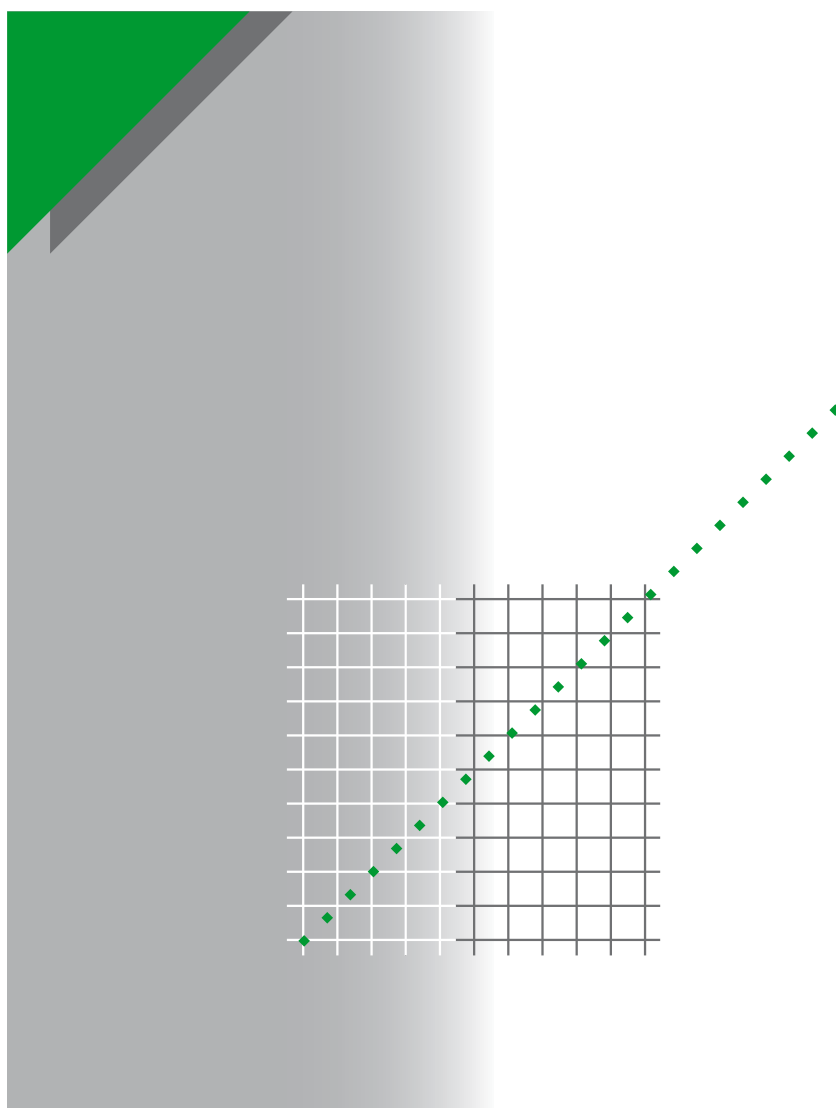


## Выпуск № 38

### Устройства плавного пуска и преобразователи частоты



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

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

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

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

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

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

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

## Выпуск № 38

### Устройства плавного пуска и преобразователи частоты

#### Даниэль КЛЕНЭ



Выпускник Национальной Школы Инженеров в городе Брест 1969 года. После работы в области приводных систем в компании Alstom в 1973 году поступил в Telemecanique в отдел преобразователей частоты в качестве инженера проектировщика. Он разрабатывал регуляторы скорости для двигателей постоянного тока для станков и приводы для передвижных платформ, а также участвовал в разработках первых преобразователей частоты для асинхронных двигателей. Во время работы с заказчиками в качестве менеджера проекта в составе подразделения Шнейдер Электрик по Промышленным Приложениям он приобрел опыт в области практических применений. В период с 1986 по 1990 годы он отвечал за выпуск приводов Altivar в Соединённых Штатах. Инженер, выпускник Высшей национальной школы электротехники, электроники, информатики, гидравлики и телекоммуникаций, доктор технических наук университета Тулузы. С 1980 по 1995 участвовал в проектировании преобразователей частоты марки Telemecanique. Впоследствии заведовал отделом фильтрации гармоник. В настоящее время работает с группой «Архитектура и системы» компании Schneider Electric в качестве эксперта по распределению электроэнергии.

---



# Устройства плавного пуска и преобразователи частоты

Наиболее распространённый путь пуска асинхронных двигателей – напрямую от линии питающего напряжения (прямой пуск). Эта технология часто подходит для широкого спектра механизмов. Однако она несет в себе ограничения, которые не позволяют ее применять в некоторых приложениях:

- Бросок тока при старте может вносить помехи в работу других приборов, подключенных к той же линии питания.
- Механическая ударная нагрузка в процессе старта, которая не допустима для устройства или может оказать вредное воздействие на комфорт и безопасность пользователя.
- Невозможно управлять разгоном и торможением.
- Невозможно регулировать скорость.

