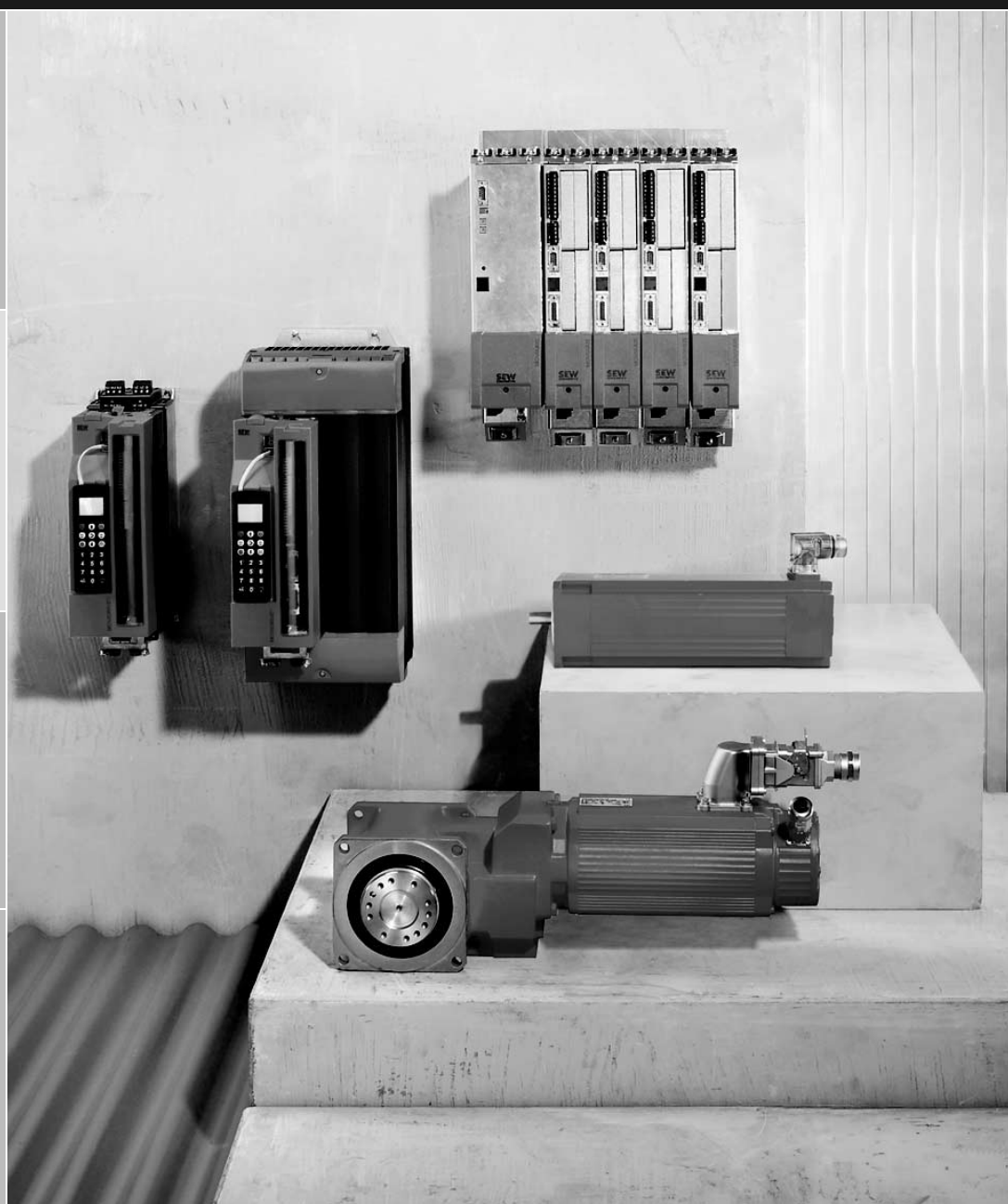
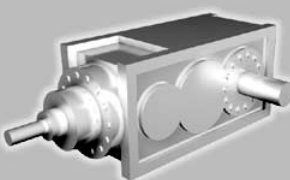
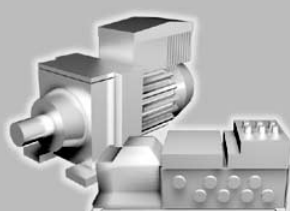
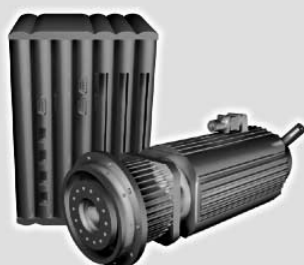
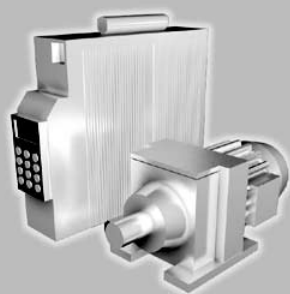




SEW
EURODRIVE



Сервоприводы

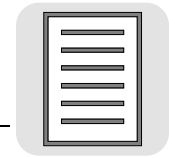
KB000000

Издание 09/2006

11322853 / RU

**Практика приводной
ТЕХНИКИ**

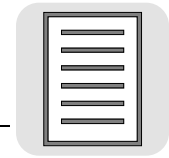




1 Введение	6
1.1 Определение и развитие сервотехники	7
1.2 Сферы применения сервотехники	7
1.3 Компоненты сервосистемы	8
2 Серводвигатели	10
2.1 Обзор современных серводвигателей	11
2.2 Характеристики синхронных и асинхронных серводвигателей	12
2.3 Устройство синхронных серводвигателей	13
2.3.1 Устройство двигателя CMP	14
2.3.2 Устройство двигателя CM/DS	15
2.3.3 Устройство двигателя CMD	16
2.3.4 Конструкция ротора	17
2.4 Принцип действия синхронных серводвигателей	18
2.4.1 Оптимальная рабочая точка	19
2.4.2 Соотношение токов статора	19
2.4.3 Питание синусоидальной формы	20
2.4.4 Питание прямоугольной формы	21
2.4.5 Предельные механические характеристики	23
2.5 Устройство асинхронных серводвигателей	25
2.5.1 Устройство двигателя CT/CV	25
2.6 Принцип действия асинхронных серводвигателей	26
2.6.1 Механическая характеристика	31
2.7 Синхронный линейный двигатель	33
2.7.1 Принципиальные конструкции синхронных линейных двигателей	34
2.7.2 Механическая характеристика	36
2.7.3 Дополнительное оборудование	39
2.8 Тормоза для ротационных серводвигателей	43
2.8.1 Пружинный тормоз в качестве стояночного	43
2.8.2 Рабочий тормоз SEW	44
2.8.3 Стояночный тормоз с возбуждением от постоянных магнитов	45
2.9 Тормоза для линейных двигателей	46
3 Датчики	48
3.1 Инкрементные датчики	48
3.1.1 Инкрементные датчики угловых перемещений с сигналами TTL и HTL	48
3.1.2 Инкрементные датчики с sin/cos-каналами	51
3.2 Датчики абсолютного отсчета	52
3.2.1 Датчики абсолютного отсчета с SSI-интерфейсом и sin/cos-сигналами	52
3.2.2 Датчики абсолютного отсчета с интерфейсом HIPERFACE®	53
3.2.3 Резольверы	56
3.3 Сравнительный обзор для выбора типа датчика: резольверов, sin-/cos-датчиков, TTL-датчиков	59
3.3.1 Технические данные датчиков двигателей SEW-EURODRIVE	60
3.4 Системы прямого измерения перемещений для линейных серводвигателей	61
3.4.1 Устройство и принцип действия оптических систем измерения перемещений	61
3.4.2 Устройство и принцип действия магнитных систем измерения перемещений	62
3.4.3 Устройство и принцип действия индуктивных систем измерения перемещений	63
3.5 Глоссарий	65



4 Сервоусилители	66
4.1 Общие сведения о сервоусилителях	66
4.1.1 Звено постоянного тока	67
4.1.2 Инвертор	68
4.1.3 Контроль перегрузки	68
4.1.4 Требования ЭМС	70
4.1.5 Дополнительные устройства	70
4.2 Модульная многоосевая сервосистема	71
4.2.1 Модуль питания	71
4.2.2 Устройство рекуперации энергии в сеть	73
4.2.3 Тормозной выпрямитель и тормозной резистор	73
4.2.4 Сравнительный обзор параметров устройства рекуперации и тормозного прерывателя	74
4.2.5 Осевой модуль	75
4.2.6 Питание 24 В	76
4.3 Одноосевой усилитель	77
4.4 Сравнительный обзор модульной многоосевой системы и одноосевой системы	78
4.5 Глоссарий	78
5 Структура и режимы регулирования	79
5.1 Обзор	79
5.2 Регулирование тока	80
5.3 Регулирование частоты вращения	82
5.3.1 Структура регулирования частоты вращения	82
5.3.2 Контроль положения и частоты вращения	83
5.3.3 Фильтр действительного значения частоты вращения	85
5.3.4 Подготовка уставки частоты вращения	85
5.3.5 Регулятор частоты вращения	86
5.3.6 Упреждение по ускорению	87
5.3.7 Безлюфтовое соединение с нагрузкой	87
5.3.8 Соединение двигателя и нагрузки с люфтом	88
5.4 Позиционное регулирование	89
5.5 Глоссарий	89
6 Промышленное применение	90
6.1 Параметры электросети	90
6.2 Условия окружающей среды	90
6.3 Указания по двигателю	90
6.3.1 Синхронные двигатели	91
6.3.2 Асинхронные двигатели	91
6.4 Прокладка кабелей	91
6.5 Электромагнитные помехи / Электромагнитная совместимость	91
6.6 Коммуникационные порты	93
6.6.1 Промышленные шинные системы: подключение к контроллеру верхнего уровня	93
6.6.2 Шинная система Profibus DP	94
6.6.3 Шинная система INTERBUS-S	95
6.6.4 Ethernet как основа промышленных сетей	96
6.6.5 Обмен данными между осевыми модулями	97
6.6.6 Диагностическая шина	98
6.7 Глоссарий	98



7	Редукторы для сервопривода	99
7.1	Требования к редуктору для сервопривода	99
7.2	Общий обзор редукторов	100
7.2.1	Планетарные редукторы для сервопривода	100
7.2.2	Конические редукторы.....	102
7.2.3	Цилиндрические редукторы	103
7.2.4	Конические редукторы.....	104
8	Проектирование.....	105
8.1	Общие сведения	105
8.2	Данные для расчета параметров привода и выбора редуктора	106
8.3	Алгоритм проектирования сервопривода с мотор-редуктором	109
8.4	Пример проектирования сервопривода с мотор-редуктором.....	114
8.5	Алгоритм проектирования линейного сервопривода.....	128
8.6	Пример проектирования линейного сервопривода SL2.....	129
9	Алфавитный указатель.....	140



1 Введение

SEW-EURODRIVE – это ведущая компания на мировом рынке электроприводной техники. Штаб-квартира корпорации расположена в Брухзале, Германия. Компоненты для модульных приводных систем SEW-EURODRIVE производятся по самым высоким стандартам качества на заводах в Германии, Франции, Финляндии, США, Бразилии и Китае. Приводы комплектуются из готовых компонентов на 58 сборочных предприятиях в более чем 44 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 офисы, центры обслуживания и поставки запасных частей можно найти в более чем 60 странах мира.

Наличие филиалов SEW-EURODRIVE по всему миру, полный ассортимент продукции и широкий спектр услуг делают эту компанию идеальным партнером в решении сложных задач автоматизации.

Особенностью последних лет стало развитие сферы сервотехники в мощную отрасль с высокими инновационными темпами. Отвечающие требованиям рынка разработки SEW-EURODRIVE учитывают это динамичное явление.

Настоящее издание из серии "Практика приводной техники" предназначено для технических специалистов в области сервопривода и наглядным образом предоставляет информацию об устройстве и принципе действия распространенных компонентов сервотехники, а также о сферах их применения и проектировании.

SEW-EURODRIVE - Driving the world.

Брухзаль, сентябрь 2006



1.1 Определение и развитие сервотехники

Термин "серво" происходит от латинского "servus", что означает раб, слуга или помощник. Этот термин соответствовал действительности в те времена, когда сервоприводы применялись лишь как вспомогательные приводы для решения задач нижнего уровня, например, как исполнительные приводы станочных механизмов. Причина такого ограниченного применения была в низком КПД так называемых линейных усилителей с силовыми транзисторами и ограниченном (ок. 200 В) напряжении между коллекторными пластинами в двигателях постоянного тока. Аналоговое регулирование приводов сильно ограничивало объем функций, всякое функциональное расширение требовало очень больших затрат.

Решающим фактором успеха сегодняшней сервотехники стало стремительное развитие в области полупроводниковой техники и современных микроконтроллеров. Высокоинтегрированные и мощные вычислительные системы, как и соответствующие модули памяти позволили перейти на цифровое регулирование. Это дало возможность существенно расширить объем функций приводной системы.

Благодаря этому развитию современные сервосистемы все чаще применяются в качестве основных приводов и в меньшей степени – для вспомогательных задач нижнего уровня.

1.2 Сферы применения сервотехники

Рост автоматизации во всех отраслях производства машин и оборудования требует постоянного сокращения циклов и повышения гибкости при смене продукции. Эти задачи все реже реализуются с помощью обычных асинхронных приводов или гидравлических/пневматических компонентов. Такое развитие привело к значительным изменениям в приводной технике, а именно – к широкому применению современных сервоприводов:

- синхронные серводвигатели;
- асинхронные серводвигатели;
- синхронные линейные двигатели.

В этом издании рассматриваются приводные системы с вышеназванными серводвигателями.

Эти приводы используются прежде всего в следующих отраслях:

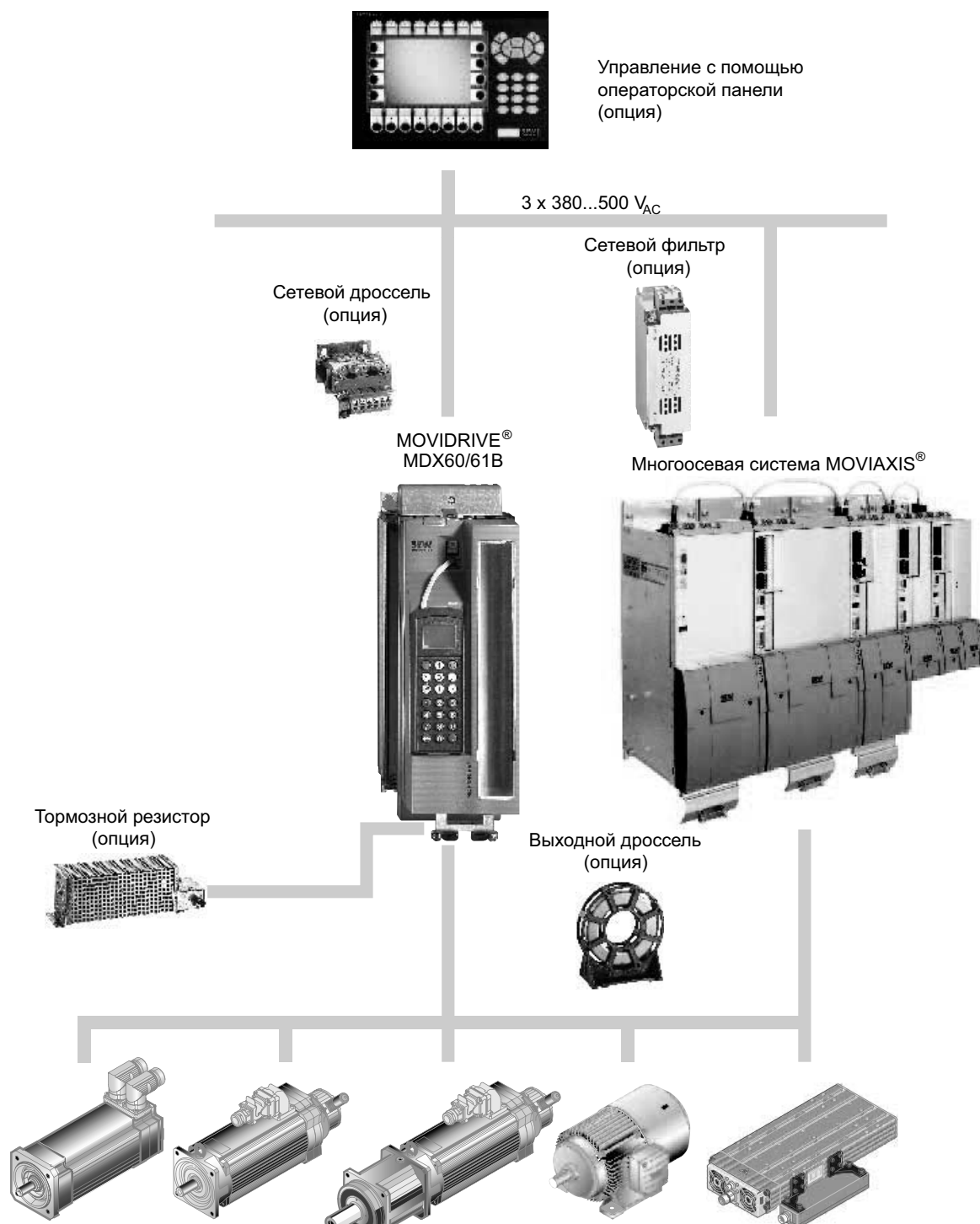
- упаковочная техника;
- робототехника;
- станки;
- системы переработки грузов;
- обработка листового металла;
- переработка бумаги;
- подъемно-транспортное оборудование.



1.3 Компоненты сервосистемы

В связи с постоянным сокращением продолжительности циклов и времени переналадки при производстве машин и оборудования современные сервосистемы – это нечто намного большее, чем просто серводвигатель с соответствующим сервоусилителем. Особенно в приводной технике этот факт ставит повышенные требования к функциональности и совместимости интерфейсов с контроллерами верхнего уровня.

Компоненты сервосистем SEW на базе MOVIDRIVE® и MOVIAxis®



58278aru

Рис. 1. Компоненты сервосистемы

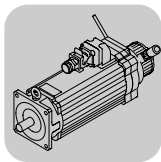


*Компоненты
сервосистемы
(см. Рис. 1)*

1. Контроллер (опция): Современные и мощные сервоусилители типа MOVIDRIVE® и MOVIAXIS® являются программируемыми. То есть, с их помощью можно реализовать и такие сложные функции, как регулятор положения, синхронного управления или электронный кулачок. Кроме того, в некоторых случаях в сервоусилитель можно установить плату управления для координации осей (Motion Control) и использования классических функций ПЛК.
2. Одноосевой усилитель MOVIDRIVE®.
3. Многоосевой сервоусилитель MOVIAXIS®.
4. Синхронный серводвигатель типа CMP, CMD, DS.
5. Синхронный серводвигатель с планетарным редуктором.
6. Асинхронный серводвигатель типа CT/CV.
7. Синхронный линейный двигатель типа SL2.

*Дополнительные
компоненты
сервосистемы*

- Фабрично подготовленные кабели двигателя и датчика.
- Сетевые дроссели / сетевые фильтры; в зависимости от сервоусилителя и классификации по ЭМС (электромагнитной совместимости).
- Тормозные резисторы.
- Устройства рекуперации энергии в сеть.
- Интерфейсные модули; опция, в зависимости от варианта применения и наличия контроллера верхнего уровня.
- Импульсные блоки питания.



2 Серводвигатели

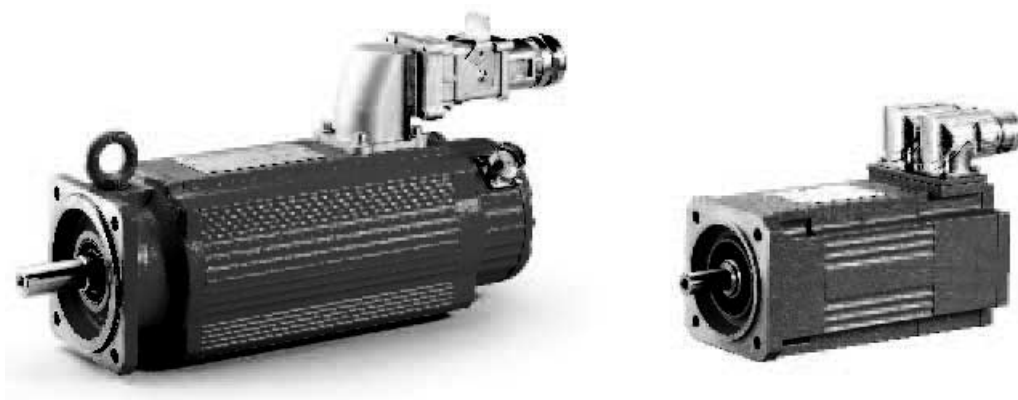
Характеристики серводвигателя

Серводвигатели обладают следующими характеристиками:

- высокая динамика,
- высокая точность позиционирования,
- высокая перегрузочная способность в широком диапазоне частоты вращения.

Кроме того, серводвигатели имеют следующие особенности:

- высокая точность поддержания заданной частоты вращения;
- широкий диапазон регулирования частоты вращения;
- малое время разгона;
- малое время регулирования вращающего момента;
- большой пусковой момент;
- малый момент инерции;
- малая масса;
- компактная конструкция.



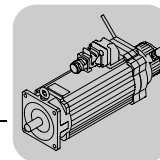
59855axx

Рис. 2. Пример серводвигателей SEW серии CM.. и CMP..

Базовая конструкция

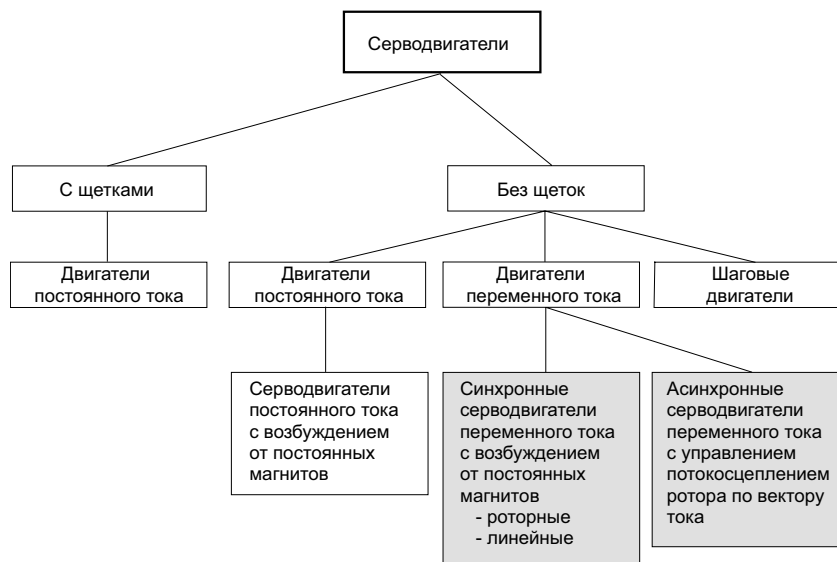
Основными элементами конструкции серводвигателя являются:

- ротор;
- статор;
- элементы для подключения в виде штекерных разъемов или клеммной коробки;
- датчик обратной связи.



2.1 Обзор современных серводвигателей

Семейство серводвигателей можно разделить на следующие группы:



56160aru

Рис. 3. Обзор серводвигателей

Важнейшие отличительные особенности обусловлены следующими факторами:

- конструкция двигателей (статор, ротор);
- необходимые системы регулирования;
- система обратной связи (датчики).

До недавних лет в качестве сервоприводов применялись бесщеточные двигатели постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов. Управление обеспечивали тиристорные или транзисторные преобразователи-регуляторы.

Благодаря техническому прогрессу в области силовых полупроводниковых приборов и микроконтроллеров в девяностых годах существенно выросло применение синхронных серводвигателей.

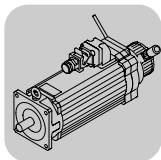
Сегодня синхронные серводвигатели переменного тока с возбуждением от постоянных магнитов занимают большой сегмент рынка, чем асинхронные серводвигатели. Это обусловлено характеристиками двигателей.

Далее синхронные серводвигатели переменного тока с возбуждением от постоянных магнитов и асинхронные серводвигатели переменного тока рассматриваются более подробно.

Определение

В данной брошюре для обозначения двигателей используются следующие термины:

- **Синхронный серводвигатель** $\triangleq$ синхронный серводвигатель переменного тока с возбуждением от постоянных магнитов.
- **Асинхронный серводвигатель** $\triangleq$ асинхронный двигатель с датчиком обратной связи, специально спроектированным для работы от преобразователя частоты.
- **Синхронный линейный двигатель** $\triangleq$ линейный синхронный серводвигатель переменного тока с возбуждением от постоянных магнитов.



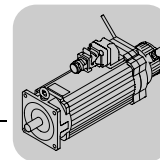
Серводвигатели

Характеристики синхронных и асинхронных серводвигателей

2.2 Характеристики синхронных и асинхронных серводвигателей

Характеристики синхронных серводвигателей
Высокая динамика.
Умеренно хорошие характеристики регулирования при больших моментах инерции нагрузки.
Высокая перегрузочная способность до 6 Мн (номинального момента, зависит от типа двигателя).
Высокая допустимая тепловая нагрузка в длительном режиме по всему диапазону частоты вращения.
Охлаждение посредством конвекции, теплоотвода и теплового излучения.
Высокое качество регулирования частоты вращения.
Возможность длительной работы с пусковым моментом на низких скоростях.
Широкий диапазон регулирования частоты вращения, 1:5000 и более (зависит от преобразователя).
Пульсация вращающего момента (Cogging) на низкой частоте вращения. Соответствующие определения см. на Стр. 89.

Характеристики асинхронных серводвигателей
Средняя ... высокая динамика.
Хорошие характеристики регулирования при больших моментах инерции нагрузки.
Высокая перегрузочная способность (почти 3-кратная).
Высокая допустимая тепловая нагрузка в длительном режиме в зависимости от частоты вращения.
Охлаждение крыльчаткой на валу или принудительное.
Высокое качество регулирования частоты вращения.
Из-за высокой тепловой нагрузки невозможна длительная работа в нижнем диапазоне частоты вращения без вентилятора принудительного охлаждения.
Широкий диапазон регулирования частоты вращения, 1:5000 и более (зависит от преобразователя).
Практически полное отсутствие пульсации вращающего момента (Cogging). Соответствующие определения см. на Стр. 89.



2.3 Устройство синхронных серводвигателей

**Базовая
конструкция**

Основными элементами конструкции синхронного серводвигателя являются:

- ротор с постоянными магнитами;
- статор с соответствующей обмоткой;
- элементы для подключения в виде штекерного разъема или клеммной коробки;
- датчик обратной связи.

**Различное
исполнение**

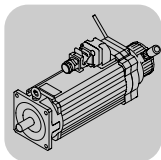
Различают следующие варианты синхронных серводвигателей:

- исполнение с корпусом $\triangle$ корпусные двигатели;
- исполнение без корпуса $\triangle$ бескорпусные двигатели.

Исполнение без корпуса означает, что роль корпуса двигателя выполняет пакет пластин статора. Это позволяет полностью использовать весь профиль пакета стальных пластин.

Далее оба варианта исполнения представлены на примере двигателей SEW:

- исполнение с корпусом: двигатель CMP;
- исполнение с корпусом: двигатель CM/DS;
- исполнение без корпуса: двигатель CMD.



Серводвигатели

Устройство синхронных серводвигателей

2.3.1 Устройство двигателя CMP

Серводвигатели CMP отличаются очень высокой динамикой, низким моментом инерции ротора, компактностью и высокой удельной мощностью.

Серводвигатели CMP – это двигатели с корпусом.

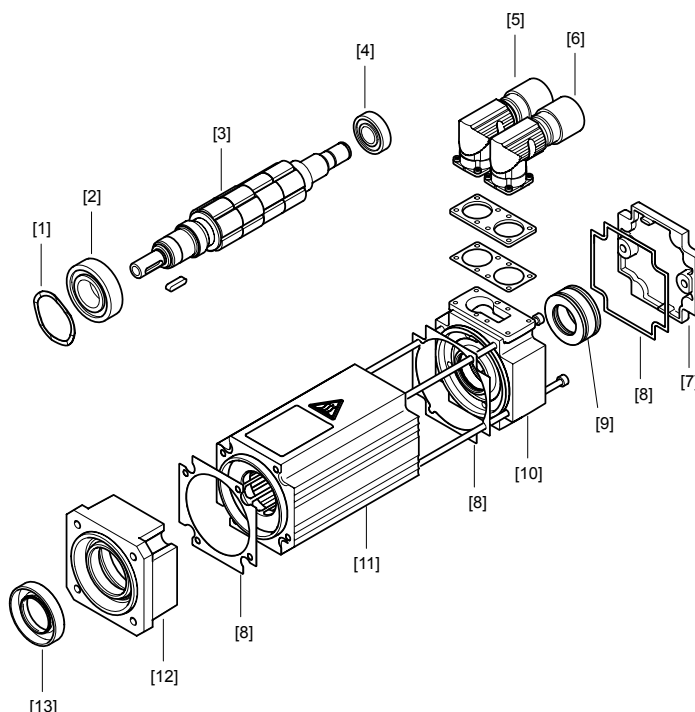
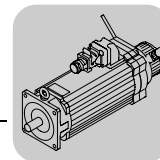


Рис. 4. Устройство синхронного серводвигателя CMP компании SEW-EURODRIVE 58993xx

[1]	Компенсационная шайба	[8]	Прокладка
[2]	Радиальный шарикоподшипник	[9]	Резольвер
[3]	Ротор	[10]	Задний подшипниковый щит
[4]	Радиальный шарикоподшипник	[11]	Корпус со статором
[5]	Сигнальный штекерный разъем SM / SB	[12]	Подшипниковый щит с фланцем
[6]	Силовой штекерный разъем SM / SB	[13]	Манжета
[7]	Крышка корпуса		

Характеристики и опции двигателя CMP

- Перегрузочная способность до 4,5*Мн (номинального момента).
- Статор с зубцовой обмоткой.
- Возможность монтажа на стандартные редукторы и редукторы для сервопривода через адаптор.
- Возможность прямого монтажа на редуктор.
- Возможность установки резольвера или датчика абсолютного отсчета с высокой разрешающей способностью.
- Изменяемое расположение штекерных разъемов.
- Вентилятор принудительного охлаждения (опция).
- Тормоз с катушкой 24 В (опция).
- Датчик КТУ для тепловой защиты двигателя.



2.3.2 Устройство двигателя CM/DS

Серводвигатели CM/DS отличаются широким диапазоном вращающего момента, хорошими характеристиками регулирования при больших моментах инерции нагрузки, применением мощного рабочего тормоза и разнообразием опций.

Серводвигатели CM/DS – это двигатели с корпусом.

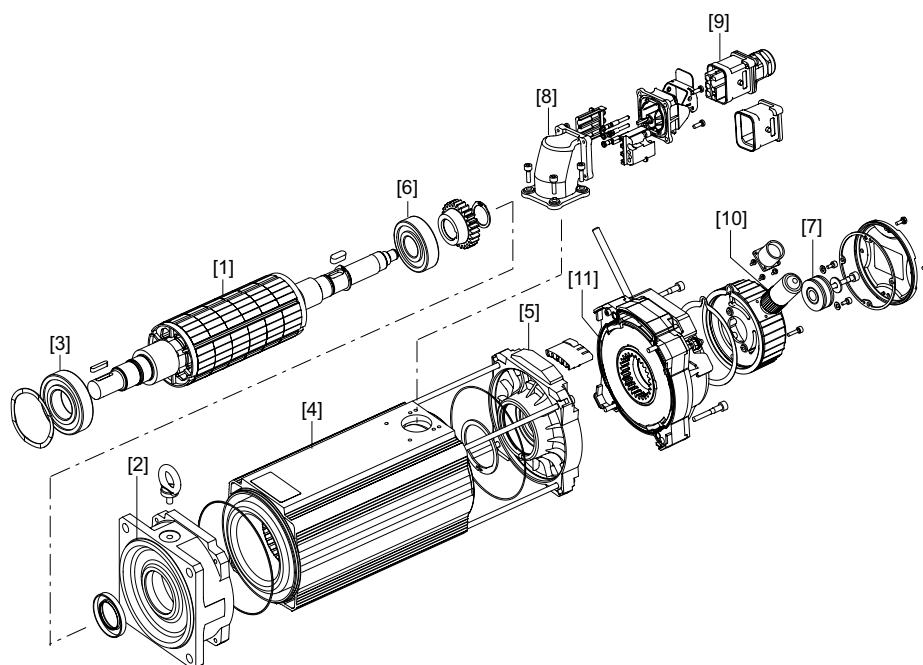
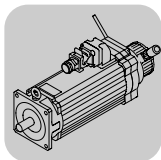


Рис. 5. Устройство синхронного серводвигателя CM компании SEW-EURODRIVE 57559axx

- | | |
|---------------------------------|---|
| [1] Ротор | [7] Резольвер |
| [2] Подшипниковый щит с фланцем | [8] Корпус штекерного разъема |
| [3] Радиальный шарикоподшипник | [9] Штекер силового кабеля, в сборе |
| [4] Корпус со статором | [10] Штекер сигнального кабеля, в сборе |
| [5] Задний подшипниковый щит | [11] Тормоз, в сборе |
| [6] Радиальный шарикоподшипник | |

Характеристики и опции двигателя CM/DS

- Перегрузочная способность до 4*Мн (номинального момента).
- Статор с шаблонной обмоткой.
- Возможность монтажа на стандартные редукторы и редукторы для сервопривода через адаптор.
- Возможность прямого монтажа на редуктор.
- Возможность установки резольвера или датчика абсолютного отсчета с высокой разрешающей способностью.
- Штекерный разъем или клеммная коробка.
- Вентилятор принудительного охлаждения (опция).
- Рабочий тормоз (опция).
- Датчик TF или КТУ для тепловой защиты двигателя.
- 2-й вал со стороны датчика (опция).
- Усиленные подшипники (опция).



Серводвигатели

Устройство синхронных серводвигателей

2.3.3 Устройство двигателя CMD

Серводвигатели CMD отличаются особой компактностью, оптимальным выбором частоты вращения и набором опций для установок с прямым (безредукторным) приводом.

Серводвигатели CMD – это двигатели без корпуса.

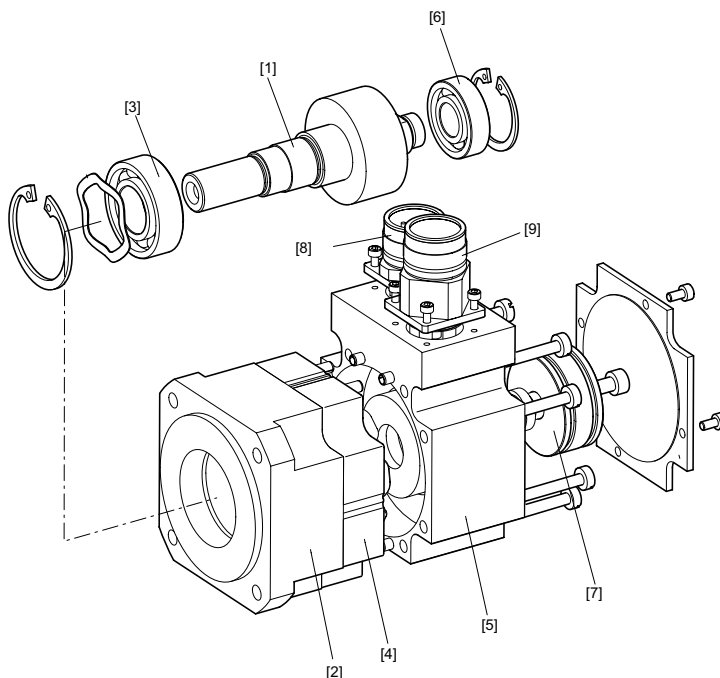


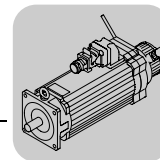
Рис. 6. Устройство синхронного серводвигателя CMD компании SEW-EURODRIVE

57562axx

[1]	Ротор	[6]	Радиальный шарикоподшипник
[2]	Подшипниковый щит с фланцем	[7]	Резольвер
[3]	Радиальный шарикоподшипник	[8]	Разъем сигнального кабеля
[4]	Статор	[9]	Разъем силового кабеля
[5]	Задний подшипниковый щит		

Характеристики и опции двигателя CMD

- Почти 6-кратная перегрузочная способность.
- Статор с шаблонной обмоткой.
- Тормоз с катушкой 24 В (опция).
- Возможность установки резольвера или датчика абсолютного отсчета с высокой разрешающей способностью.
- Датчик КТУ для тепловой защиты двигателя.



2.3.4 Конструкция ротора

Ротор синхронных серводвигателей оснащен постоянными магнитами.

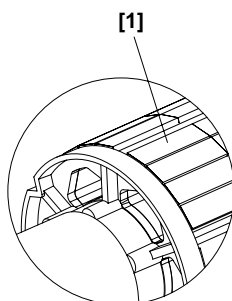
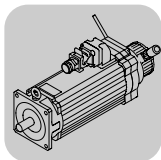


Рис. 7. Наклеенные на ротор магниты

57561axx

[1] Наклеенные магниты

Эти магниты, как правило, изготавливаются из спеченного редкоземельного материала неодим-железо-бор. Магнитные свойства этого материала значительно превосходят свойства обычных ферритовых магнитов. Это позволяет сделать конструкцию более компактной при равной выходной мощности.



2.4 Принцип действия синхронных серводвигателей

При подключении двигателя к соответствующему сервоусилителю в обмотках статора создается так называемое вращающееся поле статора. Это вращающееся поле оказывает магнитную силу на ротор. За счет сцепления магнитных полей статора и ротора последний разгоняется и вращается с такой же угловой скоростью, что и вращающееся поле, то есть синхронно.

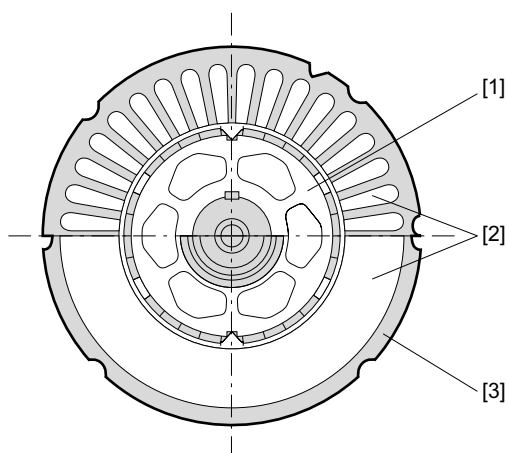


Рис. 8. Схематическое изображение петлевой (шаблонной) обмотки

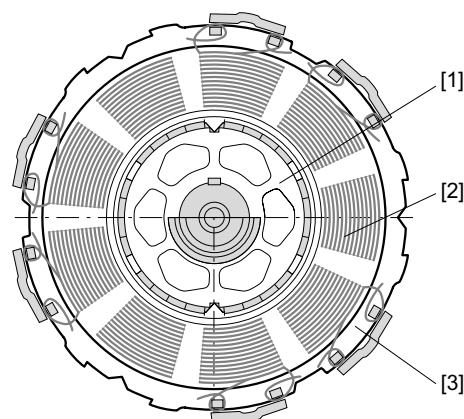


Рис. 9. Схематическое изображение зубцовой обмотки

- | | | | |
|-----|---------|-----|---------------|
| [1] | Ротор | [3] | Пакет пластин |
| [2] | Обмотка | | |

Если двигатель нагружен, происходит сдвиг вращающегося поля ротора относительно вращающегося поля статора. Полюса ротора отстают от полюсов вращающегося поля статора на роторный угол α . С увеличением роторного угла вращающий момент двигателя возрастает. Максимальный вращающий момент достигается в тот момент, когда роторный угол $\alpha = 90^\circ$. В этом случае полюса ротора находятся точно между двух полюсов статора.

При этом полюс статора перед полюсом ротора "тянет" за собой ротор, а полюс статора за полюсом ротора "толкает" ротор.

Если роторный угол α принимает значение $> 90^\circ$, вращающий момент снижается. Двигатель находится в нестабильном рабочем режиме и может остановиться. Это может привести к его перегреву и повреждению.

Действительно: $M = f(U, I, \sin \alpha)$.

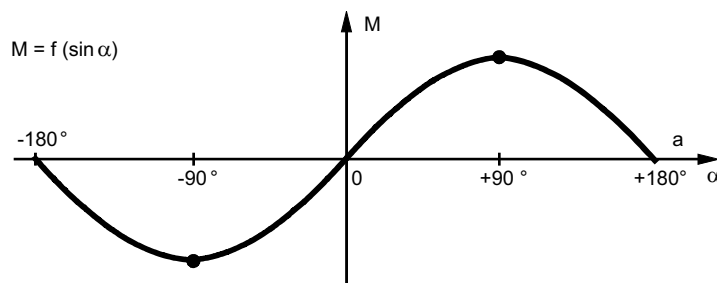
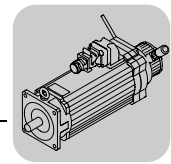


Рис. 10. Зависимость вращающего момента от роторного угла

56165axx



2.4.1 Оптимальная рабочая точка

Чтобы синхронный двигатель работал с максимальным вращающим моментом, роторный угол α должен составлять 90° . Соответственно, в двигательном режиме полюс статора должен опережать полюс ротора на 90° , а в генераторном режиме – отставать на 90° . Система управления двигателем выполняет расчет трех фазных токов двигателя по заданному моменту и уставке тока в соответствии с моделью двигателя, чтобы создавать в нем нужное результирующее магнитное поле.

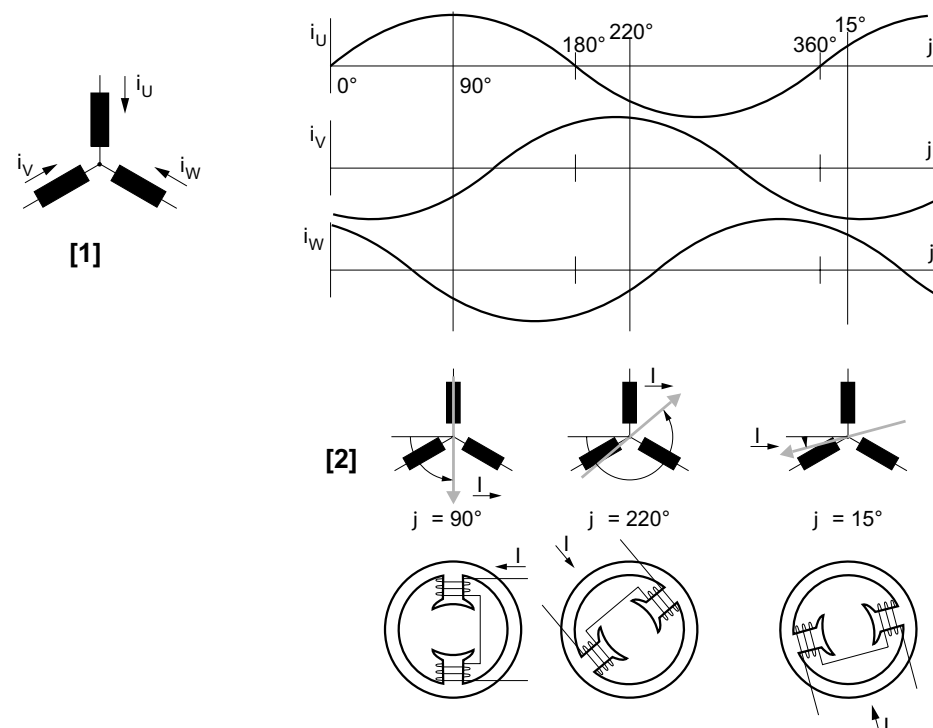
Для этого необходимо контролировать положение ротора с помощью соответствующего датчика. К действительному положению ротора прибавляется (или вычитается, в зависимости от направления вращающего момента) 90° и рассчитываются соответствующие фазные токи.

