

# Устройства управления электродвигателями

- Необходимые функции устройств управления электродвигателями
- Выбор функций устройств пуска и регулирования скорости электродвигателей

5.1	Введение	94
5.2	Основные функции устройств управления электродвигателями	94
5.3	Конструкция и принцип работы контактора	105
5.4	Выбор контактора	107
5.5	Устройства управления электродвигателями и координация	108
5.6	Интеллектуальные пускатели	113
5.7	Преобразователи частоты	115
5.8	Структура и компоненты устройств плавного пуска и преобразователей частоты	119
5.9	Силовые компоненты	119
5.10	Регулятор напряжения для двигателя постоянного тока	123
5.11	Преобразователи частоты для асинхронных двигателей	125
5.12	Регулятор напряжения для асинхронных двигателей	131
5.13	Регулятор скорости синхронных двигателей	132
5.14	Регулятор для шагового двигателя	133
5.15	Дополнительные функции регуляторов скорости	134
5.16	Регуляторы скорости и потребление энергии	136
5.17	Регуляторы скорости, энергосбережение и обслуживание	138
5.18	Таблица выбора устройств управления двигателями	139

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

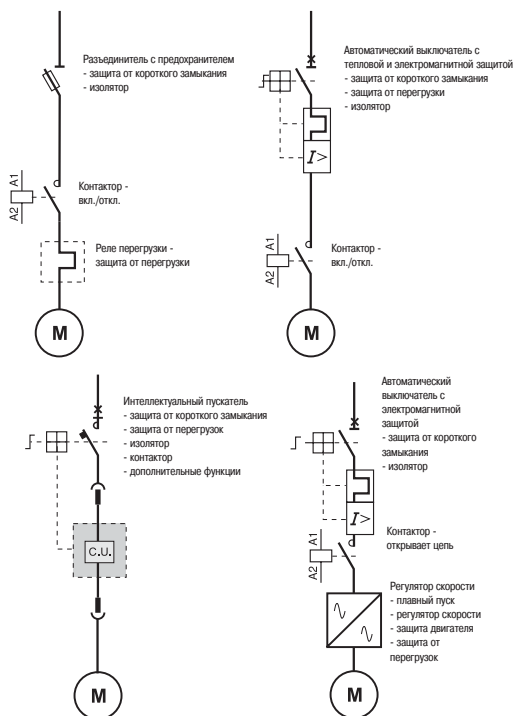
C

# 5 - Устройства управления электродвигателями

## 5.1 Введение

### 5.2 Основные функции устройств управления электродвигателями

### 5.1 Введение



↑ Рис. 1

Различные схемы построения устройств управления электродвигателями с учетом основных функций и их комбинаций

Устройства управления электродвигателями имеют четыре основные функции:

- изолирование нагрузки от цепи питания;
- защита электродвигателя от короткого замыкания;
- защита электродвигателя от тепловой перегрузки;
- управление процессами пуска и остановки.

Каждое устройство управления электродвигателем может быть оснащено дополнительными функциями в зависимости от требований технологии. Эти функции могут реализовываться как в энергетическом канале:

- управление частотой, плавный пуск, реверс;

так и в канале управления:

- вспомогательные контакты, временные задержки, коммуникация и т.д.

В зависимости от структуры устройства управления электродвигателем его функции могут быть реализованы на основе различных схем, представленных на (⇒ Рис. 1).

Преобразователи частоты и устройства плавного пуска являются интеллектуальными устройствами управления электродвигателем и рассматриваются в разделе (Раздел 5.7).

Пускатели для специальных электродвигателей, например, синхронных и шаговых, также рассматриваются в этом разделе, поскольку они имеют похожие принципы работы.

В разделах 5.16 и 5.17 рассматриваются вопросы баланса мощности, экономии электроэнергии и другие вопросы, связанные с применением устройств управления электродвигателями.

### 5.2 Основные функции устройств управления электродвигателями

#### ■ Изолирующие контакторы

Изолирующие контакторы рекомендуется устанавливать в начале каждой цепи для обеспечения безопасности (см. стандарты NF C15-100, МЭК 60364-5-53). Установка этих контакторов не является обязательной, но рекомендуется их использование в каждой цепи электродвигателя для обеспечения надежного изолирования его от источника тока в выключенном состоянии. Это позволяет обеспечить безопасность при проведении ремонтных работ, наладке и в отключенном состоянии системы.

Изолирующие контакторы должны обеспечивать следующие функции:

- одновременное отключение всех цепей электродвигателя;
- безопасный зазор разомкнутых контактов в зависимости от уровня напряжения;
- блокировка несанкционированного включения;
- видимый разрыв контактов (термин «видимый разрыв» означает, что оператор может визуально контролировать разрыв цепи);
- кроме видимого разрыва, информация об отключенном состоянии может быть получена на основании состояния индикатора отключения; в этом случае использование индикатора допускается по стандарту, только если он показывает отключенное состояние с требуемым зазором. Производители предлагают различные изделия с данной функцией. Часто одно устройство позволяет обеспечивать отключение и защиту от короткого замыкания (например, предохранитель/разъединитель).

Разъединитель обеспечивает гарантированное отключение цепи и отсутствие возможности несанкционированного включения. Разъединитель должен не только обеспечивать гарантированное отключение, но и выдерживать большие токи отключения (стандарт МЭК 947-3).

### ■ Защита

#### □ Защита от короткого замыкания

##### • Общие положения

Короткое замыкание - это прямой контакт между двумя точками, имеющими различные электрические потенциалы:

- при переменном токе: соединение между фазами, между фазой и нейтралью, между фазой и землей или между витками на одной фазе;
- при постоянном токе: соединение между двумя полюсами или между землей и изолированным от нее полюсом.

Существует несколько возможных причин: нарушения слоя изолирующего лака проводника, обрывы проводов или кабелей, наличие посторонних металлических предметов, наличие проводящих примесей (пыль, влажность и т.п.), проникновение воды или других жидкостей, ухудшение качества нагрузки, дефекты кабеля.

Короткое замыкание приводит к внезапному скачку тока, который может за несколько миллисекунд достичь значения в сотни раз превышающего величину рабочего тока. Короткое замыкание может вызвать серьезное повреждение оборудования. Оно характеризуется двумя составляющими:

##### • Температурная составляющая

Она зависит от количества освобожденной в электрической цепи энергии при коротком замыкании с величиной тока  $I$  в течение промежутка времени  $t$ , рассчитываемого по формуле  $I^2t$  и выраженной в А<sup>2</sup>с. Температурная составляющая может привести к:

- разрушению контактов контакторов;
- разрушению температурных (тепловых) компонентов биметаллических реле, если используется координация типа 1;
- образованию электрической дуги;
- разрушению изолирующего оборудования;
- возгоранию оборудования.

##### • Электродинамическая составляющая

Она возникает между проводниками в результате воздействия механических сил, вызванных протеканием тока, и может привести к:

- деформации проводников обмоток двигателя;
- разрушению изолирующих опор;
- отталкиванию контактов (внутри контакторов), что может привести к разрушению или спайке контактов.

Обе составляющие опасны как для человека, так и для оборудования. Поэтому очень важно использовать приборы, которые обнаруживают короткое замыкание и как можно скорее размыкают цепь до того, как ток достигает максимального значения.

Для этих целей обычно используются приборы двух типов:

- плавкие предохранители, которые при превышении тока плавятся и тем самым разрывают цепь. После устранения причины короткого замыкания их требуется заменить;
- автоматические выключатели с магнитным расцепителем, которые чаще называют магнитными автоматическими выключателями. Они размыкают цепь автоматическим открыванием своих контактов. Повторное закрывание этих контактов позволяет вернуть устройство в работу.

Функция обнаружения короткого замыкания может быть реализована в multifunctionальных устройствах, таких как автоматические выключатели двигателей, или контакторы.

##### • Определения и характеристики

Устройства защиты от короткого замыкания имеют следующие основные характеристики:

- размыкающая способность - это значение максимального предполагаемого тока короткого замыкания, который может разомкнуть защитное устройство при заданном напряжении;
- замыкающая способность - это значение максимального тока, который защитное устройство может включить при номинальном напряжении в определенных условиях. Замыкающая способность пропорциональна размыкающей способности в соответствии с таблицей на [Рис. 2](#).

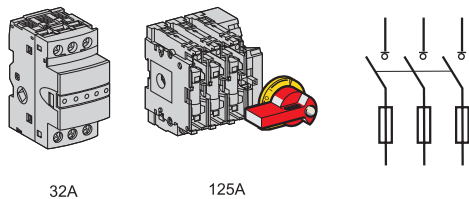
Размыкающая способность	Cos φ	Замыкающая способность
4,5 кА < PC < 6 кА	0,7	1,5 PC
6 кА < PC < 10 кА	0,5	1,7 PC
10 кА < PC < 20 кА	0,3	2 PC
20 кА < PC < 50 кА	0,25	2,1 PC
50 кА < PC	0,2	2,2 PC

↑ Рис. 2

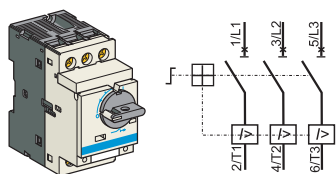
Размыкающая и замыкающая способности, в соответствии со стандартом МЭК 60947-2 для автоматических выключателей

## 5 - Устройства управления электродвигателями

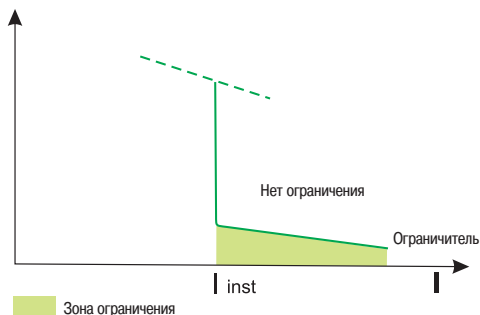
### 5.2 Основные функции устройств управления электродвигателями



↑ Рис. 3 Размыкающий выключатель на 32 или 125 А с предохранителями (LS1-D32 и GS1-K4 Schneider Electric)



↑ Рис. 4 Магнитный автоматический выключатель GV2-L (Schneider Electric) и его графическое обозначение



↑ Рис. 5 Кривая отключения магнитного автоматического выключателя

#### • Плавкие предохранители (прерыватели)

Плавкие предохранители обеспечивают пофазную (1P) защиту с высокой размыкающей способностью при небольшом размере устройства. Они характеризуются пороговой величиной  $I^2t$  и величиной электродинамической пиковой нагрузки (Ipeak).

Их монтаж осуществляется:

- либо на специальных креплениях, называемых держателями плавких предохранителей;
- либо внутри размыкающего выключателя (⇒ Рис. 3).

Примечание: картридж предохранителя может быть оборудован специальным адаптером, который позволяет в случае отключения одного полюса одновременно отключить все остальные (все полюсы двигателя) и предотвращает наличие напряжения на контакторе.

Для защиты двигателей должны использоваться предохранители типа aM. Их особенностью является то, что они выдерживают превышения по току намагничивания при подаче питания двигателя. В связи с этим они не предназначены для защиты от перегрузки (в отличие от предохранителей типа gG), поэтому в цепь питания двигателя необходимо включить реле перегрузки.

Как правило, их номинальная характеристика должна лежать выше характеристики полной нагрузки защищаемого двигателя.

#### • Магнитные автоматические выключатели

Автоматические выключатели предназначены для защиты электроустановок от короткого замыкания (⇒ Рис. 4) в диапазоне их отключающих способностей и при помощи их магнитных расцепителей (один на фазу).

Магнитный расцепитель обеспечивает отключение всех полюсов одновременно: срабатывания расцепителя на одной фазе достаточно для отключения всех контактов для всех полюсов.

Для малых токов короткого замыкания автоматический выключатель работает быстрее предохранителя.

Эта защита соответствует стандарту МЭК 60947-2.

Чтобы эффективно отключить ток короткого замыкания, должны быть соблюдены три условия:

- раннее обнаружение превышения тока;
- быстрое отключение контактов;
- размыкание тока короткого замыкания.

Большинство автоматических выключателей с магнитным расцепителем, используемых для защиты двигателей, являются токоограничивающими, и поэтому координация улучшается (⇒ Рис. 5).

Они характеризуются очень малым временем отключения, поэтому они позволяют отключить ток короткого замыкания до того, как он достигнет своего максимального значения.

В результате воздействия температурной и электродинамической составляющих также ограничивается, что обеспечивает защиту кабелей и коммутационной аппаратуры.

### ■ Защита от перегрузки

#### • Общие положения

Перегрузка является наиболее частой причиной выхода двигателей из строя. Она проявляется в виде повышенного значения тока двигателя и возникающего в результате этого теплового эффекта. Класс изоляции определяет допустимое превышение температуры двигателя при температуре окружающей среды 40°C. Любое превышение пределов рабочей температуры приводит к уменьшению срока службы изоляции.

Однако, следует иметь в виду, что перегрузка, приводящая к превышению температуры сверх нормы, не причиняет немедленного вреда, если это превышение ограничено по времени и случается редко. Поэтому, отключение двигателя при перегрузке не всегда обязательно, хотя очень важно быстрое восстановление нормальных условий работы.

Важность надежной защиты от перегрузки является очевидной, поскольку:

- защита продлевает срок службы двигателя, предохраняя от работы при недопустимо высокой температуре;
- защита обеспечивает непрерывность работы с помощью:
  - исключения преждевременных отключений двигателя;
  - разрешения на перезапуск после отключения в оптимальных условиях безопасности для людей и оборудования.

Реальные рабочие условия (температура окружающей среды, высота над уровнем моря и стандартизованный режим работы) очень важны при определении рабочих характеристик двигателя (мощность, ток) и при выборе эффективной защиты от перегрузки (⇒ Рис. 6). Эти данные должны быть предоставлены производителем двигателя.

Высота, м	Температура окружающей среды						
	30 °C	35 °C	40 °C	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C
1000	1,07	1,04	1,00	0,96	0,92	0,87	0,82
1500	1,04	1,01	0,97	0,93	0,89	0,84	0,79
2000	1,01	0,98	0,94	0,90	0,86	0,82	0,77
2500	0,97	0,95	0,91	0,87	0,84	0,79	0,75
3000	0,93	0,91	0,87	0,84	0,80	0,76	0,71
3500	0,89	0,86	0,83	0,80	0,76	0,72	0,68
4000	0,83	0,81	0,78	0,75	0,72	0,68	0,64

Значения, приведенные в таблице выше, даны для справки. Поскольку коэффициент ухудшения параметров зависит от размеров двигателя и класса изоляции, а также от конструктивной модели (тип вентиляции, степень защиты IP 23, IP 44 и т.д.), он может изменяться в зависимости от фирмы производителя.

Номинальная мощность, указанная на заводской табличке технических данных двигателя, определяется производителем для непрерывного режима работы S1 (устойчивая работа с постоянной нагрузкой и скоростью, достаточно продолжительная для достижения теплового равновесия).

Существуют другие стандартизованные режимы эксплуатации, например, кратковременная работа S2 или режимы повторно-кратковременной работы S3, S4 и S5 для которых производитель в каждом случае определяет значение мощности, отличное от номинала.

↑ Рис. 6 Коэффициент ухудшения параметров двигателя в зависимости от условий работы

В зависимости от требуемой степени безопасности, защита от перегрузки может быть обеспечена с помощью реле следующих типов:

- тепловые реле (с биметаллическими контактами) или электронные реле перегрузки, которые обеспечивают защиту двигателя от:
  - перегрузки с помощью контроля тока по каждой фазе;
  - перекоса или обрыва фаз с помощью контроля остаточного тока устройства;
- реле с термистором ПТК (Положительный температурный коэффициент);
- реле с контролем превышения момента;
- многофункциональные реле.

Эти реле не могут выполнять размыкающую функцию. Они предназначены для управления размыканием отключающего устройства (обычно контактора), которое должно иметь необходимую размыкающую способность для отключения аварийного тока. Поэтому такие реле должны иметь аварийный НЗ контакт, который подключается последовательно с катушкой питания контактора.

### ■ Реле перегрузки (тепловые или электронные)

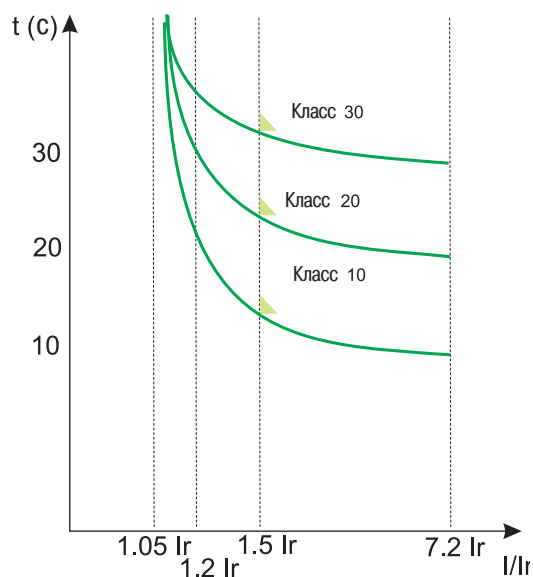
#### • Общие положения

Реле перегрузки защищают двигатель, однако они должны выдерживать большие токи при пуске и отключаться, если пуск затягивается.

В зависимости от специфики применения, время пуска двигателя может изменяться от нескольких секунд (нет нагрузки при пуске, низкий момент сопротивления и т.д.) до нескольких десятков секунд (высокий момент сопротивления, высокая инерция нагрузки и т.д.).

## 5 - Устройства управления электродвигателями

### 5.2 Основные функции устройств управления электродвигателями



↑ Рис. 7 Кривая отключения реле перегрузки

Необходимым условием правильного выбора реле является соответствие характеристики реле и времени включения двигателя. Стандарт МЭК 60947-4-1 определяет количество классов реле перегрузки, каждый из которых характеризуется своим временем отключения (⇒ Рис. 7).

Номинал реле должен быть выбран в соответствии с номинальным током двигателя и расчетным временем пуска. Рабочие пороговые значения приведены в таблице ниже (⇒ Рис. 8) и зависят от времени и настройки тока (кратно  $I_r$ ).

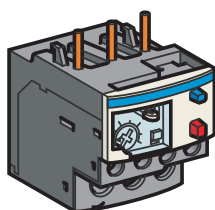
Класс	Время отключения из состояния:				Допуски (группа E)
	Холодное при $1,05 \times I_r$	Горячее при $1,2 \times I_r$	Горячее при $1,5 \times I_r$	Холодное при $7,2 \times I_r$	
10 A	> 2 ч	< 2 ч	< 2 ч	$2 \text{ с} < t_p < 10 \text{ с}$	-
10	> 2 ч	< 2 ч	< 4 ч	$4 \text{ с} < t_p < 10 \text{ с}$	$5 \text{ с} < t_p < 10 \text{ с}$
20	> 2 ч	< 2 ч	< 8 ч	$6 \text{ с} < t_p < 20 \text{ с}$	$10 \text{ с} < t_p < 20 \text{ с}$
30(*)	> 2 ч	< 2 ч	< 12 ч	$9 \text{ с} < t_p < 30 \text{ с}$	$20 \text{ с} < t_p < 30 \text{ с}$

(\*) Класс редко используется в европейских странах, однако часто используется в США  
**Холодное состояние:** начальное состояние без нагрузки  
**Горячее состояние:** состояние теплового равновесия, которое достигается при выбранном и настроенном токе  $I_r$   
 $I_r$  : настраиваемый ток реле перегрузки

↑ Рис. 8 Основные классы отключения для реле перегрузки по стандарту МЭК 60947-4-1

Данные реле имеют тепловую память (кроме некоторых электронных реле перегрузки, как указано их производителем), и они могут быть подключены:

- последовательно с нагрузкой;
- к трансформатору тока, последовательно подключенному к нагрузке, для применений, требующих более высокого уровня мощности.



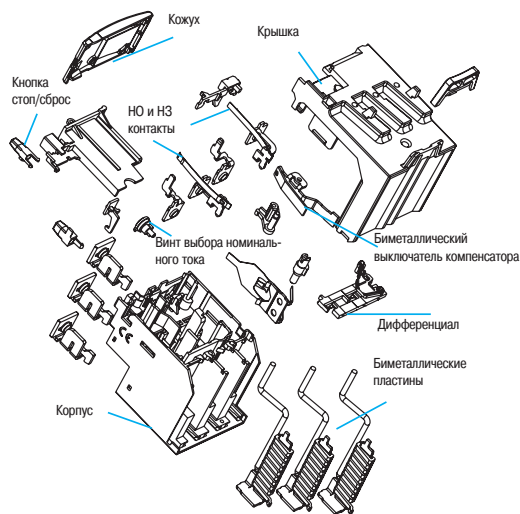
↑ Рис. 9 Тепловое реле с биметаллическим расцепителем LDR (Schneider Electric) и его схема

#### • Тепловые реле перегрузки с биметаллическим расцепителем (⇒ Рис. 9)

После подключения к контактору тепловое реле позволяет защитить линию, двигатель и выключатель от кратковременной или длительной перегрузки. При этом оно позволяет нормально запустить двигатель без отключения. Однако эта цепь должна быть защищена от короткого замыкания при помощи автоматического выключателя или предохранителя (см. раздел «Защита от короткого замыкания»).

## 5 - Устройства управления электродвигателями

### 5.2 Основные функции устройств управления электродвигателями



↑ Рис. 10 Внутренний вид теплового реле перегрузки с биметаллическим расцепителем

Принцип работы теплового реле перегрузки основан на деформации его биметаллических пластин, вызванной их нагреванием при протекании электрического тока (⇒ Рис. 10).

Биметаллические пластины деформируются при протекании тока через них. Когда деформация достигает заданного уставкой значения тока, расцепитель отключает реле.

Сброс возможен только после остывания биметаллических пластин.

Тепловые реле перегрузки могут быть использованы на постоянном и переменном токе. Они обычно имеют:

- три полюса;
- компенсацию, благодаря которой окружающая температура не влияет на пороги отключения (кривая отключения от 0 до 40 в зависимости от размеров и стандарта) (⇒ Рис. 11);
- ручной или автоматический сброс;
- градуировку в амперах: параметр отключения задается в амперах и точно соответствует параметрам двигателя, указанным на его табличке.

Такие реле могут также быть чувствительными к потере фазы: это псевдодифференциальная защита. Это свойство не позволяет применять такие устройства для однофазных двигателей в соответствии со стандартом МЭК 60947-4-1 и 60947-6-2 (⇒ Рис. 12).