Устройства плавного пуска (УПП) и преобразователи частоты (ПЧ) способны решить вышеуказанные проблемы.

Электронные технологии дают больше гибкости и расширяют поле применения оборудования. Разумеется, важно при этом сделать правильный выбор. Цель данного издания «Технической Коллекции» - обеспечить развёрнутую информацию об этих устройствах для лёгкого выбора при проектировании, улучшении или замены коммутационного оборудования двигателя, собранного для управления и защиты.

## Содержание

	Стр.
<b>1. Краткая история и обзорение</b>	<b>4</b>
1.1. Краткая история	4
1.2. Обзорение: Основные функции УПП и ПЧ	4
<b>2 Основные рабочие режимы и основные типы приводов</b>	<b>6</b>
2.1. Основные рабочие режимы	6
2.2. Основные типы приводов	8
<b>3. Структура и компоненты УПП и ПЧ</b>	<b>10</b>
3.1. Структура	10
3.2. Компоненты	11
<b>4. Регулятор скорости для двигателей постоянного тока</b>	<b>14</b>
4.1. Основные принципы	14
4.2. Возможные режимы работы	15
<b>5. Преобразователь частоты для асинхронных двигателей</b>	<b>16</b>
5.1 Основные принципы	16
5.2. Закон регулирования $U/f$	17
5.3. Векторное управление	18
5.4. Регулятор напряжения для асинхронных двигателей	21
5.5. Синхронные сервоприводы	23
5.6. Шаговые приводы	23
<b>6. Дополнительные функции преобразователей частоты</b>	<b>25</b>
6.1. Диалоговые возможности	25
6.2. Встроенные функции	25
6.3. Дополнительные карты	26
<b>7. Заключение</b>	<b>27</b>

# 1. Краткая история и обзор

## 1.1. Краткая история

Первоначально для запуска электродвигателей и управления их скоростью использовались пусковые реостаты, механические приводы и вращающиеся устройства (в частности, производства Ward Leonard). Позже устройства плавного пуска (УПП) и преобразователи частоты (ПЧ) вышли на передовые позиции, как современные, рентабельные, надёжные устройства, обеспечивающие бесперебойную работу оборудования в промышленных применениях. Любой ПЧ или УПП является преобразователем энергии, модулирующим электрическую энергию, питающую двигатель. УПП используются исключительно с асинхронными двигателями. Они являются регуляторами напряжения. ПЧ обеспечивают плавное ускорение и замедление и обеспечивают скорость оптимально точно соответствующую рабочему режиму. Для питания двигателей постоянного тока используются регуляторы постоянного тока на основе управляемого выпрямителя, а для двигателей переменного тока – преобразователи частоты.

Исторически первыми появились регуляторы для двигателей постоянного тока. Надёжные и рентабельные преобразователи частоты появились в результате прогресса в силовой электронике и микроэлектронике. Современные преобразователи частоты могут использоваться для питания стандартных асинхронных двигателей с уровнем характеристик подобным лучшим регулируемым приводам постоянного тока. Некоторые производители даже предлагают асинхронные двигатели с преобразователями частоты, сделанными на заказ в одном корпусе. Это решение предназначено для небольших мощностей (только несколько киловатт).

Последние разработки по ПЧ и информация о современных направлениях производства будет представлена в конце данного издания «Технической Коллекции». Данные разработки значительно расширяют предложения по ПЧ и их опциям.

## 1.2. Обзор: Основные функции УПП и ПЧ

### Регулируемое ускорение

Увеличение скорости двигателя регулируется с использованием линейной или S-образной характеристики ускорения. Эта характеристика обычно настраиваемая, поэтому есть возможность выбора времени возрастания скорости в соответствии с конкретным случаем применения.

### Управление скоростью

Регулятор частоты сам по себе не является в то же самое время регулятором скорости. В простейших ПЧ принцип управления осуществляется на основе электрических характеристик двигателя с использованием регулирования мощности в системе без обратной связи, известной как «открытый контур».

Скорость двигателя определяется входной величиной (напряжение или ток), известной как заданное значение или уставка. Для конкретного заданного значения скорость может варьироваться в зависимости от помех (изменений в питающем напряжении, нагрузки, температуры).

Диапазон регулирования скорости определяется по отношению к номинальной скорости.

### Регулирование скорости

Регулятор скорости - это устройство управления приводом (см. Рис. 1). Он включает в себя систему управления с усилением мощности и контуром обратной связи, известным как «замкнутый контур».

Скорость двигателя определяется заданным значением.

Величина заданного значения постоянно сравнивается с сигналом обратной связи, который представляет собой значение скорости двигателя. Данный сигнал может поступать как от тахогенератора, так и от импульсного датчика, установленного на конце вала двигателя.