Для каждого положения ротора определяется соответствующее положение вращающегося поля статора. При этом рассчитываются величина и распределение поля статора по ротору, т. е. поле статора зависит от ротора.

Упомянутый в этом контексте роторный угол α является электрическим углом. Для 6-полюсного двигателя электрический угол 90° соответствует пространственному углу 30° .

2.4.2 Соотношение токов статора

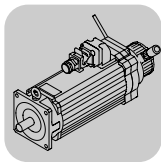
Соотношение токов статора имеет следующий вид:



56166ахх

Рис. 11. Соотношение токов статора

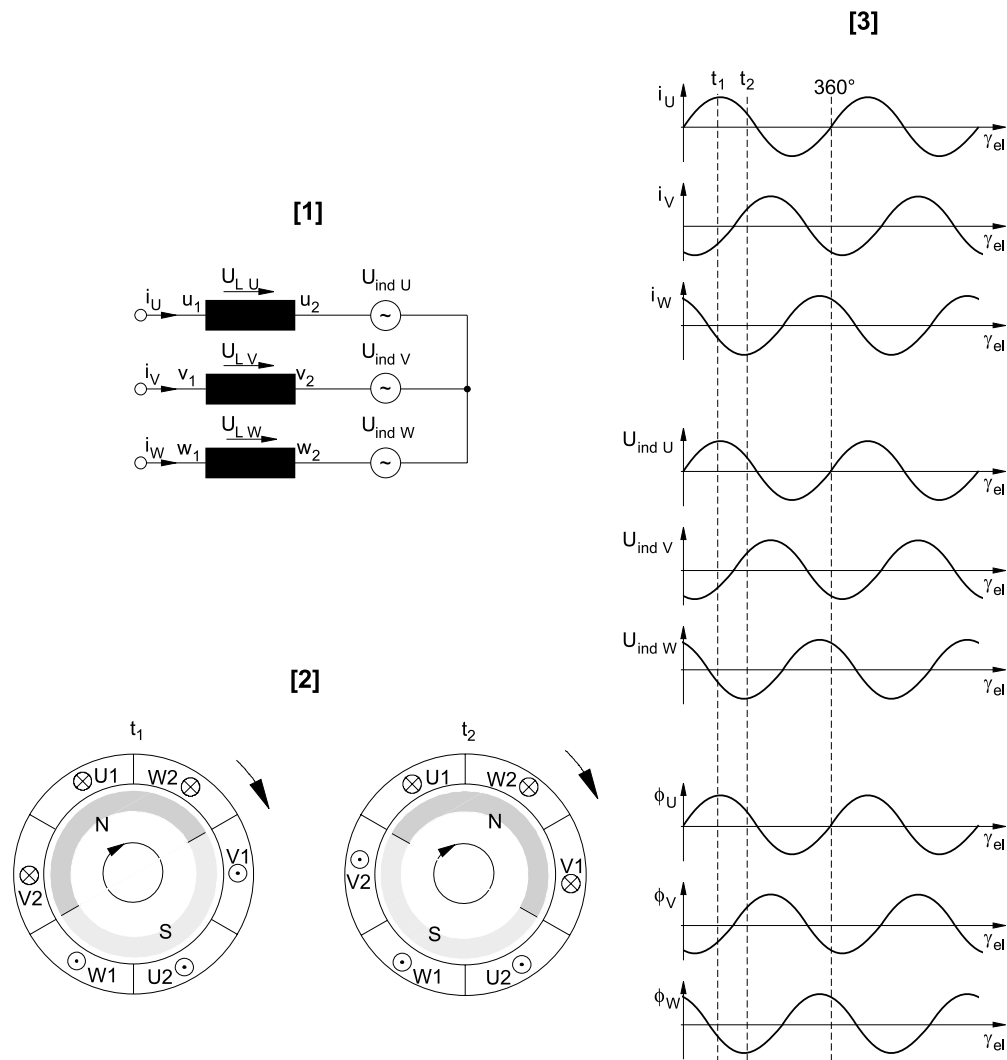
- [1] Пространственный вектор тока I = векторная сумма токов i_U, i_V, i_W
- [2] На рисунке показано соотношение токов статора при создании вращающего момента в различные моменты времени



2.4.3 Питание синусоидальной формы

Большая часть предлагаемых сегодня синхронных серводвигателей работает от синусоидального тока, подаваемого на статорную обмотку соответствующим сервоусилителем. На все три фазы двигателя ток подается одновременно.

Рис. 12 показывает величину тока и напряжения в моменты времени t_n .

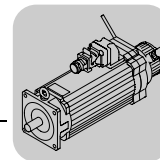


56169aru

Рис. 12. Питание синусоидальной формы

- [1] Схема замещения синхронного серводвигателя
- [2] Положение ротора в момент времени t_n
- [3] Диаграмма: ток, напряжение и магнитный поток во времени при постоянной величине напряжения
- U_{ind} Напряжение, индуцированное вращением ротора (ЭДС)
- U_L Падение напряжения на индуктивности

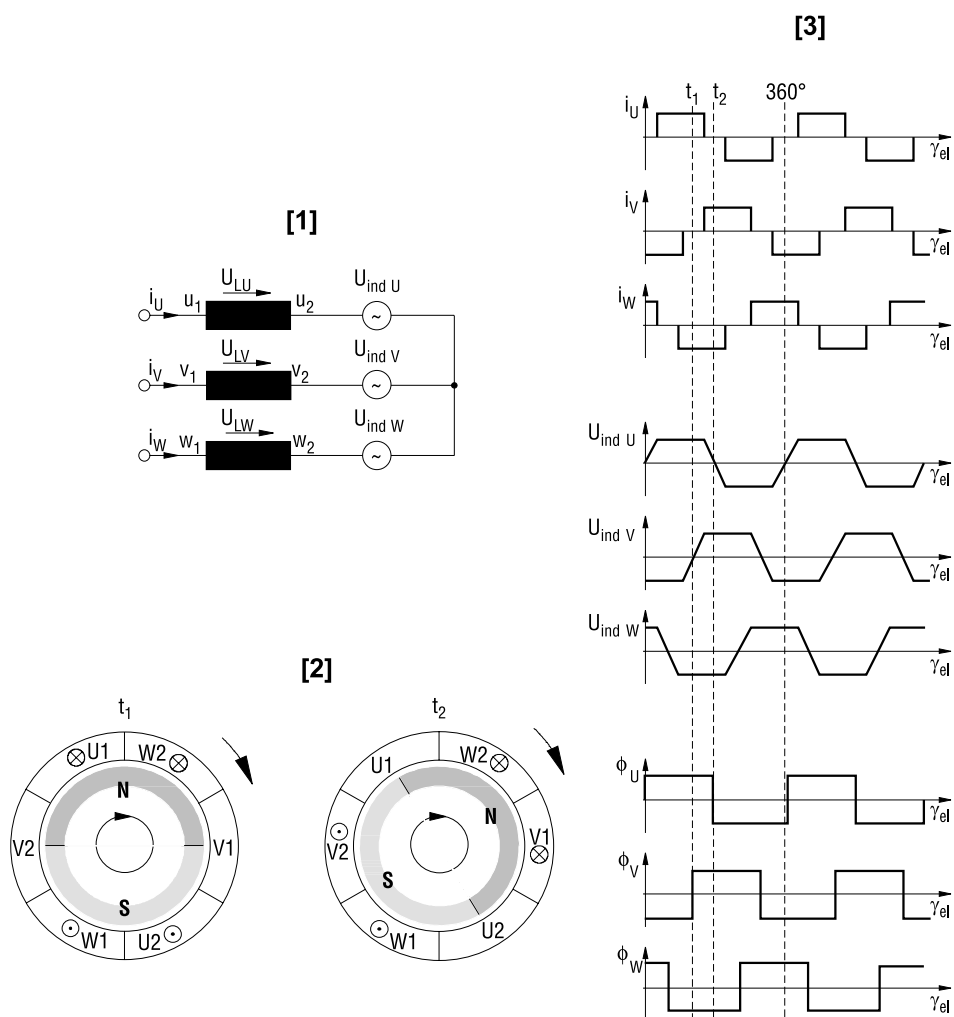
При этом сервоусилитель подает на каждую фазу прямоугольные широтно-модулированные импульсы постоянного напряжения из звена постоянного тока. Действующее значение этого напряжения на выходных клеммах соответствует значению реального синусоидального напряжения. За счет тактированных импульсов постоянного напряжения (с синусоидальной модуляцией) на двигатель подается синусоидальный ток, который, в свою очередь, возбуждает синусоидальный магнитный поток. Это обеспечивает высокую стабильность вращающего момента и частоты вращения, даже при низких угловых скоростях.



Обычно синхронные серводвигатели оснащаются резольверами или sin/cos-датчиками абсолютного отсчета. На основании данных, полученных от такого датчика положения, сервоусилитель обеспечивает роторный угол в 90° . Условием этого является точная ориентация датчика положения по полюсам постоянных магнитов. Только в этом случае внешнее магнитное поле статора может создаваться со сдвигом в 90° . Этот процесс также называется коммутацией.

2.4.4 Питание прямоугольной формы

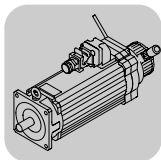
Кроме питания синусоидальной формы на двигатели может подаваться и питание прямоугольной формы, которое сегодня используется в основном для вспомогательных задач. Как видно из названия, питание двигателя осуществляется с помощью напряжения прямоугольной формы из звена постоянного тока.



56170aru

Рис. 13. Питание прямоугольной формы

- [1] Схема замещения синхронного серводвигателя
- [2] Положение ротора в момент времени t_n
- [3] Диаграмма: ток, напряжение и магнитный поток во времени при постоянной величине напряжения
- U_{ind} Напряжение, индуцированное вращением ротора (ЭДС)
- U_L Падение напряжения на индуктивности



Серводвигатели

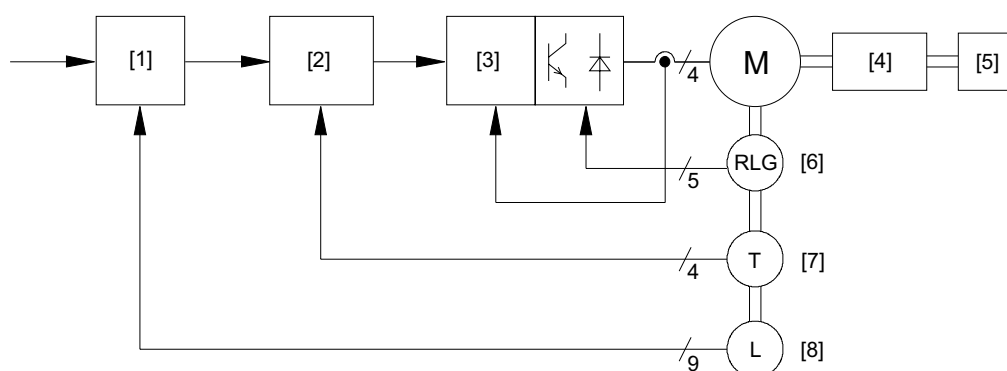
Принцип действия синхронных серводвигателей

На обмотки двигателя подаются импульсы тока прямоугольной формы. Они индуцируют в двигателе напряжение трапецеидальной формы. Благодаря особой конструкции двигателя в воздушном зазоре возникает прямоугольное распределение индукции, что обеспечивает создание постоянного вращающего момента.

Регуляторы тока управляются импульсами прямоугольной формы с использованием датчика положения ротора.

Для контроля частоты вращения необходим дополнительный датчик (как правило, тахогенератор).

Абсолютное положение ротора контролируется с помощью датчика положения.



56171axx

Рис. 14. Структура регулирования с датчиками для двигателя с питанием прямоугольной формы

[1] Регулятор положения	[5] Нагрузка
[2] Регулятор частоты вращения	[6] Датчик положения ротора
[3] Регулятор тока	[7] Тахогенератор
[4] Редуктор	[8] Датчик положения

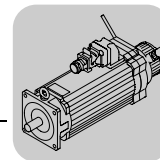
Преимущества и недостатки питания прямоугольной формы в сравнении с питанием синусоидальной формы:

Преимущества питания прямоугольной формы

- более простые и дешевые датчики (например датчик Холла, фотоячейка для определения положения ротора);
- простое формирование управляющих сигналов для тока.

Недостатки питания прямоугольной формы

- менее стабильная частота вращения;
- менее стабильный вращающий момент, особенно на низкой частоте вращения;
- необходимость дополнительного датчика для контроля частоты вращения.



2.4.5 Предельные механические характеристики

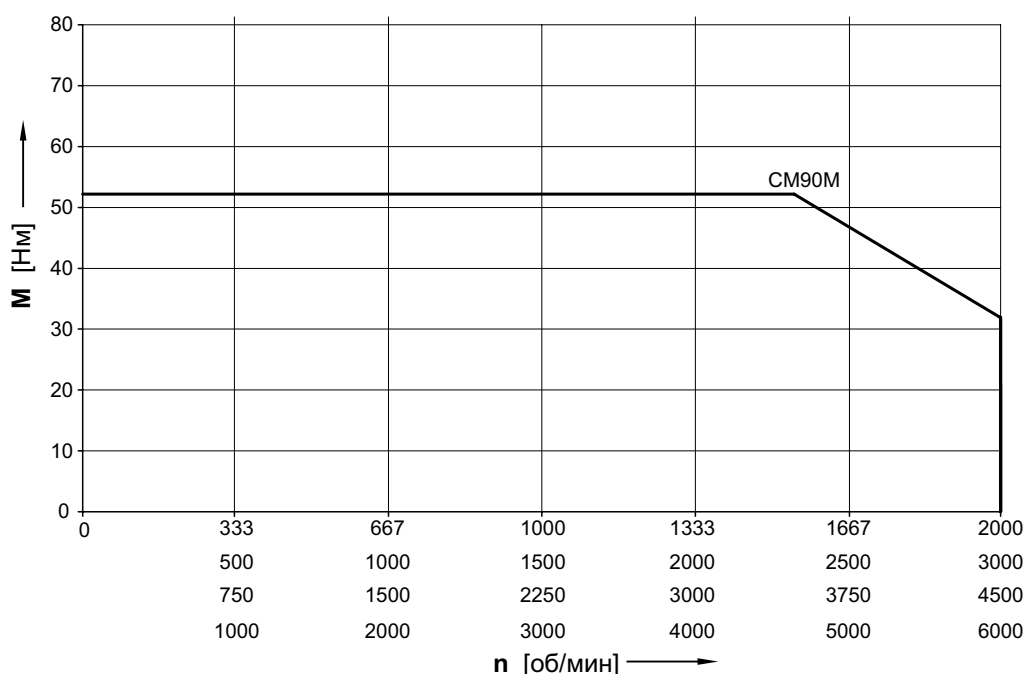
Предельная характеристика в динамическом режиме

Предельная механическая характеристика в динамическом режиме позволяет судить о том, какой максимальный вращающий момент и при какой частоте вращения может развивать двигатель.

Следует учитывать, что сервоусилитель должен обеспечивать достаточный ток, чтобы двигатель мог достигать максимального вращающего момента.

При проектировании следует также учитывать падение максимального вращающего момента в верхнем диапазоне частоты вращения. Это обусловлено противодействующим напряжением (противо-ЭДС), создаваемым в двигателе в соответствии с законом электромагнитной индукции. Это напряжение в статорных катушках создают постоянные магниты ротора. Из-за противодействующего напряжения сервоусилитель более не способен подавать ток, необходимый для максимального вращающего момента, так как интервал между выходным напряжением сервоусилителя и индуцированным противодействующим напряжением становится слишком малым.

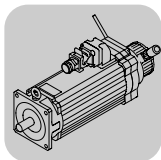
На Рис. 15 показана предельная механическая характеристика в динамическом режиме для синхронного серводвигателя CM90M с номинальной частотой вращения 2000, 3000, 4500 и 6000 об/мин.



57563aru

Рис. 15. Предельная механическая характеристика CM90M в динамическом режиме

При проектировании привода следует учитывать, что максимальный вращающий момент нагрузки при соответствующей частоте вращения должен находиться ниже или на кривой предельной характеристики двигателя в динамическом режиме (см. главу 8 "Проектирование").



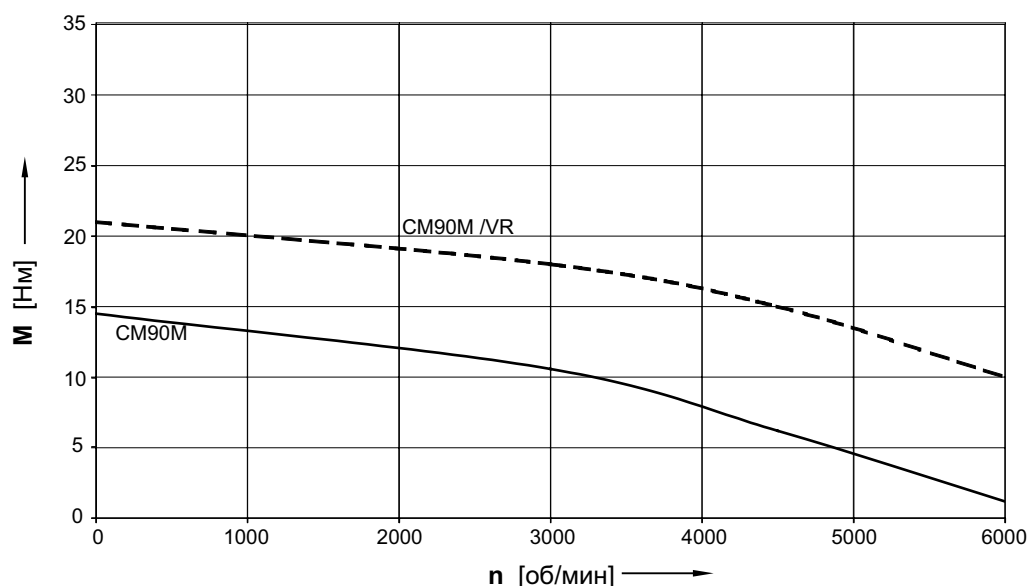
Предельная характеристика с учетом тепловой нагрузки

При проектировании привода для определения степени использования двигателя по нагреву рассчитываются средняя частота вращения двигателя и эффективный вращающий момент за один цикл нагрузки. По этим данным определяется рабочая точка двигателя.

Эта рабочая точка должна находиться ниже предельной характеристики двигателя с учетом тепловой нагрузки, иначе возникает тепловая перегрузка двигателя. И в этом случае необходимо учитывать снижение характеристики с увеличением частоты вращения. Поэтому определение рабочей точки при проектировании является обязательным. Рабочая точка рассчитывается по средне-квадратичному моменту M_{eff} и средней частоте вращения n .

Снижение характеристики вызывается, в основном, различными потерями: от вихревых токов, на перемагничивание и в железе.

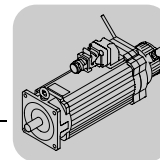
На Рис. 16 показана предельная механическая характеристика с учетом тепловой нагрузки для синхронного серводвигателя CM90M с номинальной частотой вращения 6000 об/мин.



57564aru

Рис. 16. Предельная механическая характеристика CM90M с учетом тепловой нагрузки

Символы "/VR" в конце условного обозначения двигателя означают, что двигатель оснащен вентилятором принудительного охлаждения.



2.5 Устройство асинхронных серводвигателей

Базовая конструкция

Основными элементами конструкции асинхронного серводвигателя являются:

- ротор с короткозамкнутой обмоткой;
- статор с трехфазной обмоткой;
- силовой разъем (клеммная коробка);
- датчик.

Далее асинхронные серводвигатели представлены на примере серии двигателей CT/CV компании SEW-EURODRIVE.

2.5.1 Устройство двигателя CT/CV

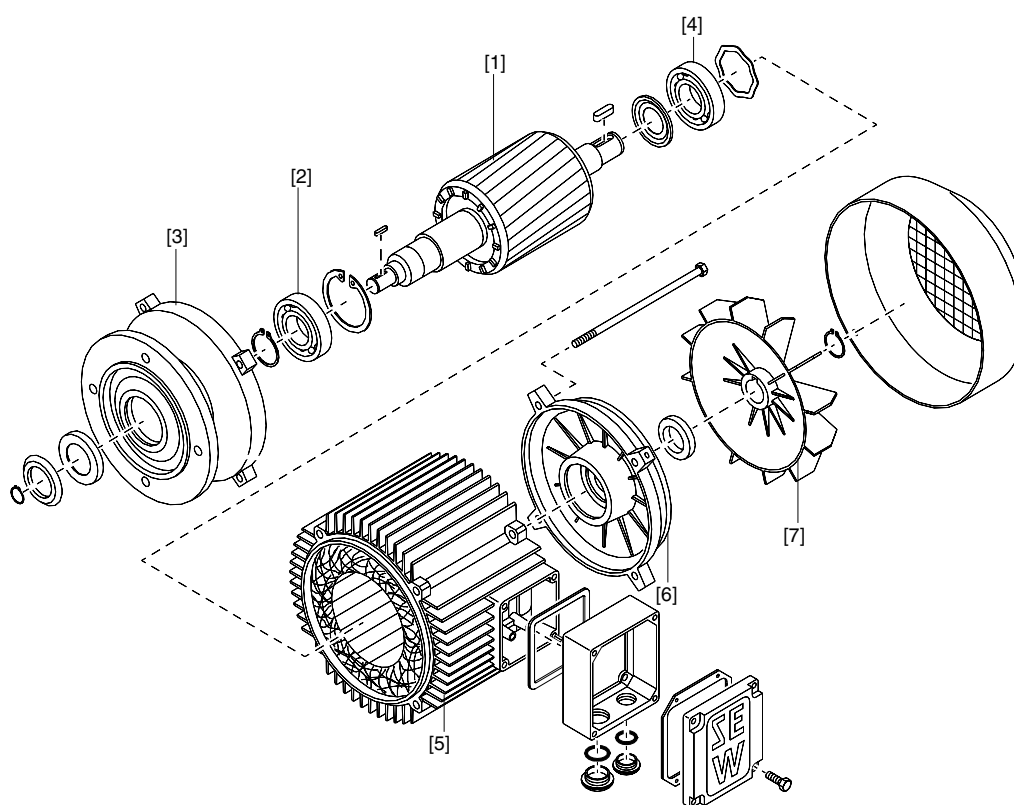
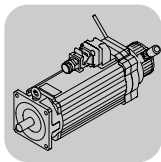


Рис. 17. Устройство асинхронного серводвигателя CT/CV компании SEW-EURODRIVE 57572AXX

- | | |
|---------------------------------|------------------------------|
| [1] Ротор, в сборе | [5] Статор, в сборе |
| [2] Радиальный шарикоподшипник | [6] Задний подшипниковый щит |
| [3] Подшипниковый щит с фланцем | [7] Крыльчатка |
| [4] Радиальный шарикоподшипник | |



Серводвигатели

Принцип действия асинхронных серводвигателей

Статоры асинхронного и синхронного серводвигателей имеют принципиально одинаковую конструкцию, а их роторы существенно различаются. Асинхронный серводвигатель имеет ротор с короткозамкнутой обмоткой, в котором магнитное поле создается за счет индукции.

Статор состоит из трех катушек, намотанных на каркас из пластин трансформаторной стали и расположенных с интервалом в 120° (электрических градусов). Выводы катушек могут быть соединены по схеме "звезда" или "треугольник".

Характеристики и опции двигателей СТ/CV

- Диапазон вращающего момента от 3 до 200 Нм.
- Статор с шаблонной обмоткой.
- 3-кратная перегрузочная способность по крутящему моменту.
- Хорошие характеристики регулирования при больших моментах инерции нагрузки.
- Для длительной работы на низкой частоте вращения необходим вентилятор принудительного охлаждения.
- Для определения положения ротора комплектуются инкрементным датчиком (стандартное исполнение) или датчиком абсолютного отсчета (опция).
- Возможно исполнение с тормозом.

2.6 Принцип действия асинхронных серводвигателей

Обмотка ротора асинхронного серводвигателя имеет форму цилиндрической клетки. С торцов отдельные стержни клетки удерживаются замыкающими кольцами. При работе ток протекает через замыкающее кольцо в стержни. Каждый проводник, через который протекает ток, создает магнитное поле. Если это магнитное поле смещено относительно магнитного поля статора, на ротор действует сила. Эта сила максимальна в том случае, если магнитное поле ротора расположено перпендикулярно магнитному полю статора.

За счет векторного алгоритма управления (с ориентацией по векторам магнитного потока ротора и статора) оба магнитных поля рассчитываются таким образом, что асинхронный серводвигатель может работать намного динамичнее, чем при параметрическом управлении U/f .

Векторное управление – это управление взаиморасположением двух существующих магнитных полей. На синхронных и асинхронных серводвигателях оно реализуется одинаково. Чтобы добиться постоянного намагничивания ротора асинхронного серводвигателя, необходимо учитывать множество физических ограничений, обусловленных конструкцией ротора. Асинхронные серводвигатели не имеют постоянных магнитов, поэтому магнитный поток в роторе должен создаваться магнитным полем статора. То есть, создание магнитного потока и вращающего момента зависит от тока статора.

По аналогии с трансформатором, первичная обмотка которого через шихтованный магнитопровод связана с вторичной обмоткой и индуцирует в ней напряжение, в асинхронном серводвигателе статорная обмотка связана с короткозамкнутым ротором через воздушный зазор. По закону электромагнитной индукции справедливо:

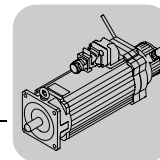
$$U_i = -N \times \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

U_i Индуцированное напряжение [В]

N Число витков

$\Delta\Phi / \Delta t$ Изменение магнитного потока во времени [Вб/с]

Из этого уравнения видно, что для поддержания вторичного напряжения и вместе с ним вторичного тока необходимо изменение магнитного потока. Эта закономерность аналогична условиям работы трансформатора, где передача постоянного напряжения невозможна.



При подаче тока на статор возникает магнитный поток, который пронизывает ротор. Согласно правилу Ленца индукционный ток всегда имеет такое направление, что его собственный магнитный поток компенсирует изменения внешнего магнитного потока, вызвавшие этот ток. То есть, возникающий в роторе ток противодействует изменению внешнего магнитного потока. За счет активных потерь в роторе этот ток затухает, если ток статора больше не изменяет своего магнитного потока. Ток в роторе затухает в течение электрической постоянной времени T_r ротора:

$$T_r = \frac{L_r}{R_r}$$

T_r	Электрическая постоянная времени ротора
L_r	Индуктивность ротора
R_r	Сопротивление ротора

Современные алгоритмы управления по вектору тока, как и разработанный в SEW-EURODRIVE режим регулирования CFC (**C**urrent **F**lux **C**ontrol), способны создавать известное по направлению и напряженности магнитное поле и при этом вызывать в роторе ток с перпендикулярно ориентированным магнитным полем. Такой алгоритм управления позволяет асинхронным двигателям работать с характеристиками сервопривода.

Пример

Ниже поясняется принцип действия векторного регулирования со взаимной ориентацией магнитных полей ротора и статора на примере асинхронного двигателя (АД):

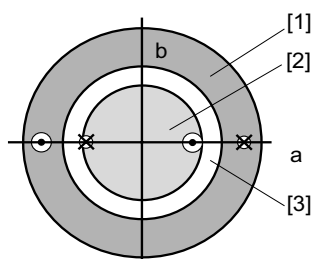


Рис. 18. Ток статора при t_0

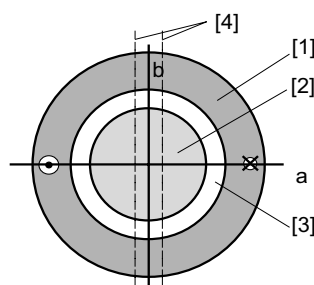


Рис. 19. Намагничивание АД

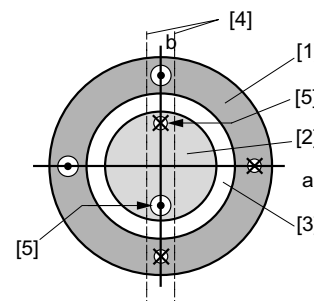
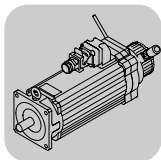


Рис. 20. Создание вращающего момента

- | | |
|-----|--|
| [1] | Статор |
| [2] | Ротор |
| [3] | Воздушный зазор |
| [4] | Силовые линии магнитного поля |
| [5] | Проводник с показанным направлением тока |

1. В момент t_0 на статор подается ток, см. Рис. 18. Направление этого первоначального тока – произвольное. Магнитное поле индукционного тока противодействует изменению магнитного потока (правило Ленца), т. е. токи ротора и статора направлены противоположно.
2. Происходит намагничивание асинхронного серводвигателя, поскольку состояние в момент t_0 сохраняется до тех пор, пока ток в роторе не затухнет. Этот ток затухает вследствие активного сопротивления в роторе. Время намагничивания определяется электрической постоянной времени T_r ротора. За время полного затухания можно принять $5 \times T_r$. Теперь асинхронный серводвигатель можно считать намагниченным, см. Рис. 19.

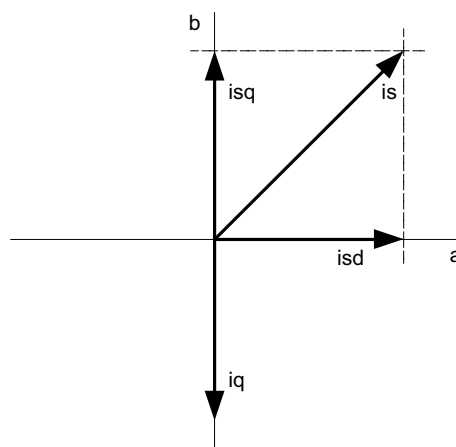


3. **Импульсная** подача дополнительной составляющей тока, ориентированной **перпендикулярно** первоначальному току, снова вызывает ток в роторе, см. Рис. 20. Это состояние сравнимо с состоянием, описанным в пункте 1, однако:

- подача тока на статор зависит от направления тока в пункте 1;
- время пребывания в этом состоянии короче, чем в пункте 1.

Подаваемый на статор ток I_{sd} обеспечивает намагничивание. Ток ротора I_q создает вращающий момент, он соответствует повернутой на 180° составляющей тока I_{sq} . Поскольку при векторном управлении обе составляющие тока известны, можно определить вращающий момент. Согласно законам электромагнитной индукции на проводник с током, в данном случае ротор, в магнитном поле действует сила F . Эта сила обеспечивает вращающий момент.

Благодаря расположению своего магнитного поля под прямым углом ток ротора, создающий вращающий момент, используется оптимально. Результирующее магнитное поле начинает ориентироваться на угол тока статора. Скорость этой ориентации изменяется по экспоненте и зависит от постоянной времени T_r ротора.



56197ахх

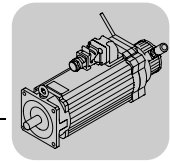
Рис. 21. Упрощенное представление токов в статоре и роторе в момент времени t_1

isq	2-я составляющая тока статора (создание вращающего момента, при t_1)
is	Ток статора при t_1 (полный ток)
isd	1-я составляющая тока статора (намагничивание, при t_1)
iq	Ток ротора при t_1

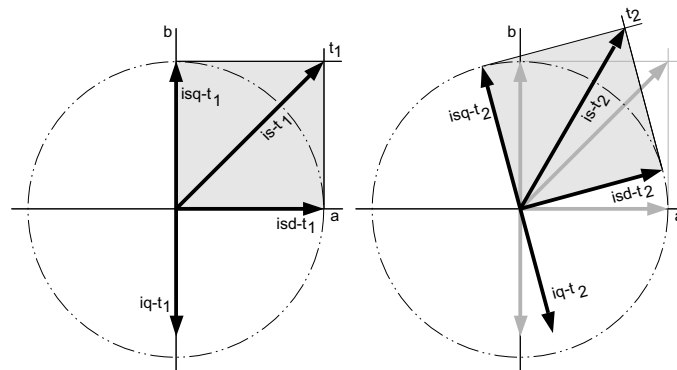
Если такая подача тока на статор сохраняется в течение времени $4 \times T_r \dots 5 \times T_r$, ток ротора уменьшается до нуля и магнитное поле ориентируется на угол тока статора. В этом случае результирующий вращающий момент был бы равен нулю, и ориентация полей была бы потеряна.

Поэтому время пребывания t в этом состоянии выбирается гораздо короче постоянной времени ротора T_r :

$$t \ll T_r$$



В этом случае при подаче тока на статор происходит переориентация токов статора:

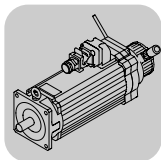


56198axx

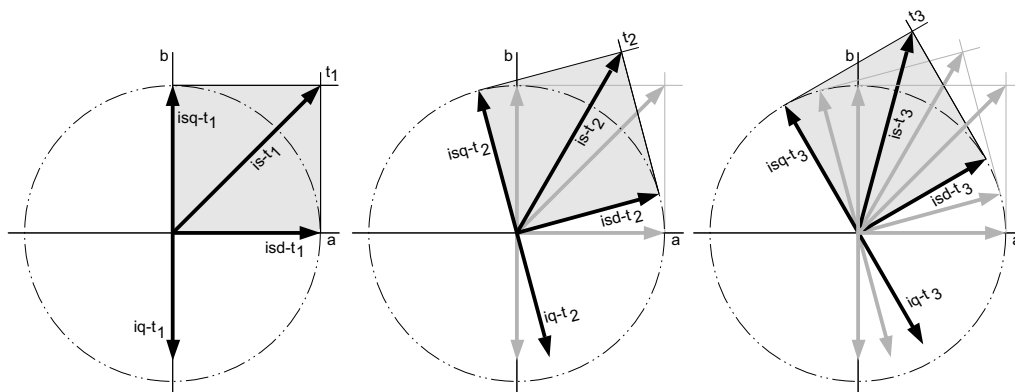
Рис. 22. Упрощенное представление изменения токов в статоре и роторе в момент времени t_2

- $isd-t_1$ 1-я составляющая тока статора (намагничивание, при t_1)
- $is-t_1$ Ток статора при t_1 (полный ток)
- $isq-t_1$ 2-я составляющая тока статора (создание вращающего момента, при t_1)
- $iq-t_1$ Затухший ток ротора при t_1
- $isd-t_2$ Переориентированная 1-я составляющая тока статора при t_2
- $is-t_2$ Ток статора после переориентации при t_2 (полный ток)
- $isq-t_2$ Переориентированная 2-я составляющая тока статора при t_2
- $iq-t_2$ Ток ротора после переориентации при t_2

У современных серворегуляторов период дискретизации составляет 62,5-250 мкс в зависимости от прикладной задачи, для которой предназначен регулятор. По истечении периода дискретизации происходит переориентация тока статора, а вместе с ним и тока ротора. За счет краткости периода дискретизации угол переориентации очень мал. В результате переориентации на малый угол обеспечивается малое изменение магнитного потока, а с ним и минимальная пульсация вращающего момента.



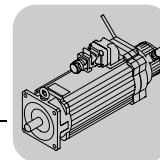
Ориентация полей восстанавливается посредством замены составляющих тока статора на переориентированные токи статора I_{sd} и I_{sq} . Таким образом, векторы тока статора описывают окружность:



56200ахх

Рис. 23. Упрощенное представление изменения токов в статоре и роторе в момент времени t_n

$isd-t_1$	1-я составляющая тока статора при t_1
$is-t_1$	Ток статора при t_1
$isq-t_1$	2-я составляющая тока статора при t_1
$iq-t_1$	Ток ротора при t_1
$isd-t_2$	Переориентированная 1-я составляющая тока статора при t_2
$is-t_2$	Ток статора после переориентации при t_2
$isq-t_2$	Переориентированная 2-я составляющая тока статора при t_2
$iq-t_2$	Ток ротора после переориентации при t_2
$isd-t_3$	Переориентированная 1-я составляющая тока статора при t_3
$is-t_3$	Ток статора после переориентации при t_3
$isq-t_3$	Переориентированная 2-я составляющая тока статора при t_3
$iq-t_3$	Ток ротора после переориентации при t_3



2.6.1 Механическая характеристика

На примере асинхронного серводвигателя CV100M4 компании SEW-EURODRIVE рассмотрим подробнее основные данные для проектирования с соответствующей механической характеристикой. Обычно известны следующие данные двигателя:

Тип двигателя	: CV100M4
Номинальная частота вращения n_N	: 2100 об/мин
Номинальный вращающий момент M_N	: 15 Нм
Номинальный ток I_N	: 8,1 А
Базовая частота вращения $n_{баз}$	: 1760 об/мин (в комбинации с сервоусилителем на 4 кВт)

При проектировании базовой частоте вращения следует уделить особое внимание. Базовой называется частота вращения, до достижения которой создается максимальный вращающий момент при использовании максимального пикового тока сервоусилителя. Если двигатель работает на частоте вращения выше базовой, его вращающий момент существенно снижается. Это отчетливо видно по следующим графикам.

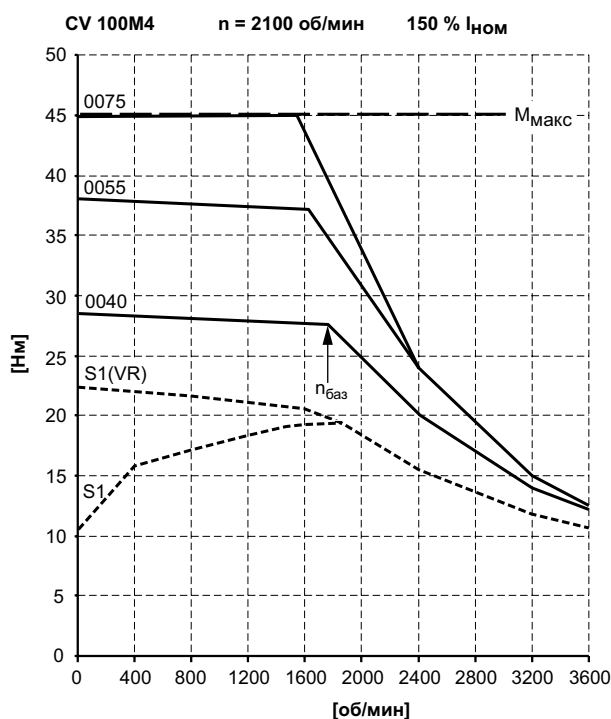


Рис. 24. Характеристики асинхронного серводвигателя CV100M4

56203aru

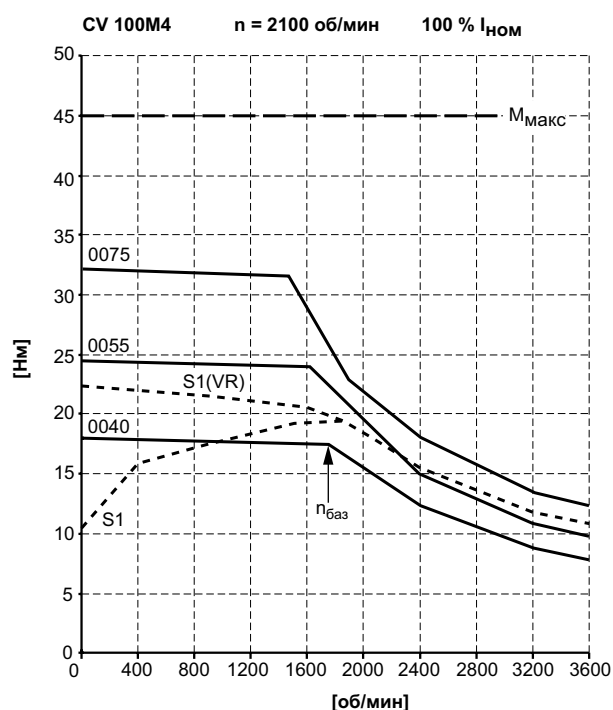
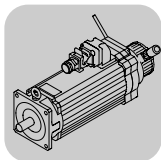


Рис. 25. Характеристики асинхронного серводвигателя CV100M4

56202aru

M_{max}	: Максимальный вращающий момент двигателя
0075	: Механическая характеристика с сервоусилителем на 7,5 кВт при 150 % / 100 % номинального тока сервоусилителя
0055	: Механическая характеристика с сервоусилителем на 5,5 кВт при 150 % / 100 % номинального тока сервоусилителя
0040	: Механическая характеристика с сервоусилителем на 4 кВт при 150 % / 100 % номинального тока сервоусилителя
S1 (VR)	: S1-характеристика (продолжительный режим) с вентилятором принудительного охлаждения
S1	: S1-характеристика (продолжительный режим)
n_{base}	: Базовая частота вращения на примере сервоусилителя на 4 кВт

Мощность сервоусилителя выбирается по величине необходимого вращающего момента. Допустимые комбинации двигателя с сервоусилителями различной мощности дают в результате различные механические характеристики.



Серводвигатели

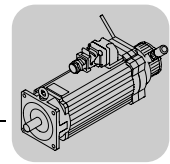
Принцип действия асинхронных серводвигателей

При проектировании следует учитывать, что эффективный вращающий момент нагрузки при средней частоте вращения должен быть не выше кривой S1 для выбранного двигателя. Если эффективный вращающий момент двигателя при средней частоте вращения находится выше кривой S1, возникает тепловая перегрузка двигателя.

Механические характеристики с указанием мощности сервоусилителя позволяют судить о том, с каким моментом и при какой частоте вращения может временно работать двигатель. Однако они не поясняют, может ли этот момент поддерживаться в продолжительном режиме. Поэтому использование характеристики S1 является обязательным. Для механизмов, работающих в повторно-кратковременном режиме, эффективный момент рассчитывается как среднее значение за 1 цикл нагрузки.

Чтобы избежать тепловой перегрузки двигателя при работе на низких скоростях, может потребоваться установка вентилятора принудительного охлаждения. Характеристика S1 (VR) показывает, что двигатель способен в продолжительном режиме развивать значительно больший вращающий момент (особенно в нижнем диапазоне частоты вращения). При проектировании привода, используя значения эффективного вращающего момента и средней частоты вращения, можно определить рабочую точку двигателя. По расположению рабочей точки можно судить о необходимости вентилятора принудительного охлаждения.

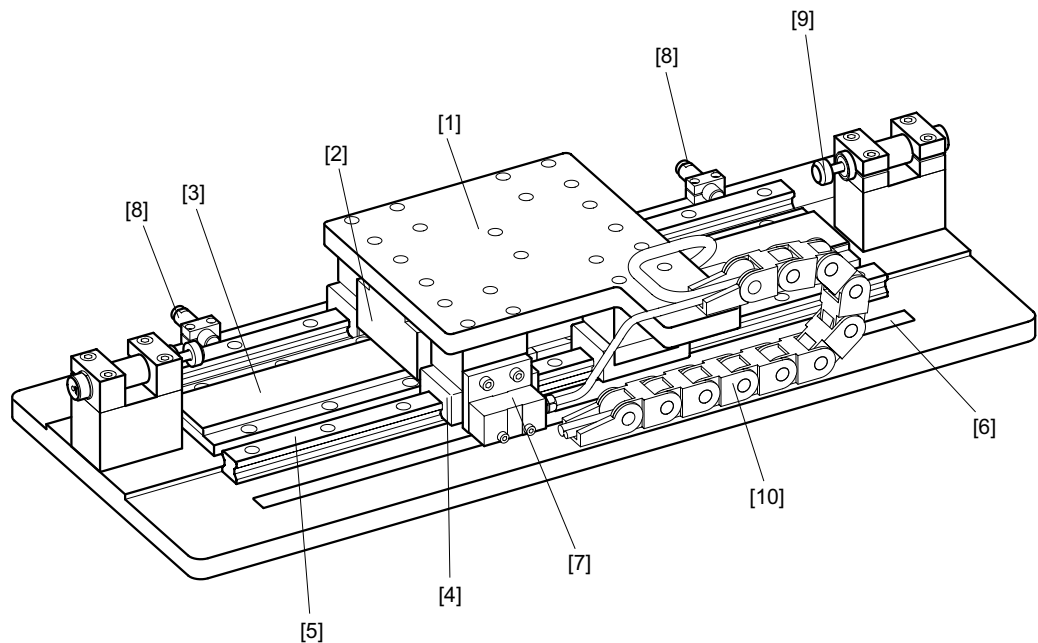
Перегрузочная способность допустимых комбинаций "двигатель-сервоусилитель" дает в результате различные механические характеристики в динамическом режиме. И в этом случае при проектировании следует учитывать, что из-за опасности тепловой перегрузки данный вращающий используется лишь кратковременно, см. главу 8 "Проектирование".