Время отключения	Кратность установленному значению тока
> 2 ч	2 полюса : 1,0 I <sub>r</sub> 1 полюс : 0,9 I <sub>r</sub>
> 2 ч	2 полюса : 1,15 I <sub>r</sub> 1 полюс : 0

↑ Рис. 11 Рабочие пороговые значения дифференциального теплового реле перегрузки, чувствительного к обрыву фаз

Такие реле очень часто применяются и являются надежными и дешевыми. Особо рекомендуется их применение, если существует вероятность блокировки ротора. Однако они не отслеживают точное тепловое состояние подключенного двигателя и чувствительны к температуре окружающего воздуха в месте установки (вентиляция шкафа и т.д.).

#### • Электронные реле перегрузки (⇒ Рис. 13)

Достоинством таких реле являются электронные технологии, которые используют более точную тепловую модель двигателя. Основываясь на модели, описанной тепловыми временными константами двигателя, электронная схема постоянно вычисляет температуру двигателя как функцию двух аргументов: протекающего тока и продолжительности работы. В результате такие реле могут более точно определять рабочие условия и, таким образом, избегать ошибочного отключения. Электронные реле перегрузки менее чувствительны к температуре окружающего воздуха в месте установки.

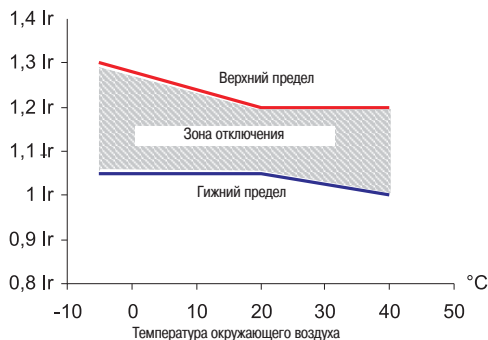
В дополнение к традиционным функциям (защита двигателя от перегрузки, дисбаланса или отсутствия фазы), электронные реле перегрузки могут выполнять такие функции как:

- контроль температуры с помощью термисторов ПТК;
- обнаружение заклинивания ротора или превышения момента двигателя;
- обнаружение переключения фаз;
- обнаружение ухудшения качества изоляции;
- обнаружение работы без нагрузки и т.д.

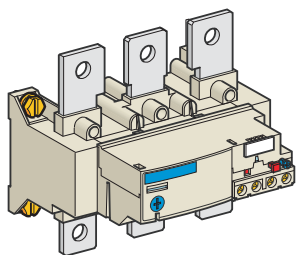
#### □ Реле с термосопротивлением ПТК

Данные реле отслеживают реальную температуру подключенного двигателя. Они имеют высокую точность измерения температуры, поскольку их компактный объем обеспечивает им очень низкую тепловую инерцию и, соответственно, очень короткое время реакции.

Поскольку эти реле контролируют температуру статора, они могут быть использованы для защиты двигателя от перегрузки при повышении температуры окружающей среды, выходе из строя вентиляции, превышении частоты пусков, работе в толковых режимах и т.д.



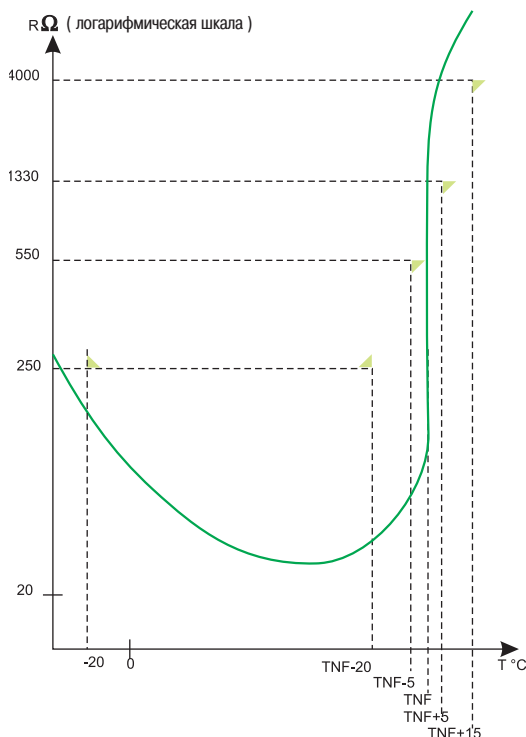
↑ Рис. 12 Зона отключения тепловых реле перегрузки с компенсацией по температуре окружающего воздуха по стандартам МЭК 60947-4-2 и 6-2



↑ Рис. 13 Электронное реле перегрузки LR9F Schneider Electric

## 5 - Устройства управления электродвигателями

### 5.2 Основные функции устройств управления электродвигателями



↑ Рис. 14 Маркер или «рабочая точка» термисторов ПТК

Они включают в себя следующие компоненты:

- один или более термистор ПТК (Положительный температурный коэффициент), который размещается внутри обмотки двигателя или других местах, подверженных нагреву (подшипник скольжения, шариковый подшипник и т.д.). Это статические компоненты, сопротивление которых мгновенно возрастает, как только температура достигает порога, называемого «номинальной рабочей температурой» (НРТ), согласно кривой, приведенной на рисунке 14;
- электронное устройство, питаемое постоянным или переменным током, постоянно измеряет сопротивление датчика, подключенного к нему. При достижении температуры НРТ происходит резкое увеличение сопротивления термистора в цепи порогового элемента и срабатывает выходное реле (⇒ Рис. 15).

В зависимости от выбранного датчика, термистор ПТК используется для:

- предупреждения о высокой температуре без остановки механизма (НРТ меньше, чем максимальная температура);
- управления остановкой (значение НРТ больше или равно предписанной максимальной температуре) (⇒ Рис. 14).

В случае использования этого реле необходимо предусмотреть наличие датчика температуры в обмотке двигателя при его производстве или перемотке.

В процессе выбора датчика температуры необходимо учитывать класс изоляции и конструкцию двигателя. Это обычно выполняется производителем двигателя или тем, кто его перематывает, поскольку они располагают всей необходимой информацией.

Эти два ограничения объясняют то, что датчики температуры ПТК обычно используются в оборудовании старших типоразмеров, с дорогими двигателями.

#### • Реле превышения момента (⇒ Рис. 16)

Данные реле помогают защитить силовые цепи в случае потери скорости, заклинивания двигателя или механических рывков.

В отличие от большинства реле перегрузки, данные реле не имеют тепловой памяти, однако имеют регулируемые временные характеристики работы (настраиваемое время задержки и порог тока).

Реле превышения момента могут использоваться для защиты двигателей от длительных или слишком частых пусков (например, подъемный механизм), а также от тепловых перегрузок.

#### • Многофункциональные реле

##### • Электронные или электромагнитные тепловые реле

Принцип работы данных реле основан на измерении тока двигателя, и их применение является достаточным для большинства приложений. Однако они имеют ограничения по применению, когда существуют риски, связанные с напряжением или для специализированных применений. Более того, в процессе обслуживания и управления производством часто возникают новые потребности, которые приводят к тому, что производители электронного оборудования вынуждены разрабатывать новые продукты, которые не только адаптируются к приложению, но и обеспечивают полное управление двигателем и его нагрузкой.

##### • Структура

Развитие данных реле заключается в объединении следующих технологий:

- датчики тока и напряжения. Такие датчики, не содержащие магнитные элементы (торы Роговского), характеризуются высоким быстродействием и отличной линейной характеристикой;
- гибридная аналоговая и цифровая технология, характеризующаяся мощной обработкой и объемами памяти;
- применение коммуникационных шин для обменов данными и сбора информации;
- высокоэффективные алгоритмы моделирования двигателя;
- интегрируемые конфигурируемые прикладные программы.



↑ Рис. 15 Электронное устройство LT3 Schneider Electric, к которому могут быть подключены три термистора, предназначенное для управления остановкой двигателя при перегреве

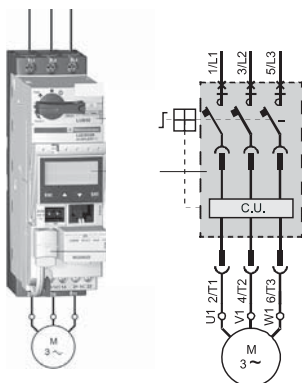


↑ Рис. 16 Реле превышения момента Schneider Electric

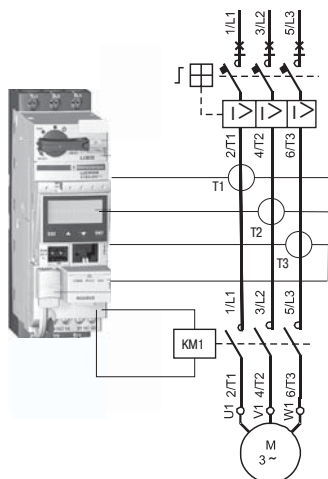


# 5 - Устройства управления электродвигателями

## 5.2 Основные функции устройств управления электродвигателями



↑ Рис. 17 Многофункциональное реле, встроенное в пускатель



↑ Рис. 18 Многофункциональное реле, отделенное от силовых цепей



↑ Рис. 19 Независимое многофункциональное реле

Это новое поколение продуктов было разработано для снижения затрат путем упрощения эксплуатации ПЛК на стадии программирования, а также уменьшения времени технического обслуживания и простоя.

Далее приведено краткое описание возможных решений и упрощенное руководство по выбору решения. Рекомендуется также обязательно изучить техническую документацию Schneider Electric на каждое семейство продуктов.

### • Три семейства продукции

Все многофункциональные реле можно разделить на три семейства продуктов.

**Решение 1:** многофункциональные реле, встраиваемые в устройство пуска двигателя (⇒ Рис. 17). Такое решение имеет преимущество: оно весьма компактно и для него необходим минимальный монтаж. Однако его применение ограничено токами ниже 32А. Подробная информация приведена в разделе «Интеллектуальные пускатели».

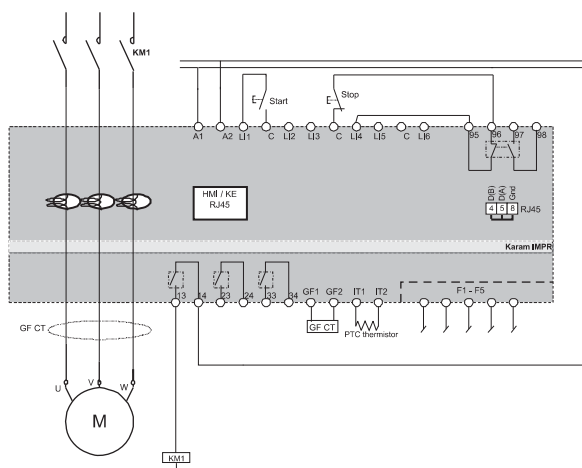
**Решение 2:** многофункциональное реле, отделенное от силовых цепей. Используется тот же блок, что и в решении 1. Может применяться при любых токах (⇒ Рис. 18).

**Решение 3:** многофункциональное реле, отделенное от силовых цепей и имеющее несколько встроенных входов/выходов (⇒ Рис. 19).

Такое решение обладает наибольшей функциональностью.

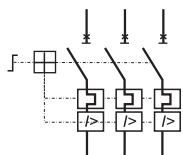
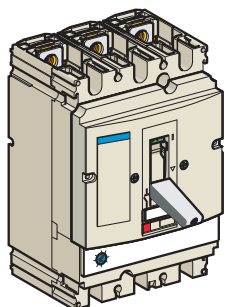
### • Таблица выбора защитных реле

Сравнение основных функций защиты двигателя произведено в таблице, приведенной в конце данного раздела.

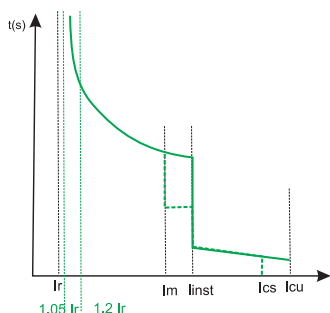


## 5 - Устройства управления электродвигателями

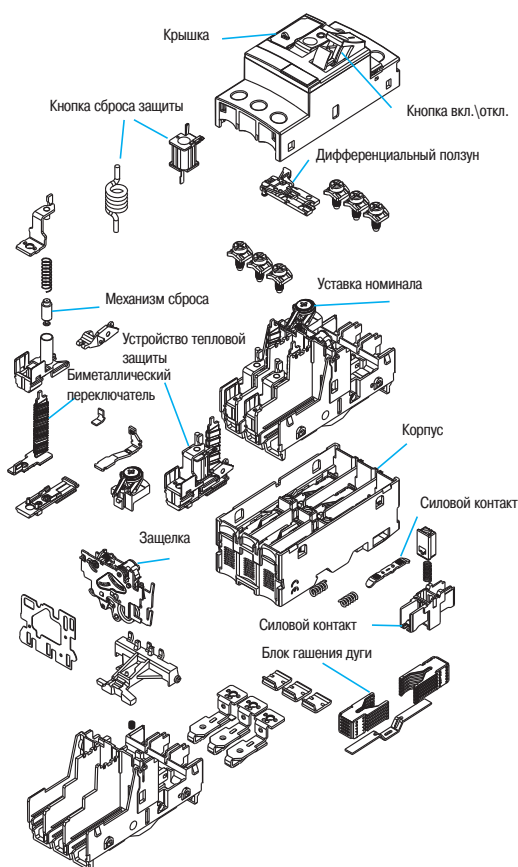
### 5.2 Основные функции устройств управления электродвигателями



↑ Рис. 20 Автоматический выключатель двигателя GV7 Schneider Electric и его схема



↑ Рис. 21 Рабочие зоны магнитного теплового выключателя



↑ Рис. 22 Магнитный тепловой выключатель в разобранном виде

#### □ Автоматические выключатели двигателя (магнитные тепловые выключатели)

##### • Общие положения

Автоматические выключатели двигателя являются магнитными тепловыми выключателями, которые обеспечивают защиту от короткого замыкания и перегрузки с помощью быстрого размыкания цепи. Они представляют собой комбинацию из магнитного выключателя и реле перегрузки и соответствуют стандартам МЭК 60947-2 и 60947-4-1 (⇒ Рис. 20). Их компоненты представлены ниже (⇒ Рис. 22).

В таких выключателях магнитные устройства (защита от короткого замыкания) имеют уже заданный порог отключения, который невозможно настроить на другое значение, обычно в 10 раз превышающий максимальный установленный ток теплового размыкания.

Их тепловые компоненты (защита от перегрузки) имеют компенсацию колебаний температуры окружающей среды. Пороговое значение тепловой защиты может быть настроено с лицевой стороны выключателя. Настраиваемое значение должно соответствовать номинальному значению тока подключенного двигателя.

Все автоматические выключатели имеют координацию типа II между тепловыми компонентами и компонентами защиты от короткого замыкания.

Кроме того, в разомкнутом состоянии большинство этих устройств имеют промежуток между контактами, достаточный для выполнения функции изолирования. В их состав входит запирающее устройство для установки замка.

##### • Кривые отключения

Автоматические выключатели двигателя характеризуются кривыми отключения, на которых представлена зависимость времени отключения от тока (кратно  $I_r$ ).

Кривая отключения имеет четыре зоны (⇒ Рис. 21):

- зона нормальной работы: до тех пор, пока текущий ток  $I < I_r$ , отключение не происходит;
- зона тепловой перегрузки: отключение из-за тепловой перегрузки – чем больше перегрузка, тем меньше время отключения. По стандарту такой режим отключения характеризуется обратной пропорциональной зависимостью времени отключения;
- зона сверхвысокого тока или тока короткого замыкания, контролируемая быстродействующим магнитным расцепителем, характеризующимся временем срабатывания менее 5 мс;
- для некоторых автоматических выключателей (электронных автоматических выключателей) существует промежуточная зона, контролируемая магнитным расцепителем с настраиваемой задержкой (от 0 до 300 мс). По стандарту такой режим отключения характеризуется независимой задержкой. Он предупреждает случайное отключение при протекании пиковых токов намагничивания двигателя.

Пороговые значения:

$I_r$ : настраиваемое значение тока для защиты от перегрузки. Оно должно соответствовать значению номинального тока ( $I_n$ ) двигателя;

$I_m$ : значение тока отключения для магнитной защиты с задержкой отключения;

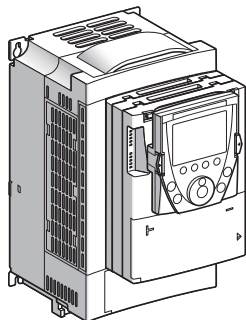
$I_{inst}$ : значение тока отключения для немедленной магнитной защиты. Оно может превышать ток  $I_r$  в 3 - 17 раз, но обычно оно соответствует  $10 I_r$ ;

$I_{cs}$ : значение тока короткого замыкания, соответствующее размыкающей способности;

$I_{cu}$ : предельный ток короткого замыкания при заданной размыкающей способности.

## 5 - Устройства управления электродвигателями

### 5.2 Основные функции устройств управления электродвигателями



↑ Рис. 23 Преобразователь частоты ATV71 Schneider Electric

#### □ Защитные устройства, встроенные в преобразователи частоты и устройства плавного пуска двигателей

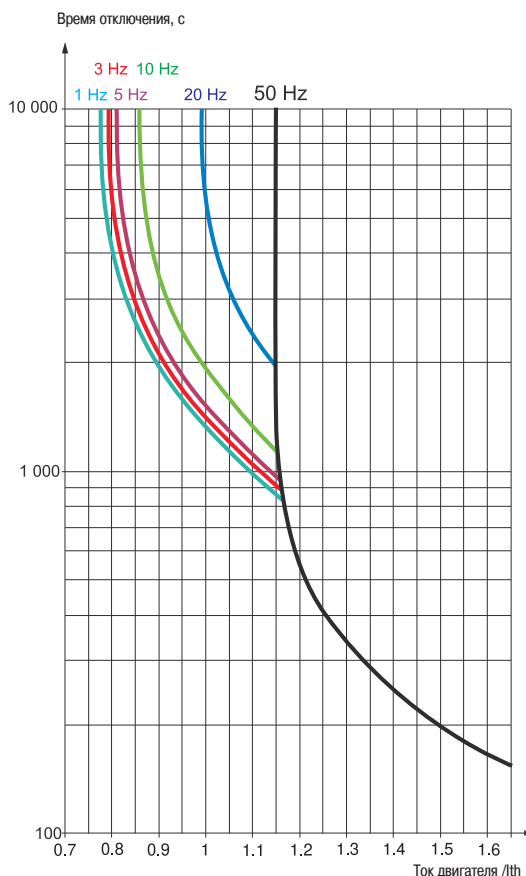
Прямой пуск асинхронных двигателей от распределительной сети является часто используемым и экономичным решением и подходит для большинства применений и большого разнообразия механизмов. Однако весьма часто конкретные применения имеют свои ограничения, и такое решение оказывается не совместимым с необходимым режимом работы механизма (бросок тока при пуске, толчкообразная работа при пуске, невозможность управления ускорением и замедлением, невозможность регулирования скорости и т.д.).

Электронные преобразователи частоты и устройства плавного пуска (⇒ Рис. 23) удовлетворяют данным требованиям. Однако, описанные выше традиционные защитные устройства невозможно использовать вместе с данными устройствами, поскольку они модулируют электрическую энергию, питающую двигатель.

Поэтому электронные пускатели и преобразователи оснащены встроенными защитными функциями (⇒ Рис. 24). Современные преобразователи частоты обычно защищают и себя, и двигатель от тепловых перегрузок. Основываясь на постоянном измерении тока и информации о скорости вращения, микропроцессор вычисляет температуру двигателя, таким образом, обнаруживая превышение температуры, и выдает предупреждающий сигнал в случае чрезмерного перегрева.

Кроме того, информация, собранная преобразователем частоты, может быть передана в ПЛК или на управляющий сервер через коммуникационную шину, которой оснащаются современные устройства пуска и преобразователи частоты.

Управление скоростью вращения рассматривается в разделе 5.7 данной главы.



↑ Рис. 24 Кривая отключения как функция скорости (ATV71 - Schneider Electric)

### ■ Коммутация или управление

#### □ Функция управления

Термин “управление” означает замыкание и размыкание электрической цепи под нагрузкой. Функция управления может быть реализована либо с помощью размыкающего переключателя нагрузки, либо с помощью пускателя двигателя, устройства плавного пуска или преобразователя частоты. Но обычно для выполнения данной функции используется контактор, поскольку он позволяет реализовать дистанционное управление. Такое устройство управления двигателем должно быть рассчитано на большое количество включений/отключений (коммутационная долговечность) и должно соответствовать стандарту МЭК 60947-4-1. В данном стандарте производителю предписано обязательно указывать следующую информацию:

- Цепи управления:
  - тип управляющего тока и частота, в случае переменного тока;
  - номинальное напряжение управления (Uc) или напряжение питания управления (Us).
- Силовые цепи:
  - номинальное рабочее напряжение (Ue): обычно соответствует напряжению между фазами. Эта характеристика совместно с другими характеристиками (замыкающая и размыкающая способность, режим эксплуатации, характеристики пуска) определяют использование цепей.
  - номинальный рабочий ток (Ie) или номинальная рабочая мощность: данная характеристика определяется производителем на основании номинальных условий работы, главным образом, номинального рабочего напряжения и обычного по тепловой нагрузке тока. В случае оборудования, предназначенного для прямого управления двигателем, указание номинального напряжения может быть замещено или дополнено указанием максимальной мощности.

В некоторых случаях, данная информация может быть дополнена:

- рекомендуемыми режимами работы с указанием класса повторно-кратковременного режима, если такой имеется. Классы определяют различные рабочие циклы;
- максимальными значениями тока, установленными производителем, которые устройство в определенных условиях может гарантированно коммутировать. Указание токов назначенных мощностей замыкания и размыкания не является обязательным для производителя, однако стандарт требует указания минимальных значений для каждой категории применения.

#### □ Категории устройств управления

Стандарты серии МЭК 60947 определяют категории применения в соответствии с назначением механизма управления (⇒ Рис. 25).

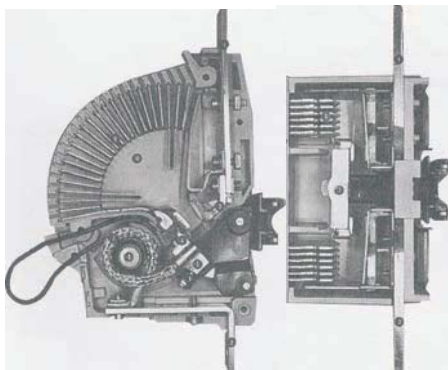
Каждая категория характеризуется одним или более условиями работы, такими как:

- ток;
- напряжение;
- коэффициент мощности или постоянная времени;
- или, если необходимо, другие условия работы.