Если обнаруживается отклонение, вызванное изменением скорости, то приложенные к двигателю значения (напряжения и/или частоты) автоматически корректируются для того, чтобы вернуть скорость к её начальной величине.

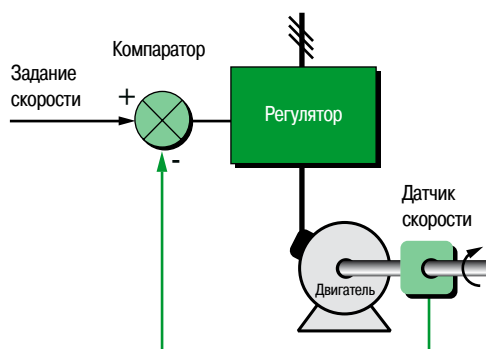


Рис. 1 : Принципы регулирования скорости

Управление с обратной связью создаёт, в сущности, устойчивость к внешним воздействиям.

Точность регулятора обычно выражается в % значения регулируемой величины по отношению к ее номинальному значению.

#### **Управляемое замедление**

Когда двигатель выключается, он тормозится под действием момента сопротивления механизма (остановка выбегом). УПП и ПЧ могут использоваться для управления замедлением по линейной или S-образной характеристике, которая обычно не зависит от кривой темпа ускорения.

Темп замедления может регулироваться, чтобы обеспечить требуемое время торможения от текущей скорости до промежуточной скорости или до полной остановки:

- если требуемое замедление быстрее, чем остановка выбегом, двигатель должен развить тормозной момент, который добавляется к моменту сопротивления механизма. Это известно, как электрическое торможение, которое может быть достигнуто как рекуперацией энергии в питающую сеть, так и рассеиванием ее на тормозном резисторе.

- если требуемое замедление дольше, чем остановка выбегом, двигатель должен развить крутящий момент больше, чем момент сопротивления механизма и продолжить вращать нагрузку до остановки.

#### **Изменение направления вращения**

Большинство современных приводов поддерживают эту функцию как стандартную.

Порядок чередования фаз напряжения, питающего двигатель, меняется автоматически путем изменения полярности сигнала задания частоты или посредством подачи команды на логический вход, или при помощи команды, передаваемой по коммуникационной сети.

#### **Динамическое торможение**

Этот тип торможения останавливает двигатель без фактического управления темпом замедления. В УПП и ПЧ для асинхронных двигателей, это достигается подачей постоянного тока в двигатель с помощью специальной коммутации силовых элементов. Так как вся механическая энергия рассеивается в роторе машины, данное торможение может быть только прерывистым. Для приводов двигателей постоянного тока, эта функция обеспечивается подключением резистора к клеммам якоря.

#### **Встроенная защита**

Современные приводы обычно обеспечивают защиту от превышения температуры для себя и двигателей. Микропроцессор использует измерения тока и данные скорости (если вентиляция двигателя зависит от его скорости вращения) для расчета роста температуры двигателя и посылает сигнал тревоги или сигнал на остановку в случае чрезмерного роста температуры.

Приводы, а в особенности преобразователи частоты, также часто обеспечиваются защитой:

- от короткого замыкания между фазами и между фазами и землей;
- от перенапряжения и провалов напряжения;
- от дисбаланса фаз;
- от работы на одной фазе.

## 2. Основные рабочие режимы и основные типы приводов

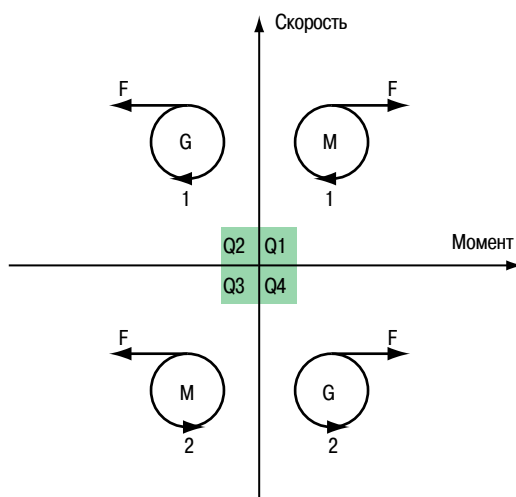
### 2.1. Основные рабочие режимы

В зависимости от электронного преобразователя, частотно-регулируемые приводы могут использоваться для работы двигателя в одном направлении вращения (в таком случае их называют **нереверсивными**) или для управления вращением в двух направлениях (в таком случае их называют **реверсивными**).

Приводы, которые способны регенерировать энергию двигателя, работающего в генераторном режиме (тормозной режим), могут сбрасывать эту энергию. Это достигается как сохранением энергии в линии питания (реверсивный входной мост), так и рассеиванием высвобождаемой энергии на тормозном резисторе с помощью тормозного ключа.