2.7 Синхронный линейный двигатель

По принципу действия синхронные линейные двигатели соответствуют ротационным синхронным серводвигателям. Линейные двигатели применяются в таких условиях, где требуется, например, максимальная динамика и точность позиционирования. Поскольку синхронный линейный двигатель состоит из множества компонентов, его сборка выполняется уже на самой машине, в которую он встраивается.

На следующем рисунке схематически показана линейная приводная система в сборе.



56174axx

Рис. 26. Линейная приводная система

[1]	Платформа первичной части	[6]	Измерительная шкала
[2]	Первичная часть (подвижная)	[7]	Считывающая головка датчика положения
[3]	Вторичная часть (неподвижная)	[8]	Концевой выключатель
[4]	Направляющая тележка	[9]	Буфер
[5]	Направляющая	[10]	Подводка питания

Преимущества синхронных линейных двигателей

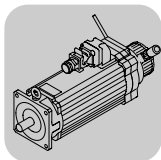
Синхронный линейный двигатель имеет следующие преимущества в сравнении с ротационной системой:

- более высокие скорости;
- более высокие ускорения;
- прямой привод (без редуктора, зубчатого ремня и т. п.), т. е. отсутствие люфта;
- практически полное отсутствие износа;
- более высокая точность позиционирования.

Применение

Основное применение синхронные линейные двигатели находят в следующих отраслях:

- системы переработки грузов (транспортировка и логистика);
- упаковочная техника;
- станкостроение;



Серводвигатели

Синхронный линейный двигатель

- сборочные технологии;
- специальное машиностроение.

В этих отраслях синхронные линейные двигатели заменяют традиционные решения с редукторным приводом (использующие шпиндели, зубчатые рейки, ремни, цепи и т. п.).

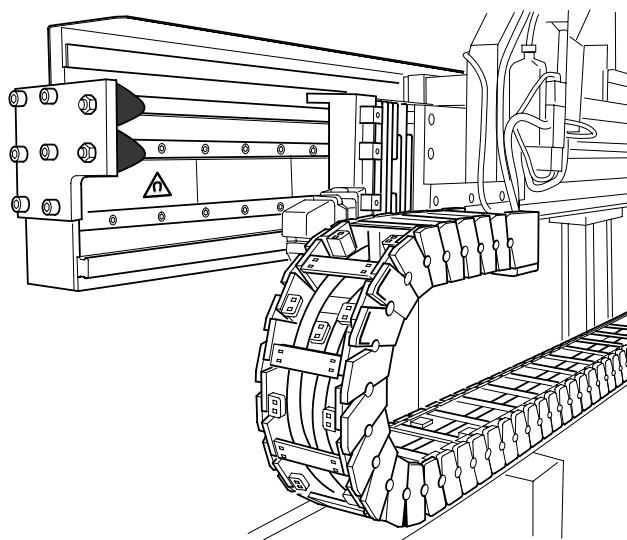


Рис. 27. Синхронный линейный двигатель в системе переработки грузов

56227ахх

2.7.1 Принципиальные конструкции синхронных линейных двигателей

Синхронные линейные двигатели могут иметь две разные конструкции:

- конструкция с длинным статором;
- конструкция с коротким статором.

Конструкция с длинным статором

При такой принципиальной конструкции участок перемещения определяется размером одной или нескольких первичных частей, которые длиннее магнитной шины. Магнитная шина находится на подвижных салазках (вторичная часть), т. е. вторичная часть не требует подачи питания и поэтому теоретически допускает перемещение на неограниченное расстояние.

Конструкция с длинным статором используется главным образом в оборудовании транспортировки и логистики.

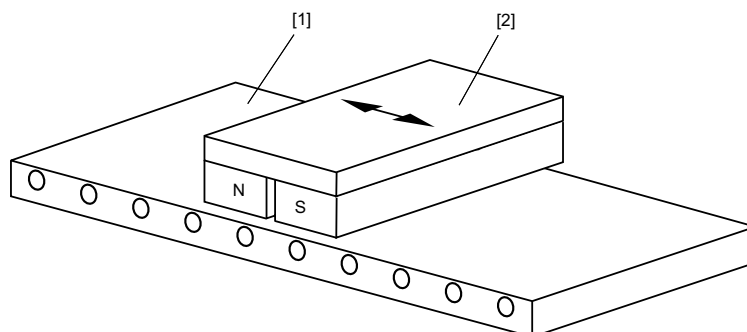
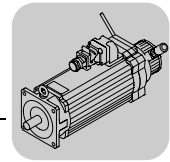


Рис. 28. Конструкция с длинным статором

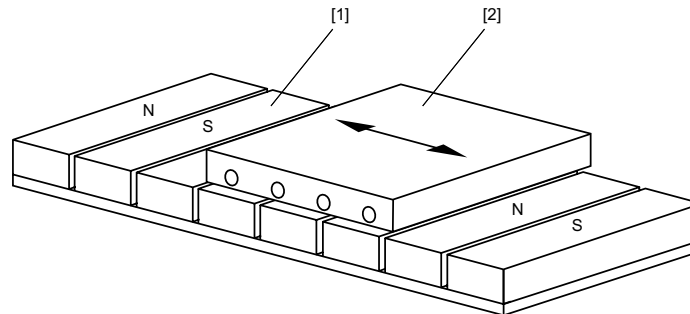
56181ахх

- [1] Первичная часть: статор с обмоткой
- [2] Вторичная часть: реактивная часть с возбуждением от постоянных магнитов



Конструкция с коротким статором

При такой принципиальной конструкции перемещается первичная часть, которая короче магнитной шины. Конструкция с коротким статором используется главным образом в сервоприводах машиностроительного оборудования.



56175axx

Рис. 29. Конструкция с коротким статором

- [1] Вторичная часть: реактивная часть с возбуждением от постоянных магнитов
- [2] Первичная часть: статор с обмоткой

В данном издании подробнее рассматривается только принципиальная конструкция с коротким статором, как более распространенная.

Устройство и принцип действия двигателей с коротким статором

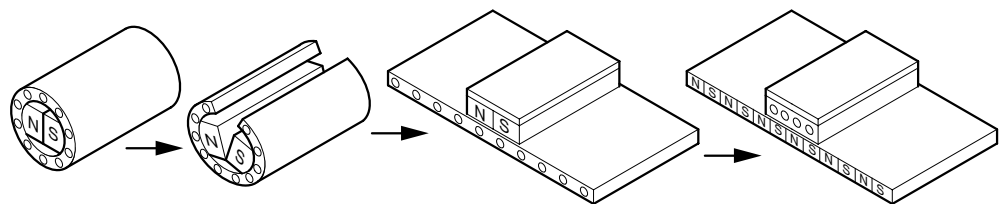
Как и ротационные приводы синхронный линейный привод состоит из двух частей, первичной и вторичной.

Исходя из принципа действия:

- Первичная часть линейного двигателя соответствует статору ротационного двигателя. Она содержит пакет пластин, обмотку двигателя и термодатчики.
- Вторичная часть линейного двигателя соответствует ротору ротационного двигателя. Она состоит из стальной опоры и наклеенных постоянных магнитов.

Первичная и вторичная части залиты компаундом.

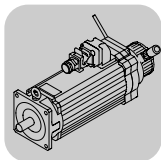
Значительное сходство в принципе действия линейного и ротационного двигателя становится очевидным, если "разрезать и развернуть" ротационный двигатель, см. Рис. 30.



56184axx

Рис. 30. Принцип действия линейного двигателя

Однако в отличие от ротационного двигателя подвижной частью линейного двигателя может быть либо первичная, либо вторичная часть.



Серводвигатели

Синхронный линейный двигатель

В целях достижения рабочих характеристик очень важным условием для линейного серводвигателя является сохранение точного воздушного зазора между первичной и вторичной частями. Если воздушный зазор увеличивается, мощность двигателя снижается. Слишком большой зазор приводит к остановке двигателя. Таким образом, основным условием исправной работы системы является точная подготовка монтажной поверхности. Воздушный зазор реализуется через систему линейных направляющих и монтажную платформу.

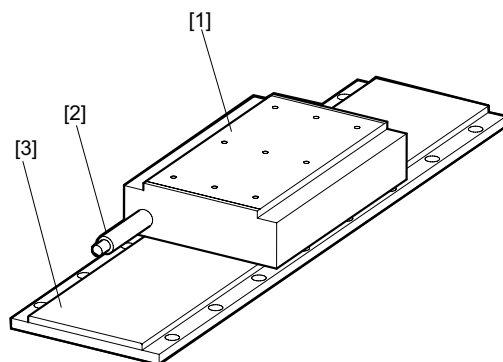


Рис. 31. Устройство

52619axx

- [1] Первичная часть
- [2] Подключение электропитания
- [3] Вторичная часть с постоянными магнитами

2.7.2 Механическая характеристика

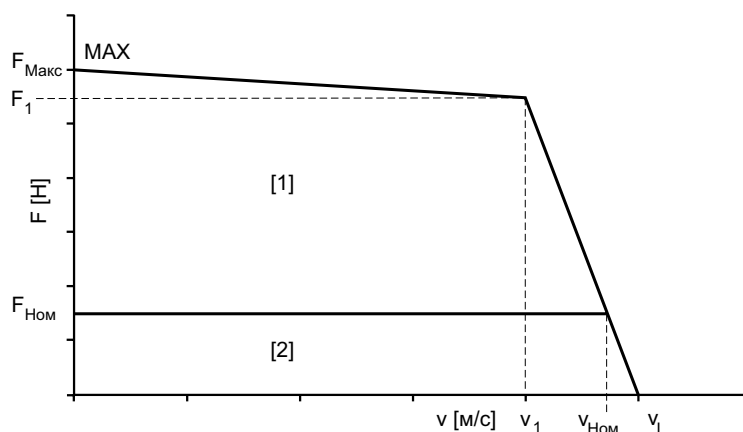
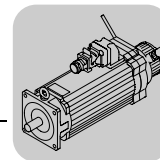


Рис. 32. Механическая характеристика

56186aru

- [1] Зона динамического ограничения усилий
- [2] Зона теплового ограничения усилий
- $F_{\text{Ном}}$ Номинальное усилие [Н]
Номинальное усилие зависит от следующих факторов:
 - размеры платформы первичной части;
 - толщина платформы первичной части;
 - температура окружающей среды;
 - высота над уровнем моря.
- F_1 Максимальное усилие [Н] при скорости до v_1
- $F_{\text{Макс}}$ Максимальное усилие [Н]
- v_L Теоретически максимальная скорость перемещения [м/с]
- v_1 Скорость [м/с], до достижения которой развивается усилие F_1
- $v_{\text{Ном}}$ Скорость [м/с], до достижения которой развивается номинальное усилие



Эта характеристика позволяет судить о том, какие максимальные усилия $F_{\text{Макс}}$ и $F_{\text{Ном}}$ можно прилагать при соответствующих скоростях двигателя. При этом следует учитывать, что для достаточного охлаждения двигателя при его нагреве должен обеспечиваться соответствующий отвод тепла от двигателя в окружающую среду. Размеры поверхности охлаждения зависят главным образом от размеров опорной поверхности и толщины первичной части.

Как правило, можно использовать два способа охлаждения:

- конвекционное охлаждение;
- водяное охлаждение.

В зависимости от случая применения могут потребоваться дополнительные меры:

- вентиляторы для конвекционного охлаждения;
- водяное охлаждение;
- водяное охлаждение с дополнительной термооболочкой.

Конвекционное охлаждение

Принцип действия такого охлаждения – излучение тепла и нагрев окружающего воздуха. Для эффективного отвода тепла необходимо при проектировании учитывать площадь поверхности двигателя.

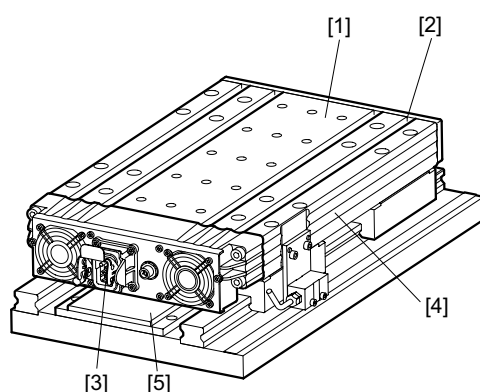
Дополнительно установленные на двигатель вентиляторы обеспечивают постоянный воздушный поток и усиливают отдачу тепловой энергии.

Свойства системы охлаждения с вентиляторами принудительного охлаждения:

- высокая эффективность охлаждения;
- простота конструкции, т. е. незначительные технические и финансовые затраты.

Решение SEW: SL2-Advance System / SL2-Power System

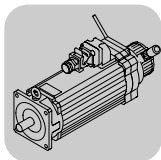
Синхронные линейные двигатели SL2-Advance System и SL2-Power System компании SEW-EURODRIVE имеют полностью интегрированную монтажно-охлаждающую систему. Это позволяет заменить сложное и дорогое водяное охлаждение вполне простым способом воздушного охлаждения. Это воздушное охлаждение, работающее по принципу конвекции, при почти равной эффективности является экономически выгодным вариантом.



53419AXX

Рис. 33. Синхронный линейный двигатель SL2- Advance System и SL2-Power System

- | | |
|---|--|
| [1] SL2-Advance / -Power System | [4] Первичная часть (не видна), встроенная в платформу |
| [2] Система пазов для монтажа рабочего оборудования | [5] Вторичная часть |
| [3] Штекерный разъем | |



Серводвигатели

Синхронный линейный двигатель

Такая конструкция обеспечивает гораздо более эффективное использование номинального усилия двигателя.

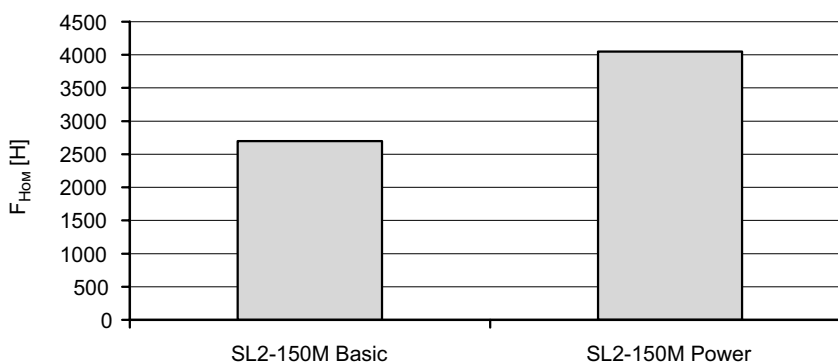


Рис. 34. Номинальные усилия SL2-150M в исполнении Basic и Power

56188aru

Двигатели SL2-Advance System и SL2-Power System наряду с преимуществами в охлаждении обеспечивают еще и очень удобное подключение и встраивание в машину. Кроме того, такая конструкция упрощает монтаж рабочего оборудования и техническое обслуживание.

Без применения двигателей SL2-Advance System и SL2-Power System пользователю потребуется овладеть определенными знаниями и опытом, чтобы установить линейную приводную систему. Номинальное усилие такой системы достигается только в том случае, если выбирается достаточно прочная конструкция, выдерживающая высокие ускорения. При этом потребуются учесть условия теплоотвода и последствия теплового расширения.

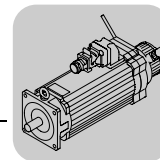
Водяное охлаждение

В машиностроении для линейных двигателей широко используется водяное охлаждение.

В первичной части линейного двигателя выполнены охлаждающие каналы, связанные с контуром водяного охлаждения.

Свойства такой системы:

- высокая эффективность охлаждения;
- за счет своей конструкции двигатель отдает значительно меньше тепловой энергии окружающим деталям машины;
- большие технические затраты:
 - проектирование;
 - охлаждающие каналы в первичной части;
 - необходимость теплообменника;
 - шланги для подачи воды;
- работа линейного двигателя без водяного охлаждения связана с потерей мощности;
- большие финансовые затраты.



Водяное охлаждение с термооболочкой

Первичная часть заключена в рубашку охлаждения и практически полностью отделена от окружающих деталей машины. Эта рубашка пронизана охлаждающими каналами.

Свойства такой системы:

- очень высокая эффективность охлаждения;
- тепловая изоляция двигателя от деталей машины, т. е. отсутствие теплового расширения;
- очень большие технические затраты:
 - проектирование;
 - термооболочка первичной части;
 - охлаждающие каналы в оболочке;
 - необходимость теплообменника;
 - шланги для подачи воды;
- большое монтажное пространство;
- потери мощности при работе без водяного охлаждения;
- очень большие финансовые затраты.

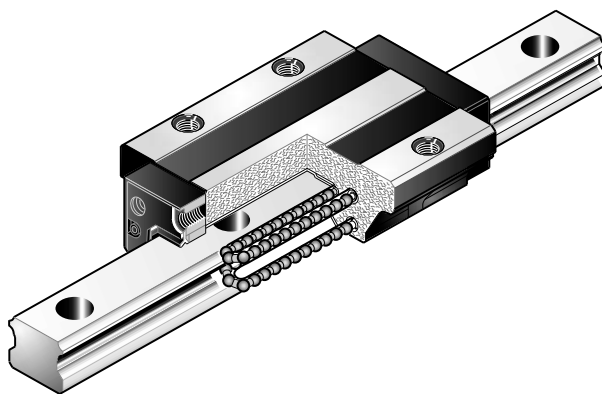
2.7.3 Дополнительное оборудование

Для возможности оптимального выполнения своих задач линейные приводные системы нуждаются в некоторых периферийных компонентах, описанных ниже.

Система линейных направляющих

Система линейных направляющих имеет следующие задачи:

- поддержание и ведение рабочей нагрузки;
- восприятие магнитных сил между первичной и вторичной частями;
- ведение измерительной системы;
- обеспечение воздушного зазора.

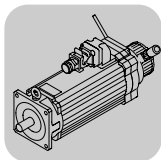


56187axx

Рис. 35. Система линейных направляющих

Критерии выбора систем линейных направляющих:

- высокие ускорения;
- высокая скорость перемещения;
- значительные изменения нагрузки;
- низкий уровень шума;
- восприятие поперечных усилий при тепловом расширении.



Серводвигатели

Синхронный линейный двигатель

В зависимости от применения и предъявляемых требований используются различные системы направляющих:

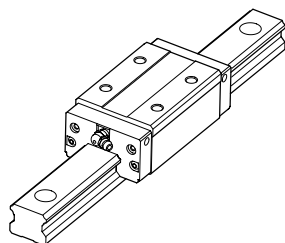


Рис. 36. Направляющая с телами качения 52892axx

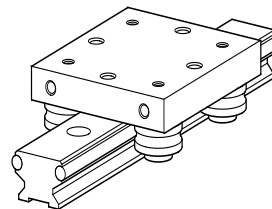


Рис. 37. Направляющая с опорными роликами 52894axx

Различные системы направляющих следует понимать как пример. В зависимости от применения исполнение системы направляющих может варьироваться. Как правило, выбор этой системы остается за заказчиком.

Буферы / амортизаторы

При работе линейные двигатели имеют высокую кинетическую энергию. Чтобы избежать повреждений в случае неисправности, настоятельно рекомендуется использовать буферы и амортизаторы для ограничения участка перемещения. Эти узлы поглощают кинетическую энергию при неправильной работе приводной системы и предохраняют систему от повреждений.

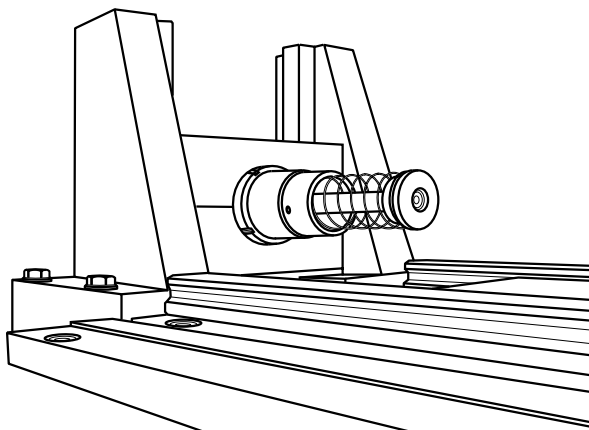
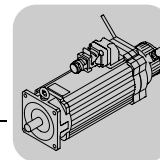


Рис. 38. Амортизатор-ограничитель 56145axx

Ввиду большого разнообразия вариантов применения компания SEW-EURODRIVE не поставляет буферы и амортизаторы. Этим занимаются соответствующие изготовители этих узлов.



Ниже приводятся характеристики буферов и амортизаторов.

Буферы

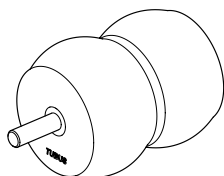


Рис. 39. Буфер

52896ахх

- простая конструкция;
- малые затраты;
- частичное отталкивание ударяющейся массы.

Амортизаторы

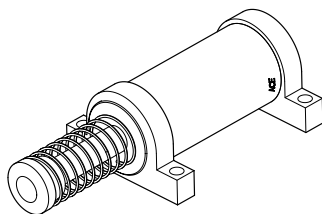
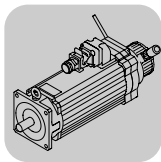


Рис. 40. Амортизатор

52893ахх

- высокая энергоемкость;
- благоприятный характер поглощения энергии;
- отсутствие отталкивания ударяющейся массы;
- малые силы реакции на движущуюся массу и окружающие детали конструкции.



Цепные коробки и шлейфовые кабели

Проложенные в цепных коробах (траках) сверхгибкие шлейфовые кабели обеспечивают подачу питания и передачу данных на передвижные потребители. Сверхгибкие кабели в цепных коробах оправдали себя во многих областях промышленности. Они применяются и для линейных двигателей.

При этом такие факторы, как:

- высокие ускорения,
- сравнительно длинные участки перемещения,
- сравнительно большие свободные участки

выдвигают специальные требования.

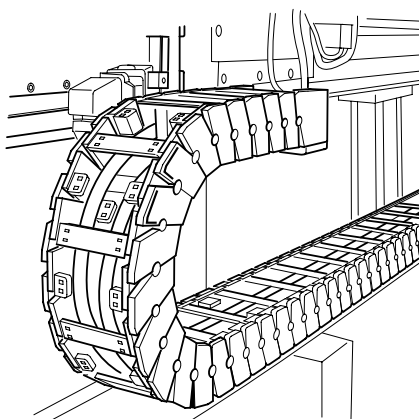


Рис. 41. Цепной короб

56190ахх

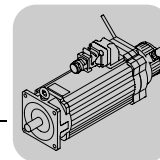
Критерии выбора

При использовании свободонесущих цепных коробов, т. е. когда верхняя ветвь цепи по всему участку перемещения не касается нижней ветви, критичной величиной является не столько скорость, сколько ускорение. Высокие ускорения вызывают вибрацию цепного короба, тем самым сокращая ее срок службы.

При выборе кабелей наряду с высокой динамикой нужно учитывать и другие критерии:

- радиусы изгиба;
- пригодность для прокладки в цепном коробе;
- экранированный кабель двигателя с отдельным экраном кабеля термодатчика → гибридный кабель;
- кабель датчика типа экранированной витой пары;
- штекерные соединения по нормам ЭМС;
- следует избегать завышения типоразмера кабелей → лишняя масса;
- возникающие токи → сечение кабельных жил;
- отраслевые и государственные стандарты.

Линейная приводная система, где подвижной является вторичная часть двигателя, имеет конструктивное преимущество, так как в этом случае кабели неподвижны.



2.8 Тормоза для ротационных серводвигателей

В данной главе дается краткий обзор тормозных систем, применяемых в серводвигателях SEW. Эта информация ни в коей мере не заменяет инструкций конкретного изготовителя или требований государственных / отраслевых правил техники безопасности. При проектировании они подлежат обязательному соблюдению.

Подробнее о тормозных системах для серводвигателей SEW-EURODRIVE см. в брошюре "Дисковые тормоза SEW" из серии "Практика приводной техники" или в каталогах соответствующих мотор-редукторов с серводвигателем.

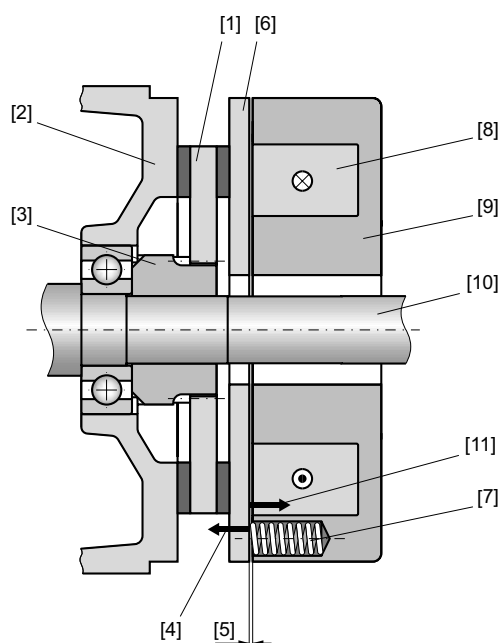
По желанию заказчика двигатели или мотор-редукторы оснащаются электро-механическим тормозом. Обычно это электромагнитный дисковый тормоз с катушкой постоянного тока, который освобождается электрическим способом, а налагается усилием пружин. То есть, при отказе питания такой тормоз автоматически налагается.

В зависимости от применения тормоз двигателя должен выполнять различные функции:

- удерживание нагрузки, например в приводе подъемного устройства;
- аварийный останов;
- удерживание механизмов машины, например подающих салазок;
- защита от непреднамеренного перемещения.

Ниже приводится информация о тормозных системах, применяемых и в двигателях SEW-EURODRIVE.

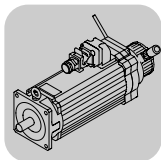
2.8.1 Пружинный тормоз в качестве стояночного



56912ахх

Рис. 42. Базовая конструкция стояночного тормоза SEW

- | | |
|---------------------------------|----------------------------|
| [1] Тормозной диск | [7] Тормозная пружина |
| [2] Тормозной подшипниковый щит | [8] Тормозная катушка |
| [3] Зубчатая муфта | [9] Каркас катушки |
| [4] Усилие пружины | [10] Вал двигателя |
| [5] Рабочий зазор | [11] Усилие электромагнита |
| [6] Нажимной диск | |



2.8.2 Рабочий тормоз SEW

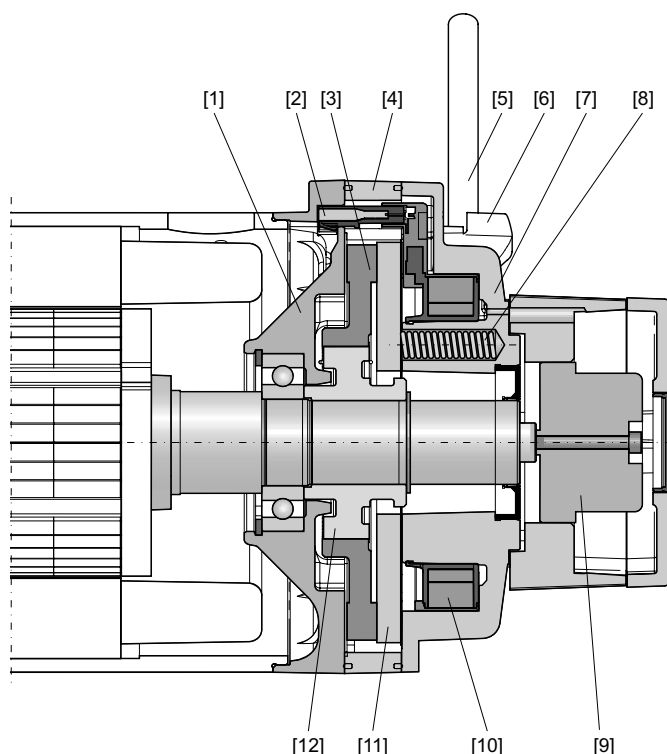
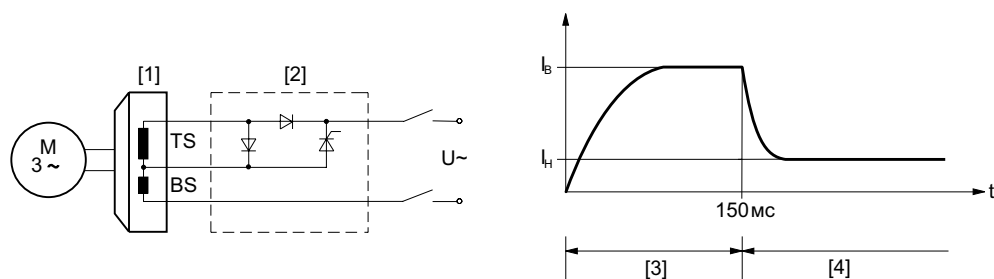


Рис. 43. Устройство тормоза с резольвером RH1L для CM71 .. 112

57857axx

- | | |
|--|------------------------|
| [1] Тормозной подшипниковый щит | [7] Каркас катушки |
| [2] Контактное гнездо | [8] Тормозная пружина |
| [3] Тормозной диск | [9] Резольвер RH1L |
| [4] Направляющее кольцо | [10] Тормозная катушка |
| [5] Рукоятка ручного растормаживания | [11] Нажимной диск |
| [6] Рычаг растормаживающего устройства | [12] Зубчатая муфта |

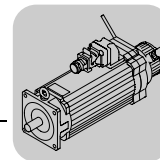
Пружинный тормоз SEW-EURODRIVE – это электромагнитный дисковый тормоз с катушкой постоянного тока, который освобождается электрическим способом, а налагается усилием пружин. Такая система удовлетворяет основным требованиям техники безопасности, поскольку при отказе питания тормоз автоматически налагается.



56009aru

Рис. 44. Принципиальная схема

- | | |
|-----------------------------------|--|
| [1] Тормоз | BS Ускоряющая обмотка |
| [2] Блок управления тормозом | TS Удерживающая обмотка |
| [3] Ускорение | BS+TS Вся катушка |
| [4] Удержание при растормаживании | I _B Ток включения (бросок тока) |
| | I _H Ток удержания |



В отличие от стандартных дисковых тормозов с катушкой постоянного тока тормоза SEW-EURODRIVE имеют двухсекционную конструкцию катушки.

Когда тормоз обесточен, нажимной диск прижимается пружинами к тормозному диску, т. е. двигатель заторможен. Если на тормозную катушку подается соответствующее напряжение, электромагнит преодолевает усилие тормозных пружин и нажимной диск оттягивается к каркасу катушки. Тормозной диск освобождается, и вал двигателя может вращаться.

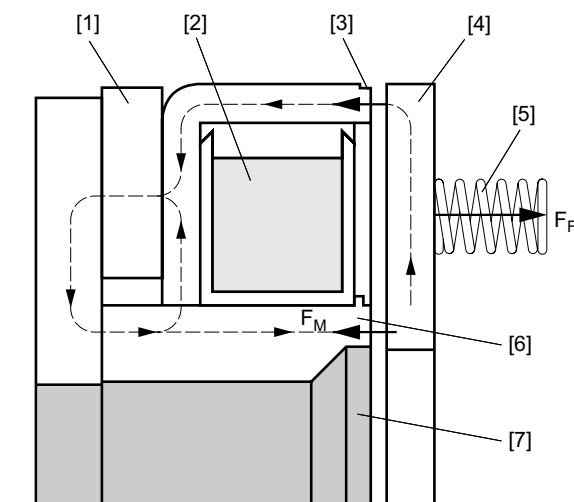
Специальный блок управления тормозом обеспечивает включение сначала только ускоряющей обмотки, а лишь затем и удерживающей обмотки (т. е. всей катушки). Мощное и резкое намагничивание ускоряющей обмотки, вызванное высоким броском тока, дает очень малое время срабатывания. Это особенно важно для больших тормозов, поскольку не достигается предел магнитного насыщения сердечника катушки. Тормозной диск освобождается очень быстро, двигатель разгоняется без потерь на трение в тормозе.

В зависимости от назначения и монтажных условий SEW-EURODRIVE предлагает соответствующий тормозной выпрямитель для большого числа вариантов применения. Подробнее об этом см. в документации к соответствующей продукции.

2.8.3 Стояночный тормоз с возбуждением от постоянных магнитов

При торможении магнитное поле постоянных магнитов передается через внутренний и внешний полюсы на нажимной диск. Нажимной диск притягивается магнитным полем, так как усилие этого поля F_M больше усилия пружин F_F . Трение между вращающимся нажимным диском и неподвижными полюсами приводит к созданию тормозного момента.

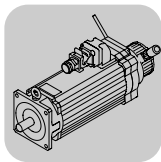
Когда на тормозную катушку подается ток, создается магнитное поле, усилие которого F_M компенсирует усилие пружин F_F . Нажимной диск отделяется от полюсов, т. е. тормоз отпущен.



56206bxx

Рис. 45. Принцип действия стояночного тормоза

[1]	Постоянный магнит	F_M	Усилие магнитного поля
[2]	Тормозная катушка	F_F	Усилие пружин
[3]	Внешний полюс		
[4]	Нажимной диск		
[5]	Пружина		
[6]	Внутренний полюс		
[7]	Ротор		



2.9 Тормоза для линейных двигателей

Исполнение тормозов линейных двигателей очень сильно зависит от устройства или применения этих двигателей и связанных с этим требований.

SEW-EURODRIVE рекомендует пользоваться документацией и литературой соответствующих поставщиков.

Тормоз линейного двигателя используется как стояночный. Этот стояночный тормоз и система направляющих должны подходить друг к другу, т. е. необходимо согласование с изготовителем системы направляющих.

По причине сравнительно высоких скоростей перемещения к тормозам линейных приводных систем предъявляются особые требования:

- легкая, компактная конструкция;
- высокая удельная мощность;
- быстрое отпускание и наложение.

В зависимости от условий применения характеристики тормозных систем могут различаться. Ниже приводится краткий обзор характеристик распространенных тормозных систем:

Тормоз с электроприводом

- большие удерживающие усилия;
- очень компактная и легкая конструкция;
- удобство встраивания;
- медленное наложение;
- принудительное наложение с подачей тока.

Электромагнитный тормоз

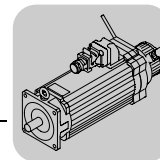
- очень быстрое отпускание и наложение тормоза, т. е. возможность работы с кратковременными циклами;
- большие удерживающие усилия;
- прочная конструкция;
- автоматическое наложение усилием пружин.

Тормоз с пневмоприводом

- большие удерживающие усилия;
- очень компактная и легкая конструкция, экономия монтажного пространства;
- невысокая цена и широкий выбор;
- возможность работы с циклами средней продолжительности;
- необходимость подключения к пневмосистеме.

Тормоза с пневмоприводом доступны в различном исполнении:

- с отпусанием под давлением (наложение усилием пружин);
- с наложением под давлением.



**Монтаж
тормоза
на линейный
двигатель
SL2-Advance/
Power System**

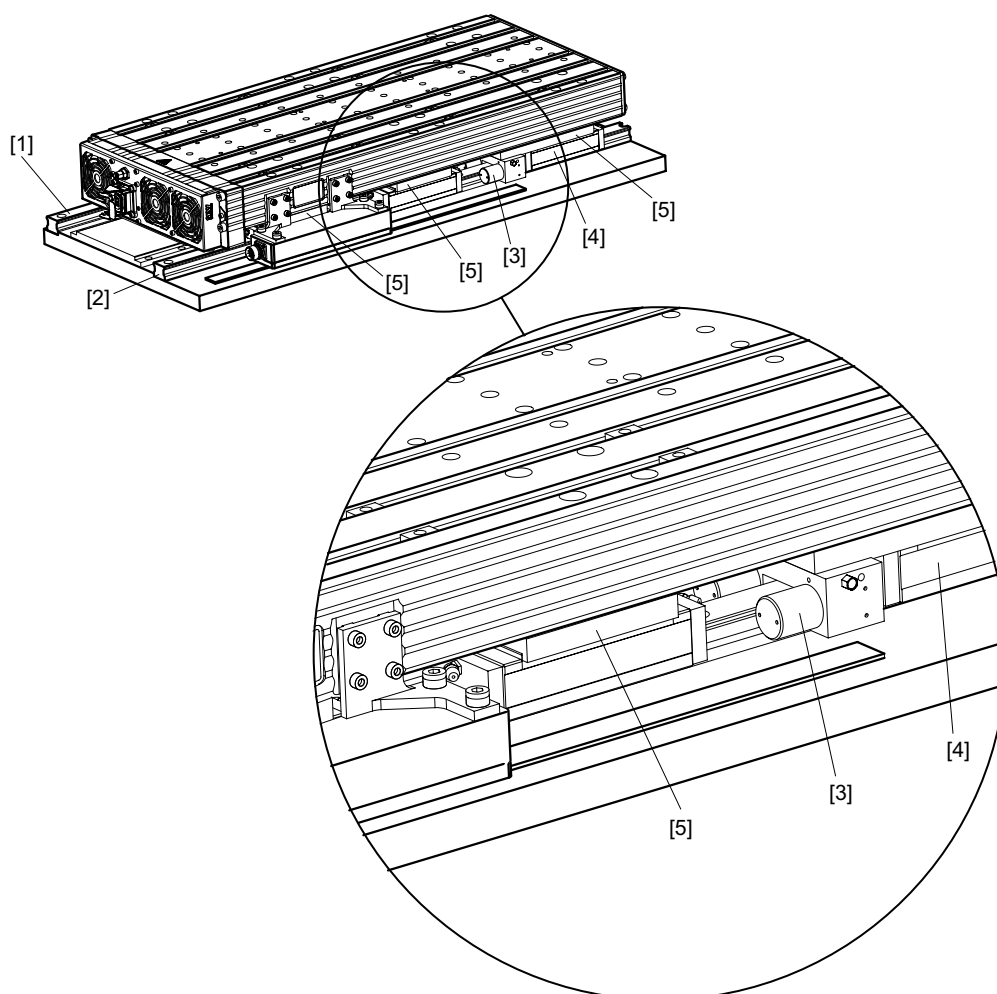
Интеграция различных тормозных систем в двигатели SL2 поясняется на двух примерах.

На двигатели типа SL2-Advance System и SL2-Power System можно установить тормоз с размерами по стандарту DIN645-1, серии 1M и 1L для профильных направляющих качения. Монтаж тормоза возможен на направляющей как со стороны несъемной, так и со стороны съемной опоры.

При этом особое преимущество состоит в том, что тормоз со стороны съемной опоры установлен на охлаждающую платформу вместе с направляющей тележкой и поэтому не подвержен тепловой нагрузке.

Тормоза короткой конструкции (например, с пневмоприводом) не требуют много места и устанавливаются между направляющих тележек.

Тормоза длинной конструкции можно установить в конце охлаждающей платформы, см. Рис. 46.



55390bxx

Рис. 46. Линейный двигатель SL2-Power System компании SEW-EURODRIVE с пневматическим тормозом

- | | | | |
|-----|-------------------------|-----|----------------------|
| [1] | Сторона съемной опоры | [4] | Направляющая тележка |
| [2] | Сторона несъемной опоры | [5] | Промежуточная панель |
| [3] | Пневматический тормоз | | |

Подробнее о монтаже тормозных систем на линейные двигатели серии SL2 компании SEW-EURODRIVE можно узнать в документации к соответствующей продукции или в техническом офисе SEW-EURODRIVE.



3 Датчики

Как пояснялось в предыдущих главах, работа серводвигателя возможна только при наличии датчика частоты вращения. Датчики, наиболее часто используемые в сервотехнике и в двигателях SEW-EURODRIVE, описываются в следующих разделах.

3.1 Инкрементные датчики

3.1.1 Инкрементные датчики угловых перемещений с сигналами TTL и HTL

Инкрементные датчики угловых перемещений преобразуют частоту вращения в дискретное количество электрических импульсов. Для этого используется инкрементный диск с радиальными, светопроницаемыми щелями, которые считываются оптоэлектронным способом. Базовая конструкция показана на Рис. 47. Разрешающая способность инкрементного диска зависит от количества щелей.

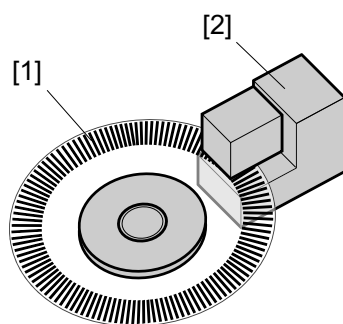


Рис. 47. Инкрементный датчик угловых перемещений

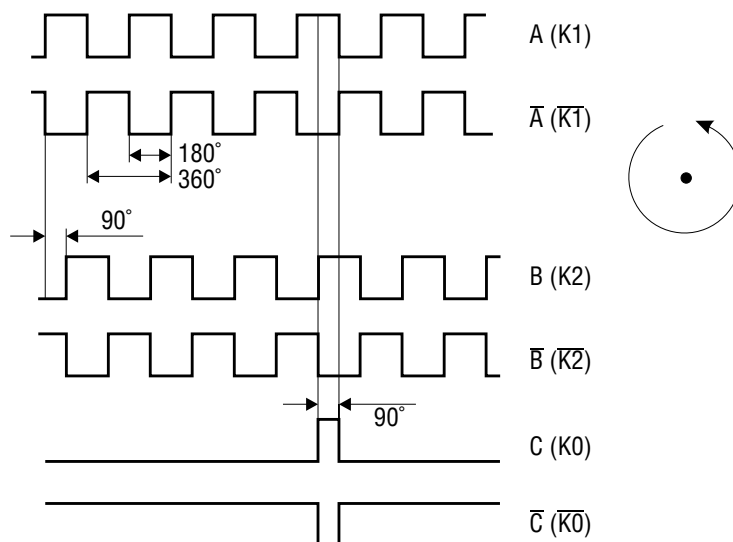
56223ахх

- [1] Инкрементный диск
- [2] Считывающий блок

Устройство и принцип действия

Как правило, такие датчики имеют два сигнальных канала и один индексный канал. С учетом инвертирования сигналов получается всего 6 каналов. Две фотоячейки энкодера, расположенные с интервалом в 90°, выдают на каналы А (K1) и В (K2) две последовательности импульсов. Канал А (K1) при вращении направо (если смотреть на вал двигателя спереди) опережает канал В (K2) на 90°. Через этот сдвиг фаз определяется направление вращения двигателя. Нулевой импульс (один импульс на оборот) контролируется третьей фотоячейкой и используется через индексный канал С (K0) как опорный сигнал для систем позиционирования.

Для каналов А (K1), В (K2) и С (K0) в TTL-датчике формируются инвертированные сигналы, которые выдаются через каналы $\bar{A}$ (K1), $\bar{B}$ (K2) и $\bar{C}$ (K0).



