной мере зависит от качества изготовления, геометрии и температуры деталей.
	Ø 125 мм	$f \approx 0,9 \text{ мм}$	
	Ø 200 мм	$f \approx 1,5 \text{ мм}$	
	Ø 415 мм	$f \approx 3,1 \text{ мм}$	

**КПД ходового винта**

Ходовой винт	КПД
Трапецеидальная резьба (в зависимости от шага и смазки)	$\eta = 0,3 \dots 0,5$
Шариковый ходовой винт	$\eta = 0,8 \dots 0,9$

**Ссылки**

<i>DIN/VDE 0113</i>	Предписания по электрооборудованию промышленных установок с номинальным напряжением до 1000 В.
<i>EN 60034</i>	Предписания по вращающимся электрическим машинам.
<i>Dubbel</i>	Руководство по машино- и станкостроению, том I и II.
<i>SEW</i>	Руководство по приводной технике.
<i>SEW</i>	Информация о производстве.

## 17.2 Пояснения к условным обозначениям

Пояснения к условным обозначениям в **формулах приводной техники** и в **примерах расчета**.

$a$	Ускорение	$\text{м/с}^2$
$a_A$	Ускорение при разгоне	$\text{м/с}^2$
$a_B$	Замедление при торможении	$\text{м/с}^2$
$a_U$	Замедление при переключении с высокой частоты вращения на низкую	$\text{м/с}^2$
$\alpha$	Угловое ускорение	$1/\text{с}^2$
$\alpha$	Угол наклона	$^\circ$
$c$	Коэффициент трения обода и реборды колеса	—
$d$	Диаметр опорной цапфы колеса	мм
$d_0$	Диаметр шестерни или звездочки на выходном валу редуктора	мм
$D$	Диаметр колеса, барабана или звездочки	мм
$\eta$	КПД	—
$\eta'$	КПД при обратной нагрузке	—
$\eta_G$	КПД редуктора	—
$\eta_T$	Общий КПД	—
$\eta_L$	КПД нагрузки или приводимого механизма	—
$f$	Плечо силы трения качения	мм
$f$	Частота	Гц
$f_B$	Эксплуатационный коэффициент	—
$f_Z$	Коэффициент запаса для расчета внешней радиальной нагрузки	—
$F$	Сила	Н
$F_F$	Сила сопротивления качению	Н
$F_G$	Сила тяжести	Н
$F_N$	Нормаль силы тяжести, перпендикулярная поверхности	Н
$F_Q$	Внешняя радиальная нагрузка	Н
$F_R$	Сила трения	Н
$F_S$	Сила сопротивления (влияет на статическую мощность)	Н
$g$	Ускорение свободного падения: 9,81 (константа)	$\text{м/с}^2$
$i$	Передаточное число редуктора	—
$i_V$	Передаточное число промежуточной передачи	—
$J$	Момент инерции	$\text{кгм}^2$
$J_L$	Момент инерции нагрузки	$\text{кгм}^2$
$J_M$	Момент инерции ротора двигателя	$\text{кгм}^2$
$J_X$	Момент инерции нагрузки, приведенный к валу двигателя	$\text{кгм}^2$
$J_Z$	Дополнительный момент инерции (инерционная крыльчатка)	$\text{кгм}^2$
$K_J/K_M/K_P$	Коэффициенты для расчета количества включений $Z$	—
$L_B$	Срок службы тормоза (до переналадки)	h
$m$	Масса	кг
$m_0$	Собственная масса = масса без учета полезной нагрузки	кг
$m_L$	Масса груза (полезной нагрузки)	кг