**Рисунок 2** иллюстрирует четыре возможных ситуации в диаграмме машины момент / скорость, сведенные в таблицу соответствия.

Следует отметить, что когда машина работает как генератор, должна быть приложена активная движущая сила. Такой режим работы используется, в частности, для торможения. Кинетическая энергия на валу машины, может как передаваться в линию питающего напряжения, так рассеиваться на резисторах или, для небольшой мощности, уходить в потери устройства.



Направление вращения	Режим работы	Момент -Т-	Скорость -п-	Продукт Т	Квадрант
1 (по часовой стрелке)	Двигатель	да	да	да	1
	Генератор		да		2
2 (против часовой стрелки)	Двигатель			да	3
	Генератор	да			4

**Рис. 2 :** Четыре возможных ситуации механизма в диаграмме момент – скорость

#### Нереверсивный привод

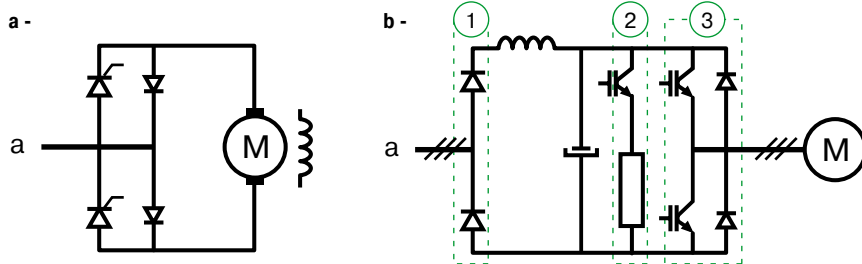
Данный тип привода довольно часто не имеет функцию рекуперации энергии в сеть или на тормозной резистор и используется для:

- Двигателя постоянного тока с прямым преобразователем (AC=>DC), состоящим из диодно-тиристорного моста (см. **Рис. 3а**)

- Двигателя переменного тока с непрямым преобразователем (с промежуточным звеном постоянного тока), включающем диодный мост на входе и инвертор частоты, который управляет работой механизма в квадранте 1 (см. **Рис. 3б**).

В некоторых случаях эта сборка может быть использована в реверсивных конфигурациях ( квадранты 1 и 3).





**Рис. 3** : Упрощённые схемы: [a] прямой преобразователь с комбинированным мостом; [b] не прямой преобразователь с (1) входным диодным мостом, (2) устройством торможения (сопротивление и тормозной ключ), (3) инвертор частоты

Непрямой преобразователь, включающий тормозной ключ и корректно подобранный резистор, является идеальным решением для моментального торможения (остановка или подъёмные механизмы, когда двигатель должен генерировать нисходящий тормозной крутящий момент, чтобы удерживать нагрузку).

Преобразователь с функцией рекуперации энергии незаменим при длительном режиме работы с активной приводной нагрузкой, например, в случае, когда двигатель используется для торможения на стенде.

#### Реверсивный привод

Данный тип привода может быть рекуперативным или нерекуперативным преобразователем.

Если он рекуперативный, машина функционирует во всех четырёх квадрантах и может обеспечивать сильное торможение.

Если он нерекуперативный, машина функционирует только в квадрантах 1 и 3.

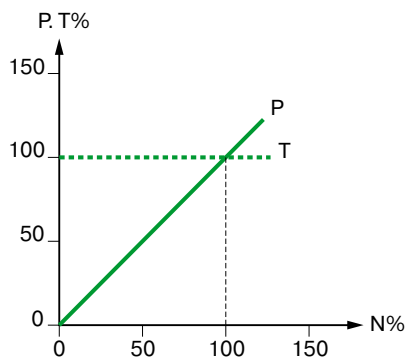
#### Работа с постоянным моментом

Работа с постоянным моментом – это работа, когда характеристика нагрузки в установившемся режиме такова, что требуемый момент двигателя приблизительно одинаков, независимо от скорости (см. Рис. 4). Данный рабочий режим характерен для конвейеров и месильных машин. Для этого типа применения, приводы должны обеспечивать высокий пусковой момент (по крайней

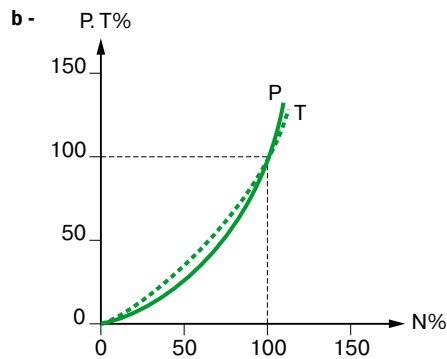
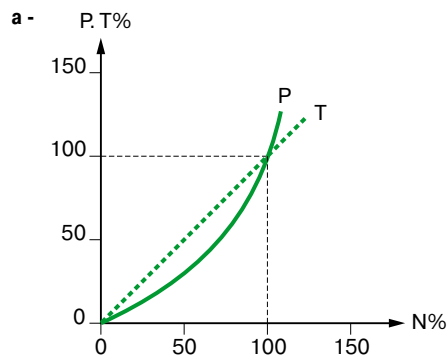
мере 1,5 номинальных крутящих момента) для того, чтобы преодолеть силу статического трения и раскрутить машину (инерция).