Тип тока	Рабочие категории	Типовые применения
Переменный ток	<b>AC-1</b>	Неиндуктивная или небольшая индуктивная нагрузка, резистивные плавильные печи Распределение электроэнергии (освещение, генераторы и т.д.)
	<b>AC-2</b>	Коллекторные двигатели: пуск, торможение. Оборудование для работы в тяжелом режиме (механизмы подъема, дробилки, прокатные станы и т.д.)
	<b>AC-3</b>	Двигатели с короткозамкнутыми обмотками: пуск, торможение Управление двигателем (насосы, компрессоры, вентиляторы, конвейеры, прессы и т.д.)
	<b>AC-4</b>	Двигатели с короткозамкнутыми обмотками: пуск, подключение, толчковый режим. Оборудование для работы в тяжелом режиме (механизмы подъема, дробилки, прокатные станы и т.д.)
Постоянный ток	<b>DC-1</b>	Неиндуктивная или небольшая индуктивная нагрузка, резистивные плавильные печи
	<b>DC-3</b>	Двигатель с независимым возбуждением: пуск, реверсирование, толчковый режим. Динамическое торможение двигателя постоянного тока
	<b>DC-5</b>	Двигатель с последовательным возбуждением: пуск, реверсирование, толчковый режим. Динамическое торможение двигателя постоянного тока
* Категория AC-3 может использоваться для толковых режимов работы электродвигателя, реверсирования, торможения противовключением или для операций ограниченного отрезка времени, таких как в сборочной машине. Число операций за ограниченный отрезок времени обычно не превышает пять в минуту и десять в 10 минут.		

↑ Рис. 25 Категории применения контакторов в зависимости от их назначения и в соответствии с МЭК 60947-1

#### 5.3 Конструкция и принцип работы контактора



↑ Рис. 26 Вид изнутри для одинарного и сдвоенного контактора

Контактор состоит из трех основных элементов:

- полюсы;
- катушка;
- дополнительные контакты.

#### ■ Полюсы

Полюсы используются для замыкания и размыкания тока в силовой цепи. Их размер зависит от номинального тока контактора и позволяет обеспечить непрерывную работу без критического роста температуры. Они содержат подвижные и фиксированные части. Подвижная часть оборудована пружиной, обеспечивающей необходимое давление на контакты при замыкании. Контакты имеют напыление из серебра и изготавливаются с применением специальной обработки на основе ноу-хау каждого производителя, улучшающей механические характеристики и срок службы.

Контакторы бывают одинарные либо сдвоенные (⇒ Рис. 26). Сдвоенные контакторы подходят для всех приложений переменного тока (тяжелых условий применения, АС-3, АС-4 и т.д.) и позволяют сделать компактный продукт.

Одинарный контактор обычно содержит электромагнитное устройство эффективного гашения дуги. Применение этих устройств рекомендуется для цепей постоянного тока и тяжелых условий эксплуатации. Отключение контактора приводит к прерыванию электрического тока, который протекал в цепи (двигатель и т.д.). Нагрузка в цепи обычно индуктивная, но иногда имеются исключения (отключение в точный момент времени при прохождении через ноль при переменном токе), когда прерываемый ток минимален.

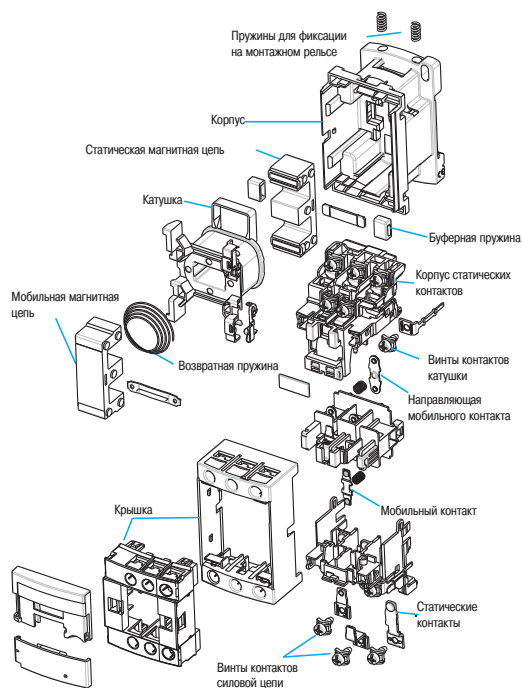
Между контактами при их размыкании образуется электрическая дуга.

Дуга образуется в электрическом поле во время разъединения контактов в вакууме или в газе. Это плазма, образованная из свободных электронов и ионов, оторванных от электродов тепловым эффектом и распространяющихся в газообразной среде под действием электрического поля, возникающего между контактами. Это также можно отнести к подвижному проводнику переменной формы, которым производится управление. Дуга может возникнуть вдоль его магнитного поля или вблизи его ферромагнитных частей.

В центральной части дуги температура максимальна и часто превышает несколько тысяч и даже десятков тысяч градусов. Она намного выше, чем температура, которую могут выдерживать металлы и даже выше той, которую могут выдерживать изоляторы, используемые в конструкции скатов дуги и контактов.

Поэтому длительность горения дуги должна быть как можно короче, чтобы предотвратить разрушение материалов, из которых сделан контактор, но не слишком короткой, чтобы не допустить перенапряжения, вызванного стремительным уменьшением тока в цепи нагрузки. Сопротивление дуги зависит от количества свободных электронов, которые присутствуют в плазме. Оно минимально, когда их количество высоко, то есть когда ионизация является максимальной или, другими словами, когда температура дуги высока. Восстановление диэлектрических свойств или деионизация, таким образом, требует значительных затрат энергии для охлаждения перегретых газов. Напряжение дуги является произведением значения сопротивления дуги и величины протекающего тока на данный момент времени.

На переменном токе высокое напряжение дуги не достигается, так как переменный ток периодически снижается. Низкое напряжение дуги предпочтительно для уменьшения ее энергии. Ферромагнитные элементы, помещенные в область дуги, должны развернуть ее в правильное направление (магнитное взрывание) и быстро охладить среду после гашения дуги.



↑ Рис. 27 Состав контактора D12

### ■ Катушка

Назначением катушки (⇒ Рис. 27) является создание электромагнитного поля, которое перемещает подвижную часть контактора, замыкая магнитную цепь. Подвижная часть контактора соединена с полюсами, которые замыкают электрическую цепь.

Катушка может питаться постоянным или переменным током.

При питании переменным током значение тока в катушке определяется её полным сопротивлением. При включении катушки из-за большого магнитного зазора в разомкнутой магнитной цепи контактора магнитное сопротивление велико, индуктивность катушки мала и, соответственно, полное сопротивление минимально. Поэтому ток через катушку максимален и ограничен только её сопротивлением. Большой ток определяет достаточное для включения контактора тяговое усилие.

При замыкании магнитной цепи её магнитное сопротивление падает, полное сопротивление возрастает и ток через катушку снижается в 6-10 раз.

Ток в катушке понижается с увеличением полного сопротивления, вызванного уменьшением магнитного зазора в контакторе, однако, его достаточно для удержания электромагнитной катушки в закрытом состоянии.

При питании катушки постоянным током необходимо использовать добавочное сопротивление (обычно резистор).

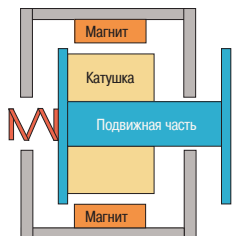
Для применения в системах автоматизации на базе ПЛК производители разработали контакторы с электромагнитами, обладающими низким потреблением, допускающие прямое подключение. Управление контакторами с низким потреблением может производиться от дискретного выхода ПЛК напрямую. Для этого контактор оснащен специально разработанным электромагнитом, позволяющим подключение к ПЛК (обычно постоянный ток 24 В/100 мА) (⇒ Рис. 28).

### ■ Дополнительные контакты

Дополнительные контакты обеспечивают самоблокировку, взаимную блокировку и блокировку контактов. Кроме того, они обеспечивают индикацию состояния. Имеются три основные модификации:

- НО (NO) - нормально открытые контакты: открытое состояние имеет место, когда контактор разомкнут, закрытое состояние, когда на электромагнит подано питание;
- НЗ (NC) - нормально закрытые контакты: закрытое состояние имеет место, когда контактор разомкнут, открытое состояние, когда на электромагнит подано питание;
- перекидные контакты НО/НЗ. Если на контактор не подано питание, его контакты находятся в состоянии НО и НЗ соответственно. После подачи питания состояние контактов меняется на противоположное. Два контакта имеют общую точку.

Контакты типа НО и НЗ могут быть дооборудованы выдержкой времени, которую можно использовать после открытия или закрытия контактора. Это время можно регулировать.



↑ Рис. 28 Схема электромагнита с низким потреблением

#### 5.4 Выбор контактора

Категории использования, определенные в стандарте, позволяют сделать начальный выбор устройства, способного удовлетворить требованиям приложения, для которого предназначен двигатель.

При этом учитывается следующее:

- рабочие токи и режимы отключения;
- тип нагрузки (электродвигатель с беличьей клеткой, электродвигатель с контактными кольцами, сопротивление);
- условия, при которых открываются или замыкаются контакты (электродвигатель запущен, электродвигатель остановлен, пуск электродвигателя, торможение противоключением и т.д.).

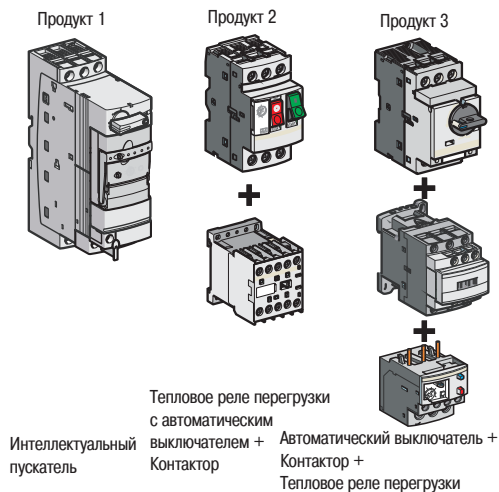
Однако при выборе контактора должны быть приняты во внимание и другие ограничения, особенно те, которые не могут быть описаны стандартом. Это в основном относится к факторам эксплуатации механизма: климатические условия (температура, влажность), географическое расположение (высота, близость к морю и т.д.).

В некоторых ситуациях надежность оборудования может быть критическим фактором, особенно в местах, где трудно осуществить обслуживание.

В этом случае электрическая надежность или долговечность контактов контактора становится важной характеристикой.

Таким образом, необходимо обладать полными и детализированными каталогами, чтобы гарантировать, что выбранное оборудование удовлетворяет всем требованиям.

### 5.5 Устройства управления электродвигателями и координация



↑ Рис. 29

Три возможные комбинации устройств, для построения устройства пуска двигателя

#### ■ Решения по пуску электродвигателя

Как сказано в начале этой главы, основные функции по запуску электродвигателя (изоляция, управление и контроль перегрузки и короткого замыкания) могут быть выполнены многими устройствами.

Для выполнения всех требований по пуску электродвигателя можно предложить три варианта решения (⇒ Рис. 29).

##### • Решение «Все в одном»

Одно устройство, выполняющее три функции. Это наиболее простой способ решения задачи по пуску электродвигателя, как для проектировщиков, так и для монтажников и обслуживающего персонала (простой монтаж и минимум компонентов).

##### • Решение «Два устройства»

Тепловой магнитный автоматический выключатель + контактор.

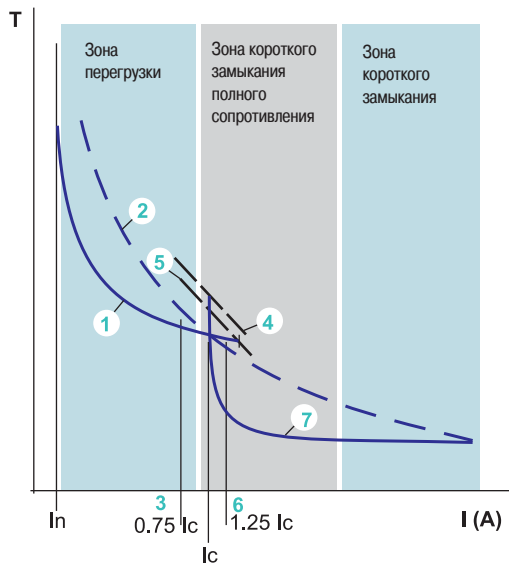
Перед применением пользователю необходимо тщательно проверить совместимость характеристик обоих устройств.

##### • Решение «Три устройства»

Тепловой магнитный автоматический выключатель + контактор + реле перегрузки.

Такое решение можно использовать для широкого диапазона мощностей. При подборе устройств необходимо тщательно изучить их совместимость, а также правила их монтажа в зависимости от того, монтируются ли они на монтажную панель или внутри шкафа.

Эти решения (выбор устройств, совместимость и монтаж) не всегда могут быть полностью прозрачными и понятными для пользователей, так как пользователь может не знать, как эти устройства будут работать совместно. Поэтому производители устройств изучают совместную работу разных компонентов и дают рекомендации по их применению в своих каталогах. Кроме того, производители выявляют наиболее эффективные комбинации функций и рекомендуют их к применению. В этом заключается понятие координации.



- 1 Кривая отключения по перегрузке
- 2 Предохранитель
- 3 Отключение только по перегрузке
- 4 Тепловой предел расцепителя
- 5 Реле предела перегрузки
- 6 Ток отключения (1)
- 7 Отключение по короткому замыканию

↑ Рис. 30

Основные координации

#### ■ Координация между защитами и управлением

Это комбинация самых эффективных функций защит (от коротких замыканий и перегрузок) и управляющего элемента (контактор), которая представляет собой устройство управления электродвигателем.

Предназначенное для определенной мощности устройство пуска стремится оптимизировать пуск электродвигателя с учетом особенностей подключенного оборудования (⇒ Рис. 30).

#### □ Основные принципы координации

Для корректной работы устройства управления электродвигателем требуется согласованная работа всех его компонентов:

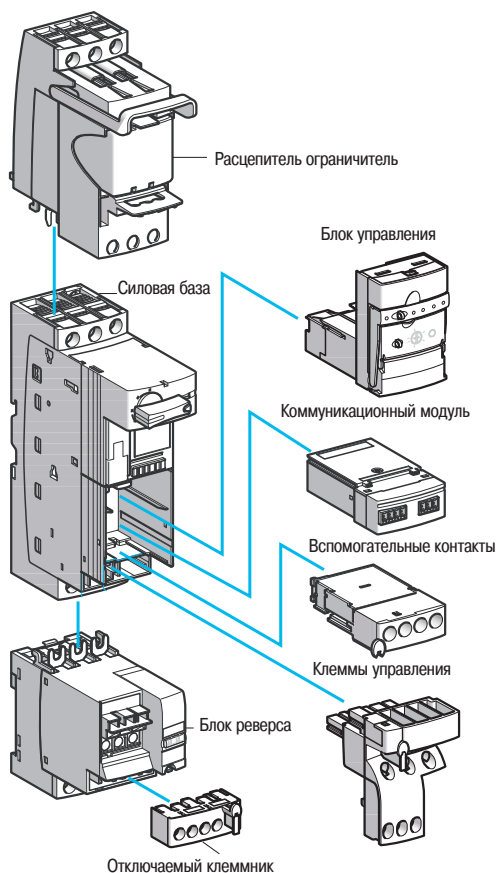
- реле контроля перегрузки должно защитить устройство управления от перегрузки: кривая «1» работы реле перегрузки, обозначенная на рисунке «1»; она должна быть ниже кривой теплового сопротивления;
- с другой стороны, для того чтобы защитить тепловое реле от короткого замыкания, кривая короткого замыкания должна обрываться до кривой теплового сопротивления;
- и последнее: для того, чтобы быть уверенным, что контактор защищен, его кривая теплового сопротивления должна быть выше двух кривых: тепловой «1» и магнитной «3» (или предохранителя «2»).

Заметьте, что по стандарту существуют два порога для кривой тока:

- до 0.75  $I_c$  должна срабатывать только тепловая защита;
- от 1.25  $I_c$  должна срабатывать только защита от короткого замыкания.

Координация дает дополнительные преимущества в виде сокращения количества оборудования и затрат на его обслуживание, поскольку различные защиты дополняют друг друга, без перекрытия диапазона функциональных возможностей.





↑ Рис. 31

Пример модульной системы управления и защиты на базе пускателя Tesys U компании Schneider Electric

### □ Типы координации

В соответствии с МЭК 60947-4-1 существуют два типа координации (тип 1 и тип 2).

- **Координация типа 1:** представляет собой общий случай стандартного решения. В соответствии с ним, в случае короткого замыкания, контактор или пускатель должен предотвратить поражение людей или повреждение установки. При этом подразумевается необходимость проведения ремонтных работ перед повторным запуском системы.

- **Координация типа 2:** решение повышенной работоспособности. В случае короткого замыкания контактор или пускатель должен предотвратить поражение людей или повреждение установки, но система должна продолжать работать. В этом случае возможен риск приваривания. Пользователь оборудования должен сам предусмотреть меры по сервисному обслуживанию оборудования.

- Предложение некоторых производителей: решение наивысшей работоспособности, которое можно назвать **«Полная координация»**. Этот тип координации подразумевает, что в случае короткого замыкания контактор или пускатель должен предотвратить поражение людей или повреждение установки, система может продолжать работу, исключается риск приваривания контактов и электродвигатель может быть запущен немедленно.

### □ Интеллектуальные системы управления и защиты (ИСЗ)

ИСЗ или «пускатель - контроллер» разработан для решения всех задач, связанных с пуском электродвигателя одновременно с защитой от перегрузки и короткого замыкания. Кроме того, они позволяют решать задачи управления системой в целом в случае короткого замыкания.

Они также могут быть доукомплектованы дополнительными функциями, такими как разъединитель, таким образом полностью выполняя функцию «устройство пуска двигателя». Они соответствуют стандарту МЭК 60947-6-2, который определяет категории применения для ИСЗ в соответствии со стандартом МЭК 60947-1 и 60947-4-1.

Функции, выполняемые ИСЗ, объединены и согласованы таким образом, чтобы позволить работу оборудования в диапазоне токов до величины тока короткого замыкания  $I_{cs}$ . ИСЗ может состоять из одного или нескольких устройств, но его характеристики таковы, что он рассматривается как единое устройство. Кроме того, гарантия «полной» координации всех функций обеспечивает пользователю простоту выбора решения с оптимальной защитой и простой реализацией.

Несмотря на то, что ИСЗ представлено как единое устройство, его можно также рассматривать как модульное решение, предлагающее модульность такую же, как в решении «три отдельных продукта», предназначенном для пуска электродвигателя, или даже большую. Примером этого может служить пускатель «Tesys U», производимый компанией Schneider Electric (⇒ Рис. 31). Этот «пускатель - контроллер» при необходимости может быть легко адаптирован к токам от 0.15 до 32 А путем замены блока управления и защиты на силовом модуле типоразмера 32 А.

Дополнительно могут быть реализованы следующие функциональные возможности:

- **регулятор мощности, блок реверса, ограничитель;**
  - **управление**
    - свободное управление, допускающее установку дополнительных функций, таких как индикатор событий и дифференцирование;
    - или многофункциональное управление, допускающее применение наиболее востребованных режимов управления и защиты.
- Блоки управления могут быть заменены без отключения подводных кабелей и не требуют для этого специальных инструментов.
- Они позволяют осуществлять выбор уставок в широком диапазоне и уменьшить потери тепла.

#### □ Выбор типа координации

Выбор типа координации зависит от параметров работы системы.

Выбор должен достигаться путем баланса между требованиями пользователя и стоимостью оборудования.

- Тип 1: наиболее часто используемое решение

Уменьшение стоимости коммутационной аппаратуры.

- Не требуется непрерывная подача питания.
- Возможность ремонта пускателя перед повторным пуском.

Результат:

- значительное время в неработоспособном состоянии;
- требуется квалифицированный обслуживающий персонал для ремонта, проверки и подачи питания.

Пример: системы кондиционирования воздуха в сфере услуг.

- Тип 2: решения для непрерывного питания

Результат:

- незначительное время в неработоспособном состоянии;
- небольшое время обслуживания после короткого замыкания.

Пример: эскалаторы.

- «Полная координация»: это решение для систем, которые не могут быть остановлены для обслуживания даже на короткое время

Результат:

- немедленное восстановление рабочего состояния;
- не требуются специальные меры предосторожности.

Пример: системы удаления дыма, пожарные помпы.

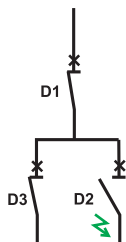
#### ■ Селективность

В электрической схеме потребители подключены к основному питанию через несколько устройств отключения, защиты и управления, включенных последовательно.

Отсутствие правильно спроектированных по селективности устройств защиты приводит к тому, что при возникновении неисправности возможно срабатывание нескольких устройств защиты. Поэтому даже один неисправный потребитель может вызвать отключение питания большого количества потребителей, в том числе, ответственных потребителей.

Чтобы предотвратить такого рода проблемы в распределительных сетях (⇒ Рис. 32) необходимо обеспечить селективность устройств защиты таким образом, чтобы отключался только автоматический выключатель на фидере, где обнаружена проблема, сохраняя питание нормально работающих потребителей. Селективность при этом увеличивает безопасность и время безотказной работы системы, а также упрощает поиск неисправности.

Чтобы гарантировать максимальное время работы, необходимо использовать устройства защиты, которые могут самостоятельно координироваться. Для этого используются различные методы, которые обеспечивают полную селективность, гарантирующую правильную последовательность отключений для всех значений максимальных токов, доступных в установке, или, по меньшей мере, применяется частичная селективность.



↑ Рис. 32

Селективность между двумя выключателями D1 и D2, подключенными последовательно, гарантирует, что только выключатель D2, расположенный ниже, чем D1 по пути следования тока в цепи, отключится

#### □ Принципы селективности

Существуют несколько видов селективности:

- **Токовая** подразумевает использование разных порогов срабатывания автоматических выключателей, включенных последовательно.
- **Временная** подразумевает выдержку времени от нескольких десятков до сотен миллисекунд перед срабатыванием каждого из автоматических выключателей, расположенных последовательно по направлению от потребителя к источнику питания. Обеспечивается за счет смещения по времени времятоковых характеристик последовательно расположенных автоматических выключателей. Селективность может быть организована путем применения разных номиналов реле перегрузки в цепи. В этом случае селективность может быть описана формулой:  $I_{r1} > 1,6 \cdot I_{r2}$  (где  $r1$  расположен ближе к источнику питания, чем  $r2$ ).
- **«Sellim» или «энергетическая»** подразумевает, что в схеме распределения электроэнергии при возникновении короткого замыкания вышестоящий ограничивающий автоматический выключатель притокрывает свои контакты на время, необходимое для срабатывания нижестоящего автоматического выключателя. При этом энергия дуги нижестоящего аппарата достаточна для его срабатывания, а энергия дуги вышестоящего аппарата недостаточна для его срабатывания, поэтому он снова возвращается в исходное состояние, обеспечивая нормальную работу остальных потребителей схемы.
- **Логическая** подразумевает передачу от расположенного ближе к источнику питания реле перегрузки к следующему в цепи информации о достигнутом в настоящий момент пороге срабатывания. В этом случае вышестоящий аппарат будет работать с заданной на расцепителе выдержкой времени, что позволяет нижестоящему реле перегрузки отключиться при достижении заданного порога.