M	Вращающий момент	Нм
M <sub>a</sub>	Вращающий момент на выходном валу	Нм
M <sub>B</sub>	Тормозной момент	Нм
M <sub>H</sub>	Динамический момент	Нм
M <sub>K</sub>	Опрокидывающий момент	Нм
M <sub>L</sub>	Статический момент нагрузки на вал двигателя (без учета $\eta$ )	Нм
M <sub>N</sub>	Номинальный вращающий момент	Нм
M <sub>S</sub>	Статический момент (с учетом $\eta$ )	Нм
M <sub>U</sub>	Момент при переключении с высокой частоты вращения на низкую для двигателей с переключением числа полюсов	Нм
$\mu$	Коэффициент трения скольжения	—
$\mu_0$	Коэффициент трения сцепления	—
$\mu_L$	Коэффициент трения в подшипниках	—
n	Частота вращения	об/мин
n <sub>a</sub>	Частота вращения на выходе редуктора	об/мин
n <sub>M</sub>	Частота вращения двигателя	об/мин
n <sub>N</sub>	Номинальная частота вращения	об/мин
n <sub>S</sub>	Синхронная частота вращения	об/мин
$\omega$	Угловая скорость	рад/с
P	Мощность	Вт
P <sub>B</sub>	Мощность торможения	кВт
P <sub>DM</sub>	Динамическая мощность двигателя без нагрузки	кВт
P <sub>DL</sub>	Динамическая мощность двигателя для ускорения нагрузки	кВт
P <sub>T</sub>	Полная мощность двигателя	кВт
P <sub>N</sub>	Номинальная мощность	кВт
P <sub>S</sub>	Необходимая статическая мощность двигателя	кВт
$\varphi$	Угловое расстояние	° или рад
r	Радиус	мм
R	Диапазон регулирования (частоты вращения)	—
$\rho$	Плотность	кг/дм <sup>3</sup>
s	Расстояние	мм
s <sub>A</sub>	Длина пути разгона	мм
s <sub>B</sub>	Длина тормозного пути	мм
s <sub>F</sub>	Длина пути с постоянной скоростью	м
s <sub>T</sub>	Общая длина пути	м
s <sub>P</sub>	Длина пути позиционирования	м
s <sub>U</sub>	Длина пути переключения с высокой частоты вращения на низкую	мм
t	Время перемещения или подъема	с
t <sub>1</sub>	Время отпускания тормоза	с
t <sub>2</sub>	Время наложения тормоза	с
t <sub>A</sub>	Время разгона	с
t <sub>B</sub>	Время торможения	с
t <sub>F</sub>	Время движения с постоянной скоростью	с

$t_T$	Общее время (рабочего цикла)	с
$t_U$	Время переключения с высокой частоты вращения на низкую	с
$t_Z$	Длительность цикла	с
$v$	Скорость	м/с
$V$	Объем	дм <sup>3</sup>
$v_P$	Скорость позиционирования	м/с
$W_B$	Работа тормоза	Дж
$W_N$	Работа тормоза до переналадки	Дж
$X_B$	Точность остановки (допуск на длину тормозного пути)	мм
$Z_0$	Допустимое количество включений без нагрузки	1/ч, вкл/ч
$Z_P$	Расчетное допустимое количество включений	1/ч, вкл/ч