#### Работа с переменным моментом

Работа с переменным моментом – это работа, когда характеристики нагрузки таковы, что в установившемся режиме требуемый крутящий момент требует изменения с изменением скорости. Этот режим характерен в частности для винтовых нагнетательных насосов, у которых крутящий момент увеличивается линейно с увеличением скорости (см. Рис. 5a) или центрифуг (насосов и или вентиляторов), у которых крутящий момент изменяется в функции квадрата изменения скорости (см. Рис. 5b).



**Рис. 4** : График работы с постоянным моментом



**Рис. 5** : График работы с переменным моментом

Для приводов, созданных для данного типа применения, достаточен низкий пусковой крутящий момент (обычно 1.2 номинального крутящего момента). ПЧ обычно имеет дополнительные функции, такие как функция пропуска резонансных частот, при которых механизм входит в состояние самопроизвольной вибрации. Работа на частотах выше номинальной частоты невозможна из-за перегрузки, которая бы воздействовала в этом случае на двигатель и привод.

#### Работа с постоянной мощностью

Это особый случай переменного момента. Работа с постоянной мощностью это работа, когда крутящий момент, вырабатываемый двигателем, обратно пропорционален угловой скорости (см. **Рис. 6**). Это используется, например, для намотки с угловой скоростью, которая должна снижаться с увеличением диаметра бобины. Этот режим также применяется в шпиндельных двигателях на станках.

Рабочий диапазон при работе с постоянной мощностью определён естественными ограничениями: на низкой скорости - током, обеспечиваемым приводом,

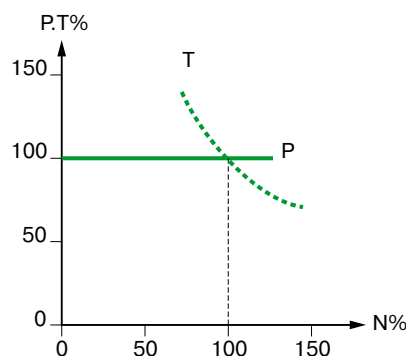


Рис. 6 : График функционирования с постоянной мощностью

а на высокой скорости - достижимым крутящим моментом двигателя. Вследствие этого, достижимый крутящий момент для асинхронных двигателей и коммутационная способность машин постоянного тока должны быть тщательно проверены.

## 2.2. Основные типы приводов

В данный раздел включены только основные современные приводы и стандартные технологические решения.

Существует множество типов схем частотных приводов: подсинхронный каскад, циклоконвертеры, коммутаторы тока, тормозные ключи и т.д.

Заинтересованные читатели найдут исчерпывающее описание в следующих публикациях: "Entraînement électrique à vitesse variable" (работа Джина Бонала и Гая Сегура, описывающая частотно-регулируемые приводные системы) и "Utilisation industrielle des moteurs à courant alternatif" (написана Джином Боналом описывает двигатели переменного тока в промышленном применении).

#### Управляемый выпрямитель для двигателей постоянного тока

Выпрямитель вырабатывает напряжение постоянного тока из однофазного или трехфазного источника питания переменного тока. При этом регулируется среднее значение напряжения.

Силовые полупроводники собраны по однофазной или трёхфазной мостовой схеме Грейца (см. **Рис. 7**). Мост может быть диодно-тиристорный (смешанный) или тиристорно-тиристорный (полный). Это последнее решение наиболее часто встречается для улучшения коэффициента формы тока.

Двигатель постоянного тока обычно имеет независимое возбуждение, за исключением линейки малых мощностей, где обычно применяются двигатели с постоянными магнитами.

Данный тип приводов подходит для большинства применений. Единственные ограничения налагаются двигателями постоянного тока, в частности сложностью с достижением высоких скоростей и необходимостью обслуживания (должны меняться щётки).

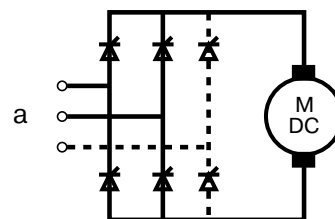


Рис. 7 : Схема управляемого выпрямителя для двигателей постоянного тока

Двигатели постоянного тока и работающие с ними регуляторы напряжения постоянного тока были первыми промышленными решениями.

Их применение в последнее десятилетие уменьшилось, так как центральное положение стали занимать преобразователи частоты.

Асинхронные двигатели фактически более износоустойчивые и экономичные, чем двигатели постоянного тока. В отличие от двигателей постоянного тока, асинхронные двигатели стандартизованы в корпусе промышленного исполнения IP55 и также практически защищены от воздействий окружающей среды (капель воды, пыли, опасных атмосферных воздействий и т.д.).