Для получения более подробной информации о селективности рекомендуется ознакомиться с технической тетрадь №167 из технической коллекции Schneider Electric.

#### □ Селективность процессов

В системах управления технологическими процессами (производственная линия, химическое производство и т.д.) в устройствах управления электродвигателями наиболее часто применяется токовая или временная селективность. Обычно селективность достигается ограничителями тока или универсальными ограничителями пускателей двигателей.

Для удовлетворения растущих потребностей пользователей в последние годы устройства управления электродвигателями изменились. Среди изменений можно отметить:

- уменьшение размеров устройств, облегчает интеграцию и размеры оборудования;
- простота решения проблем координации;
- сокращение количества наименований в каталогах;
- простота и быстрота монтажа кабелей, уменьшающие производственные затраты;
- привлекательная стоимость применения автоматизации;
- встроенные коммуникационные возможности и возможности подключения к полевым шинам.

Используя инновационный подход, Schneider Electric предлагает к применению Tesys U. Этот продукт отвечает всем современным требованиям к подобному оборудованию, обеспечивает полную координацию и, более того, позволяет осуществлять перезапуск реле перегрузки после срабатывания защиты.

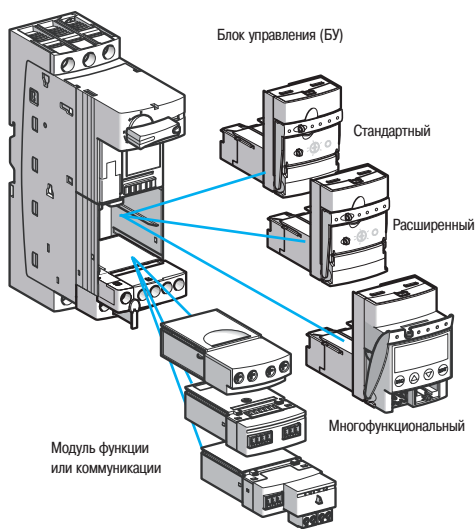
По сравнению с традиционными решениями, количество компонентов, из которых строится система, уменьшается в 10 раз, экономия монтажного кабеля составляет 60%, занимаемое место уменьшается более чем на 40%. Рис. 33 показывает Tesys U с некоторыми из его возможных дополнений.

Стандартный блок управления LUC-A представляет собой новое поколение традиционных тепловых реле защиты с преимуществами электронной технологии.

Многофункциональные блоки управления LUC-M представляют собой продукцию, которая отвечает самым высоким требованиям.

Tesys U обеспечивает основные функции устройств управления электродвигателями. Дополнительные устройства позволяют обеспечить настройку более сложных функций управления пуском электродвигателя. Более того, Tesys U предоставляет пользователю возможность запрограммировать оригинальную логику работы.

Tesys U включает в себя «силовой модуль», содержащий разъединитель и выполняющий все функции защиты. Этот основной компонент пускателя выполняет описанные ниже функции.

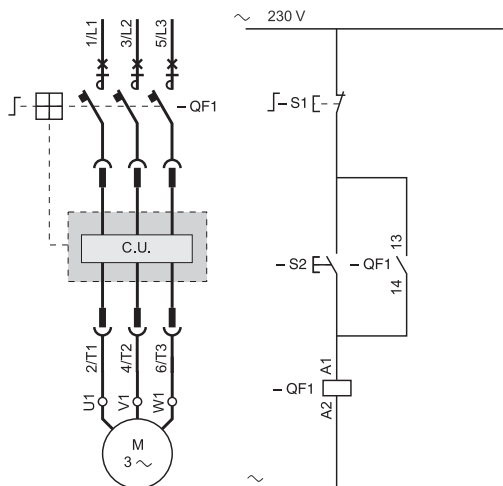


↑ Рис. 33

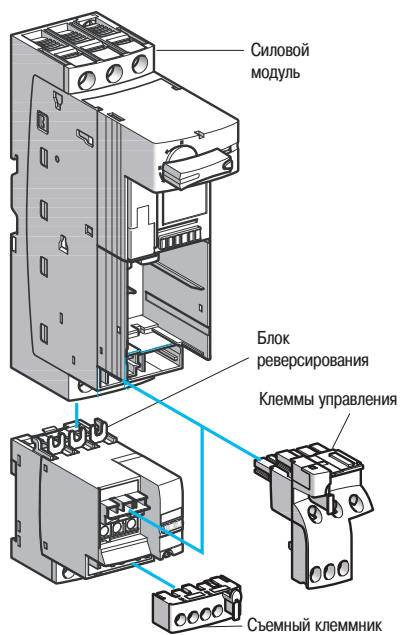
Tesys U и дополнительные устройства

# 5 - Устройства управления электродвигателями

## 5.5 Устройства управления электродвигателями и координация



↑ **Рис. 34** Схема пуска электродвигателя с вращением в одну сторону на основе Tesys U



↑ **Рис. 35** Tesys U с блоком реверса

### ■ Пуск электродвигателя с вращением в одну сторону

Состав пускателя и схема пуска представлены на **Рис. 34**. Силовой модуль содержит все необходимые компоненты для выполнения следующих функций:

- 3-проводное управление = управление импульсом и с самоблокировкой;
- 2-проводное управление = управление двухпозиционным переключателем. Включение силового питания, защита от короткого замыкания и перегрузки.

Этот силовой модуль позволяет построить схему пускателя без применения дополнительных устройств.

### ■ Пуск электродвигателя с реверсом

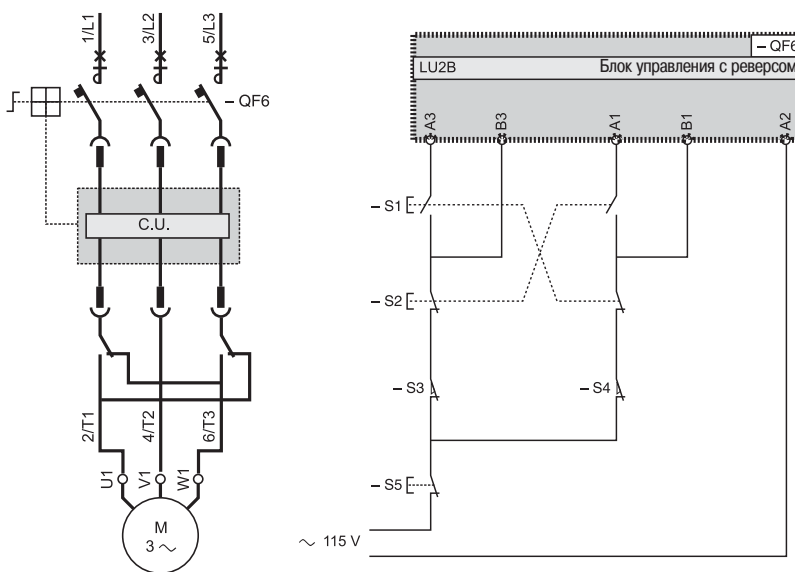
Состав пускателя с дополнительным блоком реверсирования, который может устанавливаться как сбоку продукта, так и подключаться напрямую, образуя, таким образом, компактное устройство пуска и реверса электродвигателя, показан на **Рис. 35**.

Силовой модуль осуществляет включение/отключение, а также все функции защиты (перегрузка и короткое замыкание).

Блок реверсирования всегда отключает нагрузку, таким образом устраняя износ электрической части.

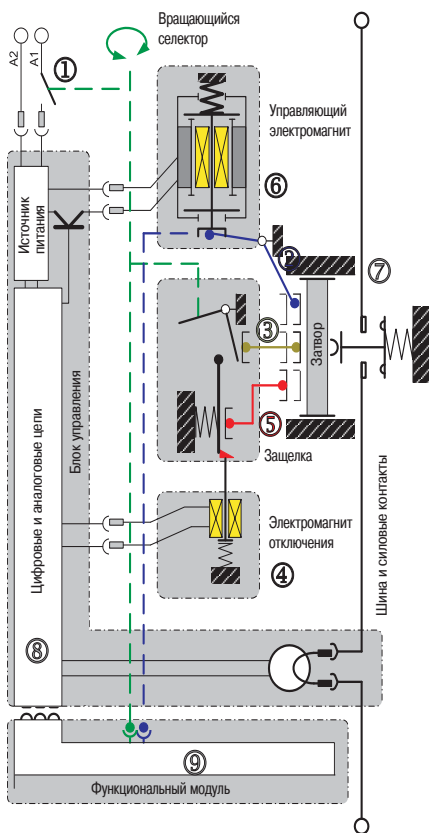
Отсутствует необходимость применения механической блокировки, поскольку электромагнит, управляющий выключателем, имеет два состояния, и доступ к выключателю реверса невозможен. Таким образом исключается возможность изменения его состояния.

Пример 3-проводного управления на **Рис. 36**: наполнение резервуара. Импульсное управление с самоблокировкой и двумя концевыми выключателями.

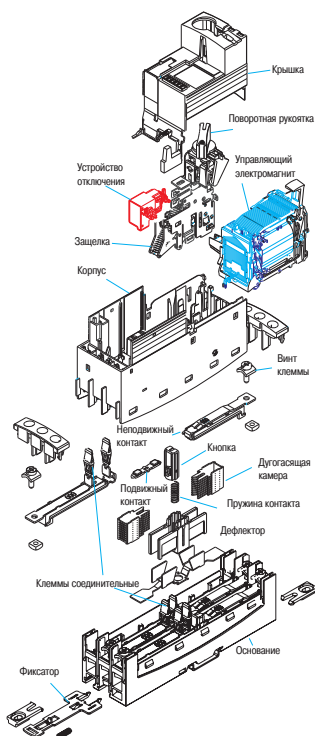


↑ **Рис. 36** Схема пуска электродвигателя с реверсом на основе Tesys U

### 5.6 Интеллектуальные пускатели



↑ Рис. 37 Принципиальная схема пускателя Tesys U



↑ Рис. 38 Внутренняя структура механической части пускателя Tesys U

#### • Принцип работы

При разработке интеллектуального пускателя электродвигателя Tesys U было предложено множество значительных усовершенствований.

Силовой компонент пускателя заимствован из успешно зарекомендовавшей себя серии контакторов. Он содержит только один комплект контактов, которые выполняют все переключения, а также оперативные и защитные отключения.

В дополнение к очевидному экономическому эффекту, эта технология предлагает много других преимуществ:

- уменьшение тепловых потерь в силовой линии;
- значительное сокращение риска подгорания во время работы и срабатывания защиты. Отсутствие проблем с координацией. Возможность простого перезапуска после обнаружения перегрузки или короткого замыкания.

#### Возможности управления

Технологические успехи в развитии полупроводниковой техники позволяют объединить логические и аналоговые функции в одном устройстве. Таким образом, новые функции можно предложить пользователям по весьма выгодным ценам.

Исследования токопроводящих материалов позволили разработать весьма компактные устройства с очень коротким временем реакции и возможностью выдерживать токи коротких замыканий до 50 000 А.

Структура пускателя представлена на Рис. 37 и 38. В пускателе имеются:

- силовая цепь (7), содержащая контактную группу и съемный датчик тока, прикрепленный к блоку управления;
- электромагнит постоянного тока с низким энергопотреблением (6) (⇒ Рис. 38);
- входные клеммы питания A1 и A2 (1) и не показанные на блок-схеме вспомогательные контакты 21/22 и 13/14;
- блок управления (8), выполняющий измерения, проверку, самоконтроль, функции защиты и т.д. Он также включает в себя источник питания, преобразующий входное питание A1/A2 в напряжение 24 В постоянного тока, которое используется для включения электромагнита;
- электромагнит (4), который отключает силовые контакты пускателя при обнаружении короткого замыкания;
- механическая блокировка (5);
- опциональный функциональный модуль (9), способный решать прикладные задачи.

#### Принцип работы (⇒ Рис. 37)

- Поворотная рукоятка в положении "0":

Контакт (1) открыт, толкатель блокировки (2) и электромагнита (3) открывают полюсы.

- Поворотная рукоятка в положении "I":

Контакт (1) закрыт, так как на клеммы A1 и A2 поступает напряжение. При этом электромагнит управления стягивается, и толкатель (3) переводит полюсы в закрытое состояние.

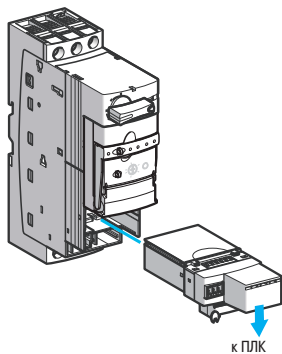
- Обнаружение короткого замыкания:

Неисправность обнаруживается блоком управления и подается команда отключения на электромагнит (4), который освобождает блокировку за 2 мс. Толкатель открывает полюсы. Чтобы сбросить блокировку и разрешить перезапуск, требуется повернуть поворотную рукоятку.

- Обнаружение перегрузки:

В рабочем режиме блок управления определяет превышение длительно допустимого тока и подает управляющий сигнал на электромагнит (4). Перезапуск производится вручную поворотной рукояткой.

Использование модулей дополнительных устройств позволяет организовать режим автоматического или ручного сброса неисправности: блок управления после обработки логики выдает команду электромагниту (4).



**↑ Рис. 39** Пускатель-контроллер Tesys U с коммуникационным модулем Modbus (Schneider Electric)

### ■ Преимущества коммуникации

При использовании коммуникационных модулей (⇒ Рис. 39), имеющих протоколы AS-I, Modbus, Profibus появляется возможность удаленного управления двигателем (включение/выключение) и удаленного мониторинга нагрузки двигателя, а также ведения журнала событий.

Применение коммуникации упрощает встраивание устройств защиты в промышленные автоматизированные системы. Кроме этого, предоставляются следующие преимущества:

- предупредительная сигнализация, применяемая для раннего обнаружения неисправностей;
- ведение архива неисправностей, предназначенного для поиска периодически повторяющихся неисправностей;
- упрощение ввода оборудования в эксплуатацию;
- упрощение технического обслуживания за счет обнаружения отклонений в условиях работы.

Таким образом, коммуникация помогает качественно улучшить управление оборудованием и сократить издержки.

### ■ Преимущества функциональных модулей

Функциональные модули используются для расширения режимов работы пускателей (тепловой мониторинг, нагрузка двигателя, дифференцирование неисправностей).

Предлагаются три типа блоков управления (⇒ Рис. 39) для всех требований по защите.

- стандартный блок, содержащий базовый набор защит (перегрузка и короткое замыкание);
- расширенный блок, содержащий дополнительные функции управления;
- многофункциональный блок с расширенными возможностями.

В таблице (⇒ Рис. 40) приведены основные характеристики этих трех блоков управления.

### ■ Преимущества прикладных карт

Прикладные карты встраиваются в преобразователи частоты и используются для удовлетворения специфических потребностей (см. раздел 5.15).

Функциональные возможности	Блоки управления		
	Стандартный	Расширенный	Многофункц.
Состояние пускателя (готов, работа, ошибка)			
Неисправности (превышение тока)			
Индикатор перегрева			
Удаленный сброс по коммуникационной шине			
Индикация нагрузки двигателя			
Дифференциация неисправностей			
Настройка параметров и функций защиты			
Функция "Журнал событий"			
Функция "Мониторинг"			
Управление пуском и торможением			
Информация, передаваемая по шине (Modbus) и поддерживаемые функции			

**↑ Рис. 40** Коммуникационные функции Tesys U

#### 5.7 Преобразователи частоты

*В этой главе подробно описаны все аспекты применения преобразователей частоты. Некоторые специфические решения, например, циклоконвертеры, асинхронные каскады, непосредственные преобразователи частоты для синхронных или асинхронных двигателей, будут упоминаться, но не будут рассмотрены подробно. Использование таких преобразователей частоты в качестве регуляторов скорости имеет свои особенности и предназначено для специфических рынков.*

*Регуляторы скорости для двигателей постоянного тока в последнее время повсеместно вытесняются преобразователями частоты для управления асинхронными короткозамкнутыми или синхронными двигателями. Тем не менее, здесь приводится общее описание принципов их действия для того, чтобы более наглядно представить особенности управления скоростью.*

#### ■ Общие сведения

##### □ История

Первыми устройствами, применявшимися для пуска электрических двигателей и управления их скоростью, были пусковые сопротивления, механические вариаторы скорости и система генератор-двигатель (система Леонардо). Электронные устройства пуска и регуляторы скорости вошли в промышленность как современные, экономичные, надежные и не требующие обслуживания устройства.

Электронные устройства пуска и регуляторы скорости представляют собой преобразователи энергии, спроектированные для дозирования подачи электроэнергии на двигатель.

Электронные устройства пуска предназначены исключительно для асинхронных двигателей. Они представляют собой регуляторы напряжения.

Регуляторы скорости позволяют обеспечить постепенное ускорение и замедление и точное управление скоростью. Регуляторы скорости для двигателей постоянного тока, как правило, выполняются в виде тиристорных преобразователей. Регуляторы скорости для двигателей переменного тока называются инверторами.

Исторически первым решением, появившимся на рынке, был электронный регулятор скорости для двигателей постоянного тока, однако, быстрый прогресс в развитии полупроводниковой техники и микроэлектроники привел к появлению надежных и экономичных преобразователей частоты для двигателей переменного тока. Современные инверторы позволяют достичь характеристик асинхронных электродвигателей на уровне образцов регуляторов скорости с двигателями постоянного тока. Некоторые производители предлагают даже асинхронные двигатели с преобразователем частоты, интегрированным в клеммную коробку двигателя. Это решение доступно только для маломощных двигателей (несколько киловатт).

Последние достижения в области электронных регуляторов скорости рассматриваются в конце данного раздела наряду с тенденциями развития и планами производителей.

##### □ Основные функции устройств плавного пуска и электронных регуляторов скорости

###### • Управление разгоном

Разгон электродвигателя осуществляется по требуемой (чаще всего линейной или S-образной) кривой разгона. Этот параметр обычно может устанавливаться при наладке.

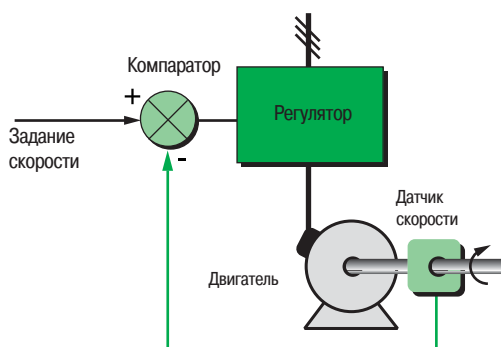
###### • Регулятор скорости

Регулятор скорости наиболее просто может быть выполнен в виде разомкнутой системы, когда на двигатель подается регулируемое напряжение (для двигателей переменного тока – регулируемое напряжение регулируемой частоты).

Лучший результат может быть достигнут при измерении текущего тока и регулировании напряжения на двигателе в зависимости от этого тока и сигнала задания на скорость. Такой способ управления используется в замкнутых системах.

Скорость двигателя определяется переменной «задание» (напряжение или ток). Для заданных значений параметров реальное значение скорости двигателя может отличаться от заданного при изменении напряжения источника питания, параметров нагрузки и температуры.

Диапазон регулирования скорости по отношению к номинальной зависит от требований к ее стабильности в заданном диапазоне изменения момента нагрузки на валу.



↑ Рис. 42

Принцип работы регулятора скорости

#### • Система управления с регулятором и датчиком обратной связи

Регулятор скорости с обратной связью (⇒ Рис. 42) называется замкнутой системой управления.

Скорость двигателя определяется значением задания.

Значение задания постоянно сравнивается с сигналом обратной связи, который пропорционален текущей скорости вращения двигателя. Этот сигнал формируется при помощи тахогенератора или импульсного датчика (энкодера), установленных на валу двигателя, либо вычисляется косвенно при помощи функции, которая определяет скорость двигателя по текущим электрическим параметрам его работы, доступным для обработки в регуляторе скорости.

Высокопроизводительные двигатели переменного тока часто оборудуются такими электронными датчиками.

Если при сравнении обнаруживается разница между заданием скорости и ее текущим значением, то регулятор немедленно вырабатывает и подает на двигатель поправку в виде напряжения и/или частоты, чтобы привести скорость к ее заданному значению.

Регулирование делает скорость практически не зависящей от внешних воздействий - изменения нагрузки, температуры и т.д.

Точность регулирования определяется как отношение разности заданного и текущего значения скорости к заданному значению в процентах.

#### • Управляемое замедление

При естественном торможении замедление скорости вращения двигателя происходит медленно под действием момента сопротивления механизма и в зависимости от момента инерции его вращающихся частей.

Устройства плавного пуска и электронные регуляторы скорости часто используются для того, чтобы управлять замедлением по линейной или S-образной кривой торможения, которая обычно отличается от кривой разгона.

Кривая торможения может быть растянута во времени, чтобы скорость плавно изменялась до промежуточной или нулевой скорости:

- если требуется более интенсивное торможение, чем естественное, то двигатель должен развивать дополнительный тормозной момент. Это называется электрическим торможением, которое может быть достигнуто возвратом энергии в питающую сеть или гашением её на тормозном резисторе;
- если требуемое замедление медленнее, чем естественное, двигатель должен развивать дополнительный вращающий момент и управлять замедлением до полной остановки двигателя.

#### • Реверс

Изменение направления вращения достигается изменением полярности напряжения (регуляторы двигателей постоянного тока) или изменением чередования фаз двигателя переменного тока, и автоматически выполняется либо после изменения полярности сигнала задания, либо после подачи команды на соответствующий логический вход, либо согласно информации, переданной по полевой шине. Эта функция стандартна в большинстве современных регуляторов для двигателей переменного тока.

#### • Динамическое торможение

Это торможение производит остановку двигателя, фактически не управляя темпом замедления. В устройствах плавного пуска асинхронных двигателей и преобразователях частоты это сделано экономичным способом, подачей постоянного тока в двигатель путем изменения коммутации силовых элементов. Вся механическая энергия рассеивается в роторе машины. В регуляторах двигателей постоянного тока эта функция может быть выполнена путем подключения резисторов к обмотке якоря.