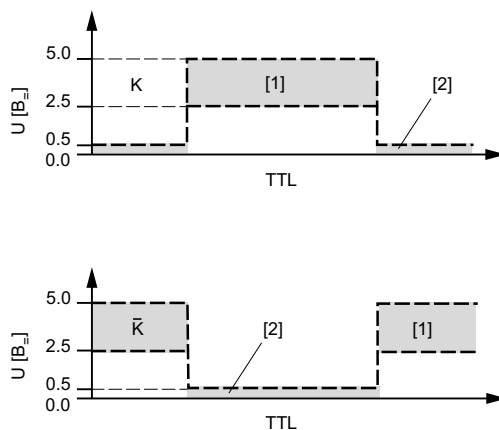
01877axx

Рис. 48. TTL-сигналы с индексным каналом и инвертированием; HTL-сигналы с индексным каналом, но без инверсных каналов

Для инкрементных датчиков различают 2 типа сигнала (по выходному напряжению):

- TTL (Transistor-Transistor Logic)

Уровень сигнала составляет $U_0 \leq 0,5 \text{ В}$ и $U_1 \geq 2,5 \text{ В}$. Сигналы передаются симметрично и обрабатываются дифференциально, т. е. для различения между сигналами низкого и высокого уровней используется диапазон изменения напряжения в 5 В. Поэтому они нечувствительны к синфазным помехам и имеют хорошие ЭМС-показатели. Передача сигналов осуществляется по стандарту RS422. На основании этих свойств TTL-датчики – самые распространенные на рынке инкрементных датчиков.



56229aru

Рис. 49. Уровни TTL-сигналов

- [1] Уровень "1"
- [2] Уровень "0"



- **HTL (High Voltage Transistor Logic)**
Уровень сигнала составляет $U_0 \leq 3 \text{ В}$ и $U_1 \geq (U_{\text{пит}} - 3,5 \text{ В})$. Сигналы HTL-датчиков используются без инвертирования, дифференциальная обработка сигналов невозможна. Поэтому HTL-сигналы подвержены синфазным помехам, что может негативно влиять на ЭМС-показатели.

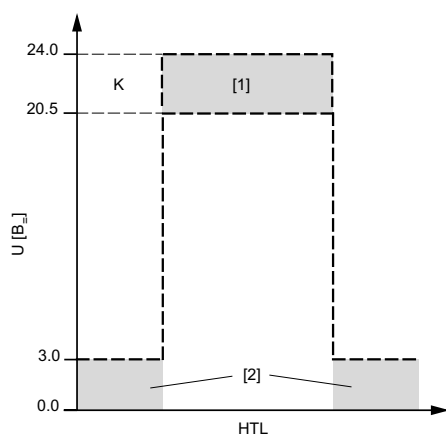


Рис. 50. Уровни HTL-сигналов

56231aru

[1] Уровень "1"

[2] Уровень "0"

Инвертированные HTL-сигналы, как правило, нельзя подключать к входу датчика на сервоусилителе, поскольку возможна перегрузка по напряжению и, как следствие, повреждение входных каскадов.

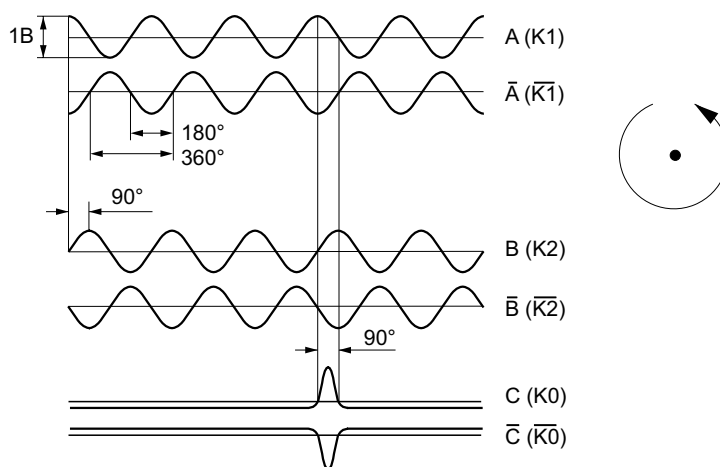


3.1.2 Инкрементные датчики с sin/cos-каналами

Устройство и принцип действия

Sin/cos-датчики, или иначе синус-датчики, выдают два синусоидальных сигнала со сдвигом в 90° . При этом оценивается количество синусоид (соответствует числу импульсов), прохождения через нуль и амплитуды (арктангенс). По этим значениям частота вращения определяется с высокой разрешающей способностью. Это особенно полезно в тех случаях, когда необходимо точное соблюдение широких диапазонов регулирования и низкой частоты вращения.

Как правило, sin/cos-датчики имеют два сигнальных канала и один индексный канал. С учетом инвертирования сигналов получается всего 6 каналов. Два синусоидальных сигнала со сдвигом в 90° передаются по каналам А (K1) и В (K2). В качестве нулевого импульса через канал С (K0) используется один полупериод синусоиды за оборот. Для каналов А (K1), В (K2) и С (K0) в датчике формируются инвертированные сигналы, которые выдаются через каналы $\bar{A}$ (K1), $\bar{B}$ (K2) и $\bar{C}$ (K0).



56211aru

Рис. 51. Sin/cos-сигналы с индексным каналом и инвертированием

Как правило, на sin/cos-сигналы накладывается постоянное напряжение в 2,5 В. Амплитудное напряжение $U_{SS} = 1$ В. Это позволяет избежать прохождений через нуль при передаче сигналов. Поскольку sin/cos-сигналы передаются симметрично и обрабатываются дифференциально, они нечувствительны к асимметричным помехам и имеют хорошие ЭМС-показатели.

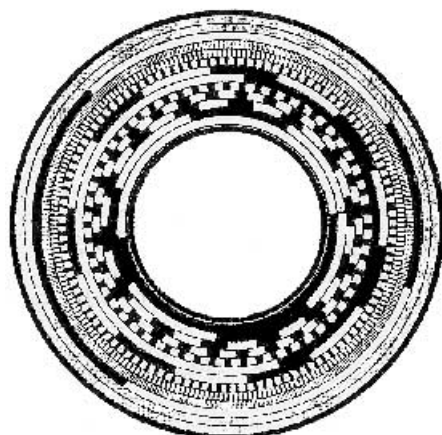


3.2 Датчики абсолютного отсчета

Наряду с резольверами в последние годы на рынке появились так называемые комбинированные датчики. Они представляют собой sin/cos-датчики, выполняющие измерение в абсолютных значениях. Кроме текущей частоты вращения вала двигателя они контролируют его абсолютное положение, тем самым обеспечивая технические и финансовые преимущества, если необходим датчик абсолютного отсчета.

3.2.3 Датчики абсолютного отсчета с SSI-интерфейсом и sin/cos-сигналами

Данные об абсолютном положении формируются с помощью кодирующего диска с кодом Грея, который, как правило считывается оптическим способом. При этом каждому угловому положению диска соответствует уникальный рисунок кода. Это позволяет определять абсолютное положение вала двигателя. Особенность кода Грея заключается в том, что при каждом последующем шаге вращения изменяется только один бит, т. е. возможная погрешность считывания составляет только 1 бит.

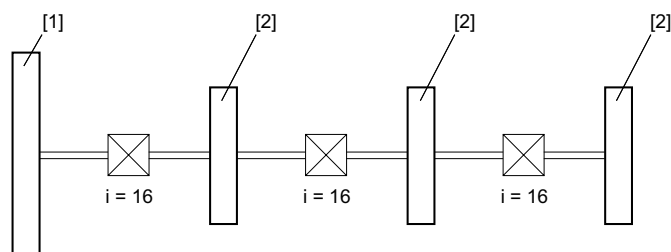


01927axx

Десятичный формат	Код Грея
0	0000
1	0001
2	0011
3	0010
4	0110
5	0111
6	0101
7	0100
8	1100
9	1101
10	1111
11	1110
и т. д.	и т. д.

Рис. 52. Кодирующий диск с кодом Грея

Датчик в таком исполнении – это так называемый однооборотный датчик, так как абсолютное положение вала двигателя определяется в пределах только одного оборота. Кроме однооборотных существуют еще и многооборотные датчики, определяющие абсолютное положение в пределах нескольких оборотов.



56213axx

Рис. 53. Устройство многооборотного датчика

- [1] Кодирующий диск для контроля углового положения
- [2] Кодирующий диск для контроля количества оборотов



Многооборотные датчики кроме кодирующего диска для контроля углового положения имеют дополнительные кодирующие диски для определения абсолютного количества оборотов. Эти кодирующие диски связаны друг с другом через редукторную ступень с передаточным отношением $i = 16$. В случае 3 дополнительных кодирующих дисков (стандартное количество) возможное абсолютное разрешение составляет $16 \times 16 \times 16 = 4096$ оборотов. Число 16 определяется 16-битным двоичным форматом (слово).

3.2.4 Датчики абсолютного отсчета с интерфейсом HIPERFACE®

Устройство и принцип действия HIPERFACE®- датчиков

HIPERFACE®¹⁾-датчик – это типичный комбинированный датчик, применяемый и компанией SEW-EURODRIVE. Помимо sin/cos-сигнала для контроля частоты вращения и информации об абсолютном положении этот датчик имеет электронную заводскую табличку, в которую кроме прочего можно ввести и данные привода. Это облегчает ввод в эксплуатацию и снижает вероятность ошибки пользователя, поскольку вводить данные привода ему не нужно.

HIPERFACE®-датчики выпускаются в 2 различных исполнениях:

1. Однооборотный HIPERFACE®-датчик.
2. Многооборотный HIPERFACE®-датчик: с помощью кодирующих дисков с кодом Грея, связанных через малогабаритный многоступенчатый редуктор, возможно определение абсолютного положения в пределах 4096 оборотов вала двигателя.

Характеристики HIPERFACE®-датчика:

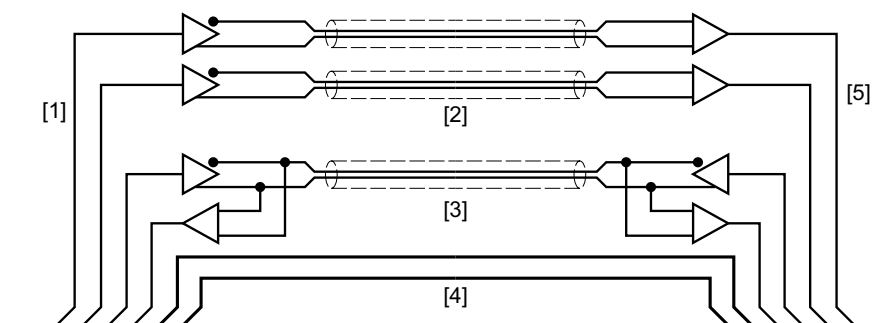
- напряжение питания 7 ... 12 В;
- температура при эксплуатации до 115 °С;
- максимальная длина кабеля 100 м;
- 10-жильный кабель;
- встроенная память с функцией "Электронная заводская табличка";
- одно- и многооборотное исполнение;
- оптическое считывание абсолютных значений угла поворота;
- отсутствие необходимости выхода в 0-позицию при повторном включении (для многооборотных датчиков);
- наличие каналов абсолютного отсчета и инкрементных sin/cos-каналов (1024 sin- и cos-периодов / оборот);
- аналоговая передача сигналов, разрешение 1024 sin-/cos-периодов для регулятора скорости;
- высокая устойчивость к электромагнитным помехам;
- возможность использования вне двигателя (внешний датчик перемещения);
- электронная юстировка угла коммутации для синхронных серводвигателей;
- канал данных процесса передает данные на сервоусилитель в режиме реального времени;
- малые габаритные размеры.



1) HIPERFACE (High Performance Interface) – это интерфейс, разработанный фирмой Sick Stegmann GmbH.



В начале процесса включения узел абсолютного отсчета оптическим способом определяет абсолютное положение ротора. Сервоусилитель считывает эти данные о положении через соединение RS485 (канал параметрирования) и задает значение счетчика. Изменения положения относительно этого абсолютного значения регистрируются через каналы sin/cos-датчика и аналоговым способом передаются через канал данных процесса на сервоусилитель. Дополнительные запросы абсолютного положения выполняются лишь для циклического контроля достоверности.



56217axx

Рис. 54. Каналы данных датчика HIPERFACE

- [1] Датчик HIPERFACE
- [2] Канал данных процесса (инкрементные сигналы sin/cos)
- [3] Канал параметрирования RS485
- [4] Питающее напряжение
- [5] Сервоусилитель

В данном случае сервоусилителем является MOVIDRIVE® MDX61B с соответствующим устройством сопряжения (адаптером) с датчиком. Сервоусилитель с Hipferface-портом получает через канал параметрирования как информацию о положении, так и значение времени этого положения. Параллельно с этим через канал данных процесса постоянно принимаются и отсчитываются входящие аналоговые сигналы (sin-/cos-сигналы).

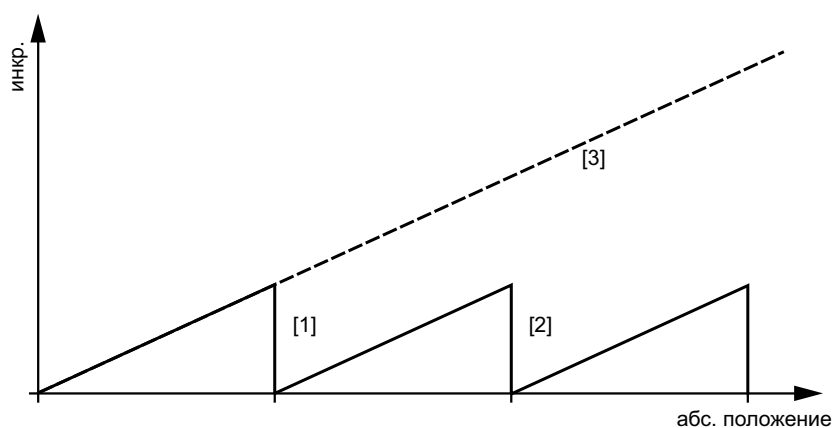
Датчик может быть как однооборотным, так и многооборотным. Для однооборотных датчиков информация об абсолютном положении всегда относится только к одному обороту. Многооборотный датчик с помощью последовательно соединенных через понижающий редуктор кодирующих дисков способен регистрировать еще и количество выполненных оборотов (до 4096) относительно абсолютной 0-позиции. После 4096 оборотов происходит переполнение датчика, которое все же учитывается в постоянной памяти MOVIDRIVE®. Сохраняется до 256 переполнений датчика. Если на контактах питания напряжение падает ниже предельного значения (например, при отказе сети), постоянная статическая память NVSRAM это распознает и сохраняет данные.

В момент повторного включения из постоянной памяти NVRAM в сервоусилителе выдается следующая информация:

- абсолютное значение в пределах одного полного диапазона значений датчика, составляющее до 4096×4096 инкрементов;
- число переполнений, составляющее 0...255.



Если после отказа питающего напряжения привод, находящийся перед самым переполнением датчика, смещается через точку переполнения, то при повторном включении возникает несоответствие регистрируемого и сохраненного абсолютных значений. В этом случае электронный блок датчика автоматически исправляет сохраненные значения на зарегистрированные.



56222aru

Рис. 55. Переполнение датчика

- [1] 1-е переполнение датчика
- [2] 2-е переполнение датчика
- [3] Видимое пользователем абсолютное положение

Переполнения датчика отсчитываются в сервоусилителе, что позволяет определить абсолютное положение.

Для пользователя переполнения датчика никак не отображаются, они сохраняются в памяти сервоусилителя. Таким образом, HIPERFACE®-датчик является настоящим датчиком абсолютного отсчета.

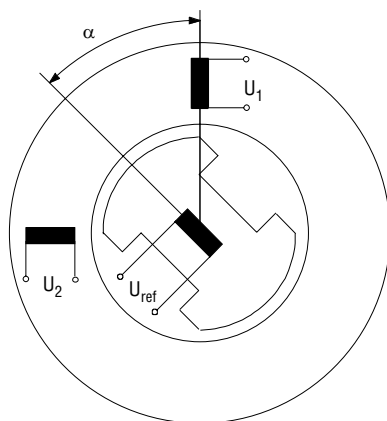


3.2.5 Резольверы

Устройство и принцип действия

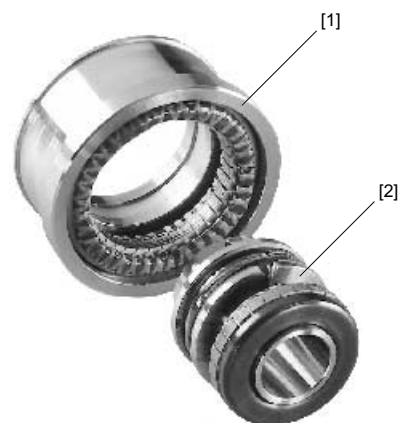
В качестве датчика для синхронных серводвигателей чаще всего используется резольвер. Абсолютное положение вала двигателя в пределах одного оборота способен определять 2-обмоточный резольвер. По сигналу резольвера определяются частота вращения и абсолютное положение при каждом обороте.

Резольвер работает по принципу вращающегося трансформатора и состоит из 2 функциональных узлов – ротора с обмоткой возбуждения и полюсами, и статора с тремя обмотками: одной первичной (для подачи напряжения на ротор) и двух измерительных (для определения угла поворота).



55668aru

Рис. 56. Структурная схема резольвера



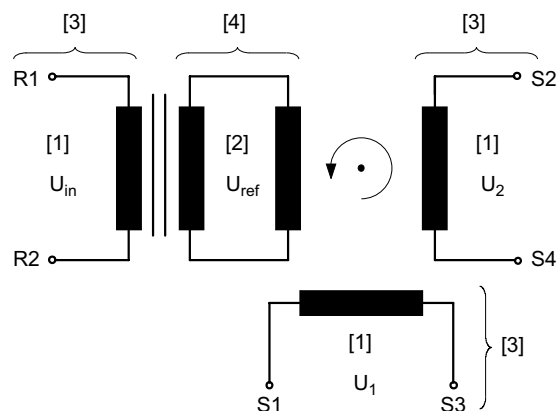
56209axx

Рис. 57. Резольвер

- [1] Статор резольвера
- [2] Ротор резольвера

Сервоусилитель подает высокочастотный сигнал с постоянной амплитудой и постоянной частотой на первичную обмотку статора. Через воздушный зазор этот сигнал передается на обмотку возбуждения ротора.

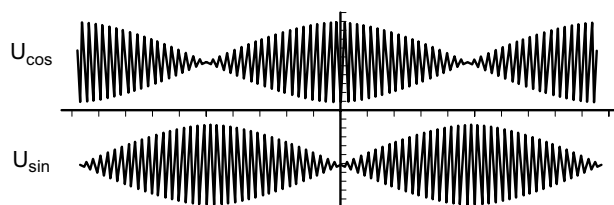
В измерительных обмотках статора индуцируется напряжение, амплитуда которого зависит от угла поворота полюсов ротора относительно полюсов статора.



56238aru

Рис. 58. Схема замещения резольвера

- [1] Статор
- [2] Ротор
- [3] Неподвижные обмотки
- [4] Вращающаяся обмотка



56239axx

Рис. 59. Выходное напряжение $U_{\cos}$ и $U_{\sin}$ резольвера

Параметры сигналов рассчитываются по следующим формулам:

$$U_{\text{ref}} = A \times \sin(\omega \times t)$$

$$U_{\cos}(t) = A \times u \times \sin(\omega \times t) \times \cos(p \times \alpha)$$

$$U_{\sin}(t) = A \times u \times \sin(\omega \times t) \times \sin(p \times \alpha)$$

$$p \times \alpha = \arctan(U_{\sin} / U_{\cos})$$

U_{ref}	Опорное напряжение
$U_{\cos}$	Выходное напряжение 1 статора
$U_{\sin}$	Выходное напряжение 2 статора
A	Амплитудное значение входного напряжения
ω	Круговая частота напряжения возбуждения U_{in}
α	Угол поворота ротора
u	Коэффициент трансформации
p	Число пар полюсов резольвера

Благодаря прогрессу в области полупроводниковой техники сегодня широко доступны недорогие и высококачественные аналого-цифровые преобразователи (АЦП). Они позволяют создавать высококачественные внешние устройства обработки сигналов резольвера и при этом добиваться еще более высокого разрешения измеряемого сигнала, чем на применявшихся в прошлом встроенных модулях обработки сигналов резольвера.

Современные устройства обработки сигналов резольвера больше не используют так называемый метод слежения, а работают по принципу считывания. При этом прямоугольный сигнал, формируемый цифровым сигнальным процессором (ЦСП), с помощью схемы возбуждения преобразуется в синусоидальное опорное напряжение, которое подается на резольвер, см. Рис. 60.

В зависимости от положения ротора изменяются амплитуды напряжения $U_{\sin}$ и $U_{\cos}$, которые через дифференциальный усилитель подаются на АЦП. Дифференциальные усилители фильтруют высокочастотные наводки на изолированные каналные сигналы $U_{\sin}$ и $U_{\cos}$ выдают на входы АЦП соответствующие напряжения с привязкой к массе.

АЦП считывает обе огибающие кривые синхронно с напряжением возбуждения в точках максимума, преобразует эти аналоговые сигналы в цифровую информацию и передает ее на ЦСП, см. Рис. 59. ЦСП определяет текущее положение по считанным каналным сигналам $U_{\cos}$ и $U_{\sin}$.

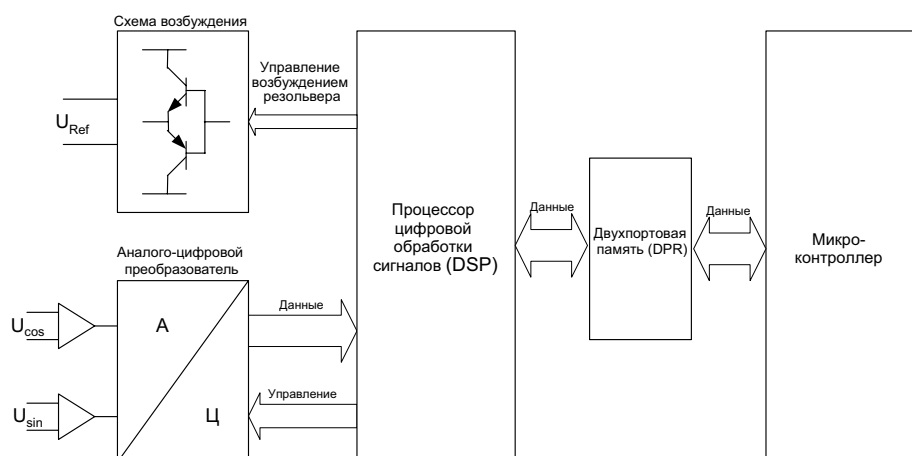
Текущее механическое положение по считанным каналным сигналам определяется легко:

$$p \times \alpha = \arctan(U_{\sin} / U_{\cos})$$



Таким образом, при каждом периоде сигнала возбуждения определяется новое значение положения. Рассчитанные данные через интерфейс двухпортовой памяти (DPR) передаются на микроконтроллер осевого регулятора, который нуждается в этой информации для управления осевым приводом.

На следующем рисунке показана принципиальная схема системы обработки сигналов резольвера, работающей по методу считывания.



55839aru

Рис. 60. Система обработки сигналов резольвера (упрощенное представление)



3.3 Сравнительный обзор для выбора типа датчика: резольверов, sin-/cos-датчиков, TTL-датчиков

Следующая таблица содержит основные характеристики уже представленных датчиков для ротационных серводвигателей. Эти данные помогут вам в выборе датчика при проектировании. В качестве примера выбраны датчики, применяемые в двигателях SEW-EURODRIVE.

Датчик [SEW-тип]	Резольвер [RH1M, RH1L]	HIPERFACE®-датчик (sin-/cos-датчик с абсолютным отсчетом) [AS1H, ES1H, AS3H, AS4H, AV1H]	Sin-/cos-датчик [ES1S, ES2S, EV1S]	Инкрементный датчик [ES1R, ES2R, EV1R]
Характеристики				
Разрешающая способность	Зависит от устр-ва обработки сигналов резольвера: до 16 бит / оборот	1024 sin-/cos-периода (для регулирования частоты вращения) 32768 шагов / оборот (для позиционирования)	1024 sin-/cos-периода	1024 импульса / оборот
Допустимый температурный диапазон	ок. -55...+150 °C	-20...+115 °C (AS1H, ES1H) -20...+85 °C (AS3H, AS4H, AV1H)	-20...+85 °C	-20...+85 °C
Механические нагрузки	- Удары 100 g / 11 мс - Вибрация 20 g / 10-50 Гц	- Удары 100 g / 10 мс - Вибрация 20 g / 10-2000 Гц	- Удары 300 g / 1 мс - Вибрация 10 g / 10-2000 Гц	- Удары 100 g / 6 мс - Вибрация 10 g / 10-2000 Гц
Применение	Регулирование частоты вращения и определение положения ротора в пределах одного оборота, "инкрементное" позиционирование	Регулирование частоты вращения, определение положения ротора и абсолютного положения	Регулирование частоты вращения и "инкрементное" позиционирование	Регулирование частоты вращения и "инкрементное" позиционирование
Двигатели	- Синхронные серводвигатели - Асинхронные серводвигатели (по запросу)	- Синхронные серводвигатели - Асинхронные серводвигатели	Асинхронные серводвигатели	Асинхронные серводвигатели
Способ монтажа	Встроенный датчик	- AS1H, ES1H: встроенный датчик (синхронные серводвигатели) - AS3H, AS4H, AV1H: навесной датчик (асинхронные серводвигатели)	Навесной датчик	Навесной датчик
Прочие характеристики	Высокая механическая прочность	- Возможность высокого разрешения сигналов частоты вращения за счет интерполяции sin-/cos-сигнала - Удобный ввод в эксплуатацию благодаря электронной заводской табличке	Возможность высокого разрешения сигналов частоты вращения за счет интерполяции sin-/cos-сигнала	Датчик простой конструкции для стандартных применений



Датчики

Сравнительный обзор для выбора типа датчика: резольверов, sin-/cos-датчиков, TTL-датчиков

3.3.1 Технические данные датчиков двигателей SEW-EURODRIVE

Тип датчика	Монтаж	Двигатели	Сигнал	Питание [В]
Инкрементные датчики				
ES1H	Датчик, встроенный в синхронный серводвигатель	Синхронные серводвигатели DS/CM	Sin/cos-сигнал 1 В, HIPERFACE® однооборотный со встроенной памятью EEPROM для электронной заводской таблички	7 .. 12
ES1T ES2T	Разрезной вал	- Двигатели переменного тока DT/DV - Асинхронные серводвигатели CT/CV	TTL-сигнал 5 В	5
ES1S ES2S			Sin/cos-сигнал 1 В	10 .. 30
ES1R ES2R			TTL-сигнал 5 В	
ES1C ES2C			HTL-сигнал 24 В	
EV1T	Муфта со сплошным валом		TTL-сигнал 5 В	5
EV1S			Sin/cos-сигнал 1 В	10 .. 30
EV1R			TTL-сигнал 5 В	
EV1C			HTL-сигнал 24 В	
RH1M	Полый вал	Синхронные серводвигатели CM	Сигналы 2-обмоточного резольвера	7
Датчики абсолютного отсчета				
AV1H	Муфта со сплошным валом	- Двигатели переменного тока DT/DV - Синхронные серводвигатели DS - Асинхронные серводвигатели CT/CV	Sin/cos-сигнал 1 В, HIPERFACE® многооборотный со встроенной памятью EEPROM для электронной заводской таблички	7 .. 12
AV1Y			Послед. интерфейс SSI Sin/cos-сигнал 1 В	10 .. 30
AS1H	Датчик, встроенный в синхронный серводвигатель	Синхронные серводвигатели DS/CM	Sin/cos-сигнал 1 В, HIPERFACE® многооборотный со встроенной памятью EEPROM для электронной заводской таблички	7 .. 12
AS2H	Разрезной вал	- Двигатели переменного тока DT/DV - Асинхронные серводвигатели CT/CV	Sin/cos-сигнал 1 В, HIPERFACE® многооборотный со встроенной памятью EEPROM для электронной заводской таблички	7 .. 12
AS3H				
Резольверы				
RH1M	Полый вал	Синхронные серводвигатели CM	Сигналы 2-обмоточного резольвера	7
RH1L		Синхронные серводвигатели с тормозом		



3.4 Системы прямого измерения перемещений для линейных серводвигателей

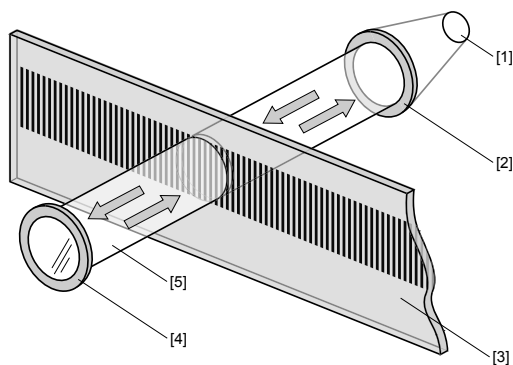
Как уже было сказано в главе 2.7, для работы синхронного линейного двигателя необходима измерительная система, контролирующая положение первичной части. По данным от этой системы в соответствующем сервоусилителе рассчитывается скорость и выполняется позиционирование.

В зависимости от применения для выбора подходящего датчика существуют различные критерии:

- максимальная скорость;
- максимальный участок перемещения;
- разрешение в соответствии с требованиями к точности;
- условия загрязненности;
- условия ЭМС.

3.4.1 Устройство и принцип действия оптических систем измерения перемещений

Оптическая система измерения перемещений состоит из стеклянной или стальной измерительной шкалы, установленной на участке перемещения, и считывающей головки, перемещающейся вдоль этого участка. В считывающей головке имеется источник света, фотоэлементы и оптические фильтры для более точного контроля. Излучаемый источником свет попадает на измерительную шкалу, отражается в соответствии с нанесенной градуировкой и воспринимается фотоэлементами. Связанный с фотоэлементами электронный контрольный блок генерирует инкрементный сигнал.



56284ахх

Рис. 61. Схематическое изображение оптической измерительной системы

- | | |
|---|------------------------------|
| 1 | Источник света и фотоэлемент |
| 2 | Линза |
| 3 | Измерительная шкала |
| 4 | Отражатель |
| 5 | Световые волны |

В зависимости от принципа действия система измерения перемещений может иметь различную разрешающую способность:

- принцип отражения – цена деления шкалы 20-100 мкм;
- принцип интерференции – цена деления шкалы 4-8 мкм.

**Закрытые системы**

В зависимости от условий эксплуатации и влияния окружающей среды используются оптические системы различного исполнения.

- максимальная скорость перемещения ок. 2 м/с;
- хорошая защита от влияний окружающей среды;
- механические направляющие.

Открытые системы

Такая система работает без механических направляющих.

- считывающая головка установлена на подвижной части и нависает над измерительной шкалой, поэтому максимальная скорость перемещения составляет ок. 8 м/с;
- отсутствие защиты от влияний окружающей среды.

3.4.2 Устройство и принцип действия магнитных систем измерения перемещений

Магнитные системы измерения перемещений состоят из следующих элементов:

- магнитная полоса;
- датчик.

Магнитная полоса в качестве измерительной шкалы устанавливается на участке перемещения. Над этой шкалой перемещается датчик, закрепленный на первичной части.

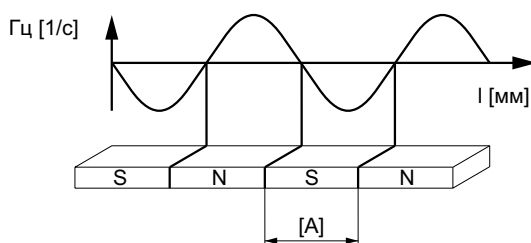


Рис. 62. Магнитная система измерения перемещений

56237aru

[A] Разрешающая способность

При перемещении двигателя датчик измеряет изменения напряженности магнитного поля, по которым электронный контрольный блок генерирует синусоидальный сигнал. Внутри датчика 2 считывающих элемента расположены со сдвигом фаз, поэтому генерируются синусоидальные и косинусоидальные сигналы.

Разрешающую способность синусоидальных сигналов считывающих элементов можно повысить с помощью интерполяции. Встроенные в датчик электронные схемы (опция) преобразуют эти синусоидальные сигналы в сигналы стандартного интерфейса, например RS422.

В качестве опции такие измерительные шкалы могут иметь намагниченный код для абсолютного отсчета. Двигатели с датчиками абсолютного отсчета после включения не требуют выхода в 0-позицию. Сигналы датчиков абсолютного отсчета преобразуются в сигналы протокола SSI.

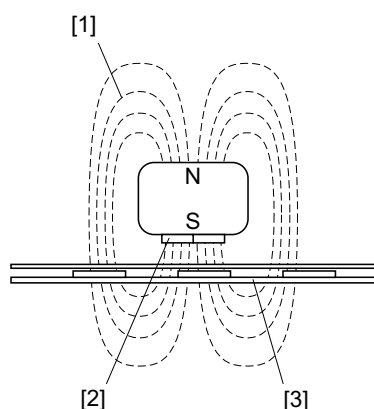


При проектировании учитывайте следующие характеристики магнитных систем измерения перемещений:

- разрешение: обычно 5000 мкм / sin-период;
- погрешность ок. 300 мкм/м;
- скорость перемещения до 6 м/с;
- нечувствительны к загрязнению;
- нечувствительны к механическим нагрузкам;
- интерфейс: SSI, HIPERFACE®.

3.4.3 Устройство и принцип действия индуктивных систем измерения перемещений

Индуктивные системы измерения перемещений работают по принципу переменного магнитного сопротивления (релюктанц). При этом метки на металлической измерительной шкале отклоняют магнитное поле, создаваемое считывающей головкой. Электронный контрольный блок распознает эти изменения поля и преобразует в синусоидальные сигналы. Внутри датчика два считывающих элемента расположены со сдвигом фаз, поэтому генерируются синусоидальные и косинусоидальные сигналы.



56232axx

Рис. 63. Схематическое изображение индуктивной системы измерения перемещений

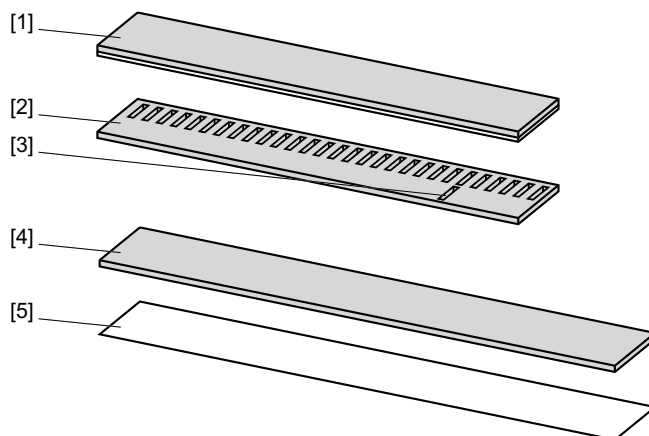
- [1] Силовые линии магнитного поля
- [2] Магнитные датчики
- [3] Измерительная шкала в разрезе



Датчики

Системы прямого измерения перемещений для линейных серводвигателей

Точность измерения зависит от измерительной шкалы на участке перемещения. Она состоит из нескольких слоев. Сердцевинкой является металлическая полоса, в которой с высокой точностью вытравлена метка шкалы. В качестве опции такие измерительные шкалы могут иметь еще и метку 0-позиции. В зависимости от исполнения системы измерения перемещений сигнал 0-позиции может контролироваться отдельным датчиком. Эта металлическая полоса располагается между опорной и покровной полосами.



56233ахх

Рис. 64. Послойное устройство измерительной шкалы

- | | |
|----------------------|-----------------------------|
| [1] Покровная полоса | [4] Стальная опорная полоса |
| [2] Деления шкалы | [5] Липкий слой |
| [3] Метка 0-позиции | |

В качестве опции для индуктивных измерительных систем предлагается электронный контрольный блок, преобразующий синусоидальные и косинусоидальные сигналы в TTL-сигнал.

Индуктивные системы измерения перемещений имеют следующие характеристики, которые нужно учитывать при проектировании:

- скорость перемещения до 20 м/с;
- разрешение: 1000 мкм / sin-период (sin-/cos-сигнал)
5-50 мкм (TTL-сигнал);
- погрешность: ок. 10 мкм/м;
- степень защиты, как правило, IP66;
- нечувствительны к загрязнению.



3.5 Глоссарий

Термин / сокращение	Определение / пояснение
HIPERFACE®	H igh P erformance I nterface (Зарегистрированный товарный знак фирмы Sick Stegmann GmbH)
EMC	E lectro M agnetic C ompobility (Электромагнитная совместимость)
TTL	T ransistor- T ransistor L ogic (Транзисторно-транзисторная логика)
HTL	H igh V oltage T ransistor L ogic (Высокопороговая логика)
Интерфейс SSI	S erial S ynchronous I nterface (Синхронный последовательный интерфейс)
Однооборотный датчик	Определение абсолютного положения в пределах 1 оборота
Многооборотный датчик	Определение абсолютного положения в пределах нескольких оборотов
ADC	A nalog-to- D igital C onverter (Аналогово-Цифровой Преобразователь)
SRAM	S tatic R andom A ccess M emory (Статическая память RAM)
NVSRAM	N on- V olatile S tatic R andom A ccess M emory (Энергонезависимая статическая память RAM)
EEPROM	E lectrically E raseable P rogrammable R ead O nly M emory (Электрически стираемое программируемое постоянное запоминающее устройство)
DSP	D igital S ignal P rocessor (Цифровой Сигнальный Процессор)
Интерфейс DPR	D ual P ort R AM-интерфейс
Релюктанц	Магнитное сопротивление



4 Сервоусилители

4.1 Общие сведения о сервоусилителях

В связи с заметным ростом потребности в рационализации и автоматизации современного производственного оборудования соответствующим образом возросли и требования к мощным сервоусилителям.

Поэтому сервоприводы больше не применяются как простые вспомогательные или исполнительные приводы, а с помощью сложных специальных функций (например таких, как регулятор синхронного управления, электронный кулачок, обработка в режиме обучения, регулирование момента) выполняют важные машинные операции, которые в прошлом оставались за механическими решениями.

Мощные сервоусилители отличаются следующими свойствами:

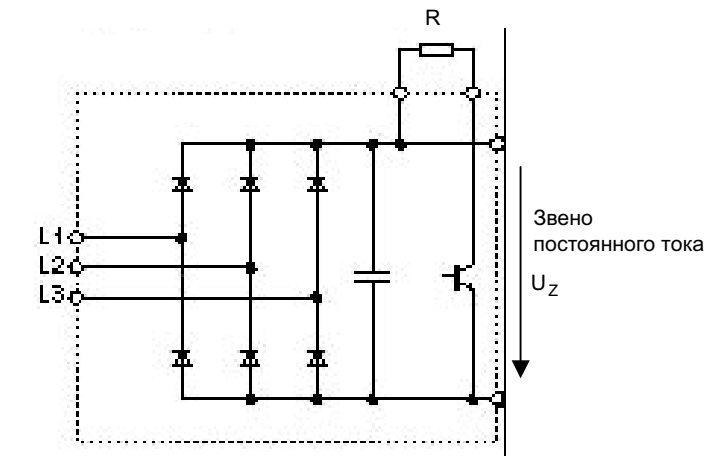
- Высокое качество регулирования:
 - равномерность вращения;
 - малое отклонение частоты вращения;
 - малая погрешность позиционирования.
- Высокая динамика:
 - малое время регулирования при скачках уставки и нагрузки.
- Перегрузочная способность:

При кратковременных циклах перемещения с большими ускорениями сервоусилитель должен быть способен подавать на двигатель соответствующий ток. Из-за коротких фаз ускорения сервоусилители с малой перегрузочной способностью нужно выбирать большего типоразмера, что влечет за собой увеличение затрат на систему.
- Высокопроизводительный микроконтроллер, обеспечивающий свободное программирование / параметрирование.
- Сложные специальные функции, как например:
 - электронный кулачок;
 - регулятор синхронного управления;
 - обработка в режиме обучения;
 - регулирование момента.
- Разнообразные порты:
 - гальванически развязанные двоичные входы и выходы;
 - аналоговые входы и выходы;
 - несколько портов для различных датчиков (на двигателе и внешних);
 - разъем для дополнительных устройств, например для сетевого интерфейсного модуля или платы управления.
- Дополнительный порт шины для связи с другими сервоусилителями.
- Стандартный порт / возможность подключения операторской панели и ПК (например USB, Ethernet).
- Дополнительные защитные элементы, например клеммы для реализации функции "Безопасный останов" по EN 954-1, категория 3.
- Широкий диапазон допустимого напряжения электросети, 3 × 380 В (-10 %) ... 500 В (+10 %).
- Соблюдение предельных значений ЭМС по классу А и В согласно EN 5011.
- Возможность подключения тормозного резистора.



4.1.1 Звено постоянного тока

Как правило, силовая часть сервоусилителя работает по принципу инвертора напряжения с промежуточным звеном. Создающее момент вращающееся поле формируется из этого промежуточного звена постоянного тока (далее – звено постоянного тока) через инверторный мост. Ток в звене постоянного тока генерируется, например, с помощью мостового выпрямителя чаще всего напрямую, т. е. без трансформатора, из 3-фазной питающей сети.



57301aru

Рис. 65. Принципиальная схема звена постоянного тока с V6-диодным мостом

R_{BW} Тормозной резистор
 U_Z Напряжение звена постоянного тока

Конденсатор звена постоянного тока работает как энергетический буфер, накапливая выпрямленное переменное напряжение. Кинетическая энергия, возникающая при торможении привода, преобразуется в электрическую и возвращается в звено постоянного тока. При этом количество энергии, которое способно принять это звено, зависит от его емкости.

Для формирования звена постоянного тока кроме прочего применяются конденсаторы. Суммарная емкость используемых в этом звене конденсаторов определяет вариант исполнения звена постоянного тока, емкость которого значительно превосходит значения вышеназванной общей емкости. Звено постоянного тока с малой емкостью называют "коротким", а с большой емкостью – "длинным".

SEW-EURODRIVE в своих сервоусилителях комбинирует оба варианта исполнения звена постоянного тока.

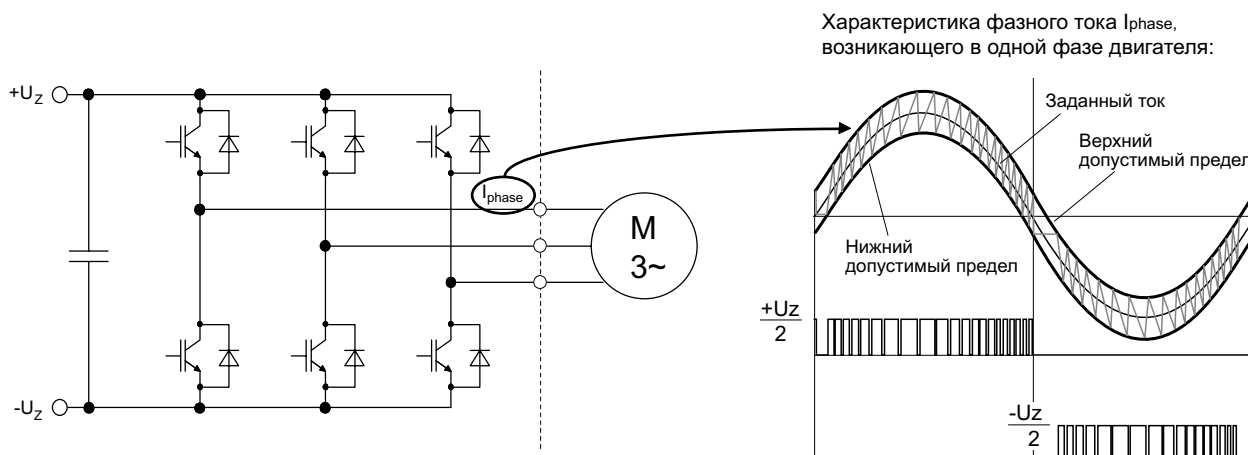
	Короткое звено постоянного тока	Длинное звено постоянного тока
Принцип	Использование: - металлопленочных конденсаторов (MKS); - конденсаторов с металлизированной полимерной пленкой (МКП).	Использование: электролитических конденсаторов.
Преимущества	Нет необходимости в зарядной схеме.	Возможность большего накопления энергии, особенно при динамических применениях.
	Меньше обратного влияния на сеть.	Менее мощный тормозной резистор.
	Снижение стоимости за счет меньшего количества деталей.	Эффективный обмен энергией между осевыми модулями.
	Экономия места за счет меньших размеров устройств.	
	Более долгий срок службы пленочных конденсаторов.	