#### Преобразователи частоты для асинхронных двигателей

Инвертор частоты преобразует трехфазное напряжение переменного тока фиксированной частоты в трехфазное напряжение переменного тока переменной частоты (см. **Рис. 8**). Для маломощных приводов (несколько киловатт) может использоваться однофазное питание, а для больших мощностей – трёхфазное питание.

Некоторые маломощные ПЧ могут получать питание как от трёхфазной, так и от однофазной сети. Выходное напряжение ПЧ всегда трёхфазное. Фактически, однофазные асинхронные двигатели не особенно приспособлены к питанию от преобразователя частоты. Посредством преобразователей частоты можно осуществлять питание стандартных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором при сохранении всех преимуществ данных двигателей: единый стандарт, низкая стоимость, повышенная прочность, защита от воздействия окружающей среды и отсутствии необходимости обслуживания. Поскольку данные двигатели имеют охлаждение самовентиляцией, они имеют только ограничение по длительному функционированию под нагрузкой

при низкой частоте вращения, так как ухудшается их вентиляция. Если, данный режим функционирования необходим, то требуется специальный двигатель, оборудованный независимым вентилятором.

### Регулятор напряжения для пуска асинхронных двигателей

Регулятор напряжения преобразует напряжение питающей линии стандартной частоты переменного тока в напряжение с управляемым среднеквадратичным значением посредством изменения угла отпирания мощных полупроводников (два тиристора соединены встречно-параллельно в каждой фазе двигателя (см. Рис. 9)).

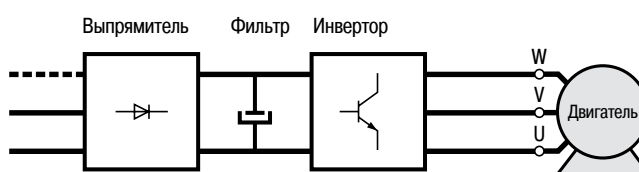


Рис. 8 : Упрощённая схема преобразователя частоты

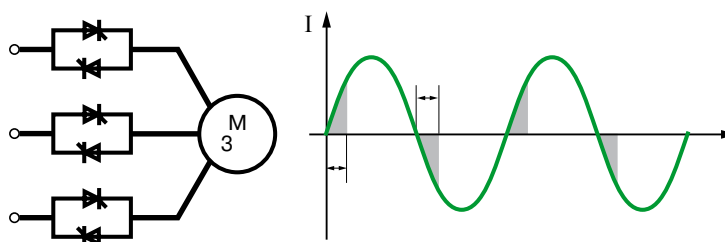


Рис. 9 : Устройство плавного пуска (УПП) асинхронных двигателей и форма питающего тока

## 3. Структура и компоненты УПП и ПЧ

### 3.1. Структура

УПП и ПЧ состоят из двух модулей, которые обычно заключены в один корпус (см. **Рис. 10**):

- модуль управления, который управляет функционированием прибора;
- силовой модуль, который снабжает двигатель питанием в форме электрической энергии.

#### Модуль управления

В современных УПП и ПЧ все функции управляются микропроцессором, который использует настройки, команды, посланные оператором или устройством управления, и результаты измерений скорости, тока и т.д.

Наряду с соответствующими специализированными интегральными схемами, вычислительные функции микропроцессора создают возможность чрезвычайно быстрого выполнения алгоритмов управления и в особенности обработки параметров управляемого механизма.

Микропроцессор использует информацию для управления ускорением и торможением, регулирования скорости и ограничения тока, а также вырабатывает команды управления силовыми модулями.

Защита и измерения параметров безопасности выполняются специальными микросхемами или схемами, интегрированными в силовые модули.

Ограничения скорости, темпы изменения скорости, ограничения тока и другие настройки осуществляются

с использованием встроенных панелей или ПЛК (через полевые шины) или компьютер. Точно также различные команды (пуск, стоп, наложить тормоз и т.д.) могут быть посланы через панель управления, ПЛК или компьютер.

Рабочие параметры, сигналы тревоги и данные ошибок могут быть отображены посредством индикаторов, светодиодов, сегментных индикаторов или ЖК-дисплеев. Они могут отображаться дистанционно через полевую шину на ЭВМ верхнего уровня.