## 18 Алфавитный указатель

### 0 ... 9

2-фазное переключение 21

### А

Антикоррозионная защита 17

Асинхронные серводвигатели 34

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором 9

### Б

Биметаллический выключатель 18

Блок-схема проектирования, сервопривод 38

Большое количество включений 19

### В

Вариатор, расчет параметров 40

Вариаторы, механические 39

Вентилятор принудительного охлаждения 30

Взрывобезопасность 17

Внешние радиальные нагрузки 54

Вращающий момент на выходном валу 47, 49

Вращающий момент, максимальный 35

Вращающий момент, постоянный 28

Время наложения тормоза 23, 24

Время отпускания тормоза 23

Время работы 15

Время работы под нагрузкой 15

Время разгона 19

Время реакции тормоза 23

Время торможения 24

Встроенный преобразователь частоты 27

Выбор параметров 30, 52

Выбор параметров двигателя 19, 30

Высота над уровнем моря 11, 12

Выходная мощность 15, 49

Выходная мощность двигателя 47

### Г

Групповой привод 32

### Д

Датчик температуры 18, 30, 31

Двигатели с переключением числа полюсов 9

Двигатели с переключением числа полюсов, преобразователь частоты 32

Двигатель с тормозом 23

Двухсекционная тормозная катушка 23

Двухфазное переключение 21

Диапазон номинального напряжения 13

Диапазон ослабления поля 31

Диапазон регулирования частоты вращения 31, 40

Дополнительный момент инерции 19

Дополнительный эксплуатационный коэффициент, червячный редуктор 51

Допуск А 13

Допуски 13

Допустимое количество включений 19

Дроссель 20

### З

Заводская табличка двигателя 11

Защита обмотки 18

Защита от короткого замыкания 18

Защита от перегрузки, вариатор 44

Защита от попадания воды 17

Защита от попадания посторонних предметов 17

Защитное устройство 18

Защитное устройство, возможности 18

Защитный автоматический выключатель двигателя 18

### И

Избыточный ток 18

Импульсная токовая нагрузка 25

Инерционная крыльчатка 20

Инструкции по проектированию, вариатор 45

Исполнение двигателя 31

### К

Кабель питания двигателя, режим параллельного включения 32

Клиноременной вариатор 39

Количество включений 19, 20

Количество включений без нагрузки 19

Количество включений, допустимое 19

Количество включений, допустимое 19

Компенсация скольжения 30

Координатный модуль 36

Корпус подшипника, удлиненный 47

Коэффициент запаса 54

Коэффициент инерции 50

Коэффициент мощности 11, 13, 15

Коэффициент увеличения мощности 15

КПД 13, 15, 48

КПД зубчатой передачи 48

КПД редуктора 47

Кратковременный режим 14

Кривая момента двигателя 10

Кривая момента нагрузки 10

Критерии выбора параметров, вариатор 40

Крыльчатка, инерционная 20

### Л

Люфт редуктора 53

### М

Максимально допустимое повышение температуры 16

Максимальный вращающий момент 35

Механическая характеристика 9, 35

Механические вариаторы 39

Механическое устройство ручного растормаживания 24

Момент нагрузки 19

Момент при переключении пар полюсов 10, 21

Мощность на валу двигателя 15

Мощность, статическая 19

**Н**

Напряжение 13  
 Недостаточные параметры 13  
 Нестабильность 18  
 Нестабильность напряжения 18  
 Несущая способность подшипников 54  
 Низкая температура 24  
 Низколюфтовые планетарные редукторы 52  
 Низколюфтовые редукторы 52  
 Номинальная мощность 11, 12, 14, 15, 19  
 Номинальная мощность, увеличение 15  
 Номинальная частота вращения 11, 12  
 Номинальное значение 13  
 Номинальное напряжение 11, 13  
 Номинальные параметры 11  
 Номинальный ток 11  
 Нормальный режим работы 18

**О**

Обрыв фазы 18  
 Общий эксплуатационный коэффициент, червячный редуктор 51  
 Ограничение по нагреву 35  
 Опора двигателя 53  
 Определение внешней радиальной нагрузки 54  
 Опрокидывание 18  
 Опрокидывающий момент 13, 29, 28, 31  
 Осевые нагрузки 54  
 Ослабление поля 28  
 Относительная продолжительность включения 15  
 Охлаждение 30  
 Охлаждение двигателя 30

**П**

Перегрузка 18  
 Передающие элементы 54  
 Переключение "звезда --> треугольник" 20  
 Перемешивающее устройство 47  
 Плавкий предохранитель 18  
 Плавное переключение числа полюсов 20  
 Плавность вращения 30  
 Плавный пуск 20  
 Планетарный мотор-редуктор 52  
 Повышение температуры 16  
 Подогрев тормоза 24  
 Постоянная мощность, вариатор 42, 43  
 Постоянный вращающий момент 28, 29  
 Постоянный вращающий момент, вариатор 41, 43  
 Потери на трение 48  
 Потери от перемешивания масла 30, 48  
 Потребление мощности 19  
 Предельная нагрузка 24  
 Преобразователи частоты 27  
 Преобразователи частоты, дополнительное оборудование 32  
 Преобразователь частоты, встроенный 27  
 Преобразователь, модульный 36  
 Приводной преобразователь  
 Приводные преобразователи 27, 37  
 Приложение усилия 55

Принудительное охлаждение 31, 30  
 Продолжительность включения (ПВ) 19  
 Продолжительность включения 14  
 Продолжительность включения, относительная 15  
 Продолжительный режим 14, 19  
 Просадка напряжения 13  
 Прочность вала 54  
 ПТК-термистор 18  
 Пусковая характеристика, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором 9  
 Пусковой момент 13  
 Пусковой ток 13  
 Пусковой трансформатор 20