4.1.2 Инвертор

Инвертор питается напряжением звена постоянного тока U_z . Транзисторы IGBT тактируются соответствующей схемой управления таким образом, что на выход осевого модуля, а значит и на двигатель, подается ШИМ-модулированное напряжение. Блок управления сервоусилителя формирует вращающееся поле, например, синусоидальное. При этом ширина импульсов определяется управляющим воздействием регулятора тока. Это ШИМ-модулированное напряжение создает в двигателе ток, который за счет индуктивностей двигателя и кабелей является почти синусоидальным.

Встречно-параллельно каждому IGBT транзистору включен диод. При индуктивной нагрузке на выходе эти безынерционные диоды предотвращают повреждение инвертора напряжениями самоиндукции, возникающими в момент переключения. Они возвращают накопленную энергию на вход инвертора. Кроме того, эти диоды используются для обмена реактивной энергией между двигателем и сервоусилителем.



57304aru

Рис. 66. Принципиальная схема инвертора, широтно-модулированное напряжение звена постоянного тока и изменение тока в двигателе

4.1.3 Контроль перегрузки

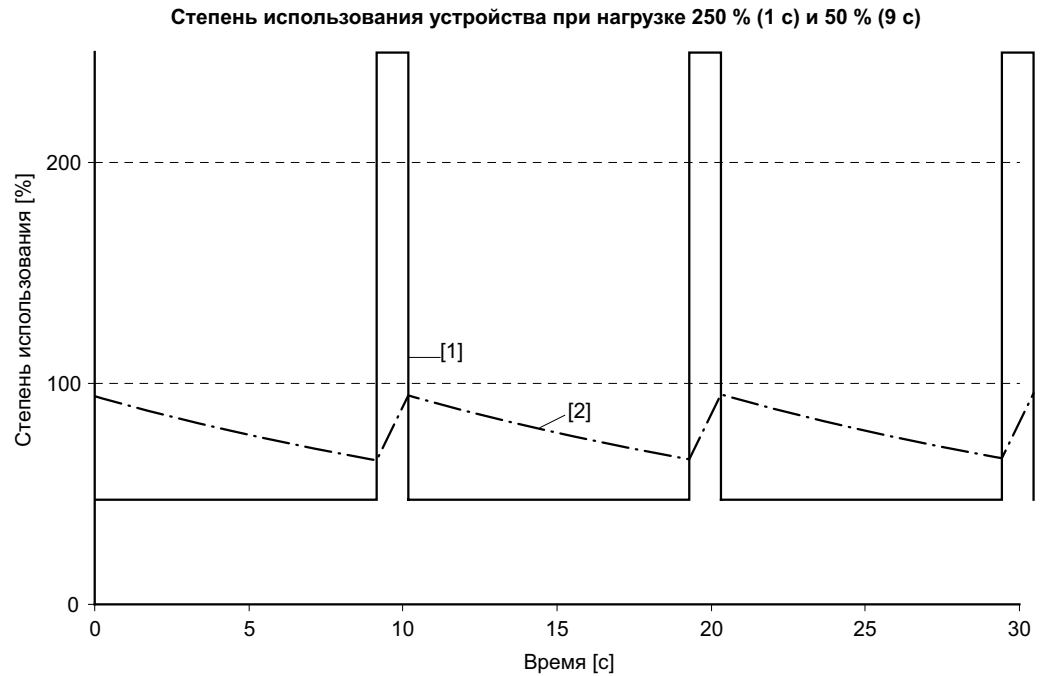
Перегрузочная способность сервоусилителя определяется главным образом необходимостью высокой динамики, что прежде всего предполагает очень кратковременные пики мощности. Продолжительность этих пиков может составлять миллисекунды, за которыми следуют более долгие "спокойные фазы" секундного порядка.

Типичной перегрузочной способностью является, например, 200-300 % от номинальной нагрузки в пределах одной секунды. В среднем степень использования не должна превышать 100 %.

Благодаря бурному развитию электроники, особенно в области процессоров, устройства управления осями обладают достаточными вычислительными ресурсами. Так, степень использования устройства может электронным способом моделироваться в самом устройстве для своевременных предупреждений или отключений.



Пример диаграммы на Рис. 67 показывает степень использования осевого модуля без учета нагрева. Выбран профиль нагрузки, при котором степень использования устройства почти достигает предела в 100 %.



57831bru

Рис. 67. Пример моделируемой в сервоусилителе электромеханической нагрузки

- [1] Ток двигателя
- [2] Степень использования

Кривая [1] на Рис. 62 показывает изменение тока, который кратко-временно и циклически достигает 250 % номинального тока. По линии 100 % можно увидеть тенденцию приближения степени использования к пределу в 100 %.



4.1.4 Требования ЭМС

От современных приводных систем требуется соответствие определенному классу помехозащищенности, например по EN 61800-3. Такое соответствие сильно зависит от конструкции и соблюдения определенных мер.

Сюда относятся, например:

- Со стороны сети:
 - использование сетевого фильтра между модулем питания и сетью;
 - использование коротких экранированных кабелей между сетевым фильтром и модулем питания.
- Со стороны двигателя:
 - использование выходного дросселя;
 - использование экранированного кабеля двигателя;
 - соблюдение максимальной длины кабеля двигателя (как правило, ок. 100 м) во избежание слишком больших емкостных токов утечки.
- Монтаж:
 - подключение кабельных экранов с большой площадью контакта для защиты от высокочастотных токов утечки;
 - раздельная прокладка силовых и сигнальных кабелей.

Подробнее см. в главе 6.5 "Электромагнитные помехи / Электромагнитная совместимость".

4.1.5 Дополнительные устройства

Дополнительные устройства значительно расширяют возможности современной приводной системы. Расширение прикладных и контрольных функций позволяет реализовать оптимальные по затратам решения почти в любых условиях применения.

Стандартные дополнительные устройства, например:

- интерфейсные модули для таких сетей как Profibus, ProfiNet, EtherCAT, DeviceNet обеспечивают подключение привода к контроллеру верхнего уровня. Контроллер передает управляющие команды и уставки (например, значения положения, скорости) на привод и получает от привода информацию о его состоянии, а также данные процесса (например, значения действительной частоты вращения, действительного положения).
- дополнительные устройства ввода/вывода необходимы, например, когда привод обрабатывает сигналы от множества конечных выключателей или иных датчиков. Кроме того, существуют дополнительные устройства с аналоговым интерфейсом, позволяющим приводу обрабатывать, например, аналоговые сигналы уставки.
- адаптеры датчиков среди прочего обеспечивают подключение внешних датчиков перемещения (например, на участках перемещения с проскальзыванием) или попеременную работу нескольких двигателей от одного осевого модуля.



4.2 Модульная многоосевая сервосистема

Модульная сервосистема состоит из следующих основных компонентов:

- центральный модуль питания;
- осевые модули.

От общего модуля питания несколько осевых приводов получают питание прямо через звено постоянного тока. Таким образом, для нескольких приводов нужен только один сетевой кабель и только один общий тормозной резистор. При использовании устройства рекуперации энергии тормозной резистор не нужен.



57306aru

Рис. 68. Блок-схема модульной сервосистемы

Преимущества сервосистемы модульной конструкции проявляются в сфере применения многоосевого привода. В зависимости от применения и режима работы через общее звено постоянного тока осуществляется обмен энергией между осевыми приводами. Этот обмен энергией начинается, когда один или несколько осевых приводов работают в двигательном режиме, в то время как остальные работают в генераторном режиме, возвращая энергию.

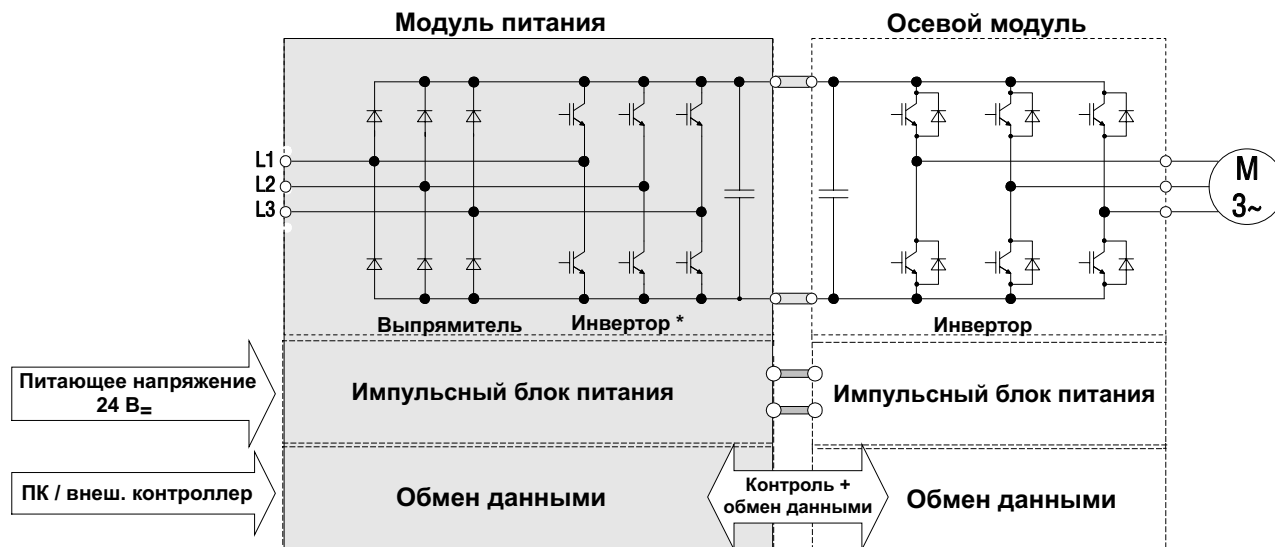
Еще одним преимуществом для многоосевого привода является снижение трудоемкости монтажа. Это возможно за счет того, что нужно подключить только один сетевой кабель и установить только один тормозной резистор на центральный модуль питания.

4.2.1 Модуль питания

Модуль питания предназначен для подачи силового питания на подключенные осевые модули через звено постоянного тока. Обычно он подключается прямо к сети переменного тока, стандартные входные параметры: 380...500 В_~, 50...60 Гц. Основные компоненты модуля питания:

- выпрямитель;
- тормозной прерыватель и клеммы для тормозного резистора¹⁾ или, как альтернативный вариант, устройство рекуперации;
- защита от перенапряжений в питающей сети;
- разъем для сетевого кабеля;
- шина обмена данными с осевыми модулями;
- разъем питания 24 В для электронных схем;
- различные контрольные устройства и функции (например, контроль отказа сети или измерение напряжения звена постоянного тока).

1) Если используется тормозной резистор, он устанавливается и подключается снаружи модуля. При невысокой генераторной энергии можно использовать модуль питания со встроенным тормозным резистором.



* Инвертор только с устройством рекуперации

57307aru

Рис. 69. Функциональная схема модуля питания с осевым модулем

В случае модульной сервоусилительной системы звено постоянного тока создается в модуле питания. Электрическая связь этого звена с осевыми модулями обеспечивается через механическое соединение, например, через систему шин.

Звено постоянного тока и возврат энергии

При торможении привода кинетическая энергия преобразуется в электрическую и возвращается в звено постоянного тока. В соответствии со следующей формулой при постоянной емкости звена постоянного тока должно возрастать напряжение, чтобы входящая энергия поглощалась этим звеном.

$$E = \frac{1}{2} \times J_{Mot} \times \omega_{Mot}^2 = \frac{1}{2} \times C_{ZK} \times U_{ZK}^2$$

J_{Mot} Момент инерции ротора двигателя

C_{ZK} Емкость звена постоянного тока, постоянная

ω_{Mot} Угловая скорость вала двигателя

U_{ZK} Напряжение звена постоянного тока

Когда привод переходит в режим торможения, избыточную энергию необходимо отводить.

Для этого существует, как правило, 4 возможности:

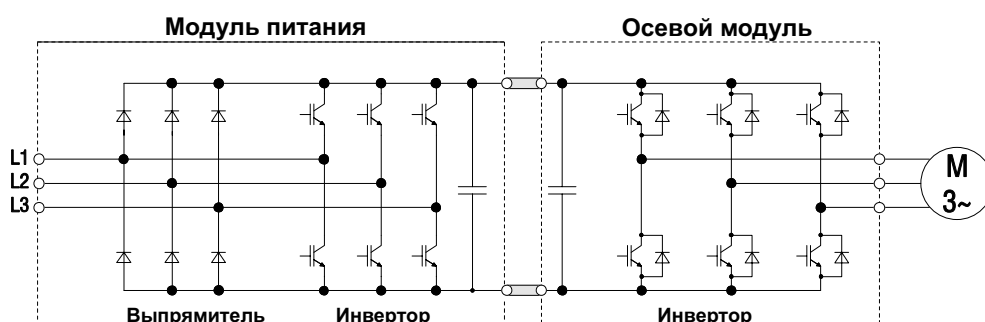
- устройство рекуперации энергии в сеть, т. е. энергия может использоваться другими потребителями;
- тормозной прерыватель и тормозной резистор, преобразующие электрическую энергию в тепловую;
- обмен энергией в многоосевой приводной системе через использование электрической энергии другими подключенными двигателями;
- емкостной (конденсаторный) модуль для накопления энергии за счет повышения емкости звена постоянного тока.



4.2.2 Устройство рекуперации энергии в сеть

Преимущество устройства рекуперации энергии в сеть состоит в том, что энергия торможения в виде электрической энергии отдается другим потребителям сети.

Существуют различные возможности реализовать устройство рекуперации энергии, например, возможности инвертора, включенного встречно-параллельно выпрямителю. При таком способе рекуперации энергии сетевой выпрямитель дополняется инвертором, который управляется с тактовой частотой, синхронной частоте сети. Если напряжение звена постоянного тока превышает выходное напряжение выпрямителя, избыточная энергия возвращается в сеть.

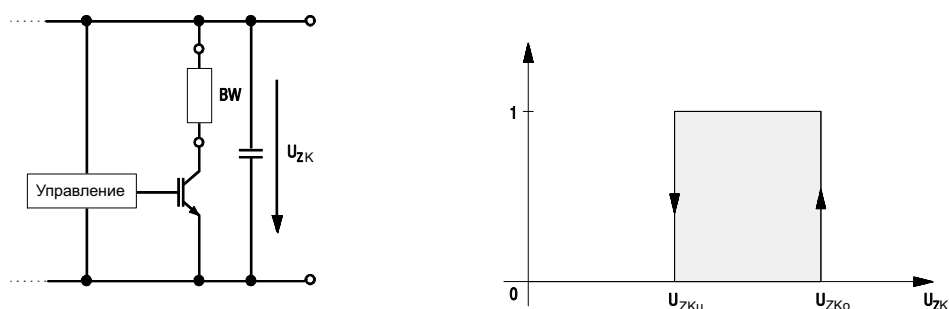


57308aru

Рис. 70. Функциональная схема модуля питания с устройством рекуперации

4.2.3 Тормозной выпрямитель и тормозной резистор

В отличие от устройства рекуперации при использовании тормозного выпрямителя избыточная энергия не возвращается в сеть, а через тормозной резистор преобразуется в тепло. Если энергия торможения невысокая, то тормозной прерыватель с соответствующим тормозным резистором – это экономически более выгодный вариант, чем устройство рекуперации.



57310aru

Рис. 71. Управление тормозным прерывателем, переходная характеристика переключения тормозного прерывателя

- U_{ZKu} Нижний предел напряжения звена постоянного тока
- U_{ZKo} Верхний предел напряжения звена постоянного тока



4.2.4 Сравнительный обзор параметров устройства рекуперации и тормозного прерывателя

С учетом условий применения в ходе проектирования необходимо выбрать наиболее оптимальный метод.

	Устройство рекуперации	Тормозной прерыватель и тормозной резистор
Критерий		
Размещение	Полностью встроено в модуль питания.	Тормозной прерыватель в модуле питания. Тормозной резистор вне электрошкафа.
Влияние на температуру окружающей среды	Весьма незначительное.	Выделение тепла на тормозном резисторе.
Дополнительные кабели	---	Подключение тормозного резистора.
Энергобаланс	Электрическая энергия сохраняется.	Электрическая энергия преобразуется в тепловую.
Расходы	Устройство рекуперации дороже тормозного резистора.	Тормозной резистор сравнительно выгоден.
ЭМС	Возможно обратное влияние на другие потребители сети.	Меньшее обратное влияние на сеть, чем в случае устройства рекуперации.



4.2.5 Осевой модуль

Осевой модуль предназначен для управления 3-фазным серводвигателем переменного тока способом изменения частоты вращающегося поля статора.

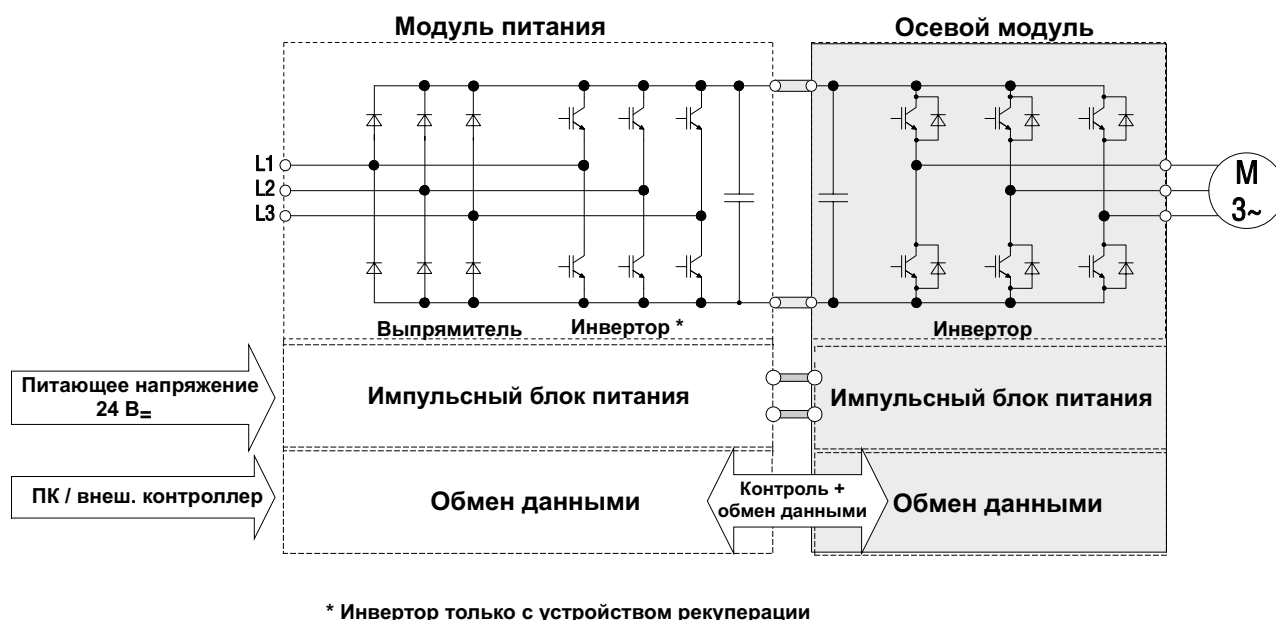
Основные компоненты осевого модуля:

- мостовой инвертор на IGBT транзисторах в качестве силового выходного каскада;
- порт обмена данными и двоичные входы/выходы как базовое оснащение для систем автоматического управления;
- разъемы для датчика двигателя;
- слоты для дополнительных устройств (адаптер датчика, интерфейсный модуль, расширение входов-выходов);
- слоты для плат управления;
- блок управления тормозом двигателя;
- блок контроля термодатчика двигателя;
- оснастка для реализации системы отключения "Безопасный останов" по стандарту EN 60204-1;
- индикатор для отображения рабочего состояния;
- внутренние аппаратные и программные средства эксплуатационного контроля.

Транзисторы IGBT – это надежные силовые транзисторы, наиболее подходящие для данного применения.

Их основные преимущества:

- малые потери при переключении;
- простое управление;
- высокая частота переключения;
- высокая электрическая прочность.



57312aru

Рис. 72. Функциональная схема осевого модуля с модулем питания



Количество осевых приводов, подключаемых к одному модулю питания, ограничено.

Это ограничение зависит от следующих параметров:

- мощность модуля питания;
- суммарная или пиковая мощность осевых модулей;
- максимальное количество адресуемых осевых приводов;
- механическая конструкция;
- параметры шин звена постоянного тока.

4.2.6 Питание 24 В

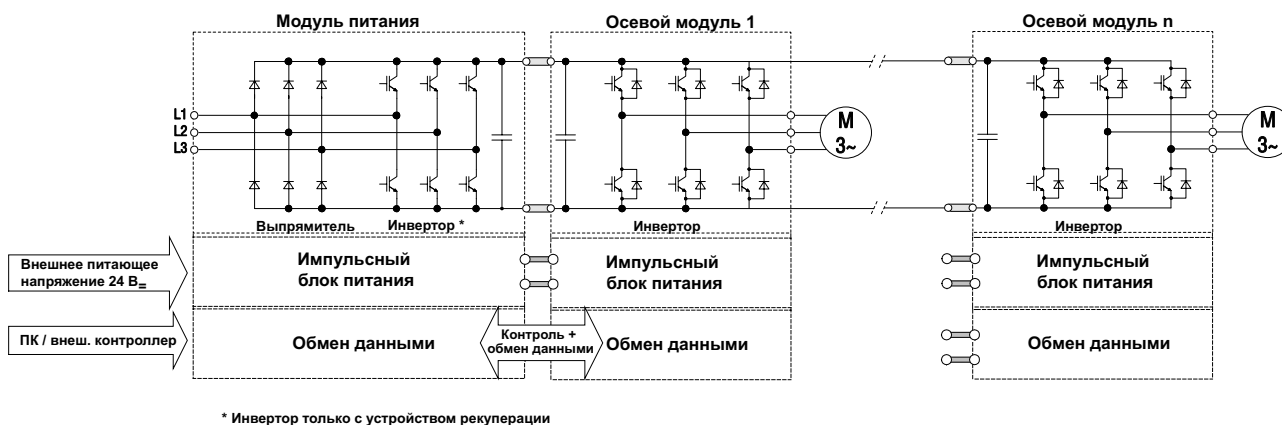
Для подачи напряжения на систему управления сервоусилителей используется питание, независимое от сети переменного тока. Устройства оснащены разъемом 24 В_±, изолированным от силового питания.

Для подачи питания на промышленные низковольтные потребители, например ПЛК и системы управления сервоусилителей используется напряжение 24 В по стандарту EN 61131. Однако иногда случаях необходимо напряжение с жесткими допусками на отклонение, например для питания тормоза. В этом случае возможностей обычных блоков питания с диодным мостом недостаточно, и используется импульсный блок питания со стабилизацией.

Как правило, независимое питание от звена постоянного тока выгодно тем, что при отключении питающей сети сохраняется возможность параметрирования устройств и функциональность шинных систем. Это важно, например, в тех случаях, когда устройства объединены какой-либо шинной системой. Если устройства получают независимое питание 24 В, говорят также о резервном режиме, обеспечивающем работу шинной системы без подключения электросети.

Как показано на Рис. 73, для модульных систем достаточно использовать внешнее питание 24 В, проведя его от одного устройства к другому.

Питание 24 В для блока управления тормозом и для электронных схем подается отдельно. В целях безопасной эксплуатации допустимые отклонения этих двух напряжений контролируются устройствами сервоусилителя.



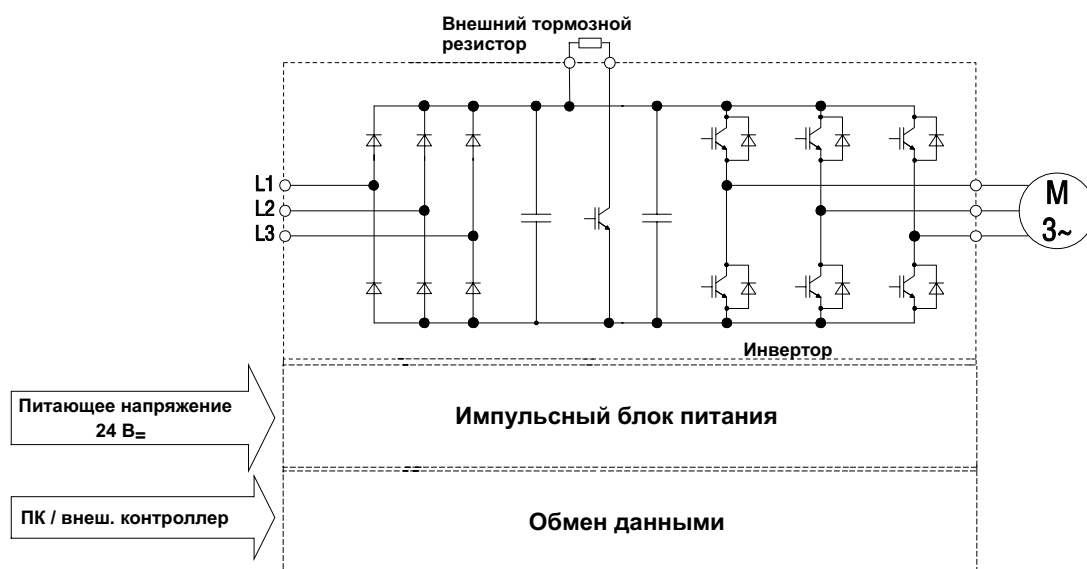
57314aru

Рис. 73. Функциональная схема модульной многоосевой системы с внешним питанием 24 В



4.3 Одноосевой усилитель

Преимущество одноосевых усилителей, которые также называются компактными усилителями, состоит в том, что они выпускаются как отдельные компактные модули. В своем корпусе они содержат звено постоянного тока с тормозным прерывателем, инвертор, выпрямитель, импульсный блок питания, разъемы для дополнительных устройств, порты обмена данными и ЦП-модули для обмена данными и регулирования. То есть, отсутствуют дополнительные соединения отдельных компонентов, необходимые для модульных систем.



57316bru

Рис. 74. Функциональная схема одноосевого усилителя

Функции силовой части, т. е. модуля питания от сети и инвертора, соответствуют функциям модульных сервоусилительных систем, описанных в главе 4.2.



4.4 Сравнительный обзор модульной многоосевой системы и одноосевой системы

Перечисленные ниже преимущества обеих систем помогут найти оптимальный вариант при выборе между модульной многоосевой и одноосевой системами.

Преимущества модульной многоосевой системы

- только один сетевой кабель, т. е. трудоемкость монтажа ниже;
- только один тормозной резистор, если нет устройства рекуперации, т. е. трудоемкость монтажа ниже;
- в случае количества осей от 3 и более, занимаемая площадь электрошкафа меньше (в сравнении с одноосевыми модулями) за счет менее сложного монтажа;
- обмен энергией между осевыми модулями через звено постоянного тока;
- простой обмен данными между отдельными осевыми модулями через общую системную и сигнальную шину.

Преимущества одноосевой системы

- возможно децентрализованное размещение, чтобы не использовать длинные кабели двигателей;
- при использовании до 2-3 осевых приводов одноосевой усилитель – экономически наиболее выгодное решение;
- при низкой мощности и малом количестве осей одноосевой усилитель – экономически наиболее выгодное решение.

4.5 Глоссарий

Термин / сокращение	Определение / пояснение
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor, силовой полупроводниковый прибор
ЭМС	ЭлектроМагнитная Совместимость
Устройства ввода/вывода	Устройства расширения входов-выходов
ПЛК	Программируемый Логический Контроллер
ЦП	Центральный Процессор, главный процессор



5 Структура и режимы регулирования

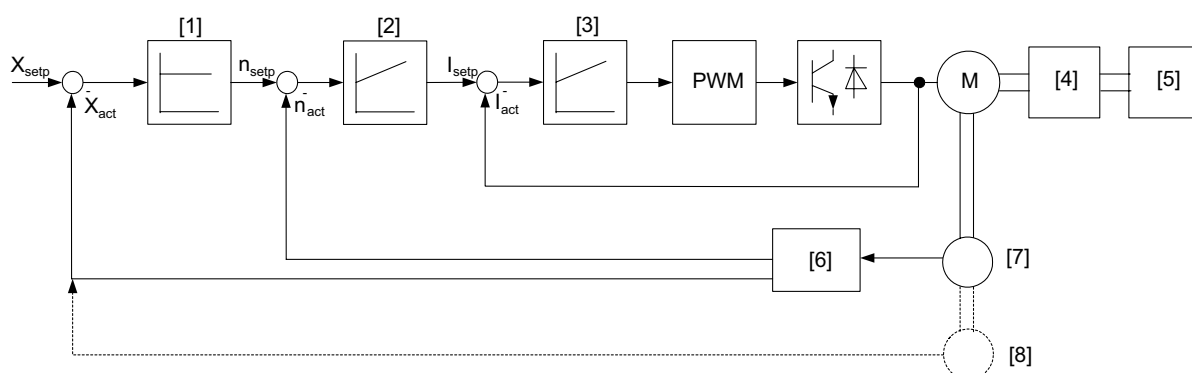
В данной главе рассматривается структура регулирования с синусоидальным питанием двигателя. Подробнее о питании такой и прямоугольной формы см. главу 2.4 "Принцип действия синхронных серводвигателей".

5.1 Обзор

Во многих случаях сервоприводы применяются для позиционного регулирования или регулирования частоты вращения. Система управления выполняется, как правило, по принципу подчиненного регулирования, т. е. контуры регулирования перекрываются.

- Внутренний контур регулирует ток. При наличии одного только этого регулятора возможно регулирование момента.
- Перекрывание регулятора тока с регулятором частоты вращения обеспечивает регулирование частоты вращения.
- Следующее перекрывание с позиционным регулятором обеспечивает регулирование положения.

На Рис. 75 показана принципиальная схема структуры регулирования сервоусилителя. Как правило, в современных сервоусилителях используются полностью цифровые регуляторы.



55701aru

Рис. 75. Структурная схема регулирования сервоусилителя

[1]	Позиционный регулятор K_{p_x}	[5]	Нагрузка
[2]	Регулятор частоты вращения K_{p_n}	[6]	Обработка сигнала
[3]	Регулятор тока	[7]	Датчик двигателя
[4]	Редуктор (необязательно)	[8]	Датчик абсолютного отсчета

В следующих главах отдельные типы регуляторов рассматриваются подробнее.

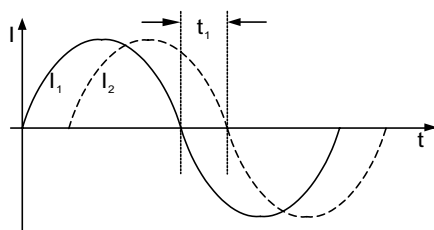


5.2 Регулирование тока

Характер работы сервопривода напрямую зависит от вращающего момента двигателя. Сам вращающий момент определяется токами в двигателе. Чтобы как можно динамичнее получить заданный вращающий момент на валу двигателя, необходимо не только подавать управляемое напряжение на двигатель (U/f-режим), но и регулировать ток.

Регулируемые двигатели переменного тока (синхронные и асинхронные) работают на 3-фазном переменном токе. Однако эти 3 тока в фазах U, V, W не являются независимыми один от другого. Действует правило, что сумма этих 3 токов всегда равна 0. Это означает, что одну составляющую тока, например ток в фазе W, всегда можно рассчитать по 2 другим составляющим, в данном случае в фазах U и V. Таким образом, для регулирования токов двигателя достаточно двух независимых друг от друга регуляторов. Например, если регулируются токи в фазах U и V, то этим определяется и ток в фазе W.

Тем не менее, прямое регулирование фазных токов имеет один недостаток. При этом с повышением частоты вращения двигателя синусоидальные токи приходится регулировать с повышенной частотой. Поскольку принцип действия регуляторов не позволяет им реагировать на изменение уставки мгновенно, это приводит к сдвигу фаз между заданными и действительными значениями тока. Задержку действительной величины относительно заданной величины регулятора следует считать постоянной, за счет чего сдвиг фаз между заданным током и действительным током при повышении частоты вращения возрастает.



55703ахх

Рис. 76. Разность амплитуд заданного и действительного тока

I_1	Заданный ток
I_2	Действительный ток
t_1	Запаздывание регулятора

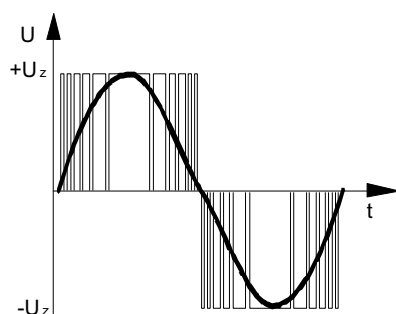
Таким образом, даже в установившемся режиме, т. е. при отсутствии изменений амплитуды тока, имеется разность заданных и действительных значений. Вычислительная мощность современных процессоров позволяет через координатное преобразование переводить измеренные действительные значения тока в систему постоянных величин. После чего выполняется регулирование этих постоянных величин. Затем значения напряжения двигателя преобразуются обратно как управляющие воздействия регулятора.

В качестве заданных значений для регулятора тока используются составляющая I_{sq} для создания вращающего момента и составляющая I_{sd} для создания магнитного поля. Для получения дополнительных сведений рекомендуется использовать литературу по теме "Векторное управление двигателями переменного тока".



Управляющим воздействием регулятора тока является напряжение двигателя. Это напряжение с помощью широтно-импульсной модуляции задается в дискретизированной по времени форме. При этом напряжение между двумя фазами выхода сервоусилителя может принимать только три потенциала.

Необходимая основная гармоника напряжения получается за счет быстрого переключения напряжения звена постоянного тока между $+U_z$ и $-U_z$. При этом стандартными частотами для широтно-импульсной модуляции являются, например, 4 кГц, 8 кГц, 16 кГц.



55704axx

Рис. 77. Широтно-импульсная модуляция (ШИМ)

Изменение напряжения возможно только с шагом ШИМ-интервала, поэтому и регуляторы тока, как правило, работают с частотами ШИМ. Между тем, интеллектуальные цифровые методы регулирования тока обеспечивают изменение уставки тока в пределах почти одного шага дискретизации. При частоте регулирования тока, например, в 8 кГц это означает время регулирования тока в 125 мкс.

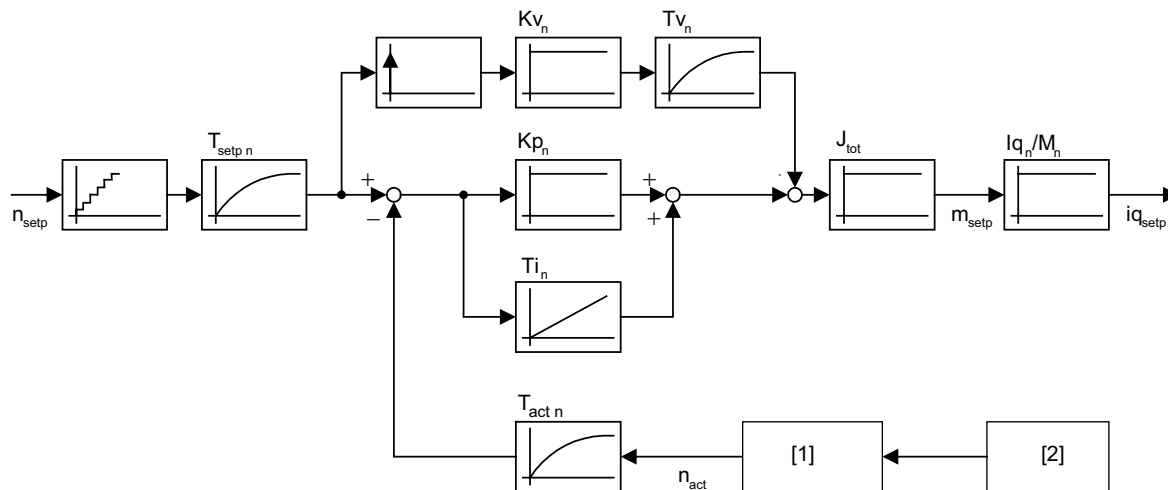
Настройка параметров регулятора тока зависит от параметров объекта регулирования. Эти параметры в свою очередь зависят от двигателя, подключенного к сервоусилителю. Поэтому на сервоусилителях SEW-EURODRIVE регулятор тока настраивается оптимальным образом при вводе двигателя в эксплуатацию. Это происходит благодаря тому, что база данных со всеми параметрами двигателей SEW-EURODRIVE встроена в программное обеспечение для ввода в эксплуатацию.



5.3 Регулирование частоты вращения

5.3.1 Структура регулирования частоты вращения

На рисунке показана структурная схема контура регулирования частоты вращения.



55705aru

Рис. 78. Структура регулирования частоты вращения

[1]	Расчет частоты вращения	$T_{i\ n}$	Постоянная времени интегрирования регулятора
[2]	Датчик двигателя	$T_{act\ n}$	Постоянная времени фильтра интегрирования частоты вращения
n_{setp}	Уставка частоты вращения	$T_{v\ n}$	Постоянная времени фильтра упреждения по ускорению
n_{act}	Действительная частота вращения	J_{tot}	Общий момент инерции
$T_{setp\ n}$	Постоянная времени фильтра частоты вращения	I_{qn}/M_n	Машинная постоянная
$K_{v\ n}$	Усиление упреждения по ускорению	m_{setp}	Заданный момент
$K_{p\ n}$	Пропорциональный регулятор	$i_{q\ setp}$	Уставка тока для создания вращающего момента

После подготовки данных:

- уставки частоты вращения, см. Стр. 85;
- контроля действительного значения частоты вращения, см. Стр. 83;
- действительного значения частоты вращения, см. Стр. 85;

разность этих сигналов подается на ПИ-регулятор. Его управляющее воздействие отвечает за ускорение привода. Отсюда можно по моменту инерции приводной линии (двигатель + нагрузка) рассчитать необходимый вращающий момент.

По обратной величине машинной постоянной $k_T = M_n/I_{qn}$ определяется ток для создания вращающего момента, подаваемый на регулятор тока.

Чтобы улучшить динамику поведения системы при задающем воздействии, вводится упреждение по ускорению (см. Стр. 87).



5.3.2 Контроль положения и частоты вращения

Для контроля положения и частоты вращения используются различные датчики. Прежде всего, эти датчики можно классифицировать по следующим критериям:

- датчики с абсолютной информацией о положении, например резольверы, Hiperface-датчики (фирмы Sick / Stegmann), датчики EnDat (фирмы Heidenhain);
- датчики приращений с инкрементной информацией о положении, например TTL-датчики, sin-/cos-датчики.

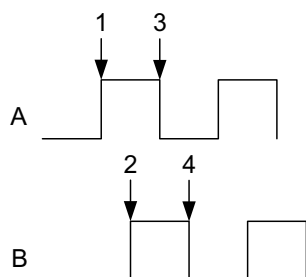
Для управления синхронными двигателями с возбуждением от постоянных магнитов необходимы данные об абсолютном положении ротора. Поэтому с двигателями такого типа применяются, как правило, датчики абсолютного отсчета.

Если требуется, чтобы после включения привода его положение было известно сразу, без выхода в 0-позицию, также целесообразно использовать датчик абсолютного отсчета. Резольвер, как правило, не подходит для такого применения, поскольку данные абсолютного положения он выдает только в пределах одного оборота вала двигателя.

Как датчики абсолютного отсчета, так и инкрементные датчики характеризуются тем, что предоставляют информацию только о положении. По одной этой информации сервоусилитель определяет частоту вращения, считывая положение через равные промежутки времени. Частота вращения определяется путем расчета разности двух считанных значений положения и деления этой разности на известное изменение времени. Отсюда очевидно, что частота вращения используется не как мгновенное значение в определенный момент времени, а скорее представляет собой среднее значение по интервалу дискретизации.

Для получения высокой динамики при регулировании частоты вращения требуется максимально быстрое определение действительного значения частоты вращения. Поэтому интервал дискретизации следует выбирать коротким. При этом решающую роль играет разрешающая способность датчика. Вышеназванные датчики имеют следующие значения разрешения на оборот вала двигателя:

- Резольвер: Современные методы контроля обеспечивают 15-битовую обработку сигнала резольвера, т. е. разрешение составляет $2^{15} = 32768$ инкрементов / оборот.
- TTL-датчик: При дискретности 1024 импульсов / оборот за счет сдвига двух каналов датчика на 90° в сервоусилителе получается разрешение в $4 \times$ число импульсов датчика на оборот, т. е. $4 \times 1024 = 4096$ инкрементов / оборот. Таким образом, для такого датчика вполне достаточна 12-битовая обработка сигналов в сервоусилителе ($2^{12} = 4096$).



55706ахх

Рис. 79. Сигналы TTL-датчика

- Sin-/cos-датчик, Hiperface, EnDat: Разрешение составляет $2^{10} \times$ число импульсов датчика на оборот, т. е. $2^{10} \times 1024 = 1048576$.



Если частота вращения рассчитывается по интервалу времени, например, 500 мкс, то с учетом позиционного разрешения различных датчиков для частоты вращения получаются следующие значения разрешения:

Резольвер

$$\frac{1 \text{ оборот}}{2^{15}} = 3,05175 \times 10^{-5} \text{ оборотов}$$

$$\frac{3,05175 \times 10^{-5} \text{ оборотов}}{500 \text{ мкс}} = 0,061 \frac{1}{\text{с}} = 3,66 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$$

**TTL-датчик
(1024 имп/об)**

$$\frac{1 \text{ оборот}}{4096} = 2,44 \times 10^{-4} \text{ оборотов}$$

$$\frac{2,44 \times 10^{-4} \text{ оборотов}}{500 \text{ мкс}} = 0,48828 \frac{1}{\text{с}} = 29,3 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$$

Sin-/cos-датчик

$$\frac{1 \text{ оборот}}{1024 \times 2^{10}} = 9,5367 \times 10^{-7} \text{ оборотов}$$

$$\frac{9,5367 \times 10^{-7} \text{ оборотов}}{500 \text{ мкс}} = 1,907348 \times 10^{-3} \frac{1}{\text{с}} = 0,114 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$$

Для разных датчиков очевидны различия в дискретизации значения частоты вращения. За счет этой дискретизации возникает так называемая "пульсация частоты вращения". На следующей диаграмме показана пульсация стандартного TTL-датчика с разрешением 1024 имп/об при периоде дискретизации регулятора частоты вращения в 500 мкс.

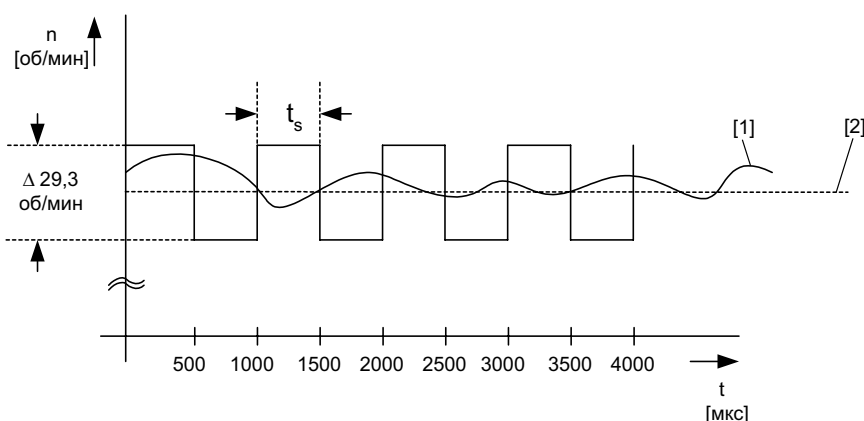


Рис. 80. Пульсация частоты вращения

55710aru

- t_s Шаг дискретизации n-регулятора
 [1] Действительная частота вращения
 [2] Уставка частоты вращения



Такая "пульсация" действительного значения частоты вращения через регулятор частоты вращения передается на уставку вращающего момента. При этом появляются такие большие значения, которые уже не остаются в пределах допустимого отклонения. Как правило, пульсация в 10 % от номинального момента двигателя является недопустимой.