Реле, обычно программируемые, позволяют получить информацию о:

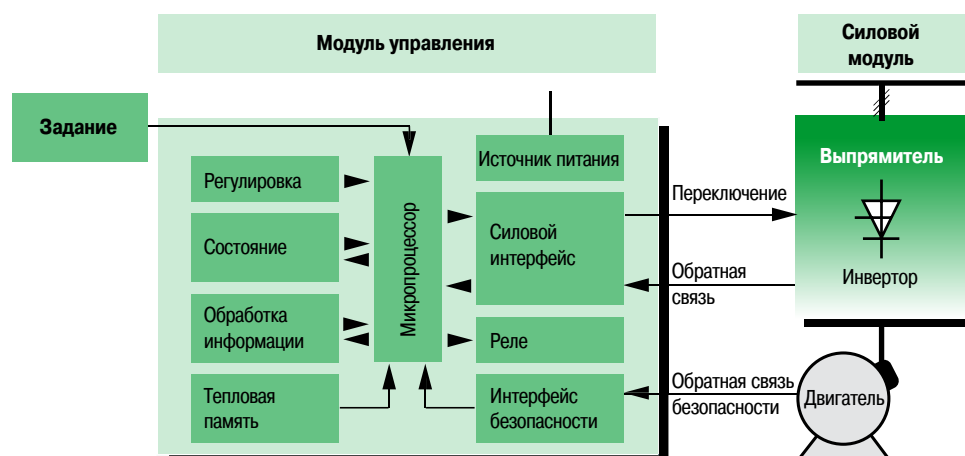
- дефектах (линии питания, температуры, прибора, последовательности, перегрузки и т.д.);
- контролируемых состояниях (порог скорости, состояние предварительной тревоги, окончание пуска).

Напряжения, требуемые для измерительных и управляющих цепей, поступают из блока питания, встроенного в привод и гальванически изолированного от силового питания.

#### Силовой модуль

Основными элементами силового модуля являются:

- Силовые компоненты (диоды, тиристоры, биполярные транзисторы с изолированным затвором и т.д.).
- Устройства для измерения напряжения и/или тока.
- Часто – элементы вентиляции.



**Рис. 10** : Структура преобразователя частоты

## 3.2. Компоненты

Силовые компоненты (см. **Рис. 11**) являются дискретными полупроводниками и так же, как механические переключатели, могут находиться в одном из двух состояний: включен или выключен.

Эти компоненты, собранные в силовой модуль, составляют инвертор, который обеспечивает питание электродвигателя с переменным напряжением и/или изменением частоты из стандартного напряжения и частоты питающей линии.

Силовые компоненты - краеугольный камень управления скоростью и прогресс, достигнутый в последние годы, привел к появлению экономичных частотных приводов.

### Напоминание

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

Полупроводник типа P получается добавлением к чистому кремнию в небольших пропорциях вещества с тремя электронами на внешней орбите. При этом в полученном веществе не хватает одного электрона для создания устойчивой структуры с восемью электронами, в результате чего появляется избыток положительных зарядов.

Полупроводник типа N получается добавлением к чистому кремнию вещества, атомы которого имеют пять электронов на внешней орбите. При этом создаётся избыток электронов, т.е. избыток отрицательных зарядов.

### Диод

Диодом называется неуправляемый полупроводник, состоящий из двух областей - P(анод) и N(катод), который позволяет протекать току только в одном направлении - от анода к катоду.

Ток протекает, когда напряжение на аноде имеет более высокий потенциал по отношению к катоду, при этом полупроводник действует, как включенный выключатель. Он перекрывает ток и действует как открытый выключатель, если потенциал анода становится меньше потенциала катода.

Основные характеристики диода:

#### ■ В открытом состоянии:

- падение напряжения, которое определяется пороговым напряжением и внутренним сопротивлением;
- максимально допустимый постоянный ток (порядок величины до 5000 ампер - среднеквадратическое значение для наиболее мощных компонентов);

■ В закрытом состоянии: максимально допустимое обратное напряжение, которое может достигать пиковых значений в 5000 В.

### Тиристор

Это управляемый полупроводник, состоящий из четырёх полупроводниковых переходов: P-N-P-N.

Он работает как диод при послышке электрического импульса на управляющий электрод, так называемый «затвор».

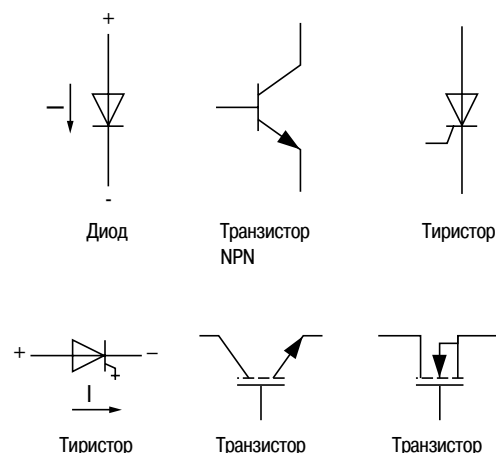


Рис. 11 : Силовые компоненты

Включение или зажигание возможно только, если существует положительное напряжение на аноде по отношению к катоду.

Тиристор меняет свое состояние на «выключенное» при прекращении протекания через него тока.

Энергия зажигания, приложенная к «затвору», не зависит от коммутируемого тока. Также нет необходимости поддерживать ток в «затворе», пока тиристор находится в проводящем состоянии.