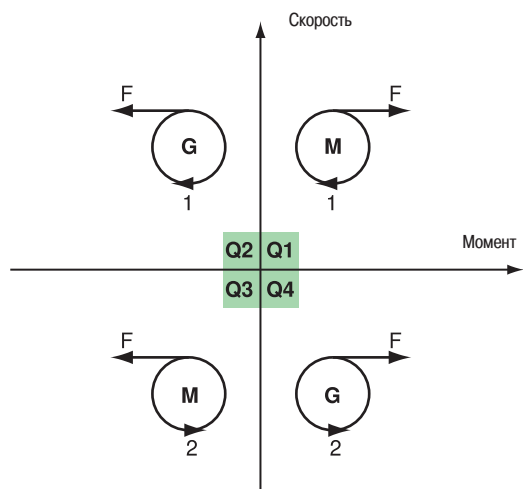
#### • Встроенная защита

Современные преобразователи частоты гарантируют тепловую защиту двигателей и свою собственную защиту. Используя текущее измерение температуры и информацию о скорости (если вентиляция двигателя зависит от его скорости вращения), микропроцессор вычисляет увеличение температуры двигателя и выдает сигнал тревоги или сигнал о необходимости отключения в случае чрезмерного перегрева.

Преобразователи частоты для двигателей переменного тока обычно также оборудуются защитой от:

- межфазного короткого замыкания и замыкания фазы на землю;
- бросков и провалов напряжения;
- дисбаланса фаз;
- работы от одной фазы.





Направление вращения	Режим	Момент, T	Скорость, S	Продукт, TS	Квадрант
1 (по часовой)	Двигатель	да	да	да	1
	Генератор				2
2 (против час.	Двигатель			да	3
	Генератор	да			4

↑ Рис. 43 Диаграмма «скорость-момент» возможных режимов работы машины

### ■ Основные режимы работы и основные типы регуляторов скорости

#### □ Основные режимы работы

В зависимости от схемного решения регуляторы скорости могут управлять движением при одном направлении вращения либо обоих.

Регуляторы скорости могут выполнять функцию рекуперации, если позволяют возвращать энергию в сеть.

Освобождаемая при работе в генераторных режимах энергия может быть либо возвращена в основную сеть (реверсивный входной мост), либо рассеяна на резисторе с помощью тормозного ключа, либо, при малой величине, аккумулирована в конденсаторах звена постоянного тока.

Рис. 43 иллюстрирует четыре возможных ситуации на диаграмме «момент-скорость», представляющей механические характеристики для различных режимов работы двигателя.

#### • Нереверсивный регулятор для управления вращением в одну сторону

Этот тип регулятора характерен для:

- двигателя постоянного тока с регулятором скорости в виде управляемого выпрямителя (пер. ток => пост. ток) с диодным и тиристорным мостом (⇒ Рис. 43-I);
- двигателей переменного тока с преобразователями частоты с диодным мостом на входе, которые содержат промежуточное звено постоянного тока, подключенное к инвертору, обеспечивающему работу машины в квадранте 1 (⇒ Рис. 43-II).

В некоторых случаях эта компоновка может использоваться для регулятора с двумя направлениями вращения (квадранты 1 и 3).

Преобразователь частоты с тормозным ключом и правильно подобранным тормозным резистором позволяет обеспечить практически мгновенное торможение (в режиме контролируемого замедления, для подъемно-транспортных механизмов, когда двигатель должен развивать тормозной момент при спуске, удерживая нагрузку).

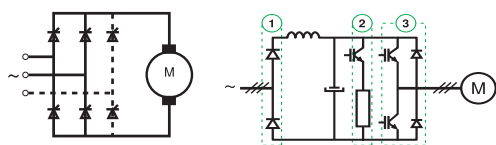
Для продолжительных режимов работы двигателя с активной нагрузкой (в генераторном режиме), необходим рекуператор (или тормозной ключ), например, для управления торможением в испытательном стенде.

#### • Регуляторы для двигателей с двумя направлениями вращения

Этот тип регулятора может быть с рекуперацией (или с тормозным ключом) или без них. Если он содержит рекуператор (или тормозной ключ), то установка на его основе работает во всех четырех квадрантах (⇒ Рис. 44) и может использоваться для постоянного торможения.

Если он не содержит рекуператор (или тормозной ключ), то установка на его основе работает в квадрантах 1 и 3.

Схематическое решение и размеры регулятора или устройства пуска зависят от характера нагрузки, её способности создавать вращающий момент, вызывающий движение (активный вращающий момент). Различные типы машин и их возможности рассматриваются в разделе 4 «Характеристики нагрузок и исполнительных механизмов».



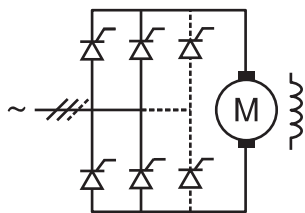
↑ Рис. 44 Схемы преобразователей  
I – Преобразователь постоянного тока  
II – Преобразователь переменного тока  
① Входной мост на диодах  
② Тормозное устройство (резистор и ключ)  
③ Преобразователь частоты

#### □ Основные типы регуляторов скорости

Как было сказано выше, в этом разделе были представлены только самые общие технологии и способы регулирования скорости.

## 5 - Устройства управления электродвигателями

### 5.7 Преобразователи частоты



↑ Рис. 45 Мост постоянного тока для двигателя постоянного тока

#### • Тиристорные преобразователи для двигателей постоянного тока

Преобразуют переменный ток однофазного или трехфазного электропитания в управляемое питание для двигателя.

Полупроводники установлены в одной фазе или трехфазном мосте (⇒ Рис. 45). Мост может быть комбинацией диодов/тириستоров или только тиристорным.

Последнее решение является наиболее часто используемым, поскольку оно позволяет получить меньшие размеры преобразователя.

Двигатели постоянного тока чаще всего имеют независимое возбуждение, кроме двигателей малой мощности, где используются постоянные магниты, и отдельная цепь возбуждения не требуется.

Этот тип регулятора скорости хорошо приспособлен к любым целям. Единственными ограничениями применения двигателей постоянного тока являются трудности достижения высоких скоростей и требования по обслуживанию (замена щеток).

Двигатели постоянного тока и устройства регулирования скорости для них были первыми промышленными решениями. За последние десять лет применение этих устройств устойчиво сокращается, поскольку предпочтительным становится применение преобразователей частоты с двигателями переменного тока. Асинхронный двигатель более надежен и более рентабелен, чем двигатель постоянного тока. В стандартном исполнении со степенью защиты IP55 он лучше защищен от внешних воздействий (дождь, пыль, опасные газы и т.д.).

#### • Преобразователи частоты для двигателей переменного тока

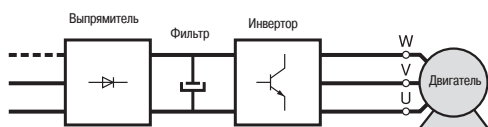
Подают на двигатель трехфазное среднеквадратичное напряжение с переменной частотой (⇒ Рис. 46). Питание преобразователей может быть однофазным для маломощных исполнений (несколько кВт) и трехфазным для высокой мощности.

Преобразователи малой мощности могут получать однофазное питание или питание от трехфазной силовой сети. Выход преобразователей частоты всегда имеет 3 фазы, поскольку асинхронные однофазные двигатели плохо приспособлены к работе с преобразователями частоты. Двигатели переменного тока для преобразователей частоты обладают всеми преимуществами: стандартизация, низкая цена, надежность, отсутствие обслуживания. Такие двигатели обычно имеют естественное охлаждение (самовентиляция), поэтому их применение в системах с продолжительным временем работы на низкой скорости вращения ограничено из-за ухудшения вентиляции. Если необходима продолжительная работа на низкой скорости вращения, то требуется применять специальные двигатели с независимыми вентиляторами.

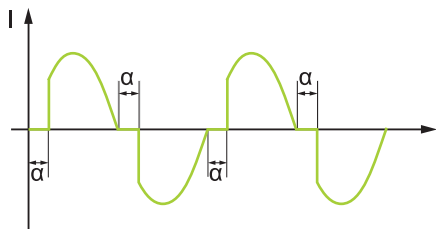
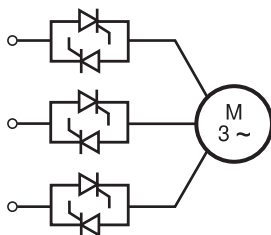
#### • Устройства плавного пуска асинхронных двигателей

Этот тип устройств, известных как «устройства плавного пуска» в настоящее время используются в основном для пуска двигателей. В прошлом, совместно со специальными асинхронными двигателями с повышенным скольжением, они использовались и для регулирования скорости этих двигателей.

Устройство плавного пуска вырабатывает переменный ток той же частоты, что и силовое питание, и управляет СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКИМ напряжением через полупроводниковые схемы. Схемное решение выполняется на основе двух тириستоров, установленных в каждой фазе двигателя встречно-параллельно (⇒ Рис. 47).

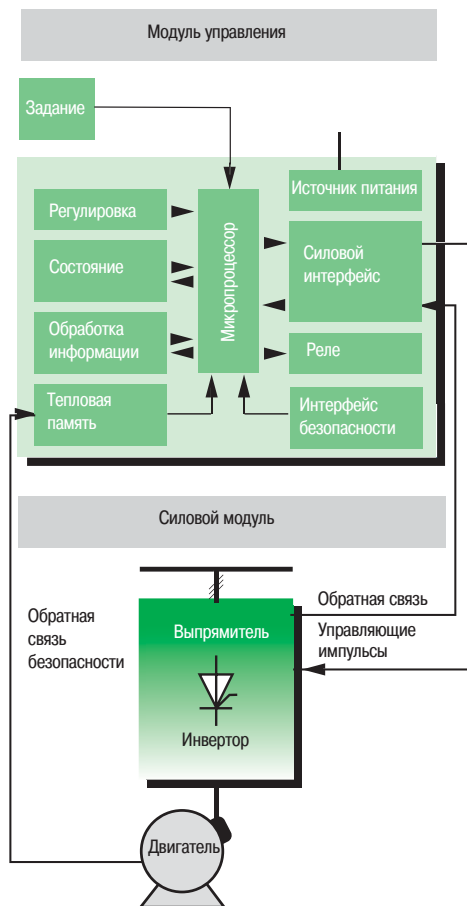


↑ Рис. 46 Схема питания двигателя переменного тока от преобразователя частоты



↑ Рис. 47 Устройство плавного пуска двигателя переменного тока и его рабочий ток

## 5.8 Структура и компоненты устройств плавного пуска и преобразователей частоты



↑ Рис. 48

Общая структура регулятора скорости

### ■ Структура

Устройства плавного пуска и преобразователи частоты состоят из двух модулей, обычно устанавливаемых в одном блоке (⇒ Рис. 48):

- модуль управления для согласования работы двигателя с алгоритмом работы механизма;
- силовой модуль для подачи силового питания на электродвигатель.

### □ Модуль управления

В современных устройствах пуска и преобразователей частоты всеми операциями управляет микропроцессор, который учитывает параметры настройки, команды, переданные оператором или управляющим процессором, а также принимает в обработку обратную связь по скорости, току и т.д.

Развитие вычислительных возможностей микропроцессоров и специализированных плат (ASIC) привело к разработке мощных алгоритмов отслеживания параметров управляемой машины. При помощи этой информации микропроцессор управляет ускорением и замедлением, регулирует скорость и ограничивает ток, а также вырабатывает команды силовым компонентам. Защита и безопасность обычно интегрирована в специализированные платы (ASIC) или в силовые модули (IPM).

Параметры настройки (ограничения скорости, параметры разгона/торможения, ограничения тока и т.д.) вводятся либо со встроенной клавиатуры, либо передаются из ПЛК или ПК через полевую шину. Кроме того, команды (пуск, остановка, торможение и т.д.) можно подать через диалоговый терминал ЧМИ, программируемые ПЛК или через ПК. Рабочие параметры, сигналы тревоги и информация о дефектах могут визуализироваться индикаторами, светодиодами, жидкокристаллическими дисплеями или передаваться на ЭВМ верхнего уровня через полевые шины.

Реле, обычно программируемые, дают возможность получить информацию:

- о дефектах (основное питание, температура, порядок операций, перегрузка и т.д.);
- о контролируемых состояниях (порог скорости, предаварийное состояние или окончание запуска).

Напряжение питания, необходимое для проведения измерения параметров и работы схем управления, подается со встроенного источника питания, гальванически развязанного с силовым питанием.

### □ Силовой модуль

Силовой модуль обычно состоит из:

- силовых компонентов (диоды, тиристоры, IGBT и т.д.);
- интерфейсов измерения напряжения и/или тока;
- системы вентиляции.

## 5.9 Силовые компоненты

Силовые полупроводниковые компоненты по принципу действия аналогичны механическим выключателям, которые могут быть или в закрытом или в открытом состоянии.

Эти компоненты встроены в силовые модули, формируя конвертер, преобразующий напряжение питающей сети с постоянной амплитудой и частотой в выходное напряжение переменной амплитуды и/или частоты, питающее электрический двигатель.

Силовые компоненты являются основными элементами преобразователей частоты, и именно из-за успешного развития этих компонентов в последние годы стало возможным массовое производство электронных регуляторов скорости.

Материалы полупроводника, такие как кремний, имеют способность изменять сопротивление, приобретая свойства проводника или изолятора. Их атомы имеют 4 периферийных электрона. Для того чтобы сформировать устойчивую структуру из 8 электронов, каждый атом объединяется с 4 соседними атомами.

Полупроводник типа P получается, если в кремний внедрить небольшое количество вещества, атомы которого имеют 3 периферийных электрона. При этом в полученном веществе не хватает одного электрона для того, чтобы сформировать структуру из 8 устойчивых электронов, что позволяет получить избыток положительных зарядов.

Полупроводник типа N получается если в кремний внедрить небольшое количество вещества, атомы которого имеют 5 периферийных электронов. При этом получается избыток электронов, то есть избыток отрицательных зарядов.



↑ Рис. 49

Диод

#### Диод (⇒ Рис. 49)

Диод представляет собой неуправляемый полупроводник, который содержит две области P (анод) и N (катод). Он позволит току протекать только в одном направлении: от анода к катоду.

Ток протекает, когда на анод подано напряжение с более высоким потенциалом, чем то, что подано на катод, при этом полупроводник действует, как включенный выключатель.

Полупроводник блокирует ток и действует, как открытый выключатель, если потенциал анода становится меньше, чем потенциал катода.

Заметим, что в отличие от механических выключателей, проводящее состояние полупроводника принято называть его открытым состоянием, а непроводящее – закрытым. Иными словами, полупроводник открыт, когда он проводит ток, и закрыт – когда не проводит.

Диод характеризуется следующими основными показателями:

- **в открытом состоянии:**
  - падением напряжения, которое определяется пороговым напряжением и внутренним сопротивлением;
  - максимальным допустимым постоянным током (приблизительно до 5000 А, среднеквадратичное значение для самых мощных компонентов).
- **в закрытом состоянии:**
  - максимальным допустимым обратным напряжением, которое может превышать 5000 В.

#### Тиристор (⇒ Рис. 50)

Это управляемый полупроводник, который состоит из четырех полупроводниковых переходов: P-N-P-N.

Он работает как диод при подаче электрического тока на управляющий электрод. Протекание тока через тиристор возможно, только если анод имеет более высокий потенциал, чем катод. Тиристор перестает проводить ток (закрывается), когда ток, протекающий через него, уменьшается до порога закрытия.

Ток, подаваемый на управляющий электрод, не влияет на ток основной цепи тиристора и, кроме того, его не требуется поддерживать постоянно при проводящем состоянии тиристора - он нужен только для открытия.

Тиристор имеет следующие основные характеристики:

- **в открытом (проводящем) состоянии:**
  - падение напряжения, определяемое пороговым напряжением и внутренним сопротивлением;
  - максимально допустимый постоянный ток (до 5000 А, среднеквадратичное значение для самых мощных компонентов).
- **в запертом состоянии:**
  - прямое максимально допустимое напряжение (может превышать 5000 В);
  - в общем случае прямое и обратное напряжения одинаковы;
  - время запирающего, то есть минимальное время, в течение которого на тиристор не должно прикладываться положительное напряжение анода относительно катода, поскольку в противном случае возможно самопроизвольное отпирание тиристора;
  - ток управления для открытия основной цепи тиристора.

Некоторые тиристоры предназначены для работы в схемах с невысокими частотами, другие - для схем с высокой частотой. Такие тиристоры называются быстродействующими, они способны работать на частотах до нескольких килогерц.

Быстродействующие тиристоры иногда характеризуются не одинаковыми прямым и обратным напряжениями.

В обычных приложениях тиристоры часто соединяются со встречно включенным диодом. Изготовители полупроводниковой техники используют это решение, чтобы увеличить постоянное напряжение, которое компонент может выдержать в выключенном состоянии. Быстродействующий тиристор теперь полностью заменен полностью управляемым тиристором GTO, силовыми транзисторами, в особенности IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor – биполярный транзистор с изолированным затвором).



↑ Рис. 50

Тиристор



↑ Рис. 51

Тиристор GTO

### Тиристор GTO (*Gate Turn Off – запираемый тиристор*) (⇒ Рис. 51)

Это разновидность быстродействующего тиристора, запираение которого может быть осуществлено по управляющему электроду. Ток протекает от анода к катоду до тех пор, пока на анод подан более высокий потенциал. Для того чтобы поддерживать полупроводник GTO в открытом состоянии и ограничивать падение потенциала, на управляющий электрод должно быть подано управляющее напряжение.

Ток через управляющий электрод для поддержания открытого состояния тиристора (ток удержания) невысок, он существенно ниже, чем ток открытия проводимости (ток отпирания). Для того чтобы запереть тиристор, необходимо изменить полярность тока управления.

Тиристоры GTO используются в очень мощных преобразователях, поскольку через них можно пропускать высокие токи и напряжения (до 5000 В и 5000 А). Однако широкое применение IGBT существенно сократило их распространение на рынке.

Тиристор GTO имеет следующие основные характеристики:

- **в открытом (проводящем) состоянии:**
  - падение напряжения определяется пороговым напряжением и внутренним сопротивлением;
  - ток удержания стремится уменьшить прямое падение напряжения;
  - максимальный допустимый постоянный ток;
  - ток запираения для прерывания основного тока в устройстве.
- **в закрытом (не проводящем) состоянии:**
  - прямое максимально допустимое напряжение часто асимметрично обратному, аналогично быстродействующим тиристорам;
  - время запираения, минимальное время, в течение которого должен подаваться ток запираения, в противном случае возможно самопроизвольное отпирание тиристора;
  - ток запираения для переключения тиристора в непроводящее состояние.

Тиристоры GTO могут работать на низких частотах до 1 килогерца.

### Транзистор (⇒ Рис. 52)

Представляет собой управляемый биполярный полупроводник, составленный из трех полупроводниковых переходов P-N-P или N-P-N. Ток может протекать только в одном направлении: от эмиттера к коллектору в технологии P-N-P и от коллектора к эмиттеру в технологии N-P-N.

Мощные транзисторы, способные работать с промышленными напряжениями, обычно имеют тип N-P-N и часто собраны по схеме Дарлингтона. Транзистор может работать как усилитель.

При этом уровень тока, который протекает через транзистор, зависит от уровня тока управления, протекающего через базу. Транзистор также может работать как статический ключ, то есть переключаться из состояния с минимальной проводимостью при отсутствии тока базы в состояние с максимальной проводимостью в случае насыщения. Этот режим используется при работе в силовых схемах регуляторов скорости.

Биполярные транзисторы способны работать с напряжениями до 1200 В и поддерживать токи до 800 А.

В последнее время эти устройства заменены биполярными транзисторами с изолированным затвором IGBT.

В операциях, которые интересуют нас, биполярный транзистор имеет следующие характеристики:

- **в открытом (проводящем) состоянии:**
  - падение напряжения определяется пороговым напряжением и внутренним сопротивлением;
  - максимальный допустимый постоянный ток;
  - управляющий ток (для перевода транзистора в состояние насыщения он должен быть выше, чем основной ток, деленный на коэффициент усиления).
- **в закрытом (не проводящем) состоянии:**
  - максимальное допустимое постоянное напряжение.

Силовые транзисторы, используемые в регуляторах скорости, способны работать на низких частотах до 1 килогерца.



↑ Рис. 52

Транзистор PNP



↑ Рис. 53

Транзистор IGBT

#### IGBT (⇒ Рис. 53)

Это силовой транзистор, управляемый напряжением, которое подается на управляющий электрод, называемый «затвором», изолированный от силовой цепи. Отсюда и название «биполярный транзистор с изолированным затвором».

Это устройство характеризуется очень малой мощностью управления для коммутации весьма значительного тока силовой цепи.

В настоящее время этот компонент используется в силовых цепях большинства преобразователей частоты для двигателей переменного тока (мощностью до МВт). Его вольт-амперные характеристики аналогичны характеристикам биполярных транзисторов, но его энергетические показатели и частота коммутации значительно выше, чем у любого другого полупроводникового элемента.

Характеристики IGBT транзисторов стремительно улучшаются и в настоящее время созданы транзисторы на большие напряжения - выше 3 кВ и большие токи - до нескольких сотен ампер.

Транзистор IGBT имеет следующие основные характеристики:

- **напряжение управления:**
  - разрешает проводимость (отпирает) или запирает устройство.
- **в открытом (проводящем) состоянии:**
  - падение напряжения определяется пороговым напряжением и внутренним сопротивлением;
  - максимальный допустимый постоянный ток.
- **в закрытом (не проводящем) состоянии:**
  - максимальное допустимое прямое напряжение.

Транзисторы IGBT, используемые в регуляторах скорости, могут работать на частотах до нескольких десятков килогерц.

#### Транзистор МОП (⇒ Рис. 54)

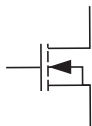
Работа этого компонента полностью отличается от предыдущего. Электрическое поле изменяется в полупроводнике, поляризуя изолированный затвор, поэтому данный элемент называется «металло-окисный полупроводник».

Использование этого транзистора в регуляторах скорости ограничено применением на низких напряжениях (регуляторы скорости, подключенные к аккумуляторным батареям) или низкой мощностью, поскольку кремниевая поверхность должна выдерживать высокое напряжение в закрытом состоянии и низкое падение напряжения в открытом состоянии, это оказывается экономически нецелесообразно.