5.3.3 Фильтр действительного значения частоты вращения

Как пояснялось в предыдущем пункте, пульсация вращающего момента двигателя должна быть ограничена. Поскольку эта пульсация выводится из действительного значения частоты вращения, это значение нужно соответствующим образом фильтровать. При этом необходимая постоянная времени зависит от следующих факторов:

- тип используемого датчика;
- усиление регулятора частоты вращения;
- моменты инерции.

Недостатком фильтров является задержка действительного значения частоты вращения по времени. Эта задержка в свою очередь ограничивает динамику контура регулирования частоты вращения.

Поэтому фильтрация должна быть только необходимой и достаточной. При этом взаимодействуют несколько величин:

- разрешение датчика;
- максимальная пульсация вращающего момента;
- необходимая динамика в контуре регулирования частоты вращения;
- моменты инерции;
- постоянная времени фильтра действительного значения частоты вращения.

Очевидно, что учитывать все эти взаимосвязи, а вместе с ними и правильную настройку всех параметров контура регулирования – задача непростая. Современные средства ввода в эксплуатацию за счет автоматической обработки этих взаимосвязей могут оказать весьма ценную поддержку, см. пункт "Жесткость регулирования" на Стр. 89.

5.3.4 Подготовка уставки частоты вращения

При определенных условиях внешнюю уставку частоты вращения требуется подготовить, прежде чем подавать на регулятор. Это необходимо, например, в том случае, когда уставка подается в аналоговом виде и имеет сильные шумы, требующие фильтрации. Эта фильтрация, как и в случае действительного значения частоты вращения, снижает возникающую пульсацию вращающего момента.

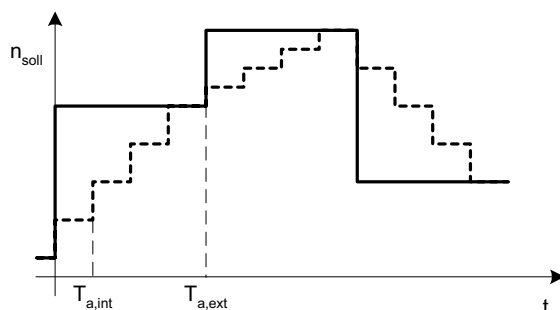


Рис. 81. Точный интерполятор

55711axx

$T_{a, \text{int}}$ Период дискретизации регулятора частоты вращения
 $T_{a, \text{ext}}$ Период дискретизации внешнего источника уставки



Однако, как правило, уставка подается в цифровом виде. Если шаг дискретизации источника уставки больше, чем у внутреннего регулятора, имеет смысл подавать уставку через "точный интерполятор". Этот интерполятор уменьшает грубую дискретизацию сигнала. Кроме того, снижается и пульсация вращающего момента.

На Рис. 81 приводится пояснение к вышесказанному.

Сплошной линией показан входной сигнал, а штриховой – выходной сигнал точного интерполятора.

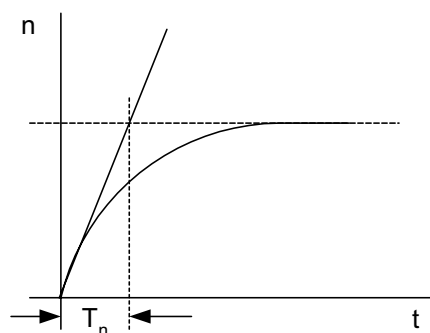
5.3.5 Регулятор частоты вращения

С допустимым приближением, которое здесь подробно не рассматривается, передаточную характеристику регулятора частоты вращения можно описать как фильтр 1-го порядка.

При этом постоянная времени описывает динамику контура регулирования и рассчитывается следующим образом:

$$T_n = \frac{1}{K_{p_n}}$$

T_n Постоянная времени регулятора частоты вращения
 K_{p_n} П-составляющая регулятора частоты вращения



55713axx

Рис. 82. Переходная характеристика Π_{11} -звена

Существует минимальная постоянная времени, при которой контур регулирования работает пока стабильно. Если при повышении K_{p_n} постоянная времени становится меньше этого предельного значения, в контуре регулирования частоты вращения начинаются колебания. При этом минимальное достижимое значение T_n зависит от следующих факторов:

- динамика регулятора тока;
- временная характеристика контроля действительной частоты вращения (интервал дискретизации для контроля положения);
- скорость вычислений цифрового регулятора частоты вращения;
- частота дискретизации регулятора частоты вращения.

Интегратор (И-составляющая) в регуляторе частоты вращения не оказывает серьезного влияния на постоянную времени T_n . Он позволяет избежать статического отклонения между уставкой и действительным значением частоты вращения при возникающих моментах нагрузки. Настройка параметров интегратора влияет на переходный режим действительного значения частоты вращения. При этом, как правило, выполняется настройка на "апериодический переходный процесс".

В двух следующих разделах показано, что на динамику регулятора частоты вращения существенно влияют и моменты инерции.



5.3.6 Упреждение по ускорению

Упреждение по ускорению способствует повышению динамики реагирования контура регулирования на задающее воздействие. Это повышение динамики не зависит от постоянной времени контура регулирования.

Следует учитывать, что упреждение по ускорению не влияет на динамику коррекции возмущающих величин, например таких как скачок нагрузки. Динамика такой коррекции зависит только от постоянной времени контура регулирования частоты вращения.

Для упреждения по ускорению из временной характеристики уставки частоты вращения рассчитывается значение ускорения, которое прибавляется к управляющему воздействию регулятора частоты вращения. При этом вращающий момент на валу двигателя может создаваться еще до того, как регулятор распознает отклонение между уставкой и действительным значением частоты вращения.

Если уставка частоты вращения имеет высокочастотные помехи, т. е. сильно "шумит", ее нужно фильтровать, чтобы пульсация вращающего момента оставалась на низком уровне. И в этом случае фильтрация тоже оказывает замедляющий эффект на сигнал ускорения, тем самым снижая динамику регулирования. Кроме того, величину упреждения можно масштабировать, однако, как правило, этот параметр устанавливается на 100 %.

5.3.7 Безлюфтовое соединение с нагрузкой

Соединение какой-либо массы с серводвигателем может быть без люфта или с люфтом. В этом разделе описывается "безлюфтовое соединение с нагрузкой".

"Безлюфтовое соединение с нагрузкой" означает, что нагрузка немедленно следует за каждым движением двигателя, даже если речь идет о мельчайших изменениях положения. Зачастую для таких приводов используют название "прямой привод".

За счет присоединения массы к двигателю увеличивается его момент инерции J_{tot} . Если пульсация вращающего момента несмотря на возросшую инерцию остается в допустимом диапазоне, то привод с присоединенной без люфта нагрузкой может работать с такой же динамикой, что и двигатель, работающий без нагрузки.

Однако если момент инерции J_{tot} увеличивается настолько, что пульсация вращающего момента выходит за пределы допустимого диапазона, необходимо увеличивать постоянную времени фильтра для действительного значения частоты вращения. Как описано выше, фильтр действительного значения ограничивает динамику регулятора, поэтому постоянную времени контура регулирования следует увеличивать путем снижения K_{pn} . При этом становится очевидно, что датчики с высоким разрешением, способные сохранять низкую пульсацию вращающего момента без сильной фильтрации действительного значения, обеспечивают преимущества для динамики контура регулирования.

$$J_{tot} = J_{Mot} + J_{ext}$$

J_{tot} Общий момент инерции

J_{Mot} Момент инерции двигателя

J_{ext} Момент инерции нагрузки, приведенный к валу двигателя



5.3.8 Соединение двигателя и нагрузки с люфтом

"Соединение двигателя и нагрузки с люфтом" означает, что нагрузка не сразу следует за каждым движением двигателя, т. е. возможны моменты, когда регулируемый по частоте вращения двигатель движется, а нагрузка – еще нет. Как правило, это бывает при соединении двигателя с нагрузкой через редуктор.

Если регулятор частоты вращения настроен на минимально допустимую постоянную времени, а параметр J_{tot} – на величину общего момента инерции $J_{Mot} + J_{ext}$, то это работает лишь до тех пор, пока двигатель и нагрузка движутся вместе.

Если двигатель движется в пределах люфта, регулятор частоты вращения задает слишком большой вращающий момент, поскольку ему не известно об "отсутствии" нагрузки. В результате чрезмерного вращающего момента постоянная времени контура регулирования становится ниже минимальной, а регулятор – нестабильным. Чтобы этого не происходило, нужно уменьшать усиление Kp_n регулятора на коэффициент $J_{Mot} / (J_{Mot} + J_{ext})$. Отсюда получится минимальная постоянная времени регулятора частоты вращения при соединении двигателя и нагрузки с люфтом:

$$T_{n, backlash} = T_{n, Mot} \times \frac{J_{Mot} + J_{ext}}{J_{Mot}}$$

$T_{n, backlash}$	Постоянная времени для всего привода
$T_{n, Mot}$	Постоянная времени для двигателя без нагрузки
J_{ext}	Момент инерции нагрузки, приведенный к валу двигателя
J_{Mot}	Момент инерции двигателя

Таким образом, привод с люфтом обязательно медленнее на так называемый относительный момент инерции, чем привод с минимально допустимой постоянной времени регулятора частоты вращения, см. пункт "Жесткость регулирования" на Стр. 89. Например, если присоединена нагрузка с моментом инерции в 100 раз больше момента инерции двигателя, а регулятор частоты вращения имеет минимальную постоянную времени T_n в 2 мс, то для такого привода минимально допустимой будет постоянная времени в 202 мс.



5.4 Позиционное регулирование

Обычно позиционный регулятор выполняется как пропорциональный (П-регулятор). Интегратор на нижнем уровне контура регулирования частоты вращения обеспечивает и для контура позиционного регулирования ликвидацию рассогласования при возмущениях в форме момента нагрузки.

Если учитывать передаточную характеристику подчиненного контура регулятора частоты вращения (см. раздел "Регулятор частоты вращения" на Стр. 86) с фильтром 1-го порядка, то для позиционного регулятора получается система 2-го порядка. В подавляющем большинстве случаев применения для действительного значения положения необходим переходный процесс без перерегулирования, т.е. "критическое затухание" и отсутствие выхода за конечное положение. При максимально высокой динамике это достигается следующим параметрированием позиционного П-регулятора:

$$K_{p_x} = \frac{K_{p_n}}{2}$$

K_{p_x} П-составляющая позиционного регулятора

K_{p_n} П-составляющая регулятора частоты вращения

Жесткость регулирования

В предыдущих разделах было показано, что при настройке параметров контура регулирования положения и частоты вращения существуют различные взаимосвязи. Чтобы облегчить процесс ввода в эксплуатацию, SEW-EURODRIVE вводит величину "жесткость регулирования". Через это значение можно выбирать необходимую динамику приводной электромеханической системы. С его помощью при вводе в эксплуатацию можно постепенно приближаться к границе устойчивости контура регулирования. При этом есть гарантия, что будут соблюдены граничные условия, например, минимально возможный фильтр действительной частоты вращения при сохранении максимально допустимой пульсации вращающего момента для данной разрешающей способности датчика положения.

5.5 Глоссарий

Термин / сокращение	Определение / пояснение
HIPERFACE® (Hiperface)	High Performance Interface. Зарегистрированный товарный знак фирмы Sick Stegmann GmbH
Интегратор	Формирует управляющее воздействие, непрерывно возрастающее при увеличении отклонения.
K_p	Пропорциональное усиление регулятора
K_v	Масштабный коэффициент упреждения
П-звено	Пропорциональный усилитель
ШИМ	Ш иротно- И мпульсная М одуляция
Контур регулирования	Компоненты: блок сравнения заданного / действительного значений, регулятор, объект регулирования
Пульсация / Шумы / Cogging	Колебания величины относительно ее среднего значения
T_i	Постоянная времени интегратора
Постоянная времени / динамика контура регулирования	Скорость реагирования контура регулирования
Запаздывание	Время задержки реакции контура регулирования
U/f-режим	Режим регулирования с фиксированным отношением Напряжение/Частота



6 Промышленное применение

6.1 Параметры электросети

Современные промышленные электросети поставляют синусоидальное напряжение с номинальной частотой в диапазоне 50-60 Гц. Сервоусилители способны работать от сетей различного типа (например, TN и TT).

Колебания напряжения в сети оказывают влияние на поведение привода при эксплуатации. При превышении номинального диапазона напряжения усилитель отключается, чтобы избежать повреждений. При выходе за нижний предел номинального диапазона напряжения двигатель более не развивает номинальных значений, указанных в его технических данных.

Сетевые дроссели и встроенная защита от перенапряжений снижает чувствительность сервоусилителей к пикам перенапряжения, возникающим в сети из-за других потребителей или компенсирующих установок без дросселей.

6.2 Условия окружающей среды

При проектировании очень важно учитывать условия окружающей среды, допустимые для сервоусилителей.

Важными условиями окружающей среды являются:

- Высота над уровнем моря. Современные сервоусилители в большинстве случаев рассчитаны на эксплуатацию без каких-либо ограничений при установке на высоте до 1000 м над уровнем моря. Если эти устройства используются на большей высоте, следует учитывать снижение номинальных параметров, т. е. уменьшение мощности. Это снижение мощности объясняется сокращением теплоотдачи из-за снижения атмосферного давления и уменьшения электрической прочности изоляции в данных условиях.
- Температура окружающей среды. Номинальным является стандартный температурный диапазон ок. 0-45 °C. При более высокой температуре следует обязательно учитывать снижение номинальных параметров из-за уменьшения теплоотдачи.
- Температура при хранении. Как правило, для хранения допускается более широкий температурный диапазон, чем для эксплуатации, поскольку отвод тепла от устройства не требуется. Однако температура не должна быть ниже минимально допустимой, иначе возможна глубокая разрядка конденсаторов звена постоянного тока и, как следствие, потеря емкости и выход из строя. После длительного хранения и после глубокой разрядки эти конденсаторы перед подключением к напряжению сети необходимо подготовить.
- Степень загрязненности среды согласно IEC 60664-1; VDE 0110-1.
- Помехозащищенность.

6.3 Указания по двигателю

Сервоусилители работают с векторно-ориентированным алгоритмом управления. Чтобы использовать этот алгоритм и добиться оптимальных результатов регулирования, необходимы точные данные подключенного двигателя. Поэтому изготовители зачастую разрешают подключать к сервоусилителю и эксплуатировать только такие двигатели, данные которых есть в памяти сервоусилителя или в программе ввода в эксплуатацию. Если в эксплуатацию вводятся так называемые "двигатели другой фирмы", их параметры сначала нужно измерить, чтобы согласовать регулятор с точными данными.

Кроме того, двигатели и сервоусилители при проектировании нужно согласовать по мощности. Следует убедиться, что сервоусилитель способен вырабатывать токи, необходимые для создания пиковых моментов (см. главу 8 "Проектирование").



6.3.1 Синхронные двигатели

Синхронные серводвигатели с возбуждением от постоянных магнитов чаще всего – невентилируемые. Поскольку тепло отводится конвекционным способом, лакокрасочное покрытие и загрязненность двигателя имеют большое значение. Как правило, такие двигатели имеют степень защиты IP65. При проектировании это следует проверять по техническому паспорту двигателя.

Во многих случаях предельный момент двигателя при нагреве можно повысить с помощью вентилятора принудительного охлаждения (опция). Точнее об этом можно судить по механическим характеристикам.

6.3.2 Асинхронные двигатели

Асинхронные серводвигатели обычно используют самоохладение (крыльчатку на валу), поэтому при длительных нагрузках в нижнем диапазоне частоты вращения нужно уделять особое внимание степени использования по нагреву. Рабочая точка (т. е. эффективный вращающий момент при средней частоте вращения) должна лежать не выше предельной характеристики двигателя с учетом тепловой нагрузки. Из-за снижения эффективности охлаждения при низкой частоте вращения эта характеристика в данном диапазоне имеет сниженные значения, см. главу 2.6.1 "Механическая характеристика".

6.4 Прокладка кабелей

При эксплуатации сервоприводов свойства кабелей и способ их прокладки играют большую роль. При выборе параметров кабелей необходимо учитывать величину тока, чтобы напряжение не падало ниже допустимого значения. Дополнительные критерии выбора параметров указаны в действующих нормативах.

Прокладка кабелей, особенно в кабельных каналах или на кабельных лотках, требует особой тщательности. Пространственное разделение силовых и сигнальных кабелей снижает влияние электромагнитных помех. Кроме того, очень хорошим способом снижения этих помех является использование экранированных кабелей. Подробнее об этом см. в документации изготовителя и в соответствующих нормативах.

6.5 Электромагнитные помехи / Электромагнитная совместимость

В этой главе кратко поясняются основные понятия по теме "Электромагнитная совместимость" (ЭМС).

Дополнительная документация

Для получения дополнительной информации рекомендуем издание SEW-EURODRIVE "Практика приводной техники: Электромагнитная совместимость в приводной технике".

В нем подробно рассматриваются следующие темы:

- механизм возникновения помех;
- проектирование ЭМС;
- меры по обеспечению ЭМС;
- стандарты и нормативы;
- понятия ЭМС;
- принцип действия так называемых ЭМС-компонентов (сетевые фильтры, дроссели и т. п.).



Толкование терминов

В соответствующих нормативах электромагнитные помехи определяются как электромагнитное явление, отрицательно влияющее на работу устройства. Причинами электромагнитных помех могут быть:

- ЭСР = электростатический разряд;
- скачок напряжения = импульс напряжения (под влиянием грозы или процессов коммутации в сети);
- кондуктивные и индуктивные высокочастотные наводки;
- выброс = быстрые (кратковременные) возмущения из-за размыкания контактов индуктивных электрических цепей.

В сфере электромагнитных помех различают следующие понятия:

- Помехозащищенность: Способность устройства работать при электромагнитных помехах без снижения функциональных возможностей (ЭМП = электромагнитная помехоустойчивость). Помехозащищенность – качественный признак объекта помех.
- Излучение помех: Способность устройства создавать электромагнитные сигналы, вызывающие в других устройствах снижение функциональных возможностей (ЭМИ = электромагнитное излучение). Излучение помех – качественный признак источника помех.

Стандарты и директивы

Сервоусилители и дополнительное оборудование – это компоненты, предназначенные для монтажа на машины и установки. Поэтому они должны отвечать требованиям стандарта по электромагнитной совместимости EN 61800-3 "Электроприводы с изменяемой частотой вращения". Кроме того, необходимо соблюдение отраслевых и государственных нормативов.

Электромагнитная совместимость компонентов машины и всей установки очень важна. Допустимые условия регламентируются директивами по электромагнитной совместимости.

При этом применяются следующие стандарты:

Стандарт по ЭМС для приводных систем с изменяемой частотой вращения	
EN 61800-3	
Излучение помех	Помехозащищенность
EN 550xx	EN 61000-4 .. x

Для случая излучения помех различают:

- Класс А предельных значений (EN 55011): Устройство предназначено для применения в промышленной среде при условии, что проектирование установки и монтаж выполняется квалифицированными электриками (возможное требование: наличие базовых знаний о мерах по соблюдению ЭМС). Часто можно встретить в промышленной зоне, поскольку там обычно допускается более высокий уровень помех.
- Класс В предельных значений (EN 55011): В жилой и офисной зоне должен соблюдаться, как правило, более низкий уровень помех, например, требуется отсутствие помех радиоприемникам.

При проектировании сервоприводной системы важно знать, какое предельное значение должно соблюдаться и какие меры для этого являются необходимыми. Сам сервоусилитель не может обеспечивать соблюдение требований по какому-либо классу предельных значений, главным образом это достигается за счет следующих мер:

- возможно, необходимые дополнительные компоненты, например сетевые фильтры, дроссели, экранированные кабели двигателей и т. п.;
- монтаж по нормам ЭМС.



Реализация мер по обеспечению ЭМС

В сферу ответственности изготовителя устройства входит предложение конкретных мер по монтажу своего сервоусилителя в соответствии с нормами по ЭМС. Однако ответственность за реализацию несет разработчик или эксплуатант установки. Данная глава может дать только общие рекомендации и ни в коем случае не заменяет указания изготовителя, отраслевые и государственные нормативы или законодательные положения.

Некоторые сервоусилители выпускаются с уже установленным сетевым фильтром, который минимизирует излучение помех со стороны сети, что позволяет обойтись без каких-либо дополнительных мер. Для соблюдения предельных значений со стороны двигателя часто используются экранированные кабели двигателей или выходные дроссели. Поскольку меры по соблюдению предельных значений ЭМС для разных устройств могут сильно различаться, следует использовать документацию по конкретному изделию.

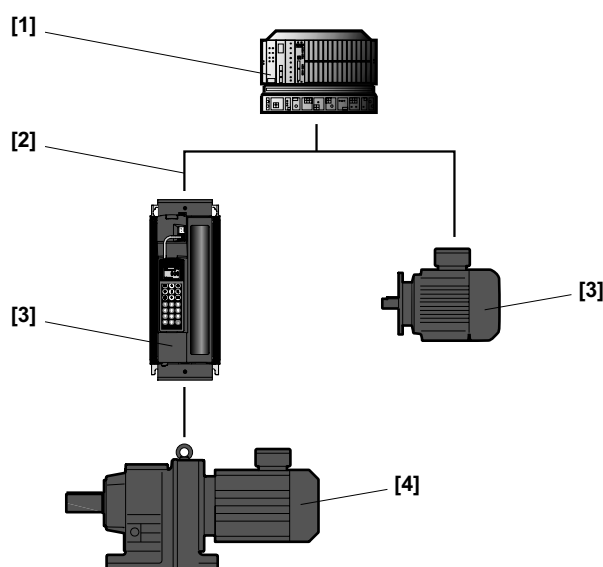
И в этом случае мы снова рекомендуем издание SEW-EURODRIVE "Практика приводной техники: Электромагнитная совместимость в приводной технике", представляющую интерес по теме ЭМС.

6.6 Коммуникационные порты

Разнообразие коммуникационных портов устройства обеспечивает различные возможности объединения в сеть. Следующие главы содержат обзор основных и наиболее часто используемых способов объединения устройств в промышленной сети передачи данных.

6.6.1 Промышленные шинные системы: подключение к контроллеру верхнего уровня

Шинные системы обеспечивают цифровую связь компонентов оборудования промышленной автоматизации.



56324axx

Рис. 83. Система с ведущим и ведомыми устройствами шины

- [1] Ведущее устройство шины (контроллер)
- [2] Сетевая шина
- [3] Ведомые устройства шины
- [4] Мотор-редуктор



Ведущее устройство предназначено для координирования обмена данными по сетевой шине. Как правило, это Программируемый Логический Контроллер (ПЛК) или промышленный компьютер (ПК). В качестве ведомых устройств нижнего уровня используются приводные системы, а также интеллектуальные датчики и исполнительные элементы.

Циклический обмен данными

Обмен данными может быть циклическим и ациклическим. Под данными процесса понимают циклические данные, которые являются критичными по времени и должны быстро обрабатываться и передаваться. Различают выходные и входные данные процесса. Выходные данные процесса – это уставки, которые ведущий передает ведомому. Входные данные процесса – это действительные значения, которые ведомый возвращает ведущему.

Ациклический обмен данными

Кроме данных процесса большинство шинных систем предоставляют канал параметрирования, который работает, как правило, ациклически и поэтому не влияет или почти не влияет на циклический обмен данными. С помощью функций считывания и записи ведущий имеет возможность доступа не только к строго определенным уставкам и действительным значениям, но и к другим данным устройства.

При этом очень часто выполняются следующие операции:

- считывание отдельных данных устройства, например памяти ошибок;
- считывание и запись целых наборов данных, например наборов параметров, результатов измерений, опорных точек электронного кулачка и т. п.

Пример стандартных шинных систем:

- PROFIBUS DP;
- DeviceNet;
- INTERBUS-S.

Для примера далее приводятся характеристики шинных систем PROFIBUS DP и INTERBUS-S.

6.6.2 Шинная система Profibus DP

Характеристики

- Profibus означает "**Process Field Bus**", эта шинная система была разработана компанией SIEMENS AG.
- Мировые лидеры в области промышленной автоматизации объединились в Организацию пользователей PROFIBUS. Общими усилиями они способствуют международному продвижению PROFIBUS. Главными задачами этой организации являются:
 - совместная маркетинговая деятельность;
 - распространение информации;
 - совершенствование технологии;
 - присвоение и контроль за идентификационными номерами PROFIBUS.
- Обычно используется протокол "PROFIBUS DP" ("**D**ecentralized **P**eriphery"):
 - расширение протокола "DP-V1" (версия 1: ациклические функции параметрирования);
 - расширение протокола "DP-V2" (версия 2: тактовая синхронизация).
- Шинная топология на базе RS485:
 - 12 Мб/с при длине кабеля до 100 м;
 - 9,6 кб/с при длине кабеля до 1,5 км.



- Среда передачи данных – медный кабель, волоконно-оптический кабель используется очень редко.
- Возможно до 126 узлов сети, однако при таком количестве производительность соответствующим образом снижается. Доступ к шине осуществляется через опрос.
- Ведущему нужен основной файл устройства (GSD-файл) от каждого ведомого (тип узла).

Пример

Ниже приводится пример структуры Profibus с централизованными узлами шины, размещенными в электрошкафу (в данном случае – сервоусилители MOVIDRIVE® компании SEW-EURODRIVE), и децентрализованными узлами шины (в данном случае – приводы MOVIMOT® компании SEW-EURODRIVE).

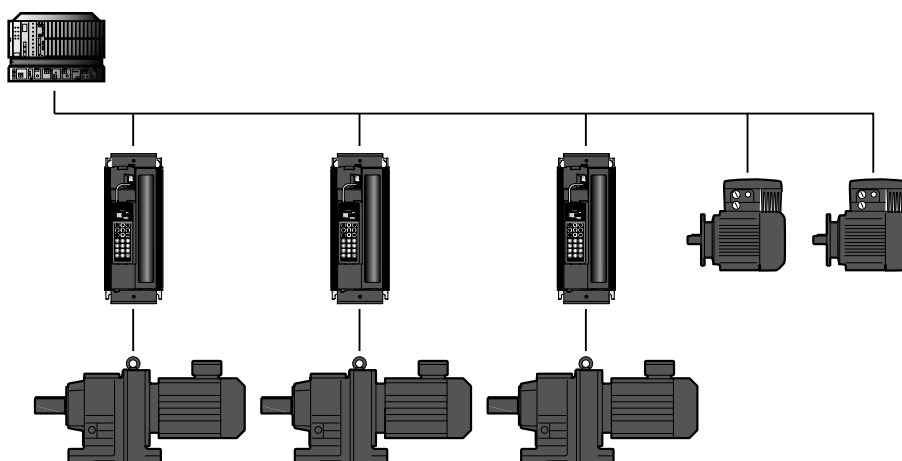


Рис. 84. Пример топологии Profibus

56325ахх

6.6.3 Шинная система INTERBUS-S

Характеристики

- Шинная система INTERBUS-S была разработана фирмой Phoenix Contact GmbH & Co.
- Зарегистрированный союз INTERBUS Club – международный союз организаций с общей целью технологического и коммерческого продвижения INTERBUS, а также содействия в реализации систем автоматизации с шиной INTERBUS и дополнительных технологий.
- Кольцевая топология на базе RS485:
 - каждый узел действует как усилитель-повторитель (репитер).
- Скорость передачи данных до 2 Мб/с.
- Очень малое время цикла благодаря высокой эффективности передачи данных.
- Протокол общего фрейма: Вместо отдельных сообщений для каждого узла шины ведущий посылает одно общее сообщение, в котором последовательно собраны отдельные сообщения для каждого узла. За счет этого время цикла заметно сокращается.
- Данные сдвигаются на один регистр, см. Рис. 85.
- Простое переоснащение на волоконную оптику.
- Удобная локализация ошибок.
- Из-за кольцевой структуры шины замена устройств во время работы невозможна.



Пример

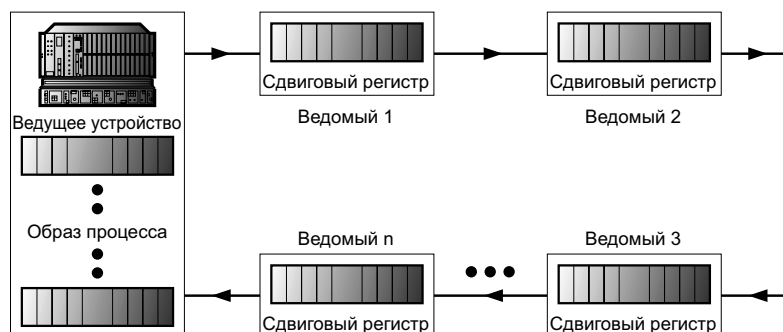


Рис. 85. Блок-схема шинной структуры Interbus-S

56326aru

6.6.4 Ethernet как основа промышленных сетей

Американская фирма XEROX в середине 70-х годов разработала локальную сеть ETHERNET для персональных компьютеров.

Изначально сеть Ethernet не имела способности работать в режиме реального времени и не могла использоваться в качестве промышленной сети. В последнее время с развитием протоколов, работающих в режиме реального времени, многие фирмы создали основу для применения этой сети в сфере промышленной автоматизации.

Примерами такого применения являются:

PROFINET	: SIEMENS AG
MODBUS TCP	: AEG Schneider
Powerlink	: B&R
EtherCAT	: Beckhoff
EtherNet / IP	: Rockwell Automation / Allen Bradley

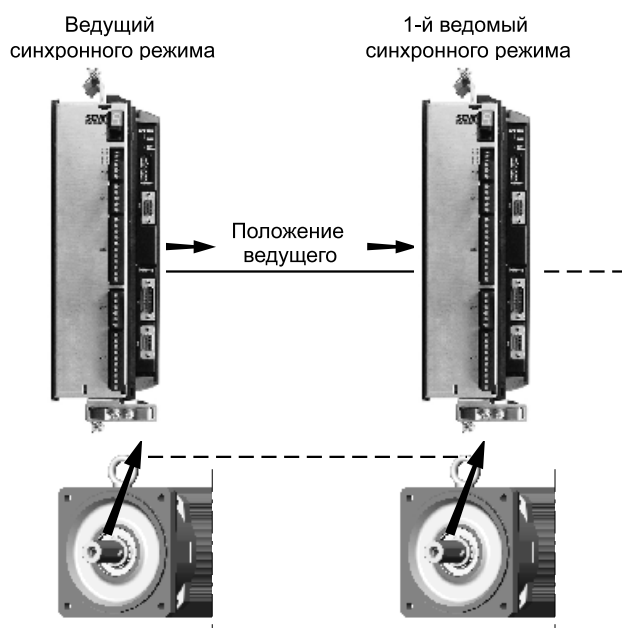


6.6.5 Обмен данными между осевыми модулями

Если несколько осевых модулей объединены в сеть, они могут обмениваться между собой как критичными по времени и циклическими данными процесса, так и ациклической информацией параметрирования.

Примером такого применения является режим синхронного управления, при котором данные о положении ведущего привода синхронизированно передаются на ведомый привод. Это позволяет, например, реализовать функцию "Электронный вал".

Для обмена данными между осевыми приводами в зависимости от скорости передачи данных используются порты шины CAN или последовательные порты устройств.



56332aru

Рис. 86. Принцип действия электронного вала с синхронизированным ведомым (регулятор синхронного управления)

Кроме того, осевые приводы могут быть связаны какой-либо сетевой шиной, чтобы обмениваться данными с контроллером верхнего уровня, например с ПЛК. При этом сетевая шина и шина связи между приводами взаимного влияния не оказывают.

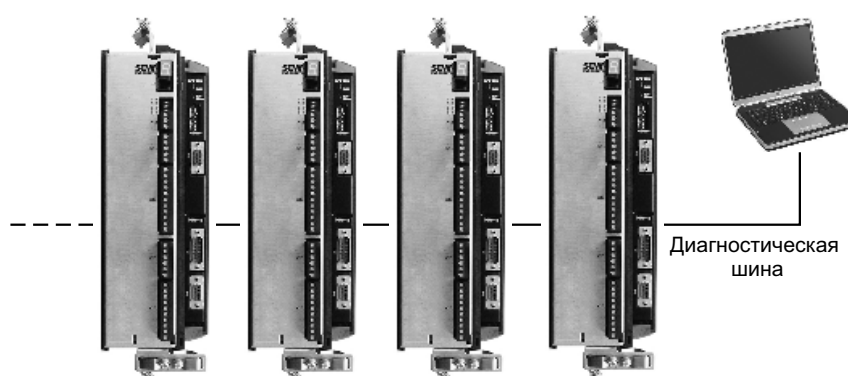


6.6.6 Диагностическая шина

Если в последовательную связь между приводами дополнительно включить ПК, появляется возможность использовать эту сеть в качестве диагностической шины. При этом ПК обменивается с приводами данными параметров через канал параметрирования и обеспечивает визуализацию этих данных на своем мониторе.

С помощью программных средств диагностики пользователь может выполнять следующие действия:

- ввод приводов в эксплуатацию;
- диагностика приводов;
- считывание параметров приводов и сохранение их в памяти ПК.



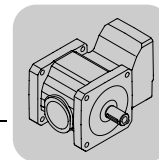
56333aru

Рис. 87. Диагностическая шина

В качестве диагностической шины наряду с последовательным интерфейсом все чаще используются системы на базе сетей CAN и Ethernet.

6.7 Глоссарий

Термин / сокращение	Определение / пояснение
Снижение номинальных параметров	Снижение мощности из-за тепловой нагрузки
ЭСР	Электростатический разряд
Скачок напряжения	Импульсное напряжение
Выброс	Быстрые, кратковременные возмущения
ЭМС	Э лектро М агнитная С овместимость
ЭМП	Э лектро М агнитная П омехоустойчивость
ЭМИ	Э лектро М агнитное И злучение
Опрос	Сообщение с запросом для синхронизации при передаче данных



7 Редукторы для сервопривода

Выполняя функцию преобразования вращающего момента и частоты вращения, редуктор является центральным модулем мотор-редуктора для сервопривода.

7.1 Требования к редуктору для сервопривода

Ввиду кратковременности циклов и больших ускорений на современных сервоприводных системах к редукторам предъявляются особые требования:

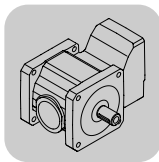
- низкий момент инерции;
- малый угловой люфт;
- высокая торсионная жесткость;
- высокий КПД;
- передача очень больших вращающих моментов из-за больших ускорений;
- низкий уровень вибрации;
- в идеальном случае целочисленные передаточные числа;
- долговечность и простота технического обслуживания;
- компактность и легкость.

В следующей таблице представлены требования к редукторам для сервопривода в зависимости от применения.

Применение	Средняя частота вращения выходного вала	Макс. радиальная нагрузка	Макс. ускоряющий момент	Тормозной момент	Инерция масс	Жесткость регулирования	Равномерность вращения	Применимость в пищевой промышленности	Взрывозащищенное исполнение
Деревообработка		x	x	x	x	x			x
Печатные машины	x				x	x	x		x
Станки									
Устройства смены инструмента			x	x	x	x			
Поворотные столы					x	x	x		
Пром-сть безалкогольных напитков									
Розлив, фасовка			x	x				x	
Транспортировка		x		x		x			
Производство компакт-дисков			x		x	x	x		
Упаковочная техника	x		x		x	x	x	x	

Низкий момент инерции редуктора является условием реализации высокодинамичного привода. Особенно для приводов, работающих с большими ускорениями, необходим динамичный редуктор с высоким КПД.

Для решения задач позиционирования требуется минимальный угловой люфт и высокая торсионная жесткость. Специально для нужд сервотехники были разработаны редукторы, угловой люфт которых составляет всего 3-6 угловых минут.



7.2 Общий обзор редукторов

В зависимости от направления передачи усилия различают следующие типы редукторов:

- соосные редукторы;
- редукторы с параллельными валами;
- угловые редукторы.

В соосных редукторах и редукторах с параллельными валами входной и выходной валы лежат в одной плоскости. То есть, усилие передается прямолинейно. В угловых редукторах входной и выходной валы расположены перпендикулярно друг другу, усилие передается под прямым углом.

Типы редукторов		
Зубчатая передача	Ременная передача	Цепная передача
Цилиндрические Планетарные Конические	Зубчатый ремень Плоский ремень Клиновой ремень	Роликовая цепь Зубчатая цепь

В следующих разделах кратко описываются редукторы тех типов, которые наиболее часто используются в сервотехнике.

7.2.1 Планетарные редукторы для сервопривода

В сервоприводных системах особенно часто используются планетарные редукторы.

В сравнении с цилиндрической зубчатой передачей распределение нагрузки между несколькими планетарными шестернями значительно повышает удельную мощность и уменьшает габариты конструкции. Благодаря оптимальной геометрии зубьев и самых жестких производственных допусков планетарные редукторы имеют угловой люфт в диапазоне 3-6 угловых минут, а в особых случаях – даже всего одной угловой минуты. Большие диаметры валов обеспечивают высокую торсионную жесткость и вместе с тем высокую точность позиционирования. Кроме того, планетарные редукторы обладают высоким КПД, низким уровнем шума и почти не требуют обслуживания.

Особая компактность мотор-редуктора обеспечивается за счет прямого монтажа двигателя. В новых мотор-редукторах SEW-EURODRIVE для сервопривода впервые используется возможность установки редуктора прямо на синхронный серводвигатель без применения адаптера. В этих мотор-редукторах интегрированной конструкции все соединения типа вал-отверстие выполнены с геометрическим замыканием и без люфта.

Основные характеристики низколюфтовых планетарных редукторов SEW-EURODRIVE:

- большой максимально допустимый момент;
- высокий КПД;
- высокая торсионная жесткость;
- надежность и долговечность;
- малый шаг передаточных чисел в диапазоне до 1:100;
- невысокая температура нагрева при работе;
- стабильно низкий угловой люфт даже при длительной эксплуатации;
- высокие допустимые радиальные нагрузки.

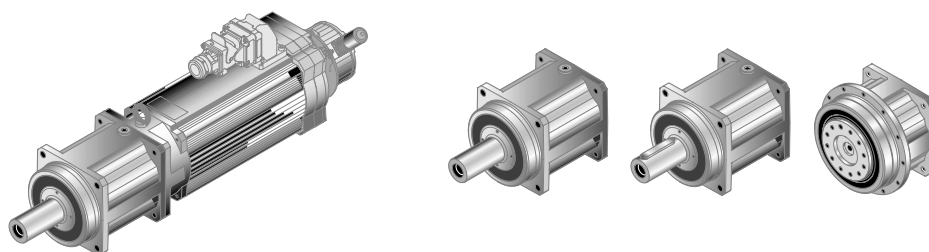
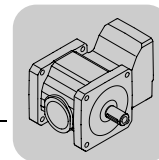
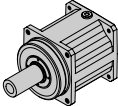
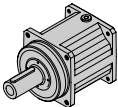
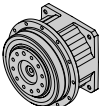
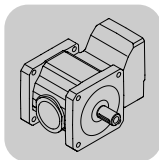


Рис. 88. Пример планетарных редукторов для сервопривода

Планетарные редукторы для сервопривода PSF. с креплением через выходной фланец B5		
Тип		Пояснение
	PSF..	Планетарный редуктор для сервопривода, гладкий сплошной вал
	PSKF..	Планетарный редуктор для сервопривода, сплошной вал со шпоночным пазом
	PSBF..	Планетарный редуктор для сервопривода, вал с фланцевым блоком по стандарту EN ISO 9409



7.2.2 Конические редукторы

Конические редукторы BSF.. компании SEW-EURODRIVE – это двухступенчатые редукторы для применения в сервотехнике. Их входная ступень – пара косозубых цилиндрических шестерен, выходная – пара конических шестерен на смещенных осях. Корпус имеет монолитную конструкцию. Прямой монтаж двигателя на редуктор без муфты, реализованный компанией SEW-EURODRIVE, и для конических мотор-редукторов обеспечивает особую компактность конструкции.

Основные характеристики конических редукторов SEW-EURODRIVE для сервопривода:

- большой максимально допустимый момент;
- высокие допустимые радиальные нагрузки;
- надежность и долговечность;
- малый шаг передаточных чисел в диапазоне до 1:40;
- отсутствие износа в зубчатом зацеплении;
- большое разнообразие вариантов конструктивных исполнений;
- компактная и легкая конструкция;
- стабильно низкий угловой люфт даже при длительной эксплуатации.

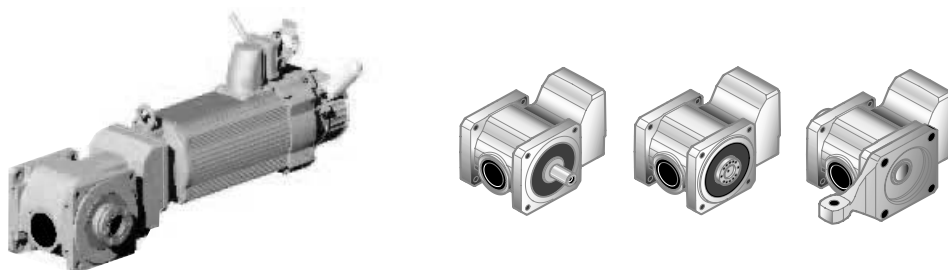
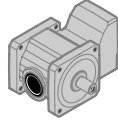
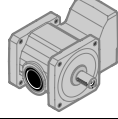
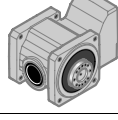
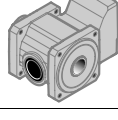
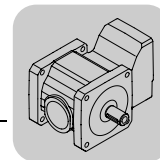


Рис. 89. Пример конических редукторов для сервопривода

Варианты исполнения низколюфтовых конических редукторов

Конические редукторы BSF.. с креплением через выходной фланец B5		
Тип	Пояснение	
	BSF..	Конический редуктор для сервопривода, гладкий сплошной вал.
	BSKF..	Конический редуктор для сервопривода, сплошной вал со шпоночным пазом.
	BSBF..	Конический редуктор для сервопривода, вал с фланцевым блоком по стандарту EN ISO 9409.
	BSHF..	Конический редуктор для сервопривода, полый вал с оппозитным расположением стяжной муфты.



7.2.3 Цилиндрические редукторы

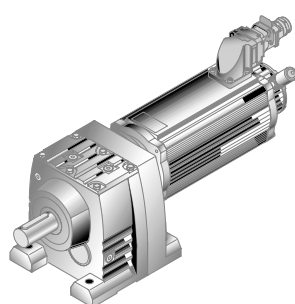
Цилиндрические редукторы имеют простую и прочную конструкцию, дешевы в изготовлении и отвечают множеству требований, поэтому они применяются в самых различных условиях.

В плоских цилиндрических редукторах входной и выходной валы расположены параллельно друг другу. Поэтому весь привод получается коротким и узким, что дает преимущество особенно в условиях малого монтажного пространства.

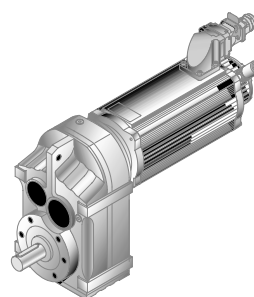
В сервотехнике цилиндрические редукторы применяются, как правило, в низколюфтовом исполнении.

Основные характеристики цилиндрических редукторов:

- выгодная цена;
- множество возможных комбинаций;
- широкий диапазон передаточных чисел и вращающего момента; конструкция: одно-, двух-, трехступенчатые; сдвоенные редукторы;
- высокий КПД;
- возможность исполнения со сниженным угловым люфтом.