**Р**

Рабочая точка, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором 10  
 Рабочая характеристика 28  
 Рабочий тормоз 23  
 Реверсивный режим 25  
 Реверсирование 18  
 Редукторы в стандартном исполнении 46, 52  
 Редукторы со сниженным люфтом редуктор 52  
 Редукторы, низколюфтовые 52  
 Редукторы, сниженный люфт 52  
 Режим S1 19  
 Режим S3 19  
 Режим S4 19  
 Режим параллельного включения 32  
 Режим работы 11, 14  
 Режим работы S1 14, 19  
 Режим работы S2 14  
 Режим работы S3 14, 19  
 Режим работы S4 14, 19  
 Режим работы S5 - S10 14  
 Рекомендации по выбору параметров 30  
 Ручное растормаживание, механическое устройство 24

**С**

Самоохлаждение 30, 31  
 Сборная шина 32  
 Сдвоенные редукторы 47  
 Серводвигатели 34  
 Серводвигатели с редуктором 53  
 Серводвигатели с редуктором со сниженным люфтом 53  
 Сервопреобразователи 27  
 Сервопреобразователь 36  
 Сервопривод 52  
 Силовой модуль 36  
 Синхронная частота вращения 9, 11, 12  
 Синхронные серводвигатели 34  
 Системная шина, MOVIDRIVE® 37  
 Скольжение 12, 13  
 Снижение вращающего момента, двигатели с переключением числа полюсов 21  
 Снижение мощности 12  
 Старт-стопный режим 14  
 Статическая мощность 19  
 Степень защиты 11, 17



Степень использования по нагреву 35  
 Степень использования, нагрев 35  
 Стояночный тормоз 23  
 Схема включения звездой 20  
 Схема включения треугольником 20

**Т**

Температура обмотки 16, 18  
 Температура окружающей среды 11, 12, 16, 24  
 Температура отключения 16  
 Температура охлаждающего воздуха 16  
 Температурный класс изоляции 11, 15, 16, 30, 31  
 Тепловая защита обмотки 18  
 Термостат 18, 30, 31  
 Типоразмер 11, 30  
 Токовая защита обмотки 18  
 Торможение постоянным током 25  
 Торможение противовключением 25  
 Тормозной контактор 25  
 Тормозной момент 24  
 Тормозной путь 24  
 Точка приложения усилия 54  
 Точность останова 24  
 Точность регулирования 30  
 Тяжелый запуск 18

**У**

Угловой люфт 53  
 Удлиненный корпус подшипника 47  
 Усиленная антикоррозионная защита 17  
 Условия окружающей среды 17  
 Устройство плавного переключения числа полюсов 10, 22

**Ф**

Фрикционный вариатор 39

**Х**

Характер нагрузки 50

**Ч**

Частота 13  
 Частота вращения выходного вала 47  
 Частота вращения на выходе редуктора 47  
 Число полюсов 11

**Э**

Эксплуатационные коэффициенты, вариатор 44  
 Эксплуатационный коэффициент 49, 50  
 Эксплуатационный коэффициент, червячный редуктор 51  
 Экстренная остановка 23  
 Экстренное торможение 24  
 Эффективный вращающий момент 35

**А**

ATEX 100a 17

**С**

CFC 27, 37  
 $\cos \pi$  11, 13, 15  
 Current Mode Flux Control 27, 37

**Е**

eta 13, 15

**І**

International Protection 17  
 IP 17  
 ІxR-компенсация 30

**М**

MAS, координатный модуль 36  
 MDS 37  
 MDV 37  
 MOVIDRIVE® 27, 37  
 MOVIDYN® 27, 36  
 MOVIMOT® 27  
 MOVITRAC® 27  
 MPB, силовой модуль 36  
 MPR, силовой модуль 36

**N**

Numerics

**R**

RM 47

**S**

S1 14, 19  
 S2 14  
 S3 14, 19  
 S4 14, 19  
 S5 - S10 14

**T**

TF 30, 31  
 TH 30, 31

**V**

VFC 27, 37  
 Voltage Mode Flux Control 27, 37