МОП транзистор имеет следующие основные характеристики:

- **напряжение управления:**
  - обеспечивает проводимость или блокировку компонента.
- **в открытом (проводящем) состоянии:**
  - внутреннее сопротивление;
  - максимальный допустимый постоянный ток.
- **в закрытом (не проводящем) состоянии:**
  - максимально допустимое прямое напряжение (может быть выше 1000 В).

Транзисторы МОП, используемые в регуляторах скорости, могут работать на частотах до нескольких сотен килогерц. Они нашли свое применение во всех импульсных источниках питания в качестве дискретных компонентов, а также в интегральных модулях, включающих в себя силовые компоненты (МОП) и цепи управления.



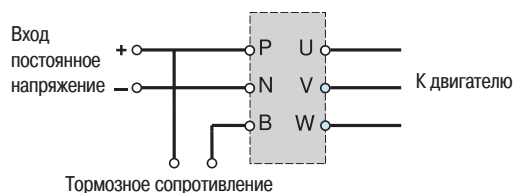
↑ Рис. 54

Транзистор МОП

## 5 - Устройства управления электродвигателями

### 5.9 Силовые компоненты

#### 5.10 Регулятор напряжения для двигателя постоянного тока



↑ Рис. 55

Модуль IPM (интеллектуальный силовой модуль)

#### IPM (интеллектуальный силовой модуль)

Строго говоря, это не полупроводниковый элемент, а целая схема с IGBT-транзисторами. Этот модуль (⇒ Рис. 55) представляет собой мост инвертора с IGBT-транзисторами и низковольтный блок управления этими полупроводниками.

Модуль IPM содержит:

- 7 IGBT-транзисторов, 6 из которых – для мостовой схемы и 1 – для тормозного резистора;
- схему управления IGBT;
- 7 силовых диодов, объединённых с IGBT, чтобы обеспечить протекание тока;
- защиту от коротких замыканий, перегрузки и температурного перегрева;
- электрическую изоляцию модуля.

Входной диодный мост выпрямителя обычно встроен в этот модуль.

Электронная схема управления позволяет улучшить управление переключением IGBT-транзисторов.

## 5.10 Регулятор напряжения для двигателя постоянного тока

### ■ Основные принципы

Предшественником статических регуляторов скорости для двигателей постоянного тока является система «генератор-двигатель» (система Леонардо) (⇒ см. раздел «Электродвигатели и нагрузки»).

Эта система состоит из приводного электродвигателя, обычно асинхронного, и генератора постоянного тока с регулируемым возбуждением, который используется для питания одного или более двигателей постоянного тока. Возбуждение генератора регулируется электромеханическим устройством (Амплидин, Rototrol, Regulex) или статической системой (магнитный усилитель или электронный регулятор).

В настоящее время эти устройства более не выпускаются, их заменили полупроводниковые регуляторы скорости, которые, выполняя те же самые функции, позволяют работать с более высокими мощностями двигателей и не требуют обслуживания.

Электронные регуляторы скорости получают питание от сети постоянного тока или от сети переменного тока и подают на двигатель регулируемое напряжение постоянного тока.

Для питания цепи возбуждения используется диодный или тиристорный мост, обычно однофазный.

Силовая схема для питания цепи якоря также является выпрямителем. Так как напряжение на выходе должно изменяться, выпрямитель должен быть управляемым, то есть состоять из силовых компонентов, проводимостью которых можно управлять (тиристоров). При регулировании угла отпирания тиристоров (смещении момента подачи на управляющий электрод отпирающего импульса относительно точки естественного отпирания) действующее значение выпрямленного напряжения на обмотке двигателя уменьшается, тем самым уменьшая скорость двигателя (закрывание тиристора происходит автоматически, когда ток достигает нулевого значения).

Для регуляторов малой мощности, или регуляторов с аккумуляторным питанием от аккумуляторных батарей, силовая схема иногда составляется из силовых транзисторов (ключей). Регулируется время проводящего состояния ключей при постоянном выходном напряжении. Этот режим работы называют ШИМ (широтно-импульсная модуляция).

### ■ Регулирование

При регулировании скорость должна точно поддерживаться на заданном уровне, несмотря на внешние воздействия (изменения момента нагрузки, напряжения сети, температуры). При разгоне или перегрузке величина тока не должна достигать опасных для двигателя или для преобразовательного устройства значений.

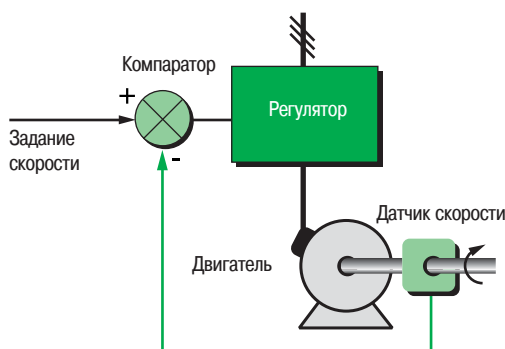
Регулятор ограничивает значения тока безопасным для двигателя диапазоном значений. Настройка регулятора зависит от характеристик двигателя. Значение задания скорости от задающего устройства подается на регулятор через аналоговый или дискретный вход или передается по полевой шине или задается устройством, вырабатывающим задание скорости.

Значение задания может устанавливаться до начала работы или регулироваться во время работы машины.

Графики кривых ускорения и замедления до заданной скорости определяют время ускорения и замедления

В замкнутой системе (⇒ Рис. 56) фактическая скорость постоянно измеряется аналоговым или импульсным датчиком скорости и сравнивается с заданным значением. Если обнаруживается отклонение, то электронное устройство управления корректирует скорость. Скорость может изменяться от нескольких оборотов в минуту до максимального значения. Точность регулирования скорости в этом диапазоне при возможном изменении нагрузки, колебании напряжения сети, изменении температуры достигает значения 0,01 при аналоговом регулировании и 0,001 – при цифровом. Можно регулировать скорость в замкнутой системе с обратной связью по напряжению на двигателе с учетом протекающего через двигатель тока.

В этом случае показатели регулирования (диапазон и точность) немного ниже. Точность, например, составляет несколько процентов при изменении нагрузки от нуля до номинальной.



↑ Рис. 56 Принцип регулирования скорости

### ■ Реверс или вращение в обратном направлении и рекуперативное торможение

Чтобы изменить направление вращения на обратное, необходимо изменить полярность напряжения на якоре двигателя. Это может быть выполнено при помощи контакторов (такое решение в настоящее время используется редко) или статически, путем изменения полярности напряжения на выходе преобразователя в обмотке якоря или изменением направления тока возбуждения.

Последнее решение используется не очень часто, из-за большой постоянной времени обмотки возбуждения.

При управляемом торможении механизмов с высоким моментом инерции нагрузки требуется возвращать вырабатываемую двигателем энергию обратно в основную сеть. Во время торможения регулятор действует как инвертор, то есть, другими словами, вырабатываемая энергия - отрицательна.

Регуляторы, способные выполнять эти две операции (реверс и рекуперативное торможение), оборудованы двумя мостами, включенными встречно параллельно (⇒ Рис. 57).

Каждый из этих мостов может инвертировать напряжение и ток, соответственно, и знак энергии, циркулирующей между основной сетью и нагрузкой.

### ■ Возможные режимы работы

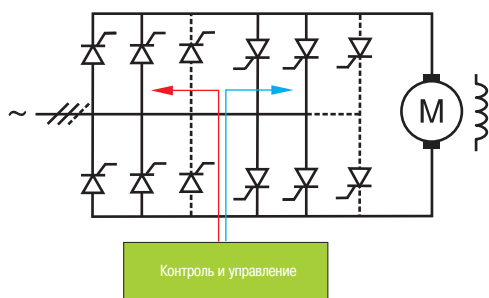
#### □ Режим работы с постоянным моментом

При постоянном возбуждении скорость двигателя зависит от напряжения, поданного на обмотку якоря. Скорость может изменяться от нулевой до номинальной в соответствии с параметрами двигателя.

Вращающий момент двигателя пропорционален его току, и номинальный вращающий момент машины может быть получен непрерывно на всех скоростях вращения.

#### □ Режим работы с постоянной мощностью

Когда на обмотку якоря подано номинальное напряжение, можно увеличить скорость двигателя, уменьшая его ток возбуждения. В этом случае регулятор скорости должен содержать управляемый выпрямитель для питания цепи возбуждения.



↑ Рис. 57 Структурная схема регулятора скорости для двигателя постоянного тока



## 5 - Устройства управления электродвигателями

### 5.10 Регулятор напряжения для двигателя постоянного тока

### 5.11 Преобразователи частоты для асинхронных двигателей

Напряжение якоря в этом случае остается постоянным и равным номинальному напряжению, а ток возбуждения регулируется для получения необходимой скорости.

Мощность выражена как:

$$P = E \cdot I,$$

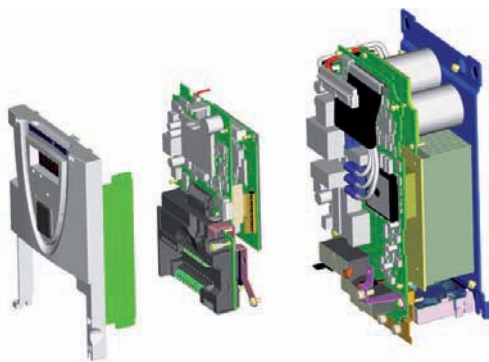
где  $E$  - ЭДС двигателя, примерно равная напряжению, и  $I$  - ток двигателя.

Мощность для заданного тока двигателя является, в этом случае, постоянной при всех значениях скорости, а максимальная скорость ограничена двумя параметрами:

- механическими ограничениями на якорь двигателя, особенно максимальной центробежной силой, которую может выдержать коллектор;
- ограниченными коммутационными возможностями машины.

Для того чтобы спроектировать установку, необходимо проконсультироваться с производителем при выборе двигателя, в особенности в отношении диапазона скоростей при работе с постоянной мощностью.

## 5.11 Преобразователи частоты для асинхронных двигателей



↑ Рис. 58 Конструкция регулятора скорости (разобранное состояние)

Принципы построения регуляторов скорости для асинхронных и синхронных двигателей одинаковы. Эффективные регуляторы скорости для асинхронных двигателей появились на рынке совсем недавно. Schneider Electric одна из первых компаний, которая вышла на французский рынок этих устройств. Технические усовершенствования этих регуляторов, выполненные в последние годы, привели к появлению высокоэффективных моделей и снижению их стоимости.

### ■ Общие принципы

Преобразователь частоты для двигателей переменного тока получает питание от силовой сети с постоянными уровнями напряжения и частоты и преобразует это напряжение в переменное регулируемое напряжение с переменной частотой, в зависимости от задания скорости. Для того, чтобы обеспечить постоянство перегрузочной способности асинхронного двигателя при любой скорости, необходимо обеспечивать постоянный магнитный поток в двигателе. Для этого напряжение и частота должны изменяться одновременно, в одном и том же соотношении.

### ■ Структура

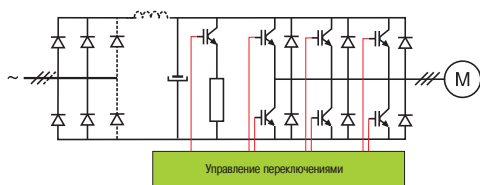
Обычно в силовую цепь преобразователя входит выпрямитель, преобразующий питающее напряжение в напряжение постоянного тока, от которого питается инвертор, вырабатывающий переменное регулируемое напряжение переменной частоты (⇒ Рис. 59). Для того чтобы обеспечить соответствие стандартам ЕС (Европейского союза) и соответствовать маркировке CE, требуется установка сетевого фильтра в цепь до выпрямительного моста.

### □ Выпрямитель

В общем случае выпрямитель представляет собой диодный мост и фильтр, состоящий из одного или нескольких конденсаторов, в зависимости от мощности.

Для обеспечения защиты цепей от перегрузки в устройство встроена схема ограничения пускового тока. Некоторые инверторы используют тиристорный мост для того, чтобы ограничить пусковой ток конденсаторов фильтра, которые заряжаются до значения, фактически равного амплитудному значению напряжения питающей сети (около 560В при трехфазном напряжении 400В).

**Примечание:** несмотря на наличие цепей разрядки, конденсаторы продолжают сохранять опасное напряжение даже при отсутствии основного силового напряжения. Любое техническое обслуживание этих устройств должно поэтому производиться только с соблюдением правил безопасности обученным персоналом, который точно знает, какие меры предосторожности требуется применить и как определить, что заряд конденсаторов достиг безопасного уровня.



↑ Рис. 59 Принципиальная электрическая схема преобразователя частоты

#### □ Инвертор

Мост инвертора, подключенный к конденсаторам, выполнен на шести мощных силовых полупроводниках (обычно IGBT) и имеет обратные диоды.

Этот тип регулятора предназначен для питания асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Преобразователь частоты Altivar компании Schneider Electric может управлять электродвигателями разной мощности, он способен работать с одним двигателем или несколькими параллельно соединенными двигателями.

Он имеет:

- выпрямитель с конденсаторным фильтром;
- инвертор с 6 IGBT-транзисторами и 6 диодами;
- тормозной ключ, связанный с тормозным сопротивлением (обычно вынесен за габариты изделия);

изделия);

- схемы управления IGBT-транзисторами;
- микропроцессорный блок управления инвертором;
- встроенные датчики измерения тока двигателя, напряжения постоянного тока на клеммах конденсаторов и в некоторых случаях измеряется напряжение на клеммах выпрямительного моста и клеммах питания двигателя, когда эти величины требуются для управления и защиты системы «ПЧ-двигатель»;
- источник питания для электронных схем низкого напряжения.

Питание цепей управления осуществляется от звена постоянного тока с конденсаторным фильтром, что позволяет обеспечить нечувствительность блока управления к кратковременным пропадающим силового питания и применять данный преобразователь частоты в промышленных электрических сетях невысокого качества.

#### ■ Изменение скорости

Выходное напряжение преобразователя формируется из импульсов разной ширины, получаемых путем коммутации постоянного напряжения на выходе выпрямителя. При модулировании импульсов получается переменный ток синусоидальной формы (⇒ Рис. 60).

Используемая здесь технология известна под названием широтно-импульсной модуляции (ШИМ) позволяет получить равномерное вращение на низких скоростях и ограничивает рост температуры двигателя.

Частота коммутации транзисторов выбирается на основе компромисса, поскольку она должна быть достаточно высока, чтобы уменьшить пульсации и шум в двигателе, но должны учитываться увеличивающиеся потери в полупроводниках моста инвертора.

#### ■ Встроенные защиты

Преобразователь частоты защищает себя и двигатель от чрезмерного перегрева, блокируя работу до того момента, пока не будет восстановлена допустимая температура.

Защита срабатывает в случае определения любого вида вмешательства или ошибки, которые могут изменить нормальное функционирование преобразователя, например, слишком высокое напряжение, пониженное напряжение, обрыв входной или выходной фазы. В некоторых моделях выпрямитель, инвертор, тормозной ключ, схемы управления и защиты от коротких замыканий встроены в ИСМ (интеллектуальный силовой модуль).

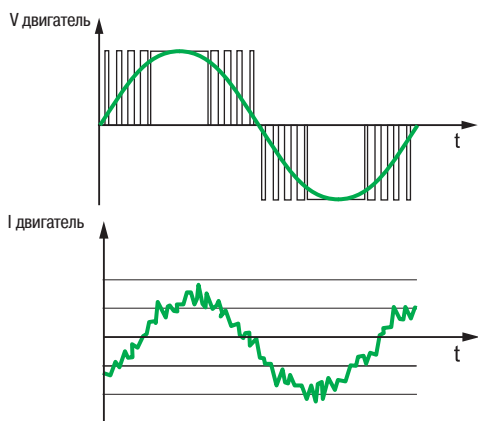
#### ■ Преобразователи частоты для двигателей переменного тока

Первые модели преобразователей частоты для двигателей переменного тока использовали скалярное управление по закону  $U/f = \text{Const}$ . В те времена это был единственный экономически оправданный выбор. Появление микропроцессорной техники позволило применять более точные и быстрые методы управления, а именно векторное управление, которое позволяет выполнить эту задачу на новом уровне. Сегодня ведущие производители предлагают комплексное решение, позволяющее выбрать подходящий закон управления: скалярный, векторный с использованием датчика обратной связи, а также векторный без использования датчика.

#### □ Управление U/f

В этом типе управления сигнал задания скорости определяет частоту на выходе инвертора и, следовательно, на двигателе, который развивает заданную скорость вращения. Напряжение находится в прямом соотношении с частотой. Этот тип управления часто называют управлением типа U/f или скалярным управлением.

Если не обеспечена компенсация, то реальная скорость зависит от нагрузки, которая ограничивает рабочий диапазон регулирования скорости. Грубая компенсация может быть осуществлена путем учета падения напряжения на внутреннем сопротивлении обмотки статора двигателя.

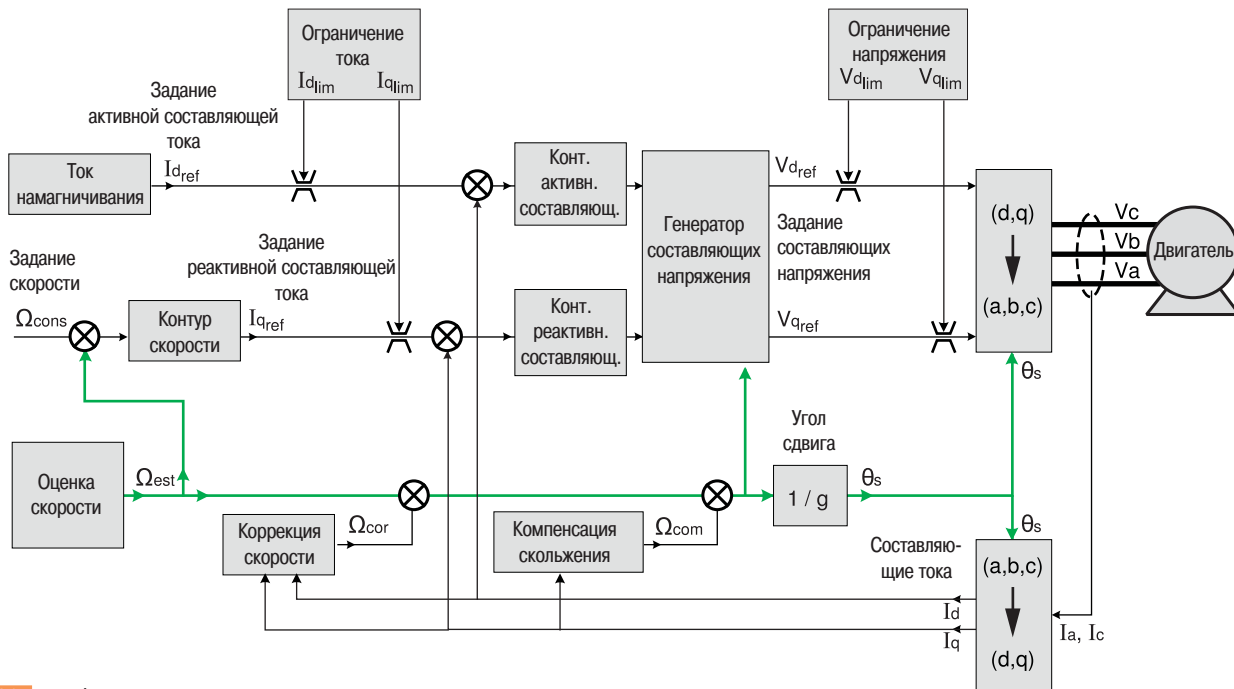


↑ Рис. 60

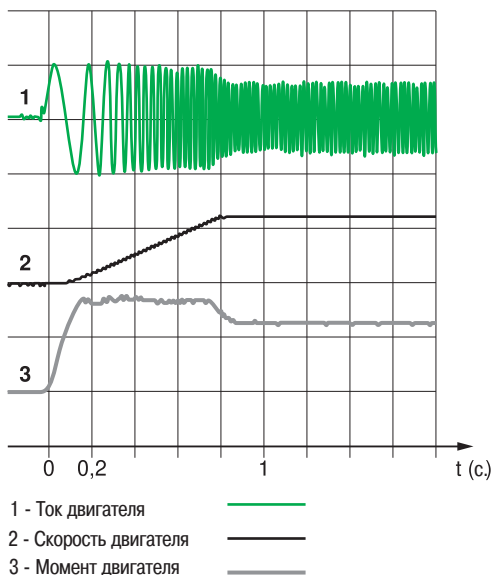
ШИМ (широтно-импульсная модуляция)

### □ Регулятор с векторным управлением без датчика обратной связи

Производительность таких устройств существенно увеличивается за счёт применения микропроцессорной электронной вычислительной системы и использования векторного управления FVC (⇒ Рис. 61).



↑ Рис. 61 Функциональная схема регулятора скорости с векторным управлением



↑ Рис. 62 Характеристики двигателя, управляемого от преобразователя частоты с векторным управлением без датчика обратной связи (например, ATV71 - Schneider Electric)

В самых современных регуляторах скорости такое устройство встроено при производстве на заводе изготовителя. Знание или оценка параметров механизма позволяют обходиться без датчика скорости для большинства применений. В этом случае, стандартный двигатель может использоваться с некоторыми ограничениями длительности работы на низких скоростях. Преобразователь частоты рассчитывает необходимые параметры на основании информации, полученной в результате измерений на клеммах двигателя (напряжение и ток). Этот способ управления гарантирует правильную работу без увеличения стоимости. Для достижения результата основные параметры механизма должны быть известны заранее. Во время ввода в действие наладчик установки должен ввести точные значения характеристик двигателя в параметры настройки регулятора, а именно:

- номинальное напряжение двигателя;
- номинальная частота статора;
- номинальный ток статора;
- номинальная скорость;
- коэффициент мощности двигателя.

По этим параметрам регулятор вычисляет характеристики ротора:  
 $L_m$ : индуктивность намагничивания;  $T_r$ : постоянная времени ротора.

При включении регулятор с векторным управлением без датчика обратной связи (типа преобразователя частоты ATV71 Schneider Electric) выполняет автоподстройку на двигатель и определяет параметры статора  $R_s$ ,  $L_f$ . Автоподстройка занимает некоторое время в зависимости от мощности двигателя (1-10 сек).