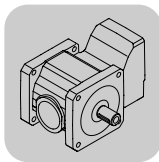


Цилиндрический
мотор-редуктор



Плоский
цилиндрический
мотор-редуктор

Рис. 90. Пример цилиндрических мотор-редукторов



7.2.4 Конические редукторы

В условиях недостаточного монтажного пространства зачастую используются конические редукторы, очень компактные благодаря угловому расположению выходного вала.

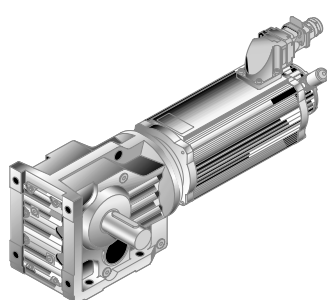
Конические редукторы выпускаются с валами следующего типа:

- полый вал со шпоночным пазом;
- полый вал со стяжной муфтой;
- сплошной вал;
- шлицевой вал.

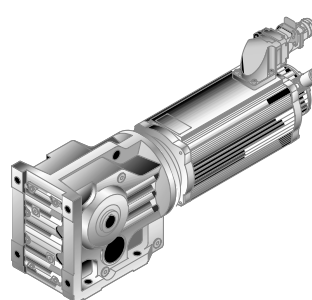
Кроме того, оба варианта исполнения (со сплошным и с полым валом) обеспечивают множество способов интеграции в различные установки. Для сервоприводных систем с учетом больших ускорений и частых изменений нагрузки более всего подходят конические редукторы в низколюфтовом исполнении.

Основные характеристики конических редукторов:

- минимум монтажного пространства благодаря угловому расположению выходного вала, малая длина в осевом направлении;
- возможность оптимальной интеграции в установку;
- широкий выбор монтажных позиций и вариантов исполнения;
- множество возможных комбинаций;
- широкий диапазон передаточных чисел и вращающего момента; конструкция: трехступенчатые; сдвоенные редукторы;
- высокий КПД;
- большой пусковой момент.



Исполнение
со сплошным
валом



Исполнение
с полым валом

Рис. 91. Пример конических мотор-редукторов



8 Проектирование

8.1 Общие сведения

Для проектирования сервопривода необходимо иметь не только диаграмму, точно описывающую рабочий цикл привода, но и множество других данных об условиях эксплуатации и окружающей среды. Для расчета параметров привода необходимо располагать данными приводимого механизма (масса, диапазон регулирования, информация о механической конструкции и т. д.).

По рассчитанным значениям вращающего момента и частоты вращения, учитывая прочие требования к механике и условия эксплуатации и окружающей среды, можно определить подходящий сервопривод.

Далее на двух практических примерах рассматривается проектирование сервопривода и линейного серводвигателя.



8.2 Данные для расчета параметров привода и выбора редуктора

Для правильного выбора компонентов привода должны быть известны или установлены определенные данные. Это:

Данные для расчета параметров мотор-редуктора для сервопривода

Данные для расчета параметров мотор-редуктора для сервопривода		
ΔS	Точность позиционирования	[мм]
ПВ	Относительная продолжительность включения	%
H	Высота над уровнем моря	[м]
η_{gear}	КПД редуктора	-
η_L	КПД нагрузки	-
i	Передаточное число редуктора	-
I_0	Номинальный ток	[А]
$I_{\text{eff_Motor}}$	Эффективный (средний за цикл) ток двигателя	[А]
$I_{N_Inverter}$	Номинальный ток сервоусилителя	[А]
IP..	Необходимая степень защиты	-
φ	Угловой люфт	[']
ϑ_{amb}	Температура окружающей среды	[°C]
J_{ext}	Внешний момент инерции, приведенный к валу двигателя	[кгм ²]
J_{gear}	Момент инерции редуктора	[кгм ²]
J_{Mot}	Момент инерции ротора двигателя	[кгм ²]
k	Относительный момент инерции $J_{\text{ext}} / J_{\text{Mot}}$	-
M_0	Номинальный пусковой момент двигателя	[Нм]
M1 - M6	Монтажная позиция	-
$M_1 \dots M_n$	Вращающий момент на выходном валу на участке $t_1 \dots t_n$	[Нм]
$M_{a \text{ kub}}$	Кубический вращающий момент на выходном валу	[Нм]
$M_{a \text{ max}}$	Максимальный вращающий момент на выходном валу	[Нм]
M_B	Ускоряющий момент	[Нм]
M_{Br_Motor}	Тормозной момент двигателя	[Нм]
M_{DYN}	Предельный момент серводвигателя в динамическом режиме	[Нм]
$M_{e \text{ max}}$	Максимальный вращающий момент на входном валу	[Нм]
M_{eff}	Необходимый эффективный вращающий момент (на валу двигателя)	[Нм]
$M_{\text{eff_Motor}}$	Эффективный вращающий момент двигателя	[Нм]
M_{gear}	Момент редуктора	[Нм]
M_{max}	Максимальный вращающий момент на выходном валу проектируемого привода	[Нм]
M_{Motor}	Момент двигателя	[Нм]
M_{NOTAUS}	Допустимый вращающий момент при аварийном останове	[Нм]
$M_{\text{NOTAUS_Appl}}$	Фактический вращающий момент при аварийном останове	[Нм]
M_{stat}	Статический момент двигателя	[Нм]
$M_{\text{stat_Motor}}$	Момент двигателя при постоянной скорости	[Нм]
M_{tn}	Момент на участке n	[Нм]
M_{Theff}	Эффективный момент с учетом нагрева редуктора	[Нм]
M_{THERM}	Допустимый момент с учетом нагрева редуктора	[Нм]
$n_{a \text{ max}}$	Максимальная частота вращения выходного вала	[об/мин]
n_{am}	Средняя частота вращения выходного вала редуктора	[об/мин]
n_e	Частота вращения входного вала	[об/мин]
$n_{e \text{ max}}$	Максимальная частота вращения входного вала	[об/мин]



Данные для расчета параметров мотор-редуктора для сервопривода		
n_K	Постоянная частоты вращения	[об/мин]
n_{max}	Максимальная частота вращения	[об/мин]
n_{Mot}	Частота вращения вала двигателя	[об/мин]
n_N	Номинальная частота вращения	[об/мин]
n_x	Средняя частота вращения на участке x	[об/мин]
P_{Br}	Мощность торможения	[Вт]
P_{Br_peak}	Пиковая мощность торможения	[Вт]
$S..$	Режим работы	-
$t_1...t_n$	Временной отрезок 1...n	[мин]
t_{Brn}	Время торможения на участке n	[с]
t_{cycle}	Время цикла	[с]

Данные для расчета параметров линейного сервопривода

Данные для расчета параметров линейного сервопривода		
μ	Коэффициент трения	-
α	Угол наклона участка перемещения	[°]
a_{max}	Максимальное ускорение	[м/с ²]
$ПВ$	Относительная продолжительность включения	[%]
F_A	Максимальное необходимое тяговое усилие	[Н]
F_D	Сила магнитного притяжения	[Н]
F_E	Эффективное усилие за пределами полного цикла	[Н]
F_g	Сила тяжести	[Н]
F_i	Возникающее усилие в пределах неполного цикла	[Н]
F_{max}	Максимальное усилие	[Н]
F_{mM}	Максимальное тяговое усилие двигателя	[Н]
F_N	Номинальное усилие	[Н]
F_R	Максимальная сила трения	[Н]
F_{table}	Усилие по таблице параметров преобразователей	[Н]
F_v	Тяговое усилие	[Н]
F_{vmax}	Максимальное тяговое усилие	[Н]
F_Z	Дополнительное рабочее усилие	[Н]
g	Ускорение свободного падения	[м/с ²]
I_N	Номинальный ток	[А]
k_N	Силовая постоянная	[Н·А ⁻¹]
L_p	Длина проектируемой первичной части	[мм]
m_L	Перемещаемая масса одной оси	[кг]
m_p	Масса первичной части	[кг]
m_Z	Дополнительная масса	[кг]
P_{max}	Максимальная мощность тормозного резистора	[кВт]
P_n	Средняя мощность тормозного резистора	[кВт]
s	Длина участка перемещения	[мм]
S	Длина проектируемого участка перемещения	[мм]
S_e	Зона конечного выключателя	[мм]
s_s	Длина вторичной части	[мм]



Проектирование

Данные для расчета параметров привода и выбора редуктора

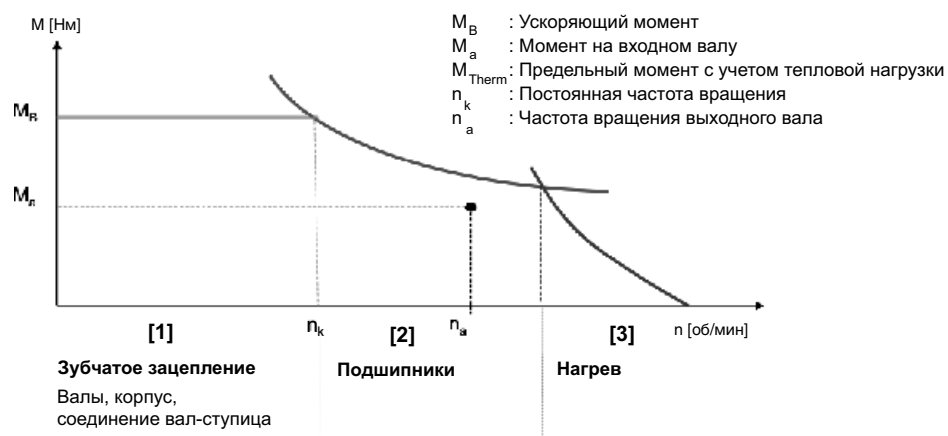
Данные для расчета параметров линейного сервопривода		
t	Время полного цикла, включая паузы	[с]
t_i	Время цикла (для F_i)	[с]
t_n	Время на участке n	[с]
$v_{\max}$	Максимальная скорость одной оси	[м/с]



8.3 Алгоритм проектирования сервопривода с мотор-редуктором

Алгоритм проектирования делится на следующие этапы:

- Расчет параметров редуктора, см. Рис. 92:
 - [1] Зубчатое зацепление;
 - [2] Подшипники;
 - [3] Нагрев.



56614aru

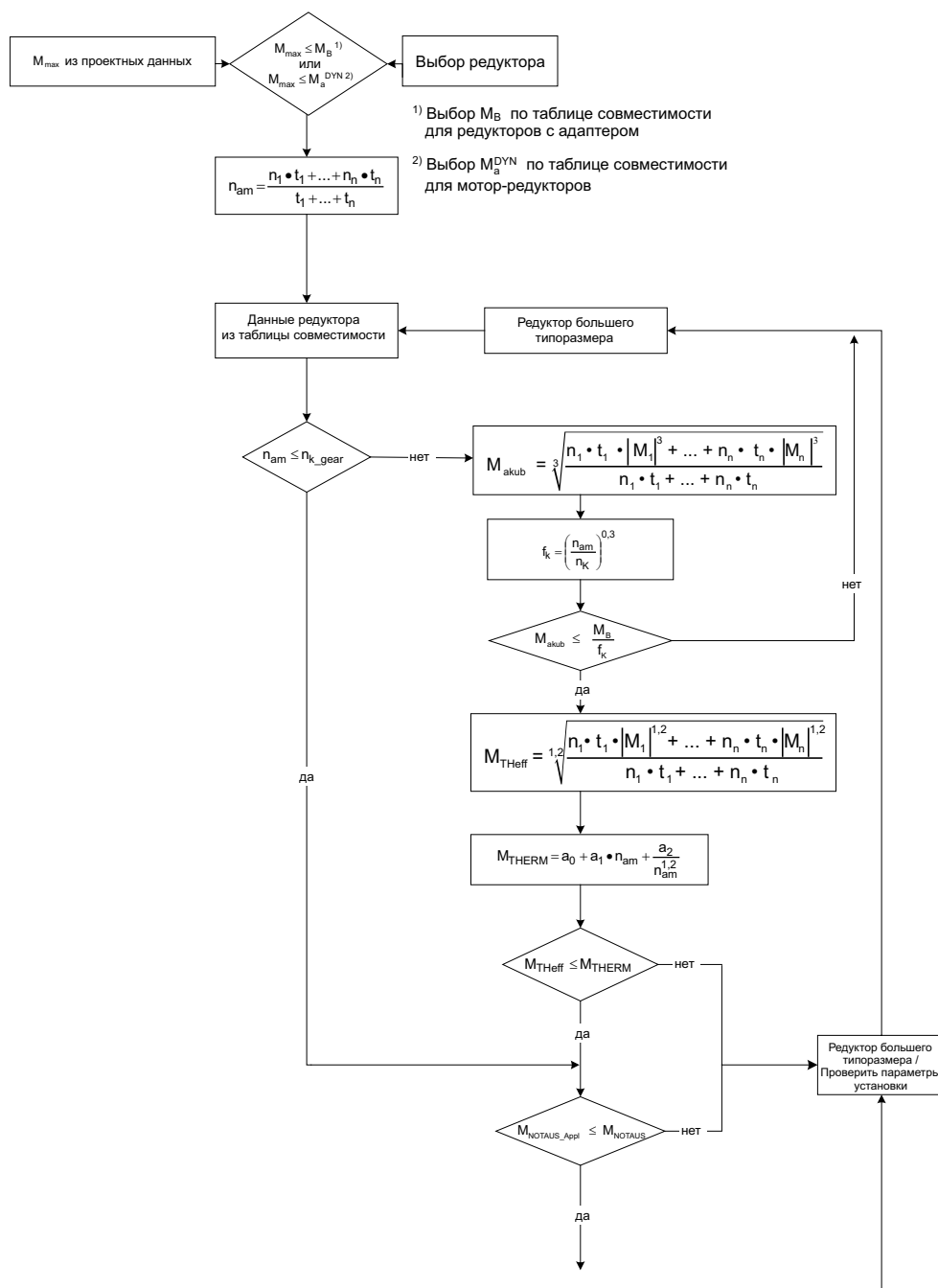
Рис. 92. Алгоритм проектирования в 3 этапа

- Расчет параметров двигателя.
- Расчет параметров сервоусилителя.
- Расчет параметров тормозного резистора.



На следующих блок-схемах представлена процедура проектирования позиционного сервопривода с коническим редуктором для эксплуатации в режиме S3.

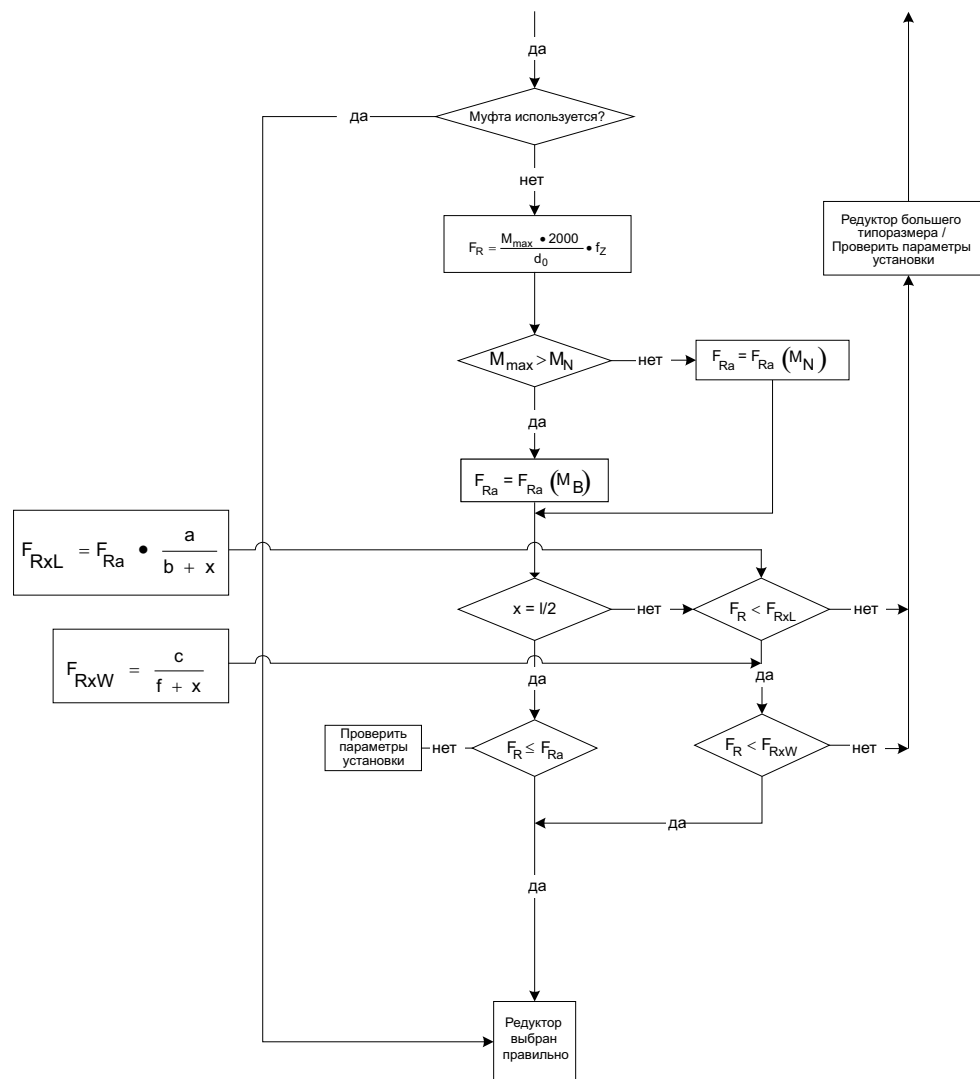
Блок-схема проектирования, часть 1: редукторы



54397ARU



Блок-схема проектирования, часть 2: редукторы



53642ARU



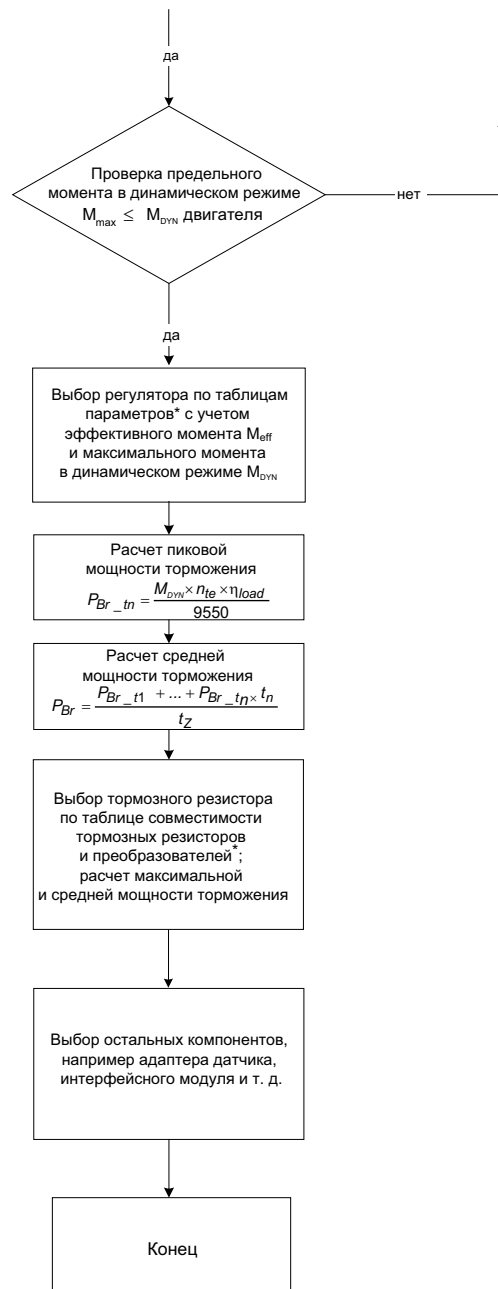
Блок-схема проектирования, часть 3: серводвигатели



54515ARU



Блок-схема проектирования, часть 4: серводвигатели



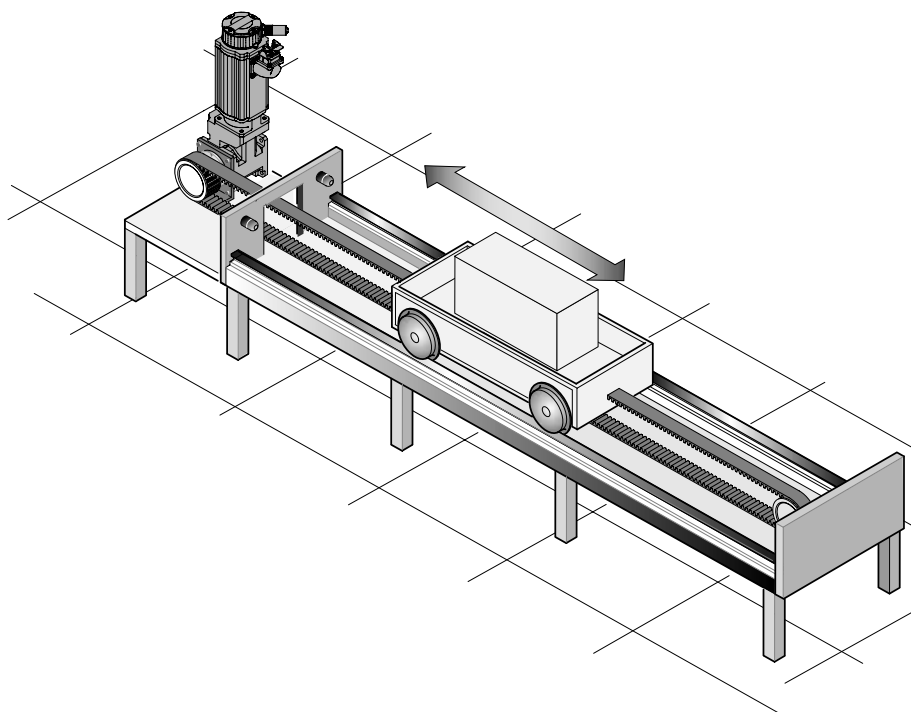
54516ARU

* Системное руководство MOVIDRIVE®



8.4 Пример проектирования сервопривода с мотор-редуктором

Для правильного расчета параметров привода необходимо располагать данными приводимого механизма (масса, частота вращения, диапазон регулирования и т. д.). По ним определяются необходимые значения мощности, вращающего момента и частоты вращения. Следующий пример проектирования сервопривода с мотор-редуктором с соответствующим сервоусилителем наглядно демонстрирует порядок действий.



54518BXX

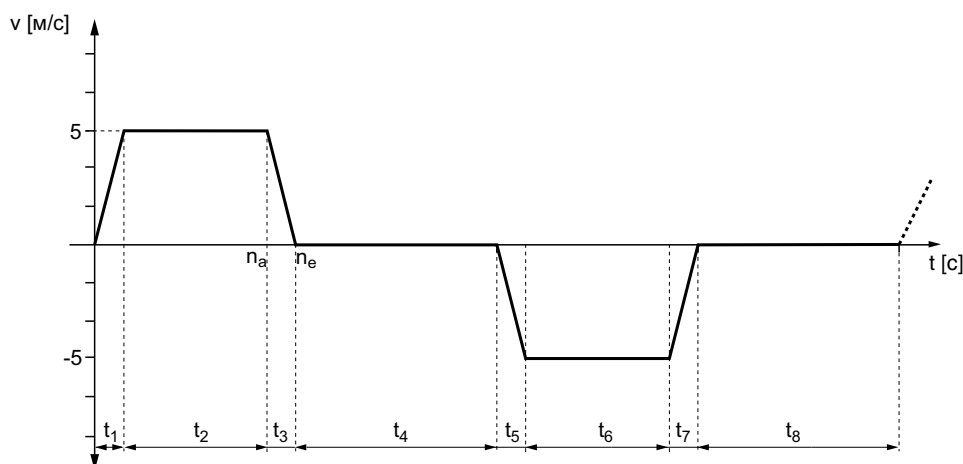
Рис. 93. Пример проектирования: Расчет параметров редуктора BSF.. с двигателем без адаптера

Заданы следующие условия:

Масса груза:	$m_{load} = 150 \text{ кг}$
Масса тележки:	$m_{trolley} = 100 \text{ кг}$
Скорость перемещения:	$v = 5 \text{ м/с}$
Ускорение:	$a = 10 \text{ м/с}^2$
Замедление:	$-a = 10 \text{ м/с}^2$
Замедление при аварийном останове:	$-a = 16,8 \text{ м/с}^2$
Диаметр зубчатого шкива:	$D_L = 250 \text{ мм}$
Сила сопротивления качению	$F_F = 100 \text{ Н/т}$
КПД нагрузки:	$\eta_L = 0,9$
Температура окружающей среды:	$\vartheta = 20 \text{ °C}$
Необходимая точность позиционирования:	0,7 мм
Точность позиционирования механических узлов:	0,3 мм
Требуемый класс ЭМС:	A
Тип двигателя:	Синхронный серводвигатель
Тип редуктора:	BSF..
Монтажная позиция редуктора:	M4
Тип датчика:	Датчик абсолютного отсчета
Подключение к шинной системе типа:	Profibus DPV1
Коэффициент запаса по радиальной нагрузке на вал:	$f_z = 2,5$



Диаграмма рабочего цикла



50795ARU

Временные
отрезки

Из диаграммы рабочего цикла получаются следующие временные отрезки:

$$t_1 = t_3 = t_5 = t_7 = 0,5 \text{ с}$$

$$t_2 = t_6 = 2,0 \text{ с}$$

$$t_4 = t_8 = 1,5 \text{ с}$$

Средняя
частота
вращения

Средняя частота вращения на участке x рассчитывается по формуле:

$$n_x = \frac{n_a + n_e}{2}$$

Выбор редуктора для сервопривода

Шаг 1: Предварительное
определение
передаточного
числа редуктора

$$n_{a \max} = \frac{v_{\max}}{D_L \times \pi}$$

$$n_{a \max} = \frac{5 \text{ м/с}}{0,25 \text{ м} \times \pi} = 6,366 \text{ 1/с} = 382 \text{ об/мин}$$

По максимальной частоте вращения выходного вала и предполагаемой номинальной частоте вращения двигателя $n_N = 4500 \text{ об/мин}$ определяется приблизительное передаточное число редуктора. При этом для частоты вращения двигателя целесообразно оставить резерв ок. 10 %.

$$i_{\text{предв.}} = \frac{n_N - 10 \%}{n_{a \max}}$$

$$i_{\text{предв.}} = \frac{4050 \text{ об/мин}}{382 \text{ об/мин}} = 10,6$$

Выбранное передаточное число редуктора: $i = 10$.



По выбранному передаточному числу редуктора определяется максимальная частота вращения входного вала редуктора $n_{e \max}$:

$$n_{e \max} = i \times n_{a \max}$$

$$n_{e \max} = 10 \times 382 \text{ об/мин} = 3820 \text{ об/мин}$$

Шаг 2:

Определение
статического
и динамического
вращающих
моментов

Динамический момент на участке t_1 :

$$M_{\text{DYN1}} = \frac{m \times a \times D_L}{\eta_L \times 2}$$

$$M_{\text{DYN1}} = \frac{(150 \text{ кг} + 100 \text{ кг}) \times 10 \text{ м/с}^2 \times 0,25 \text{ м}}{0,9 \times 2} = 347 \text{ Нм}$$

Динамический момент на участке t_3 :

Динамическому моменту на участке t_3 способствует сила трения (КПД учитывается в числителе формулы), поскольку выполняется замедление.

$$M_{\text{DYN3}} = \frac{m \times (-a) \times \eta_L \times D_L}{2}$$

$$M_{\text{DYN3}} = \frac{(150 \text{ кг} + 100 \text{ кг}) \times (-10 \text{ м/с}^2) \times 0,9 \times 0,25 \text{ м}}{2} = -281 \text{ Нм}$$

Статический момент:

Статический момент рассчитывается по силе сопротивления качению и должен учитываться отдельно для каждого участка.

При ускорении:

$$M_{\text{stat1}} = \frac{F_F \times D_L \times m}{\eta_L \times 2}$$

$$M_{\text{stat1}} = \frac{100 \text{ Н/т} \times 0,25 \text{ м} \times (0,15 \text{ т} + 0,1 \text{ т})}{0,9 \times 2} = 3,5 \text{ Нм}$$

При замедлении:

$$M_{\text{stat3}} = F_F \times \frac{D_L \times m \times \eta_L}{2}$$

$$M_{\text{stat3}} = 100 \text{ Н/т} \times \frac{0,25 \text{ м} \times (0,15 \text{ т} + 0,1 \text{ т}) \times 0,9}{2} = 2,8 \text{ Нм}$$



Шаг 3:
Определение
максимального
момента
на выходном
валу $M_{a\ max}$

При ускорении:

$$M_{a\ max1} = M_{stat1} + M_{dyn1}$$

$$M_{a\ max1} = 3,5\ \text{Нм} + 347\ \text{Нм} = 351\ \text{Нм}$$

При замедлении:

$$M_{a\ max3} = M_{stat3} + (-M_{dyn1})$$

$$M_{a\ max3} = 2,8\ \text{Нм} - 281\ \text{Нм} = -278\ \text{Нм}$$

Шаг 4: Выбор
типоразмера
редуктора

Предварительный выбор редуктора для сервопривода осуществляется по таблицам совместимости в каталоге "Низколюфтовые мотор-редукторы для сервоприводов (BSF..., PSF...)".

Предварительный выбор редуктора: **BSF 502**

Критерий выбора: $M_{a\ max} = 351\ \text{Нм}$

Условие: $M_B \geq M_{a\ max}$

$375\ \text{Нм} \geq 351\ \text{Нм} \rightarrow$ **условие выполнено.**

Шаг 5:
Определение
средней частоты
вращения
выходного вала

$$n_{am} = \frac{n_1 \times t_1 + \dots + n_n \times t_n}{t_1 + \dots + t_n}$$

$$n_{am} = \frac{\frac{382\ \text{об/мин}}{2} \times 0,5\ \text{с} + 382\ \text{об/мин} \times 2\ \text{с} + \frac{382\ \text{об/мин}}{2} \times 0,5\ \text{с}}{0,5\ \text{с} + 2\ \text{с} + 0,5\ \text{с} + 1,5\ \text{с}} = 212\ \text{об/мин}$$

Условие: $n_{am} \leq n_k$

$212\ \text{об/мин} \leq 130\ \text{об/мин} \rightarrow$ **условие не выполнено.**

Чтобы редуктор оптимально подходил для данной нагрузки, средняя частота вращения выходного вала должна быть меньше либо равна постоянной n_k частоты вращения редуктора. Если это условие не выполняется, следует проверить нагрузку по кубическому моменту, см. шаг 6.

Шаг 6:
Определение
кубического
момента
на выходном
валу $M_{a\ kub}$

$$M_{a\ kub} = \sqrt[3]{\frac{n_1 \times t_1 \times |M_1|^3 + \dots + n_n \times t_n \times |M_n|^3}{n_1 \times t_1 + \dots + n_n \times t_n}}$$

$$M_{a\ kub} = \sqrt[3]{\frac{0,5\ \text{с} \times 191\ \text{об/мин} \times |351\ \text{Нм}|^3 + 2\ \text{с} \times 382\ \text{об/мин} \times |3,5\ \text{Нм}|^3 + 0,5\ \text{с} \times 191\ \text{об/мин} \times |278\ \text{Нм}|^3}{0,5\ \text{с} \times 191\ \text{об/мин} + 2\ \text{с} \times 382\ \text{об/мин} + 0,5\ \text{с} \times 191\ \text{об/мин}}} = 186,4\ \text{Нм}$$



Шаг 7:
Определение
коэффициента
частоты
вращения f_k

Деление средней частоты вращения выходного вала на постоянную частоты вращения n_k дает в результате коэффициент частоты вращения f_k . Этот коэффициент необходим для проверки кубического момента на выходном валу. Он должен быть меньше либо равен ускоряющему вращающему моменту редуктора.

$$f_k = \left(\frac{n_{am}}{n_k} \right)^{0,3}$$

$$f_k = \left(\frac{212 \text{ об/мин}}{130 \text{ об/мин}} \right)^{0,3} = 1,16$$

Условие:

$$M_{a \text{ kub}} \leq \frac{M_B}{f_k} \leq \frac{375 \text{ Нм}}{1,16} \leq 323 \text{ Нм}$$

186 Нм $\leq$ 323 Нм $\rightarrow$ **условие выполнено.**

Шаг 8:
Определение
эффективного
момента
для проверки
допустимого
нагрева
редуктора

$$M_{THeff} = \sqrt[1,2]{\frac{n_1 \times t_1 \times |M_1|^{1,2} + \dots + n_n \times t_n \times |M_n|^{1,2}}{n_1 \times t_1 + \dots + n_n \times t_n}}$$

$$M_{THeff} = \sqrt[1,2]{\frac{0,5 \text{ с} \times 191 \text{ об/мин} \times |351 \text{ Нм}|^{1,2} + 2 \text{ с} \times 382 \text{ об/мин} \times |3,5 \text{ Нм}|^{1,2} + 0,5 \text{ с} \times 191 \text{ об/мин} \times |278 \text{ Нм}|^{1,2}}{0,5 \text{ с} \times 191 \text{ об/мин} + 2 \text{ с} \times 382 \text{ об/мин} + 0,5 \text{ с} \times 191 \text{ об/мин}}} = 83,6 \text{ Нм}$$

Шаг 9:
Определение
допустимого
момента
с учетом нагрева
редуктора

$$M_{THERM} = a_0 + a_1 \times n_{am} + \frac{a_2}{n_{am}^{1,2}}$$

$$M_{THERM} = -17,47 + (-0,316 \times 212) + \frac{119454}{212^{1,2}} = 108,6 \text{ Нм}$$

Условие: $M_{THeff} \leq M_{THERM}$

83,6 Нм $\leq$ 108,6 Нм $\rightarrow$ **условие выполнено.**



Шаг 10:
Сравнение
фактического
и допустимого
момента
редуктора
при аварийном
останове

Из-за малого времени замедления в случае аварийного останова развивается повышенный момент. Поэтому необходимо проверить, будет ли при аварийном останове фактический момент (M_{NOTAUS_Appl}) меньше момента (M_{NOTAUS}), допустимого для редуктора. По условиям приводной системы замедление при аварийном останове составляет 16,8 м/с²:

$$M_{NOTAUS_Appl} = m \times a \times \frac{D}{2}$$

$$M_{NOTAUS_Appl} = (150 \text{ кг} + 100 \text{ кг}) \times 16,8 \text{ м/с}^2 \times \frac{0,25 \text{ м}}{2} = 525 \text{ Нм}$$

Условие: $M_{NOTAUS_Appl} \leq M_{NOTAUS}$
525 Нм ≤ 560 Нм → **условие выполнено.**

Шаг 11:
Определение
радиальной
нагрузки

Радиальная нагрузка прилагается к середине вала. С учетом усилия предварительного натяжения зубчатого ремня для радиальной нагрузки используется коэффициент запаса 2,5.

$$F_R = \frac{M_{\max} \times 2000}{d_0} \times f_z = \frac{347 \times 2000}{250} \times 2,5 = 6940 \text{ Н}$$

Условие: $M_N < M_{\max} < M_B \Rightarrow F_R \leq F_{Ra} (M_B)$.

⇒ 6940 Н ≤ 12000 Н: условие выполнено.

Выбор серводвигателя

Шаг 12:
Приведение
максимального
момента
на выходном валу
на вал двигателя

$$M_{e \max} = \frac{M_{a \max}}{i \times \eta_{\text{gear}}}$$

$$M_{e \max} = \frac{351 \text{ Нм}}{10 \times 0,91} = 38,6 \text{ Нм}$$

На основании величины максимального момента на входном валу делается предварительный выбор двигателя с обязательной последующей проверкой его параметров:

⇒ CM90L /BR

- $J_{\text{Mot}} = 35,9 \times 10^{-4} \text{ кгм}^2$.
- $M_0 = 21,0 \text{ Нм}$.
- $n_N = 4500 \text{ об/мин}$.

Шаг 13: Проверка
дополнительного
вращающего
момента
двигателя
для ускорения

При разгоне нагрузки двигатель должен развивать определенный момент и для собственного разгона.

$$M_{\text{Motor}} = \frac{J_{\text{Motor}} \times n_{\max} \times 2 \times \pi}{t_a}$$

$$M_{\text{Motor}} = \frac{35,9 \times 10^{-4} \text{ кгм}^2 \times 3820 \text{ об/мин} \times 2 \times \pi}{0,5 \text{ с}} = 2,9 \text{ Нм}$$



Шаг 14:

Определение
общего момента
двигателя
при ускорении

$$M_{max} = M_{e\ max} + M_{Motor}$$

$$M_{max} = 38,6 \text{ Нм} + 2,9 \text{ Нм} = 41,5 \text{ Нм}$$

Шаг 15:

Определение
общего момента
двигателя
при замедлении

$$M_{Br_Motor} = M_{3\ max} \times \eta_{gear} \times \frac{1}{i} + M_{Motor}$$

$$M_{Br_Motor} = -278 \text{ Нм} \times 0,91 \times \frac{1}{10} + (-2,9) \text{ Нм} = -28,2 \text{ Нм}$$

Шаг 16:

Определение
вращающего
момента
двигателя
при постоянной
скорости

$$M_{stat_Motor} = M_{stat} \times \frac{1}{i \times \eta_{gear}}$$

$$M_{stat_Motor} = \frac{3,5 \text{ Нм}}{10 \times 0,91} = 0,39 \text{ Нм}$$

Шаг 17:

Определение
эффективного
вращающего
момента
двигателя

Если значения вращающего момента двигателя для каждого участка определены, можно рассчитать эффективный вращающий момент двигателя. Это абсолютно необходимо для определения рабочей точки (см. шаг 18).

$$M_{eff} = \sqrt{\frac{1}{t_{cycle}} \times (M_{t1}^2 \times t_1 + M_{t2}^2 \times t_2 + \dots + M_{tn}^2 \times t_n)}$$

$$M_{eff} = \sqrt{\frac{(41,5 \text{ Нм})^2 \times 0,5 \text{ с} + (0,39 \text{ Нм})^2 \times 2 \text{ с} + (-28,2 \text{ Нм})^2 \times 0,5 \text{ с}}{0,5 \text{ с} + 2 \text{ с} + 0,5 \text{ с} + 1,5 \text{ с}}} = 16,7 \text{ Нм}$$

Шаг 18:

Определение
средней
частоты
вращения

Если эффективный вращающий момент двигателя определен, можно рассчитать среднюю частоту вращения. Это абсолютно необходимо для определения рабочей точки (см. шаг 19).

$$n = n_{am} \times i$$

$$n = 212 \text{ об/мин} \times 10 = 2120 \text{ об/мин}$$

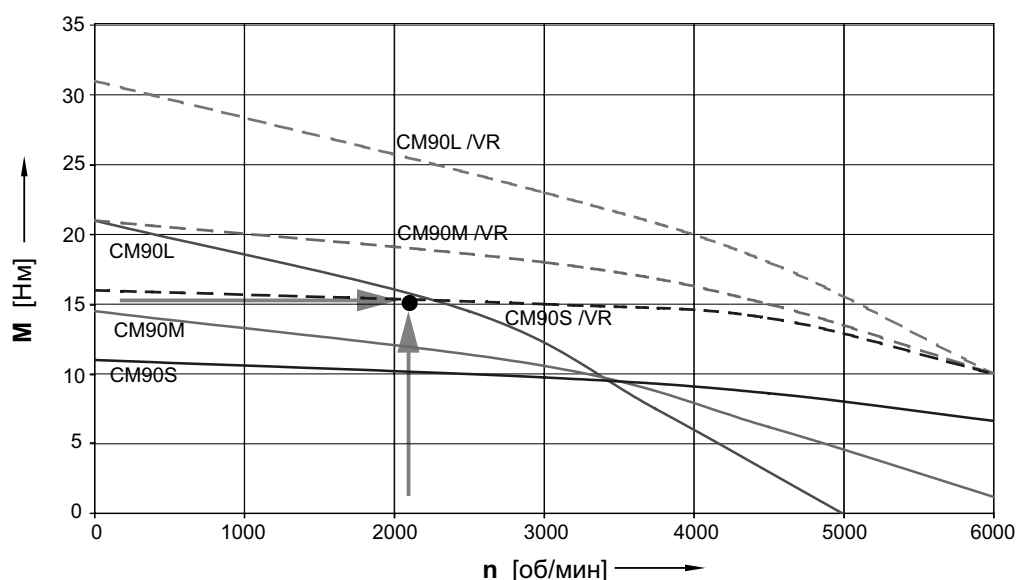


Шаг 19:
Определение
рабочей точки

По положению рабочей точки на диаграмме рабочего цикла можно судить о том, возможна ли тепловая перегрузка двигателя. Для этого на диаграмме "Предельная характеристика с учетом тепловой нагрузки" нужно провести линии средней частоты вращения и эффективного вращающего момента двигателя, см. Рис. 94. Место пересечения линий даст точную рабочую точку. Она должна находиться ниже предельной характеристики двигателя с учетом тепловой нагрузки.

В целях безопасной эксплуатации рабочая точка должна быть на определенном удалении от линии предельной механической характеристики с учетом нагрева. Тем самым создается определенный резерв на случай необходимых изменений, таких как повышение значений ускорения, увеличение нагрузки и т. п.

Поэтому двигатель CM90L оснащается вентилятором принудительного охлаждения VR: CM90L/VR.



54496aru

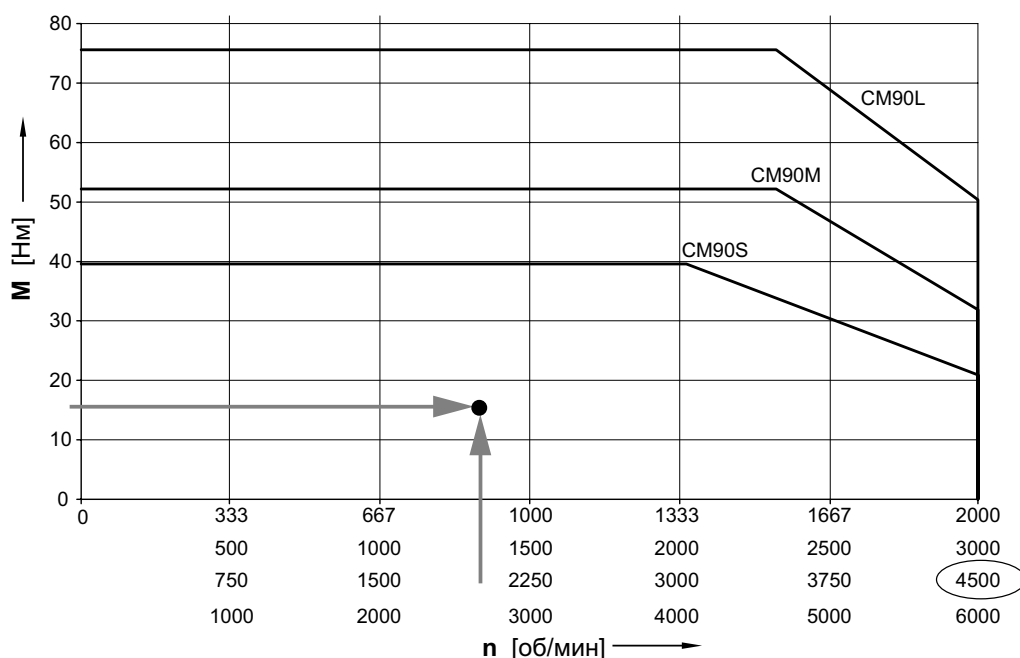
Рис. 94. Предельная механическая характеристика CM90L/VR с учетом тепловой нагрузки (рабочая точка для рассмотренного примера)



Шаг 20:
Определение
максимальной
рабочей точки

По значениям максимального момента и соответствующей частоты вращения на диаграмме "Предельная механическая характеристика в динамическом режиме" для каждого участка указывается одна или несколько максимальных рабочих точек, см. Рис. 95. При этом следует учитывать, что максимальные рабочие точки должны лежать не выше кривой предельного момента в динамическом режиме.

В целях безопасной эксплуатации рабочая точка должна быть на определенном удалении от линии предельной механической характеристики в динамическом режиме. Тем самым создается определенный резерв на случай необходимых изменений, таких как коррекция рабочего цикла, увеличение нагрузки и т. п.



56312axx

Рис. 95. Предельная механическая характеристика CM90L в динамическом режиме
(макс. рабочая точка для рассмотренного примера)



При этом особо следует учитывать спад кривой максимального вращающего момента в верхнем диапазоне частоты вращения.



Шаг 21: Проверка относительного момента инерции "k"

Отношение внешнего момента инерции к моменту инерции ротора двигателя существенно влияет на результат регулирования и поэтому не должно игнорироваться. Относительный момент инерции не должен превышать значений, указанных в следующей таблице.

Передающие узлы	Характеристики регулирования	Относительный момент инерции J_{ext} / J_{Mot}
Кованая зубчатая рейка, редуктор со сниженным люфтом	Низколюфтовый и низко-эластичный привод	$J_{ext} / J_{Mot} < 15$
Зубчатый ремень, редуктор со сниженным люфтом	Обычный сервопривод	$J_{ext} / J_{Mot} < 15$
Зубчатый ремень, редуктор в стандартном исполнении	Стандартный привод, муфты с демпфирующими элементами	$J_{ext} / J_{Mot} < 10$

Снижение относительного момента инерции за счет частоты вращения двигателя (или подбором передаточного числа редуктора) при значении $J_{ext} / J_{Mot} < 8$ на качество регулирования почти не влияет.

$$J_{ext} = 91,2 \times m \times \left(\frac{v}{n_{Mot}} \right)^2$$

$$J_{ext} = 91,2 \times 250 \text{ кг} \times \left(\frac{5 \text{ м/с}}{3820 \text{ об/мин}} \right)^2 = 390 \times 10^{-4} \text{ кгм}^2$$

$$k = \frac{J_{ext}}{J_{Mot}}$$

$$k = \frac{390 \times 10^{-4} \text{ кгм}^2}{35,9 \times 10^{-4} \text{ кгм}^2} = 10,9$$

Условие: $J_{ext} / J_{Mot} < 15$
 $10,9 < 15 \rightarrow$ **условие выполнено.**

Шаг 22:
Определение динамического момента с учетом инерции редуктора

$$M_{gear} = \frac{J_{gear} \times n_{max} \times 2 \times \pi}{t_a}$$

$$M_{gear} = \frac{4 \times 10^{-4} \text{ кгм}^2 \times 3820 \text{ об/мин} \times 2 \times \pi}{0,5 \text{ с}} = 0,9 \text{ Нм}$$



Шаг 23: Выбор
сервоусилителя

Зная значения эффективного и максимального вращающего момента двигателя, теперь можно выбрать сервоусилитель по таблицам совместимости двигателей и сервоусилителей:

$$I_{\text{eff_Motor}} = \frac{I_0 \times M_{\text{eff_Motor}}}{M_0}$$

$$I_{\text{eff_Motor}} = \frac{21,6 \text{ A} \times 16,7 \text{ Нм}}{21 \text{ Нм}} = 17,2 \text{ A}$$

Условие: $I_{\text{eff_Motor}} \leq I_{\text{N_Inverter}}$

17,2 A ≤ 32 A → **условие выполнено.**

n _N [об/мин]	Двигатель	M _{max} [Нм]	MOVIDRIVE®									
			0110	0150	0220	0300	0370	0450	0550	0750	0900	1100
			24 [A]	32 [A]	46 [A]	60 [A]	73 [A]	89 [A]	105 [A]	130 [A]	170 [A]	200 [A]
2000	CFM71S	M _{max}										
	CFM71M											
	CFM71L											
	CFM90S											
	CFM90M		52,5									
	CFM90L		70,3	75,8								
	CFM112S		76,2	81,9								
	CFM112M		79,3	99,6	108,0							
	CFM112L		80,3	104,9	141,5	156,8						
	CFM112H		80,1	106,5	150,3	189,2	220,1	237,0				
3000	DFS56M	M _{max}										
	DFS56L											
	DFS56H											
	CFM71S											
	CFM71M											
	CFM71L		31,5									
	CFM90S		39,2									
	CFM90M		47,8	51,6								
	CFM90L		51,1	65,6	75,6							
	CFM112S		54,8	69,8	81,9							
	CFM112M		54,0	70,7	95,7	108,0						
	CFM112L		53,9	71,6	101,0	126,9	147,4	156,8				
	CFM112H		56,6	75,7	108,6	139,9	167,0	197,1	223,2	237,0		
4500	DFS56M	M _{max}										
	DFS56L											
	DFS56H											
	CFM71S											
	CFM71M		21,3									
	CFM71L		30,3	31,2								
	CFM90S		33,6	39,2								
	CFM90M		34,6	44,5	52,1							
	CFM90L		34,7	45,8	63,4	75,0						
	CFM112S		37,4	49,2	67,5	81,9						
	CFM112M		37,1	49,4	69,6	87,4	101,5	108,0				
	CFM112L		35,0	46,8	67,2	86,9	104,1	123,5	140,7	156,8		
	CFM112H				70,9	92,5	112,1	135,5	157,7	189,4	231,6	237,0



Шаг 24: Выбор компонентов

В зависимости от класса предельных значений ЭМС кроме монтажа по нормам ЭМС необходимо принять еще и дополнительные меры. Со стороны двигателя и со стороны сети возможны следующие решения для каждого класса предельных значений ЭМС.

В нашем примере проектирования необходимо соблюдение требований по классу А, поэтому со стороны двигателя выбирается выходной дроссель, а со стороны сети – сетевой фильтр (см. следующую таблицу).

Выходной дроссель:

Класс А

Для монтажа по нормам ЭМС согласно EN 55011, **класс А**, в зависимости от конфигурации установки возможны 3 варианта:

Класс А	Со стороны двигателя типоразмер 0...6	Со стороны сети	
		типоразмер 0...2	типоразмер 3...6
1-й вариант	выходной дроссель HD...	дополнительных мер не требуется	сетевой фильтр NF... -...
2-й вариант	экранированный кабель двигателя	дополнительных мер не требуется	сетевой фильтр NF... -...
3-й вариант	выходной фильтр HF...	дополнительных мер не требуется	сетевой фильтр NF... -...

Класс В

Для монтажа по нормам ЭМС согласно EN 55011, **класс В**, в зависимости от конфигурации установки возможны 3 варианта:

Класс В	Со стороны двигателя типоразмер 0...5	Со стороны сети типоразмер 0...5
1-й вариант	выходной дроссель HD...	сетевой фильтр NF... -...
2-й вариант	экранированный кабель двигателя	сетевой фильтр NF... -...
3-й вариант	выходной фильтр HF...	сетевой фильтр NF... -...

Выходной дроссель можно выбрать по соответствующей обзорной таблице в Системном руководстве MOVIDRIVE® :

Тип выходного дросселя	HD001	HD002	HD003	HD004
Номер	813 325 5	813 557 6	813 558 4	816 885 7
Макс. потери мощности P_{Vmax}	15 Вт	8 Вт	30 Вт	100 Вт
Сечение жил кабеля / разъемы	1,5...16 мм ²	≤ 1,5 мм ²	≥ 16 мм ²)	контактные шпильки M12

Выходной дроссель выбирается в соответствии с сечением жил кабеля двигателя, выбор для данного примера: выходной дроссель HD001.



Сетевой фильтр Сетевой фильтр тоже выбирается по таблице параметров в Системном руководстве MOVIDRIVE:

При выборе следует учитывать, что напряжение электросети и степень использования должны соответствовать условиям эксплуатации.

Тип сетевого фильтра	NF009-503	NF014-503	NF018-503	NF035-503	NF048-503
Номер	827 412 6	827 116 X	827 413 4	827 128 3	827 117 8
Номинальное напряжение U_N	3 × 500 В _~ +10 %, 50/60 Гц				
Номинальный ток I_N	9 А _~	14 А _~	18 А _~	35 А _~	48 А _~
Потери мощности при I_N P_V	6 Вт	9 Вт	12 Вт	15 Вт	22 Вт
Ток утечки при U_N	< 25 мА	< 25 мА	< 25 мА	< 25 мА	< 40 мА
Температура окружающей среды ϑ_{amb}	-25...+40 °C				
Степень защиты	IP 20 (EN 60529)				
Подключение L1-L3/L1'-L3' PE	4 мм ² винты M5			10 мм ² винты M5/M6	
Совместимость с преобразователями на 400/500 В (MDX60/61B...-5_3)					
Номинальный режим (100 %)	0005...0040	0055/0075	-	0110/0150	0220
Повышенная мощность (VFC, 125 %)	0005...0030	0040/0055	0075	0110	0150
Совместимость с преобразователями на 230 В (MDX61B...-2_3)					
Номинальный режим (100 %)	0015/0022	0037	-	0055/0075	0110
Повышенная мощность (VFC, 125 %)	0015	0022	0037	0055/0075	-

Выбор для данного примера проектирования: сетевой фильтр NF048-503.

Шаг 25:

Выбор других
компонентов
системы:

**Датчик (адаптер
датчика)**

Согласно условиям приводной системы необходим датчик абсолютного отсчета. В данном случае выбирается Hiperface-датчик многооборотного типа. Следовательно, для сервоусилителя необходим соответствующий адаптер датчика.

Выбор для данного примера проектирования: адаптер датчика DEH11B.

Сетевая шина

Для подключения к шинной системе выбираются следующий интерфейсный модуль: PROFIBUS-интерфейсный модуль DFP21B.

Шаг 26:

Определение
пиковой
мощности
торможения
на участке t_3

$$P_{Br_peak} = \frac{M_{Br_Motor} \times n_{max}}{9550}$$

$$P_{Br_peak} = \frac{-28,2 \text{ Нм} \times 3820 \text{ об/мин}}{9550} = 11,28 \text{ кВт}$$



Шаг 27:
Определение
средней
мощности
торможения
на участке t_3

$$P_{Br_peak} = \frac{M_{Br_Motor} \times \frac{n_{max}}{2}}{9550}$$

$$P_{Br_peak} = \frac{-28,2 \text{ Нм} \times \frac{3820 \text{ об/мин}}{2}}{9550} = 5,64 \text{ кВт}$$

Шаг 28:
Определение
продолжитель-
ность включения
(ПВ) тормозного
резистора

$$ПВ = \frac{t_{Br1} + \dots + t_{Brn}}{t_1 + \dots + t_n} \times 100 \%$$

$$ПВ = \frac{0,5 \text{ с}}{0,5 \text{ с} + 2 \text{ с} + 0,5 \text{ с} + 1,5 \text{ с}} \times 100 \% = 11,1 \%$$

Шаг 29: Выбор
и проверка
тормозного
резистора

Выбор тормозного резистора по данным Системного руководства "MOVIDRIVE® MDX60B/61B": BW018-015
Условие: $5,64 \text{ кВт}_{ПВ 11\%} < 6,7 \text{ кВт}$ и $11,4 \text{ кВт}_{ПВ 6\%} > 11,3 \text{ кВт}$
→ **условие выполнено.**

Шаг 30: Проверка
точности пози-
ционирования

$$\Delta S = \Delta S_{gear} + \Delta S_{sensor} + \Delta S_{mechanic}$$

$$\Delta S_{gear} = \frac{D \times \pi \times \alpha_{gear}}{360^\circ}$$

$$\Delta S_{gear} = \frac{0,25 \text{ м} \times \pi \times \frac{6'}{2}}{360^\circ} = 0,218 \text{ мм}$$

$$\Delta S_{sensor} = \frac{D \times \pi \times 5 \text{ инкр.}}{4096 \text{ инкр.} \times i}$$

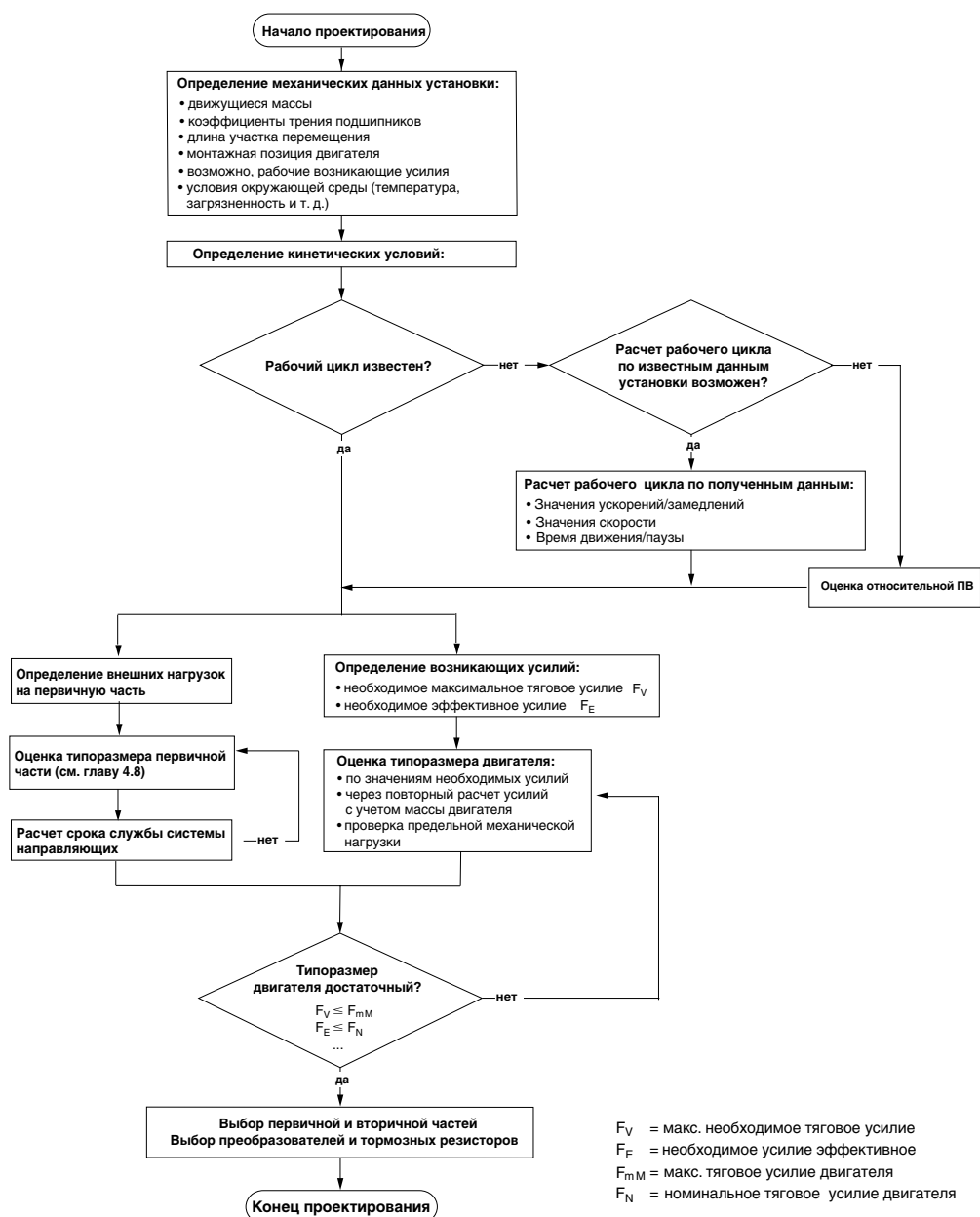
$$\Delta S_{sensor} = \frac{0,25 \text{ м} \times \pi \times 5 \text{ инкр.}}{4096 \text{ инкр.} \times 10} = 0,095 \text{ мм}$$

$$\Delta S_{mechanic} = 0,3 \text{ мм}$$

$$\Delta S = 0,218 \text{ мм} + 0,095 \text{ мм} + 0,3 \text{ мм} = 0,613 \text{ мм}$$

Условие: $\Delta S < 0,7 \text{ мм}$
условие выполнено.

На следующей блок-схеме представлена процедура проектирования линейного привода SL2 компании SEW.



56417bru



8.6 Пример проектирования линейного сервопривода SL2

Пример проектирования

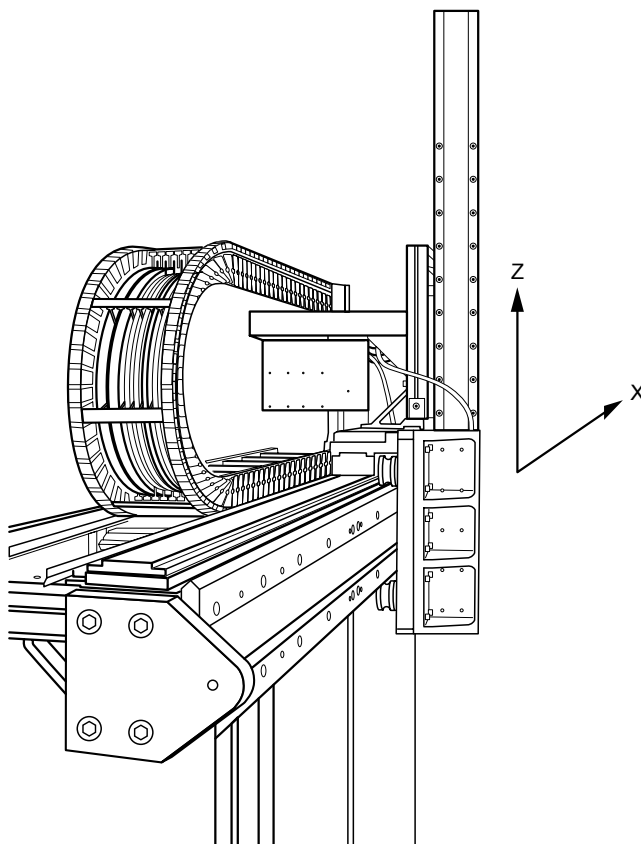


Рис. 96. Скоростной загрузочный портал

56350AXX

Скоростной загрузочный портал оснащен синхронными линейными двигателями SL2.

Заданы следующие условия:

Горизонтальная ось (ось x):

Масса	$m_L = 50 \text{ кг} + \text{масса вертикальной оси}$
Макс. скорость	$v_{\max} = 6 \text{ м/с}$
Длина участка перемещения	$s = 2 \text{ м}$

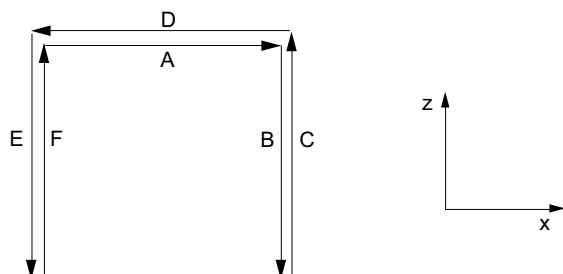
Вертикальная ось (ось z):

Масса	$m_L = 25 \text{ кг}$
Макс. скорость	$v_{\max} = 6 \text{ м/с}$
Длина участка перемещения	$s = 0,8 \text{ м}$



Время цикла для каждого изделия должно быть минимальным. Поэтому для оси z кривая изменения скорости должна быть треугольной, если при этом не превышает максимальная скорость 6 м/с.

вперед [A]	вниз [B]	вверх [C]	назад [D]	вниз [E]	вверх [F]
ок. 0,5 с	ок. 0,5 с		ок. 0,5 с	ок. 0,5 с	

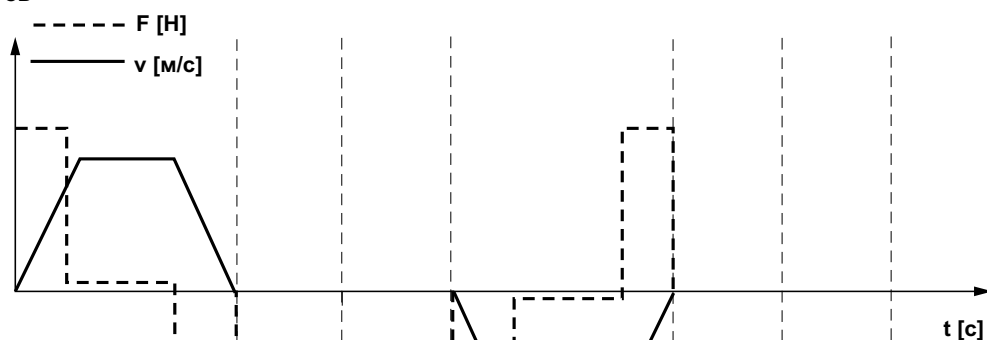


52981AXX

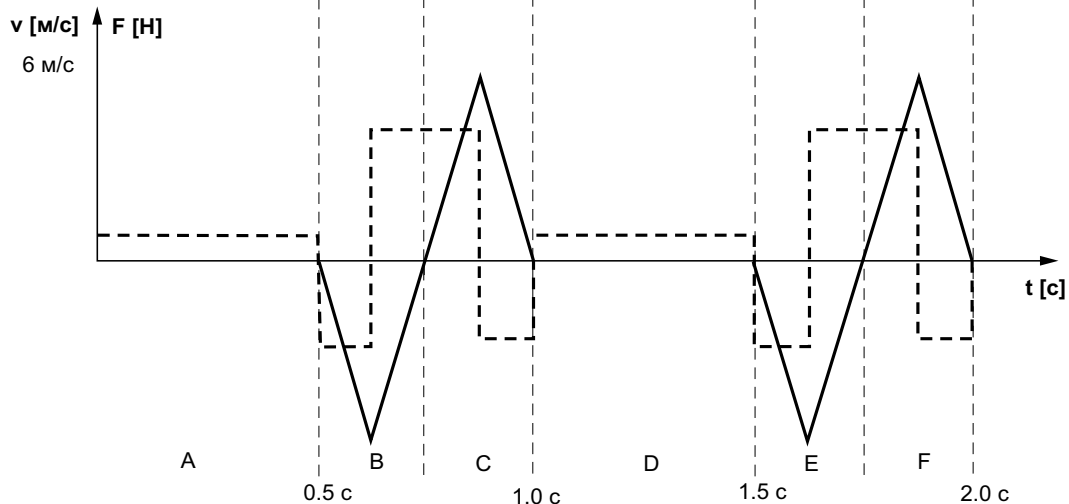
Рис. 97. Цикл перемещения

С учетом этого получаются следующие диаграммы:

Горизонтальная ось
(ось x)



Вертикальная ось
(ось z)



52997ARU

Рис. 98. Диаграммы рабочего цикла

В следующем примере проектирования сначала рассчитывается ось x, а затем ось z.



Пример проектирования механизма перемещения 1А (ось x)

Шаг 1: Расчет рабочего цикла

(машинный нуль = крайнее левое положение; положительное направление перемещения: вправо)

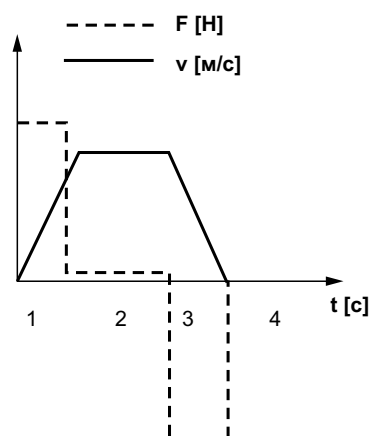


Рис. 99. Участки n рабочего цикла

53000ARU

1, 2, 3, 4 = участки рабочего цикла

Из диаграмм рабочего цикла получается, что привод должен проходить 2 м за 0,5 с. При треугольной кривой изменения скорости необходимая максимальная скорость v_{max} составляет:

$$v_{max} = \frac{2 \times s}{t} = \frac{2 \times 1 \text{ м}}{0,25 \text{ с}} = 8 \text{ м/с}$$

Поскольку $v_{max} > v_{maxMotor}$, для оси x изменение скорости возможно только по трапецеидальной кривой.

Расчет необходимого ускорения при трапецеидальной кривой изменения скорости (1/3 ускорение, 1/3 постоянная скорость, 1/3 замедление):

$$a_{max} = \frac{v_{max}}{\frac{1}{3} \times t} = \frac{6 \text{ м/с}}{0,1667 \text{ с}} = 36 \text{ м/с}^2$$

Шаг 2: Оценка типоразмера двигателя

Для оценки типоразмера двигателя предположим, что общая нагрузка привода подъема составляет 60 кг.

Как правило, сначала проектируется привод подъема, а затем привод перемещения. Однако поскольку проектирование привода подъема строится на проектировании привода перемещения, в данном случае порядок был изменен и за массу привода подъема взято предполагаемое значение.

При этом для механизма перемещения получается:

$$m_L = 50 \text{ кг} + 60 \text{ кг} = 110 \text{ кг}$$

$$F_{mM} = m_L \times [a_{max} + (g \times \sin \alpha)] \times 1,5$$

$$F_{mM} = 110 \text{ кг} \times 36 \text{ м/с}^2 \times 1,5 = 5940 \text{ Н}$$



По таблице параметров двигателей выбирается SL2-P-150ML-060 со следующими данными:

- $F_1 = 6000 \text{ Н}$;
- $v_1 = 6 \text{ м/с}$;
- $F_D = 17000 \text{ Н}$;
- $m_P = 36 \text{ кг}$.

Условие: $F_{\text{мМ}} \leq F_1$

$5940 \text{ Н} \leq 6000 \text{ Н} \rightarrow$ **условие выполнено.**

Шаг 3: Расчет сил на отдельных участках движения и проверка степени использования в динамическом режиме:

$$F_R = (F_G + F_D) \times \mu$$

$$F_R = [(m_L + m_P) \times g \times \cos \alpha + F_D] \times \mu$$

$$F_R = [(110 \text{ кг} + 36 \text{ кг}) \times 9,81 \text{ м/с}^2 + 17000 \text{ Н}] \times 0,01 = 184,3 \text{ Н}$$

Дополнительное рабочее усилие F_Z : отсутствует

Ускоряющая сила в динамическом режиме:

$$F_A = (m_L + m_P) \times a_{\text{max}}$$

$$F_A = (110 \text{ кг} + 36 \text{ кг}) \times 36 \text{ м/с}^2 = 5256 \text{ Н}$$

По формулам расчета движения с равномерными ускорениями получаются следующие данные для отдельных участков движения:

Участок	1	2	3	4
Расстояние [м]	0,5	1	0,5	0
Время [с]	0,167	0,167	0,167	0,5
Конечная скорость [м/с]	6	6	0	0
Ускорение [м/с ²]	36	0	- 36	0
Тяговое усилие [Н]	$F_A + F_R$	F_R	$- F_A + F_R$	0
	5440,3	184,3	5071,7	0

При этом все рабочие точки лежат ниже кривой предельного усилия в динамическом режиме, а максимальное тяговое усилие составляет

$$F_{\text{vmax}} = F_A + F_R = 2765,7 \text{ Н}$$

Условие: $F_{\text{vmax}} \leq F_1$

$5440,3 \text{ Н} \leq 6000 \text{ Н} \rightarrow$ **условие выполнено.**



Шаг 4: Расчет
эффективного
усилия и средней
скорости /
проверка степени
использования
по нагреву

Для определения тепловой нагрузки двигателя рассчитываются эффективное усилие и средняя скорость.

$$F_E = \sqrt{\frac{\sum(F_i^2 \times t_i)}{t}}$$

$$F_E = \sqrt{\frac{(5440,3 \text{ Н})^2 \times 0,167 \text{ с} + (184,3 \text{ Н})^2 \times 0,167 \text{ с} - (5071,7 \text{ Н})^2 \times 0,167 \text{ с}}{1 \text{ с}}}$$

$$F_E = 3040,4 \text{ Н}$$

Поскольку по всему рабочему циклу $v_{\max}$ всегда $\leq v_1$, то и средняя скорость автоматически тоже $< v_N$.

Условие: $F_E \leq F_N$

$3040 \text{ Н} \leq 3600 \text{ Н} \rightarrow$ **условие выполнено**, так как рабочая точка лежит ниже предельной кривой с учетом нагрева для режима S1.

Шаг 5: Выбор
сервоусилителя
MDx_B

Выбор сервоусилителя по данным Инструкции по эксплуатации "Синхронные линейные двигатели SL2".

Исходя из номинальной скорости 6 м/с и усилия $F_{\max} = 5440,3 \text{ Н}$ выбирается MDX61B0300.

Шаг 6: Выбор
тормозного
резистора

Для выбора тормозного резистора определяются значения необходимой максимальной и средней мощности при включенном тормозном резисторе. Тормозной резистор активен на участке 3, см. Рис. 99.

Максимальная мощность тормозного резистора в начале участка 3:

$$P_{\max} = F_{\max} \times v_{\max} \times \eta$$

$$P_{\max} = 5071,7 \text{ Н} \times 6 \text{ м/с} \times 0,9 = 27,4 \text{ кВт}$$

Рабочий цикл, участок 3:

Средняя мощность торможения:

$$P_3 = \frac{P_{\max}}{2} = 13,7 \text{ кВт}$$

При продолжительности включения ПВ

$$ED = \frac{t_3}{t} = \frac{0,167 \text{ с}}{1 \text{ с}} = 17 \%$$

По данным Системного руководства MOVIDRIVE® выбирается тормозной резистор BW012-050.



*Шаг 7:
Определение
параметров
вторичной части
по длине участка
перемещения*

Необходимая длина вторичной части рассчитывается следующим образом:

$$s_s \geq s + L_p + (2 \times s_e)$$

$$s_s \geq 2,0 \text{ м} + 0,72 \text{ м} \geq 2,72 \text{ м}$$

Для зон конечных выключателей S_e с каждой стороны предусмотрено по 10 мм.

Когда привод входит в зону конечного выключателя, он дополнительно тормозится амортизатором-ограничителем. В этом случае перекрывание первичной и вторичной частей становится неполным.

Выбираются

5 секций по 512 мм SL2-S-150-512

и

3 секции по 64 мм SL2-S-150-064.

*Шаг 8: Выбор
дополнительных
компонентов*

Для проектирования полной приводной системы потребуются дополнительные компоненты, не поставляемые компанией SEW.

В случае привода перемещения это:

1. Hiperface-датчик абсолютного отсчета (Stegmann Lincoder) или инкрементный датчик;
2. линейные направляющие;
3. цепной короб;
4. кабели двигателя и датчика для прокладки в цепных коробах;
5. амортизаторы-ограничители;
6. возможно, внешний аварийный тормоз.



Пример проектирования подъемного механизма 1В (ось z)

Шаг 1: Расчет
рабочего цикла

(машинный нуль = крайнее верхнее положение; положительное направление перемещения: вверх)

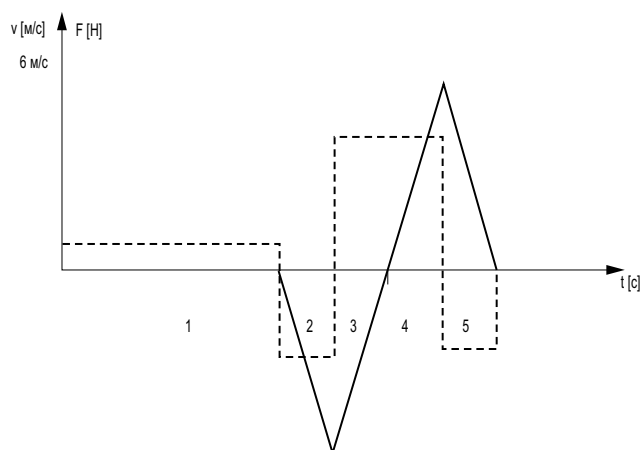


Рис. 100. Участки n рабочего цикла

52629ARU

1, 2, 3, 4, 5 = участки рабочего цикла

Расчет необходимого ускорения при треугольной кривой изменения скорости:

$$a_{max} = \frac{v_{max}^2}{2 \times \frac{s}{2}} = \frac{(6 \text{ м/с})^2}{0,8 \text{ м}} = 45 \text{ м/с}^2$$

$$t = \frac{v_{max}}{a_{max}} = \frac{6 \text{ м/с}}{45 \text{ м/с}^2} = 0,133 \text{ м/с}$$

Шаг 2: Оценка
типоразмера
двигателя

$$F_{mN} \leq F_1$$

$$F_{mN} = m_L \times [a_{max} + (g \times \sin 90^\circ)] \times 1,5$$

$$F_{mN} = 25 \text{ кг} \times (45 \text{ м/с}^2 + 9,81 \text{ м/с}^2) \times 1,5 = 2055 \text{ Н}$$

По таблице параметров двигателей выбирается SL2-P-100M-060 со следующими данными:

- $F_1 = 3000 \text{ Н}$;
- $v_1 = 6 \text{ м/с}$;
- $F_D = 8570 \text{ Н}$;
- $m_P = 18,9 \text{ кг}$.



Шаг 3: Расчет сил / проверка степени использования в динамическом режиме

Сила трения:

$$F_R = (F_G + F_D) \times \mu$$

$$F_R = [(m_L + m_P) \times g \times \cos 90^\circ + F_D] \times \mu$$

$$F_R = 8570 \text{ Н} \times 0,01 = 85,7 \text{ Н}$$

Сила тяжести вместе с рабочим усилием (сила тяжести + дополнительная масса)

$$F_Z = (m_L + m_P + m_Z) \times g$$

$$F_Z = (25 \text{ кг} + 18,9 \text{ кг} + 5 \text{ кг}) \times 9,81 \text{ м/с}^2 = 480 \text{ Н}$$

Общая масса стояночного тормоза подъемного механизма и цепного короба с кабелем принимается за 5 кг.

Ускоряющая сила в динамическом режиме:

$$F_A = (m_L + m_P + m_Z) \times a_{\max}$$

$$F_A = (25 \text{ кг} + 18,9 \text{ кг} + 5 \text{ кг}) \times 45 \text{ м/с}^2 = 2200 \text{ Н}$$

При этом для отдельных участков движения получается:

Участок	1	2	3	4	5
Расстояние [м]	0	- 0,4	- 0,4	0,4	0,4
Время [с]	0,5	0,133	0,133	0,133	0,133
Конечная скорость [м/с]	0	- 6,0	0	6	0
Ускорение [м/с ²]	0	- 45,0	45,0	45,0	- 45,0
Тяговое усилие [Н]	$F_Z - F_R$	$-F_A + F_Z - F_R$	$F_A + F_Z - F_R$	$F_A + F_Z + F_R$	$-F_A + F_Z + F_R$
	394,3	-1805,7	2594,3	2765,7	-1634,3

При этом все рабочие точки лежат ниже кривой предельного усилия в динамическом режиме, а максимальное тяговое усилие составляет

$$F_{v\max} = F_A + F_Z + F_R = 2765,7 \text{ Н}$$

$$\text{Условие: } F_{v\max} \leq F_1$$

$$2765,7 \text{ Н} \leq 3700 \text{ Н} \rightarrow \text{условие выполнено.}$$



Шаг 4: Расчет
эффективного
усилия и средней
скорости /
проверка степени
использования
по нагреву

Для определения тепловой нагрузки двигателя рассчитываются эффективное усилие и средняя скорость.

$$F_E = \sqrt{\frac{\sum(F_i^2 \times t_i)}{t}}$$

$$F_E = \sqrt{\frac{[(394,3 \text{ Н})^2 \times 0,5 \text{ с} + (1805,7 \text{ Н})^2 \times 0,133 \text{ с} + (2594,3 \text{ Н})^2 \times 0,133 \text{ с} + (2765,7 \text{ Н})^2 \times 0,133 \text{ с} + (1634,3 \text{ Н})^2 \times 0,133 \text{ с}]}{1 \text{ с}}}$$

$$F_E = 1667 \text{ Н}$$

Поскольку по всему рабочему циклу $v_{\max}$ всегда $\leq v_1$, то и средняя скорость автоматически тоже $< v_N$.

Условие: $F_E \leq F_N = 1800 \text{ Н}$

$1667 \text{ Н} \leq 1800 \text{ Н} \rightarrow$ **условие выполнено**, так как рабочая точка лежит ниже предельной кривой с учетом нагрева для режима S1.

Шаг 5: Выбор
сервоусилителя
MDx_B

Выбор сервоусилителя по данным Инструкции по эксплуатации "Синхронные линейные двигатели SL2".

Условие: $F_{vmax} \leq F_{table}$

Для MDX61B0220 действительно:

$2765,7 \text{ Н} < 3300 \text{ Н} \rightarrow$ **условие выполнено**.



Для подъемных механизмов с электрическим удержанием необходимо проверить, способен ли сервоусилитель длительно подавать ток для создания усилия удержания. Это касается и того случая, когда привод стоит, а весь ток протекает через одно плечо выходного инвертора (т. е. через один IGBT-модуль).

Силовая постоянная / номинальная точка

$$k_N = \frac{F_N}{I_N} = \frac{1800 \text{ Н}}{23,3 \text{ А}} = 77,3 \text{ Н/А}$$

Определение допустимого длительного усилия:

$$F_{continuous} \leq \frac{I_{rated_ampl.}}{\sqrt{2}} \times k_N$$

$$F_{continuous} \leq \frac{46 \text{ А}}{\sqrt{2}} \times 77,3 \text{ Н/А}$$

$$F_{continuous} \leq 2514 \text{ Н}$$

Условие: $F_{continuous} > F_{V \text{ interval } 1}$

$2514 \text{ Н} > 394,3 \text{ Н} \rightarrow$ **условие выполнено**.



Шаг 6: Выбор тормозного резистора

Для выбора тормозного резистора определяются значения необходимой максимальной и средней мощности при включенном тормозном резисторе. Тормозной резистор активен на участках 3 и 5.

Максимальная мощность тормозного резистора в начале участка 3 рабочего цикла:

$$P_{max} = F_{max} \times v_{max} \times \eta$$

$$P_{max} = 2594,3 \text{ Н} \times 6 \text{ м/с} \times 0,9 = 14 \text{ кВт}$$

Рабочий цикл, участок 3:

Средняя мощность торможения:

$$P_3 = \frac{P_{max}}{2} = 7 \text{ кВт}$$

Продолжительность включения: $t_3 = 0,133 \text{ с}$

Рабочий цикл, участок 5:

Средняя мощность торможения

$$P_5 = \frac{1}{2} \times F_{max} \times v_{max} \times \eta = 0,5 \times 1634,3 \text{ Н} \times 6 \text{ м/с} \times 0,9 = 4,4 \text{ кВт}$$

Продолжительность включения: $t_5 = 0,133 \text{ с}$

Рабочий цикл, участки 3 и 5:

Средняя мощность

$$P_{\varnothing} = \frac{(P_3 \times t_3) + (P_5 \times t_5)}{t_3 + t_5} = \frac{(7 \text{ кВт} \times 0,133 \text{ с}) + (4,4 \text{ кВт} \times 0,133 \text{ с})}{0,266 \text{ с}} = 5,7 \text{ кВт}$$

При продолжительности включения:

$$ED = \frac{t_3 + t_5}{t} = \frac{0,266 \text{ с}}{1 \text{ с}} = 27 \%$$

По данным Системного руководства MOVIDRIVE® В выбирается тормозной резистор BW018-035.



Шаг 7:
Определение
параметров
вторичной части
по длине участка
перемещения

Необходимая длина вторичной части рассчитывается следующим образом:

$$s_s \geq s + L_P + (2 \times s_E)$$

$$s_s \geq 0,8 \text{ м} + 0,544 \text{ м} + 0,02 \text{ м} \geq 1,346 \text{ м}$$

Для зон конечных выключателей с каждой стороны предусмотрено по 10 мм.

Когда привод входит в зону конечного выключателя, он дополнительно тормозится амортизатором-ограничителем. В этом случае перекрытие первичной и вторичной частей становится неполным.

Выбираются

2 секции по 512 мм SL2-S-100-512;

1 секция 256 мм SL2-S-100-256;

1 секция 128 мм SL2-S-100-128.

Шаг 8: Выбор
дополнительных
компонентов

Для проектирования полной приводной системы потребуются дополнительные компоненты, не поставляемые компанией SEW.

В случае привода подъема это:

1. Hiperface-датчик абсолютного отсчета (Stegmann Lincoder);
2. линейные направляющие;
3. цепной короб;
4. кабели двигателя и датчика для прокладки в цепных коробах;
5. амортизаторы-ограничители;
6. внешний рабочий и стояночный тормоз.



9 Алфавитный указатель

Е

Ethernet как основа промышленных сетей96

С

Sin-/cos-датчик.....84

Т

TTL-датчик (1024 имп/об)84

А

Амортизаторы.....41

Асинхронные двигатели91

Ациклический обмен данными94

Б

Безлюфтовое соединение с нагрузкой.....87

Блок-схема проектирования, часть 1, редукторы110

Блок-схема проектирования, часть 2, редукторы111

Блок-схема проектирования, часть 3, серводвигатели112

Блок-схема проектирования, часть 4, серводвигатели113

Буферы41

Буферы / амортизаторы40

В

Водяное охлаждение38

Водяное охлаждение с термооболочкой.....39

Д

Диагностическая шина98

Дополнительные компоненты сервосистемы9

Ж

Жесткость регулирования89

З

Закрытые системы62

К

Конические редукторы102, 104

Конструкция с длинным статором.....34

Конструкция с коротким статором.....35

Контроль положения и частоты вращения.....83

Кривая момента двигателя в динамическом режиме23

Кривая момента двигателя с учетом тепловой нагрузки24

М

Механическая характеристика31, 36

Монтаж тормоза на линейный двигатель SL2-Advance/Power47

Н

Недостатки питания прямоугольной формы22

О

Обмен данными между осевыми приводами97

Оптимальная рабочая точка.....19

Открытые системы62

П

Питание прямоугольной формы.....21

Питание синусоидальной формы.....20

Планетарные редукторы для сервопривода100

Подготовка уставки частоты вращения85

Преимущества питания прямоугольной формы22

Преимущества синхронных линейных двигателей33

Принципиальные конструкции синхронных линейных двигателей.....34

Пружинный тормоз43

Р

Регулятор частоты вращения.....86

Резольвер84

Решение SEW
Монтажно-охлаждающие платформы37

С

Синхронные двигатели91

Система линейных направляющих39

Соединение двигателя и нагрузки с люфтом.....88

Соотношение токов статора19

Стояночный тормоз45

Структура регулирования частоты вращения82

Т

Тормоз с пневмоприводом46

Тормоз с электроприводом.....46

Тормоза для линейных двигателей46

У

Упреждение по ускорению.....87

Устройство и принцип действия.....56

Устройство и принцип действия
HIPERFACE®-датчиков53

Устройство и принцип действия двигателей с коротким статором.....35

Устройство и принцип действия индуктивных систем измерения перемещений63

Устройство и принцип действия магнитных систем измерения перемещений62

Устройство и принцип действия оптических систем измерения перемещений61

Ф

Фильтр действительного значения частоты вращения85

**Ц**

Цепные короба и шлейфовые кабели	42
Циклический обмен данными	94
Цилиндрические редукторы	103

Ш

Шинная система INTERBUS-S	95
Шинная система Profibus DP	94

Э

Электромагнитный тормоз	46
-------------------------------	----

Что движет миром

Мы вместе с Вами
приближаем
будущее.

Сервисная сеть,
охватывающая весь
мир, чтобы быть
ближе к Вам.

Приводы и системы
управления,
автоматизирующие
Ваш труд и
повышающие его
эффективность.

Обширные знания
в самых важных
отраслях
современной
экономики.

Бескомпромиссное
качество, высокие
стандарты которого
облегчают
ежедневную работу.



Глобальное
присутствие
для быстрых и
убедительных побед.
В решении любых
задач.

Инновационные
технологии,
уже сегодня
предлагающие
решение завтрашних
вопросов.

Сайт в Интернете
с круглосуточным
доступом
к информации и
обновленным версиям
программного
обеспечения.

SEW-EURODRIVE
Driving the world



SEW
EURODRIVE

SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG
P.O. Box 3023 · D-76642 Bruchsal / Germany
Phone +49 7251 75-0 · Fax +49 7251 75-1970
sew@sew-eurodrive.com

→ www.sew-eurodrive.com