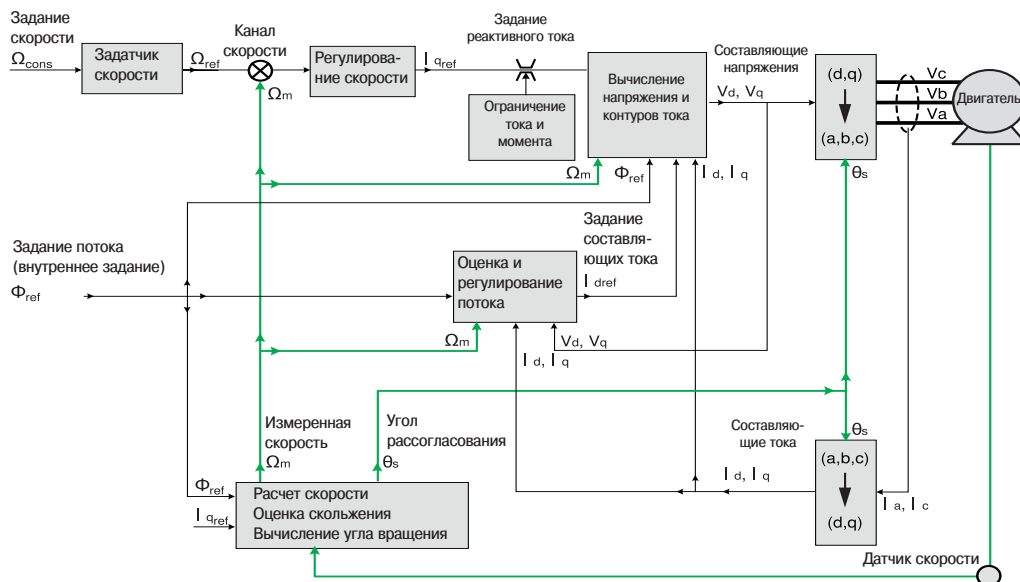
Эти измерения и вычисления запоминаются и позволяют устройству корректно работать в соответствии с выбранным профилем управления.

Осциллограмма (⇒ Рис. 62) иллюстрирует процесс ускорения двигателя с номинальным моментом нагрузки при управлении от преобразователя частоты без датчика обратной связи.

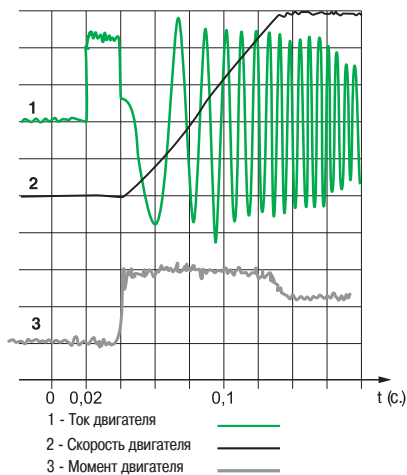
Можно отметить, что время, за которое достигается номинальный момент, менее 0,2 с. Сохраняется линейность ускорения. Номинальная скорость достигнута через 0,8 с.

### □ Векторное управление в замкнутой системе с датчиком обратной связи

Другим вариантом является векторное управление в замкнутой системе с датчиком обратной связи. Это решение основано на преобразовании Парка, позволяющем осуществлять независимое управление составляющими тока  $I_d$  и  $I_q$ , определяющими поток и вращающий момент двигателя (пропорциональный произведению токов  $I_d \times I_q$ ). Управление асинхронным двигателем становится аналогичным управлению двигателем постоянного тока.



↑ Рис. 63 Функциональная схема регулятора скорости с векторным управлением и датчиком обратной связи



↑ Рис. 64 Осциллограмма работы двигателя с номинальным вращающим моментом, подключенного к ПЧ с векторным управлением и датчиком обратной связи (например, ATV71 – Schneider Electric)

Это решение ( $\Rightarrow$  Рис. 63) является ответом на требования пользователей: высокий вращающий момент в течение переходных процессов, точность регулирования скорости и номинальный вращающий момент на нулевой скорости.

Максимальный переходный вращающий момент равен 2- или 3-кратному номинальному моменту в зависимости от типа двигателя.

Максимальная скорость может достигать удвоенного номинального значения или превышать его, в случае, если это допускает механика двигателя.

Этот тип управления может обеспечить показатели регулирования, сопоставимые или более высокие, чем обеспечивают лучшие модели регуляторов для двигателей постоянного тока. Поэтому для таких систем используются специальные двигатели, оборудованные на заводе производителе датчиками обратной связи и иногда внешней системой вентиляции.

Осциллограмма ( $\Rightarrow$  Рис. 64) показывает разгон двигателя с номинальным моментом нагрузки при питании от регулятора скорости с векторным управлением и датчиком обратной связи. Масштаб времени 0,1 секунды на деление графика. По сравнению с тем же самым устройством без датчика, увеличение производительности очевидно. Номинальный вращающий момент достигается за 80 мс. и скорость достигает заданного значения за 0,5 с.

В таблице ( $\Rightarrow$  Рис. 65) приведено сравнение характеристик регулятора в трех возможных конфигурациях.

### ■ Реверс и торможение

Чтобы изменить направление вращения, должен появиться внешний сигнал (на логическом входе регулятора, назначенного на эту функцию или через команду, переданную по коммуникационной шине), в результате чего произойдет изменение порядка коммутации силовых ключей инвертора и реверс двигателя. Существуют несколько вариантов реверса:

	Скалярное управление	С векторным управлением	
		Без датчика	С датчиком
Диапазон скорости	1 - 10	1 - 100	1 - 1000
Частота пропускания	5 - 10 Гц	10 - 15 Гц	30 - 50 Гц
Точность скорости	1%	1%	0.01%

↑ Рис. 65 Сравнительная таблица производительности регулятора скорости в трех возможных конфигурациях (например, ATV71 – Schneider Electric)

#### □ **Вариант 1: противовключение — мгновенное изменение порядка коммутации транзисторных ключей**

При изменении порядка чередования фаз на вращающемся двигателе изменяется направление вращения поля и возникает большое скольжение вследствие чего происходит резкое нарастание тока ПЧ до максимально возможной величины (внутреннее ограничение тока ПЧ). Из-за большого скольжения тормозной момент мал и внутренний регулятор ПЧ значительно уменьшит задание скорости. Как только двигатель достигнет нулевой скорости, произойдет реверс в соответствии с кривой разгона. Излишек энергии, не поглощенный нагрузкой и трением, рассеется в роторе.

#### □ **Вариант 2: изменение направления вращения поля с регулированием темпа замедления и без него**

Если вращающий момент механизма противоположен и по модулю превышает момент двигателя (естественное замедление быстрее, чем кривая замедления, установленная регулятором), скорость постепенно уменьшается, затем изменяет направление. Если вращающий момент механизма таков, что естественное торможение ниже установленного регулятором, двигатель работает в режиме рекуперативного торможения и возвращает энергию преобразователю. Однако наличие диодных мостов не позволяет передать энергию в сеть, происходит зарядка конденсаторов фильтра, увеличивается напряжение и срабатывает устройство безопасности, предотвращающее выделение энергии. Чтобы исключить перенапряжение, необходимо через тормозной ключ подключить тормозное сопротивление к блоку конденсаторов. Тормозной момент ограничен ёмкостью в звене постоянного тока преобразователя, скорость постепенно уменьшается и изменяется направление вращения.

Изготовители преобразователей поставляют тормозные резисторы разных номиналов для того, чтобы обеспечить соответствие мощности двигателя и рассеиваемой энергии. В большинстве моделей тормозной ключ встраивается в регулятор. Наличие тормозного резистора отличает регуляторы, которые могут обеспечивать управляемое торможение, поэтому этот метод торможения является наиболее экономичным.

Данный способ управления позволяет замедлять двигатель до остановки, не изменяя направление вращения.

#### □ **Вариант 3: длительная работа в режиме торможения**

Типичный пример применения этого варианта - это стенд для испытания двигателей. В этом режиме выделяющаяся энергия слишком велика и не может быть рассеяна на резисторах, поскольку вызывает чрезмерное повышение температуры.

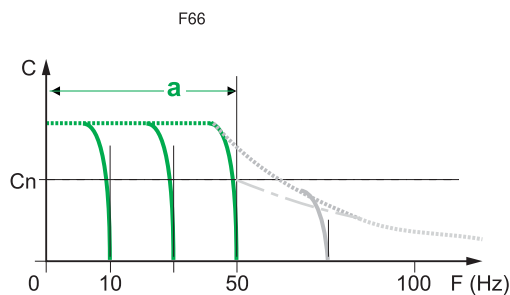
Большинство изготовителей предлагают системы, позволяющие возвращать энергию обратно в сеть.

В общем случае диодный мост в этих устройствах заменен управляемым полупроводниковым мостом, составленным из IGBT-транзисторов. Функционирование определяется многоуровневым управлением, которое позволяет получить форму тока, близкую к синусоидальной.

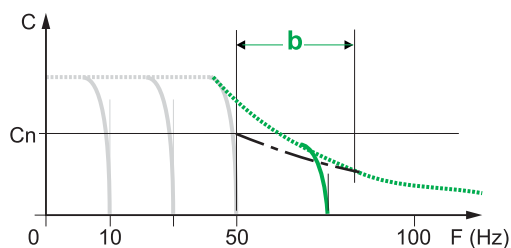
#### □ **Динамическое торможение**

Этот режим является малозатратным, поскольку может быть легко получен путем формирования на выходе преобразователя тормозного постоянного тока, питающего обмотки двигателя. Тормозной момент в этом случае не регулируется. Этот режим не очень эффективен, особенно на высоких скоростях, потому что темпом торможения нельзя управлять.

Данное решение позволяет осуществлять интенсивное торможение. Однако в связи с выделением большого количества энергии в роторе оно не всегда применимо.



↑ Рис. 66 Момент асинхронного электродвигателя при работе от преобразователя частоты (a) – зона работы с постоянным моментом



↑ Рис. 67 Момент асинхронного электродвигателя при работе от преобразователя частоты (b) – зона работы с постоянной мощностью

### ■ Возможные режимы работы

#### □ Режим работы с постоянным моментом

Если напряжение, подаваемое от регулятора на обмотки двигателя, изменяется по закону  $U/f = \text{const}$  или в соответствии с законами векторного управления, что позволяет достичь лучших результатов, то магнитный поток двигателя будет примерно постоянным, а вращающий момент – пропорциональным току. При этом двигатель может работать, развивая номинальный момент во всем диапазоне регулирования скорости (⇒ Рис. 66).

Однако, длительная работа с номинальным вращающим моментом на низкой скорости возможна только при независимой вентиляции двигателя, т.е. при использовании специального, а не общепромышленного короткозамкнутого асинхронного двигателя. Современные преобразователи частоты оснащены системами защиты, которые обеспечивают тепловую защиту двигателя, используя его тепловую модель, как функцию тока, времени рабочего цикла и скорости вращения, защищая таким образом двигатель.

#### □ Режим работы с постоянной мощностью

При частотном регулировании можно получить скорость вращения выше номинальной путем подачи на двигатель напряжения более высокой частоты, чем номинальная. С увеличением частоты величина питающего напряжения остается неизменной, поскольку выходное напряжение регулятора не может превышать напряжение силовой сети.

При этом наблюдается уменьшение вращающего момента, который обратно пропорционален скорости (⇒ Рис. 67).

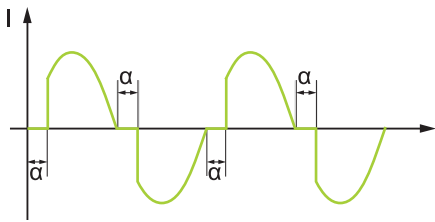
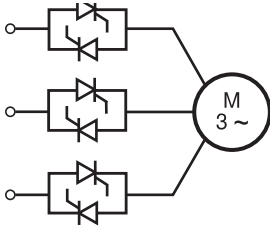
При работе выше номинальной скорости двигатель перестает развивать постоянный вращающий момент и работает с постоянной мощностью ( $P = C\omega$ ) насколько это допускают технические характеристики двигателя.

Максимальная скорость ограничена двумя параметрами:

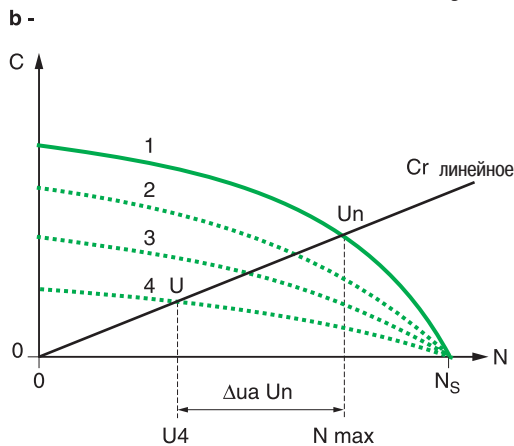
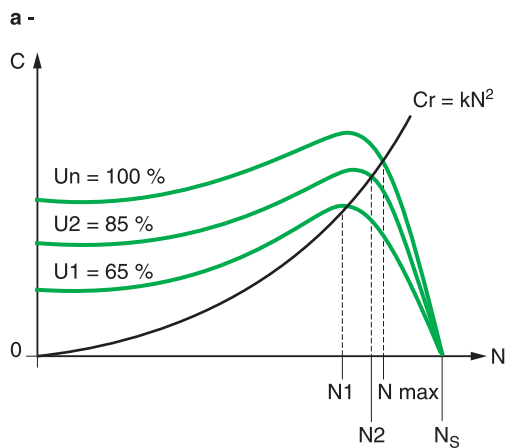
- механические возможности ротора;
- развиваемый вращающий момент.

При неизменном значении напряжения на двигателе, поскольку максимальный вращающий момент обратно пропорционален квадрату скорости (⇒ см. раздел «Электродвигатели и нагрузки»), работа в режиме постоянства мощности возможна только в ограниченном диапазоне, определяемом механической характеристикой механизма.

### 5.12 Регулятор напряжения для асинхронных двигателей



↑ Рис. 68 Силовая цепь



↑ Рис. 69 Допустимый момент асинхронного двигателя, работающего с квадратичной нагрузкой (вентилятор), при питании от преобразователя напряжения  
(а) - асинхронный короткозамкнутый двигатель  
(б) - двигатель асинхронный с повышенным скольжением

#### ■ Общие сведения

Устройство регулирования напряжения (⇒ Рис. 68), обычно используемое для управления освещением и отоплением, практически не применяется для регулирования скорости двигателя.

Режим работы иллюстрирован на Рис. 69.

Обычно применяются 3-фазные асинхронные двигатели, иногда используются однофазные для низких мощностей (приблизительно до 3 кВт).

Эти устройства используются для обеспечения плавного пуска и замедления асинхронных короткозамкнутых двигателей, обычно трехфазных, поскольку для этого не требуется высокий пусковой вращающий момент. Регулятор напряжения ограничивает пусковой ток, а также последующую просадку напряжения и появление механических ударов из-за резкого роста вращающего момента.

Типичные примеры применения этого устройства: пуск центробежных насосов, конвейеров, эскалаторов, систем конвейерной мойки автомобилей, механизмов с ременными передачами и т.д., а также регулирование скорости двигателей очень малой мощности или универсальных, как, например, в портативных электрических инструментах. В некоторых случаях, например при регулировании скорости маленьких вентиляторов, регуляторы напряжения заменяют преобразователи частоты двигателей переменного тока, как менее дорогие в применении.

При использовании в электроприводе насосов функция замедления полностью исключила появление гидроударов. При выборе этого устройства в качестве регулятора скорости должны быть приняты некоторые меры предосторожности. При работе двигателя потери пропорциональны вращающему моменту и обратно пропорциональны скорости. Принцип работы регулятора подразумевает уменьшение вращающего момента при уменьшении напряжения. Двигатель с высоким сопротивлением должен на низкой скорости рассеивать потери (до 3 кВт обычно могут). На более высоких скоростях необходимо использовать двигатель с независимым охлаждением. В двигателях с контактными кольцами (с фазным ротором) резисторы должны быть подобраны в соответствии с режимами работы машины. Решение должно быть принято специалистом, который может выбрать правильный двигатель для данного режима работы механизма.

На рынке представлены три типа устройств плавного пуска: с одной управляемой фазой для двигателей малой мощности, с двумя управляемыми фазами (третья подключена напрямую к сети) и со всеми управляемыми фазами. Первые два типа из-за высоких гармоник должны использоваться только для механизмов, которые работают с низкой нагрузкой.

#### ■ Общий принцип

Силовая цепь построена на основе 2 тиристоров, встречно-параллельно включенных на фазу (⇒ Рис. 68).

Изменение напряжения достигается путем изменения времени проводимости этих тиристоров. Чем позже происходит их включение, тем ниже величина напряжения на выходе.

Управление тиристорами контролируется микропроцессором, который также выполняет следующие функции:

- управление темпом роста и снижения управляемого напряжения. Замедление с заданным темпом выполняется только в случае, если время замедления меньше времени свободного выбега;
- ограничение тока;
- регулирование пускового момента;
- динамическое торможение;
- защита регулятора от перегрузок;
- защита двигателя от перегрева из-за перегрузок или слишком частых пусков;
- обнаружение несимметрии фаз или их отсутствия, а также отказа тиристоров.

Приборная панель отображает параметры и режимы работы и облегчает настройку, эксплуатацию и обслуживание.

## 5 - Устройства управления электродвигателями

### 5.12 Регулятор напряжения для асинхронных двигателей

### 5.13 Регулятор скорости синхронных двигателей

Некоторые регуляторы, например, Altistart (Schneider Electric) могут управлять запуском и остановкой:

- одного двигателя;
- нескольких двигателей вместе, в пределах диапазона номинальных значений;
- нескольких двигателей, включаемых последовательно.

Этот принцип управления обычно используется в насосных станциях, когда одно устройство плавного пуска запускает несколько дополнительных насосов по мере необходимости. В установленном режиме каждый двигатель подключен к силовой сети напрямую через контактор.

Только Altistart обладает патентованной технологией управления, позволяющей оценивать момент двигателя, и за счет этого обеспечить линейный темп разгона и замедления, а также, при необходимости, ограничить вращающий момент двигателя.

#### ■ Реверс и торможение

Реверс достигается путем изменения порядка чередования входных фаз устройства плавного пуска.

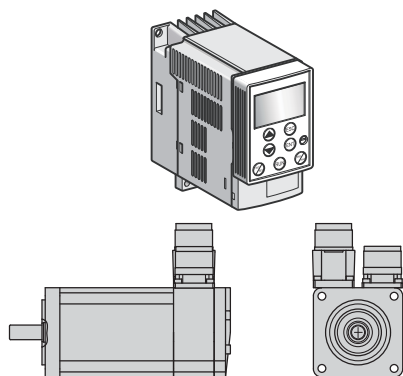
При этом происходит торможение противовключением, и вся энергия рассеивается в роторе двигателя. Поэтому данный режим работы не может быть частым.

#### ■ Динамическое торможение

Малозатратное динамическое торможение может быть достигнуто путем превращения регулятора в выпрямитель и подачи постоянного тока в электродвигатель.

В этом случае тормозной момент не регулируется, и торможение не очень эффективно, особенно при высоких скоростях. Управление темпом замедления не происходит. Однако это решение позволяет сократить время остановки механизма по сравнению с естественным. Поскольку энергия рассеивается в роторе, этот способ торможения не всегда применим.

## 5.13 Регулятор скорости синхронных двигателей



↑ Рис. 70 Синхронный регулятор скорости двигателя (Lexium + двигатель)

#### ■ Общий принцип

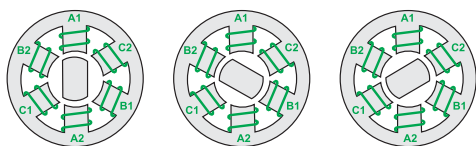
Регулятор скорости синхронных двигателей (⇒ Рис. 70) представляет собой комбинацию преобразователя частоты и синхронного двигателя с постоянными магнитами, оборудованного датчиком. Эти двигатели часто называют «бесщеточными двигателями».

Регуляторы скорости синхронных двигателей разработаны для специфических применений, таких как роботы или станки, где двигатели имеют малые размеры, и требуется высокая динамика с широкой полосой пропускания.

#### ■ Двигатель

Ротор двигателя оснащен постоянными магнитами из редкоземельных металлов для того, чтобы произвести сильное поле в маленьком объеме (см. раздел о двигателях для получения более детальных объяснений). На статоре размещена 3-фазная обмотка (⇒ Рис. 71).

Эти двигатели выдерживают высокие токи перегрузки для обеспечения быстрого ускорения. Они оснащены датчиком для измерения углового положения полюсов, необходимого для управления коммутацией напряжения на обмотках (⇒ Рис. 72).



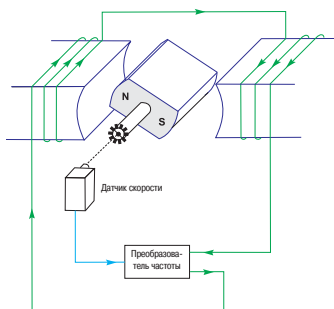
↑ Рис. 71 Упрощенное представление синхронного двигателя с постоянными магнитами статора - «бесщеточный двигатель»



## 5 - Устройства управления электродвигателями

5.13 Регулятор скорости синхронных двигателей

5.14 Регулятор для шагового двигателя



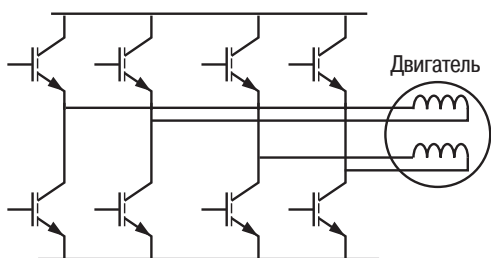
↑ Рис. 72 Упрощенное представление синхронного двигателя с постоянными магнитами в статоре «бесщеточный двигатель» с датчиком углового положения ротора

### ■ Преобразователь

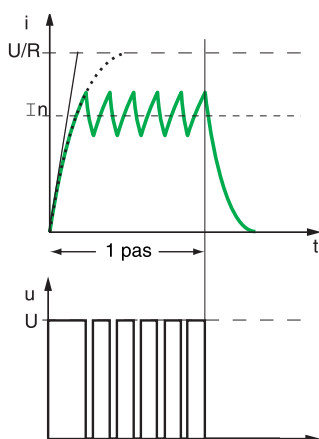
Преобразователь подобен преобразователю частоты для асинхронных двигателей и работает по аналогичным принципам. Он также имеет выпрямитель и широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) для того, чтобы обеспечить на выходе регулятора синусоидальную форму тока. Несколько преобразователей этого типа часто подключаются к одному источнику питания постоянного тока. На станке каждый регулятор управляет одним из двигателей, связанным с осью станка. Это решение позволяет использовать энергию торможения каждой оси.

Аналогично преобразователям частоты, тормозной резистор совместно с тормозным ключом используется для того, чтобы рассеивать избыточную энергию торможения. Электронные цепи блокировок, небольшие механические и электрические временные константы позволяют обеспечить высокие ускорения или более широкую полосу пропускания при высоких динамических характеристиках.

## 5.14 Регулятор для шагового двигателя



↑ Рис. 73 Рабочая диаграмма регулятора для шагового двигателя



↑ Рис. 74 Форма тока, формируемого при помощи ШИМ

### ■ Общий принцип

Регулятор, управляющий шаговым двигателем, обеспечивает электронную коммутацию мощности и конструктивно аналогичен преобразователям частоты для двигателей переменного тока. Он работает в разомкнутой системе без датчика обратной связи и используется для позиционирования.

### ■ Двигатель

Шаговые двигатели могут иметь переменное, постоянное или смешанное магнитное сопротивление (⇒ Глава 3 «Электродвигатели и нагрузки»).

### ■ Регулятор

Конструктивно регулятор подобен преобразователю частоты двигателей переменного тока (выпрямитель, фильтр и мост, собранный из силовых полупроводников).

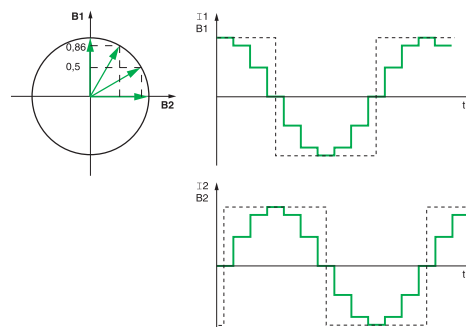
Выходная цепь питает катушки шагового двигателя (⇒ Рис. 73), как показано на примере биполярного шагового двигателя.

Однако, его функционирование существенно отличается, поскольку он предназначен для подачи в катушки постоянного тока. Иногда для этого используется широтно-импульсная модуляция (ШИМ), которая применяется для улучшения характеристик, в особенности времени нарастания тока, (⇒ Рис. 74) и позволяет расширить возможности и рабочий диапазон.

Принцип работы с дроблением шага (⇒ Рис. 75) основан на микрошагах (см. более детально в разделе о двигателях), искусственно умножающих количество положений ротора в соответствии с последовательностью импульсов в катушках. Токи в двух катушках подобны переменным токам, смещенным на 90°.

Результирующее поле представляет собой векторную композицию полей, созданных 2 катушками. Появляется возможность устанавливать ротор во все возможные положения.

Диаграмма представляет формирование питающего тока катушек B1 и B2. Позиции ротора обозначены вектором.



↑ Рис. 75 Диаграмма графика изменения тока и принцип управления дроблением шага с микрошагами

#### 5.15 Дополнительные функции регуляторов скорости

##### ■ Диалоговые возможности

Чтобы гарантировать хорошие характеристики работы двигателя, регулятор оснащен рядом датчиков, чтобы контролировать напряжение, ток и тепловое состояние. Эта информация необходима регуляторам для расширения их возможностей.

Выпускаемые в настоящее время преобразователи частоты и устройства плавного пуска обладают коммуникационными возможностями и могут подключаться к полевым шинам. Таким образом, можно удобно передавать информацию о состоянии механизма для использования в ПЛК и системах визуализации. Информация, которая используется в ПЛК для управления, может передаваться по тем же коммуникационным каналам.

Информация может содержать:

- задание скорости;
- сигналы запуска и остановки;
- исходные параметры регулятора или изменения параметров настройки во время работы;
- состояние регулятора (работа, остановлен, перегрузка, ошибка);
- аварийные сигналы;
- состояние двигателя (скорость, вращающий момент, ток, температура).

Диалоговые возможности также используются для связи с ПК, чтобы упростить настройку параметров при наладке (загрузка параметров) или сохранить начальные параметры.

##### ■ Встроенные функции

Чтобы эффективно работать с различными приложениями, регуляторы предоставляют возможности регулировки параметров и возможность настройки режимов, включая:

- времена разгона и замедления;
- профиль кривых разгона и торможения (линейный, S-или U-образный);
- переключение темпов разгона и торможения;
- уменьшение максимального вращающего момента по дискретному входу или заданному значению;
- пошаговая работа;
- управление тормозом для подъемно-транспортных операций;
- выбор предварительно заданных скоростей;
- суммирование сигналов на аналоговых входах для получения сигнала задания;
- переключение сигналов задания на входе преобразователя;
- ПИ-регулятор (например, по скорости или расходу);
- автоматическое замедление при потере питающего напряжения, позволяющее осуществить остановку двигателя;
- автоматический повторный пуск с поиском скорости (подхват на ходу);
- тепловая защита двигателя на основании тепловой модели, вычисляемой преобразователем;
- подключение датчиков температуры РТС, встроенных в двигатель;
- пропуск резонансных частот механизма;
- ограничение времени работы на пониженной скорости в насосных системах, в которых перекачиваемая жидкость используется для смазки насоса.

В современных регуляторах эти функции уже встроены производителем, например, Altivar (ATV71) Schneider Electric.

##### ■ Дополнительные карты

Для более сложных применений изготовители предлагают дополнительные карты, предназначенные для реализации специальных функций, например, векторного управления с использованием датчика, или готовых решений для определенных применений.

Таковыми картами являются:

- карта переключения насосов для обеспечения экономичной работы насосной станции, дающая возможность управления несколькими насосами, работающими на одну магистраль, от одного преобразователя;
- «мультидвигательная» карта;
- «карта мультипараметров» - автоматическая загрузка наборов параметров в регулятор;
- специальные карты, разработанные для специальных применений по требованию пользователя.

Некоторые изготовители также предлагают карты ПЛК, встраиваемые в регулятор, для решения простейших прикладных задач. Они предназначены для реализации несложных систем автоматизации, где отдельный ПЛК был бы слишком дорогим решением.

Например, карта ПЛК (карта встроенного контроллера) может быть вставлена в преобразователь частоты ATV71. Система, созданная на основе такого решения, может удовлетворять потребностям следующих промышленных установок:

- подъемно-транспортное оборудование;
- конвейеры;
- деревообрабатывающие машины;
- упаковочные машины;
- текстильные машины.

Некоторые возможные применения из множества доступных описаны ниже.

### ■ Позиционирование

ATV71, оснащенный датчиком скорости, показывает характеристики, близкие к системам на основе серводвигателя.

В этом случае регулятор скорости работает в режиме векторного управления потоком в замкнутой системе (⇒ Рис. 63).

Динамические свойства этой системы несколько хуже из-за более высокого момента инерции асинхронного двигателя и более низкого максимального вращающего момента.

Однако, оснащенный таким образом ATV71 показывает возможности позиционирования на уровне систем с серводвигателем.

Это решение имеет следующие преимущества:

- привлекательная стоимость решения;
- универсальность, поскольку те же самые устройства (двигатель и регулятор скорости) используются для различных применений;
- упрощение механической адаптации систем, так как большинство механизмов в настоящее время строится на основе асинхронных двигателей.

Функция позиционирования, которую выполняет карта встроенного контроллера, позволяет легко достичь заявленных характеристик по позиционированию, что покрывает потребности всех стандартных применений.

Команды управления передаются через полевую шину CANopen или Modbus.

Программирование является очень простым в применении, как показано на примере интерфейса (⇒ Рис. 76).

Это решение успешно использовалось для следующих механизмов:

- деревообрабатывающие машины;
- сварочные аппараты для труб;
- упаковочные машины.

### ■ Синхронизация подъемно-транспортных систем

Цель состоит в том, чтобы синхронизировать положение двух механизмов подъема (⇒ Рис. 77), сохраняя возможности независимой работы.

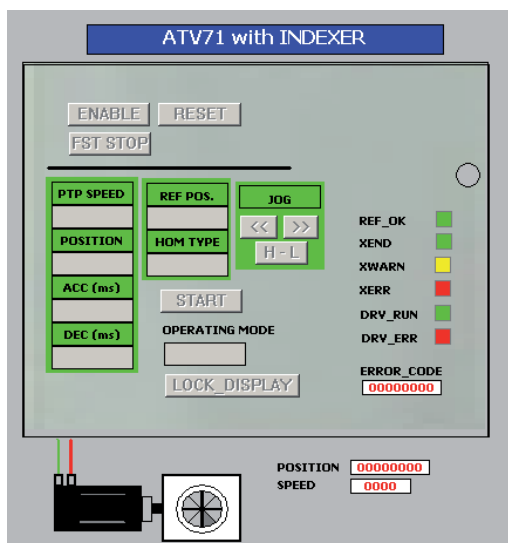
Синхронизация вертикального движения гарантируется картой встроенного контроллера, установленной в регулятор скорости.

Система организована следующим образом (⇒ Рис. 78): регулятор скорости ведущего устройства считывает задание позиции с потенциометра, затем производится обработка на ПИД-регуляторе карты встроенного контроллера, сравнивается рассчитанное значение позиции с заданием позиции и с текущей позицией двух механизмов подъема для того, чтобы выработать корректирующее задание для позиции ведомого двигателя.

Это корректирующее задание передается по шине CANopen на ведомый двигатель.

Карта встроенного контроллера также выполняет дополнительные функции, касающиеся специфики применения:

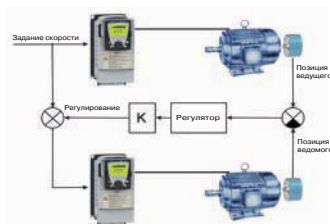
- управление устройствами безопасности;
- непрерывный контроль положения ведущего и ведомого двигателя;
- возможность работы выше номинальной частоты, чтобы уменьшить время цикла.



↑ Рис. 76 Пример интерфейса для функции позиционирования



↑ Рис. 77 Подъемно-транспортная система



↑ Рис. 78 Сервосистема

### 5.16 Регуляторы скорости и потребление энергии

#### ■ Коэффициент сдвига

##### □ Напоминание

Коэффициент сдвига ( $\cos \varphi$ ) является косинусом угла сдвига фазы тока по отношению к напряжению. Коэффициент сдвига рассматривается только для синусоидальных токов и напряжений одной и той же частоты. В случае наличия в потребляемом токе гармонических составляющих, что характерно для большинства регуляторов скорости, коэффициент мощности определяется сдвигом основной (первой) гармоники тока по отношению к основной гармонике питающего напряжения.

##### □ Вариант 1: тиристорный преобразователь: например, для двигателя постоянного тока

Коэффициент сдвига очевидно равен косинусу угла сдвига фазы тока. Другими словами, если выходное напряжение мало (низкая скорость),  $\cos \varphi$  низкий. Если выходное напряжение велико (высокая скорость),  $\cos \varphi$  близок к единице.

В реверсивном тиристорном преобразователе  $\cos \varphi$  становится отрицательным, если тиристорный преобразователь возвращает энергию в питающую сеть.

##### □ Вариант 2: диодный мост, например, выпрямитель в преобразователе частоты для асинхронных двигателей

Основная гармоника тока почти совпадает по фазе с питающим напряжением, и  $\cos \varphi$  близок к 1.

##### □ Вариант 3: преобразователь на IGBT транзисторах

Эта конфигурация используется для того, чтобы сформировать ток, наиболее близкий к синусоидальному. При правильной ШИМ  $\cos \varphi$  равен или близок к 1.

*Выпрямители в составе преобразователей частоты для асинхронных двигателей позволяют обеспечить лучший коэффициент сдвига, чем при питании двигателя от сети. Диодный мост, обычно встроенный в регуляторы этого типа, имеет коэффициент сдвига, близкий к 1. Встроенные конденсаторы звена постоянного тока служат накопителями реактивной мощности.*

#### ■ Коэффициент мощности

Коэффициент мощности - это отношение активной мощности **P** к полной мощности **S**.

$$F_p = P/S$$

Активная мощность **P** - результат умножения основной гармоники напряжения на ток и на  $\cos \varphi$ .

$$P = U \times I \times \cos \varphi$$

Полная мощность **S** равна произведению среднеквадратичного напряжения на среднеквадратичное значение тока. Если напряжение и ток искажены, среднеквадратичные значения каждого параметра будут тоже искажены.

При малом полном сопротивлении сети (что обычно имеет место), напряжение питания близко к синусоидальному, а ток, потребляемый транзисторами, имеет гармонические составляющие, тем большие, чем полное сопротивление сети меньше.

Среднеквадратичное значение тока можно представить следующей формулой:

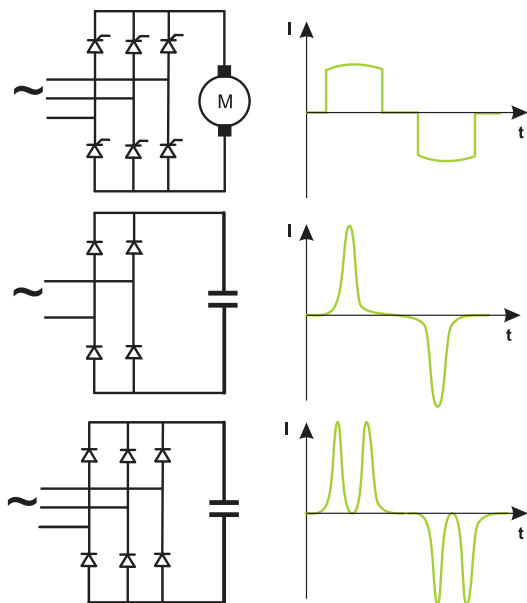
$$I_{\text{eff}} = (I_{1\_}^2 + I_{2\_}^2 + I_{3\_}^2 + \dots + I_{n\_}^2)^{0.5}$$

Полную мощность **S** при этом можно описать как: **S** =  $V_{\text{eff}} \times I_{\text{eff}}$

или:

$$S = V \times I_{\text{eff}}$$

Низкое отношение **P/S** показывает, что сеть перегружена несинусоидальным потребляемым током. Это приводит к перегреву проводников, и кабели должны быть выбраны в соответствии с примененным схемным решением.



↑ Рис. 79 Ток в цепи постоянного тока, заряжающий конденсатор

### □ Форма кривой тока (⇒ Рис. 79)

Зависит от схемного решения и характера нагрузки (индуктивная или емкостная).

### □ Вариант 1: тиристорный преобразователь: например, регулятор двигателя постоянного тока

Форма тока в этом случае приблизительно квадратная. Коэффициент мощности мал при низком выходном напряжении и увеличивается с ростом выходного напряжения, достигая значения приблизительно 0,7.

### □ Вариант 2: диодный мост, например, выпрямитель в преобразователе частоты для асинхронных двигателей

Форма тока богата гармониками, и коэффициент мощности мал независимо от скорости двигателя. Это приемлемо для низких мощностей, но становится недопустимым при увеличении мощности.

Чтобы уменьшить гармоники во входной и выходной цепях, в цепи постоянного тока последовательно с конденсаторами устанавливают дроссели. Они могут уменьшить амплитуду гармоник и существенно улучшить коэффициент мощности. Преобразователи частоты двигателей переменного тока с диодными мостами без входных/выходных дросселей или без фильтров в цепи постоянного тока имеют коэффициент мощности приблизительно 0,5.

### □ Вариант 3: преобразователь на IGBT транзисторах

Используется ШИМ, что позволяет получить ток, близкий к синусоидальному. Метод осуществления последовательной выборки позволяет получить ток, очень близкий по форме к волне синуса, и оптимальный коэффициент мощности, близкий к 1 (⇒ Рис. 80).

Из-за высокой стоимости такое решение не очень широко распространено в предложениях изготовителей.

### □ Потери регулятора

Рассматривая эффективность электропривода, нужно принять во внимание потери в преобразователе и потери в двигателе.

Полупроводники являются главными источниками потерь энергии:

- потери, определяемые пороговым напряжением полупроводника (примерно 1 В) и его внутренним сопротивлением;
- потери, связанные с частотой переключения.

Полупроводники с малым временем переключения имеют наименьшие потери. Это относится и к IGBT, которые имеют высокие частоты переключения.

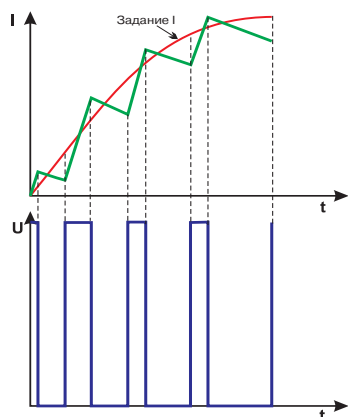
Преобразователи частоты имеют высокий КПД, превышающий 90%.

### □ Потери в двигателях

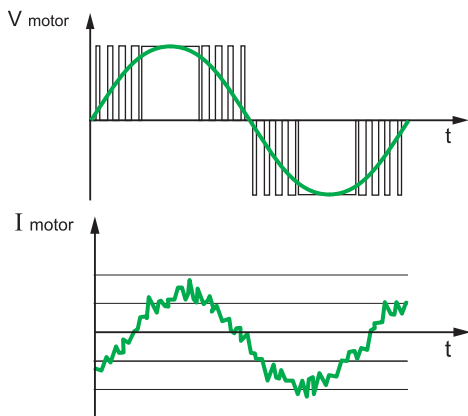
В двигателях, работающих от регуляторов, выделяются дополнительные потери из-за коммутации рабочего напряжения. Однако, в связи с тем, что частота коммутации высока, ток имеет почти синусоидальную форму, и дополнительные потери можно считать незначительными (⇒ Рис. 81).

### □ Электромагнитные помехи

Чтобы уменьшить помехи, производимые регуляторами скорости, изготовители встраивают в них фильтрующие устройства, которые позволяют обеспечить соответствие промышленным стандартам. Для получения более подробной информации рекомендуем обратиться к документу технической коллекции № 149: «Электромагнитная совместимость ЭМС для оборудования Schneider Electric»



↑ Рис. 80 ШИМ



↑ Рис. 81 Форма тока двигателя

#### 5.17 Регуляторы скорости, энергосбережение и обслуживание

##### ■ Выбор двигателя

Преобразователи частоты для двигателей переменного тока могут подключаться к стандартным двигателям без особых предосторожностей, кроме работы на низких скоростях, когда требуются двигатели с принудительной вентиляцией.

Однако, всегда предпочтительно выбрать двигатель с самым высоким КПД и  $\cos \phi$  (коэффициентом мощности).

Для низкой мощности целесообразным выбором является синхронный регулятор из-за его высокой эффективности. Дополнительная стоимость скоро возмещается.

##### ■ Типы нагрузки

Преобразователи частоты двигателей переменного тока являются лучшим решением для насосов с их механическими характеристиками (*Глава 3 «Электродвигатели и нагрузки»*).

По сравнению со ступенчатым регулированием или управлением заслонками, преобразователи частоты обеспечивают существенное сбережение энергии.

Экономию можно оценить, только хорошо зная особенности применения. Эксперты изготовителей имеют эти знания и предоставляют пользователям эту информацию.

##### ■ Улучшение эксплуатационных характеристик

Преобразователи частоты для двигателей переменного тока и устройства плавного пуска (*Глава 4 «Пуск и защита двигателей переменного тока»*) предотвращают механические удары в машине, таким образом, работа механизма может быть оптимизирована на стадии проектирования.

При управлении несколькими двигателями (например, насосная станция) производится адекватный контроль нагрузки каждого двигателя. Это позволяет регулировать время работы каждого двигателя, что увеличивает срок службы и надежность всего оборудования.

##### ■ Заключение

Выбор устройства плавного пуска или преобразователя частоты зависит от типа нагрузки, требуемой производительности и набора защит. Определение и выбор должны быть основаны на анализе функциональных требований технологической установки и требований, предъявляемых к двигателю.

Кроме упомянутых выше, в документации поставщиков регуляторов скорости часто приводятся следующие термины: постоянный вращающий момент, переменный вращающий момент, лошадиная сила, векторное управление, реверсивный регулятор скорости и т.д.

Эти термины описывают все данные, необходимые для выбора самого подходящего типа регулятора. Желательно спросить детальный совет экспертов изготовителей, которые могут помочь с выбором регулятора скорости с наилучшим соотношением «цена/производительность».

Неправильный выбор регулятора может привести к неудовлетворительной работе механизма.

# 5 - Устройства управления электродвигателями

## 5.18 Таблица выбора устройств управления двигателями










### 5.18 Таблица выбора устройств управления двигателями

В этой главе мы рассмотрели основные функции управления двигателями:

- изолирование;
- защита от короткого замыкания;
- защита от перегрузки;
- включение и управление.

Таблица на *Рис. 82* представляет наличие этих функций в разных семействах продуктов.

Таблица на *Рис. 83* подробно представляет возможности защит, реализованных в этих семействах продуктов.

Продукт	Контактор	Устройство плавного пуска	Преобразователь частоты	Предохранитель	Переключатель	Переключатель с предохранителем	Авт. выключатель линии	Авт. выключатель двигателя	Интеллектуальный пускатель
Функция									
Изолирование									
Отключающая способность									
Защита от короткого замыкания									
Защита от перегрузки									
Переключение режима пуска звезда/треугол.									
Плавный пуск									
Регулирование скорости									

↑ *Рис. 82* Функции, реализованные в разных семействах продуктов

## 5 - Устройства управления электродвигателями

5.18 Таблица выбора устройств управления двигателями

Тип устройства	Реле перегрузки	Реле с термо-датчиками	Реле контроля момента	Многофункциональное реле			Устройство плавного пуска	ПЧ
				Тепловое или электронное	Встроенное в пускатель	Отдельное		
<b>Тип функции</b>								
Несколько настроек защит	10 и 20			От 5 до 30	От 5 до 30	От 5 до 30		
Перегрузка по току								
Короткое замыкание на землю								
Дисбаланс фаз								
Останов после старта								
Работа без нагрузки				Модуль	Модуль			
<b>Тип функции</b>								
Дисбаланс фаз								
Потеря фазы								
Чередование фаз								
Пониженное напряжение								
Перенапряжение								
Коэффициент мощности								
<b>Температура</b>								
Термопара				Модуль	Модуль			
Термосопротивление PT100				Модуль	Модуль			
<b>Логика</b>								
Дискретные входы/выходы				3	10	От 10 до 20	9	От 7 до 35
Таймер								
<b>Управление</b>								
Прямой пуск								
Реверс								
Пуск звезда/треугольник								
Переключение обмоток								
Плавный запуск								
Регулирование скорости								
<b>Обслуживание / диагностика</b>								
Диагностика								
Журнал истории				Модуль	Модуль			
<b>Коммуникационная связь</b>								
Локальный дисплей				Модуль	Модуль			
Удаленный дисплей на коммуникационной шине				Модуль	Модуль			
Управление по коммуникационной шине				Модуль	Модуль			
<b>ПО конфигурирования Power Suite</b>								

↑ Рис. 83 Возможности защит, реализованные в продуктах