Основные характеристики тиристора:

#### ■ В открытом состоянии:

- падение напряжения, определяемое пороговым напряжением и внутренним сопротивлением;
- максимально допустимый постоянный ток (порядок величины до 5000 ампер – среднеквадратическое значение для наиболее мощных компонентов).

#### ■ В закрытом состоянии:

- максимально допустимое прямое и обратное напряжение (может достигать пиковых значений 5000 В). Прямое и обратное напряжения обычно одинаковые.
- время запираания - это минимальное время в течение которого, при наличии приложенного положительного напряжения между анодом и катодом, может произойти самопроизвольное отпирание тиристора;
- ток затвора, при котором происходит отпирание тиристора.

Некоторые быстродействующие тиристоры характеризуются не одинаковым прямым и обратным напряжениями.

В стандартных схемах, они часто соединяются со встречно включенным диодом. Производители полупроводников используют данную схему для увеличения прямого напряжения, которое компонент может выдержать в закрытом состоянии.

В настоящее время вышеназванные компоненты полностью заменены полностью управляемыми тиристорами с коммутируемым затвором (GTO), силовыми транзисторами и, в особенности, биполярными транзисторами с изолированным затвором (IGBT).

### **Тиристор с коммутируемым затвором (GTO – Gate Turn-Off)**

Это разновидность быстродействующего тиристора, запираение которого может быть осуществлено по управляющему электроду. Положительный ток, приложенный к затвору, приведет к открытию полупроводника при условии, что потенциал на аноде выше, чем на катоде. Для того, чтобы GTO оставался в открытом состоянии при ограниченном падении напряжения необходимо поддерживать ток затвора. Тиристор блокируется сменой полярности тока затвора. Тиристоры с коммутируемым затвором используются в преобразователях очень высокой мощности, так как они способны контролировать высокие напряжения и токи (до 5000 вольт и 5000 ампер). Однако в связи с развитием технологии биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT) доля рынка тиристоров с коммутируемым затвором (GTO) сокращается.

Основные характеристики тиристоров с коммутируемым затвором:

- В открытом (проводящем) состоянии:
  - падение напряжения определяется пороговым напряжением и внутренним сопротивлением;
  - ток удержания стремится уменьшить прямое падение напряжения;
  - максимально допустимый постоянный ток;
  - ток запираения для прерывания основного тока устройства.
- В закрытом (непроводящем) состоянии:
  - максимально допустимое прямое и обратное напряжение, часто асимметричное как для быстродействующих тиристоров по тем же причинам;
  - время запираения – это минимальное время, в течение которого должен удерживаться ток запираения для предотвращения самопроизвольного опирания тиристора;
  - ток затвора, управляющий работой тиристорov с коммутируемым затвором, допускает рабочую частоту в несколько килогерц.

### **Транзистор**

Это управляемый биполярный полупроводник, состоящий из трёх полупроводниковых переходов – P-N-P или N-P-N. Ток может протекать только в одном направлении: от эмиттера к коллектору для P-N-P полупроводников и от коллектора к эмиттеру для N-P-N транзисторов. Транзисторы N-P-N типа часто выполнены по схеме Дарлингтона и способны работать на промышленных напряжениях. Транзистор может работать как усилитель. Значение тока протекающего через него определяется током управления, протекающего по его базе. Транзистор может также работать как статический ключ: открытого, когда нет тока базы и закрытого в режиме насыщения. Этот режим ключа используется в силовых цепях приводов.

Биполярные транзисторы могут использоваться при напряжениях до 1200 вольт и поддерживать токи, достигающие 800 ампер.

Данный компонент в настоящее время заменён в преобразователях биполярными транзисторами с изолированным затвором IGBT.

В рамках режима работы, который нас интересует, биполярные транзисторы имеют следующие характеристики:

- В открытом (проводящем) состоянии:
    - падение общего напряжения, определяемое пороговым напряжением и внутренним сопротивлением;
    - максимально допустимый постоянный ток;
    - коэффициент усиления по току (для перевода транзистора в состояние насыщения ток базы должен быть выше, чем основной ток, делённый на коэффициент усиления).
  - В запертом (не проводящем) состоянии - максимально допустимое прямое напряжение.
- Силовые транзисторы, используемые в управлении скоростью, могут работать на частотах в несколько килогерц.

### **Биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT)**

Это силовой транзистор, управляемый напряжением, которое подается на управляющий электрод, называемый «затвором», который изолирован от силовой цепи. Отсюда и название – «Биполярный транзистор с изолированным затвором» (Insulated Gate Bipolar Transistor).

Это устройство характеризуется очень малой мощностью управления для обеспечения циркуляции больших токов.

В настоящее время этот компонент используется в качестве силового ключа в большинстве преобразователей частоты до самых высоких уровней мощности (несколько мегаватт). Его вольт-амперные характеристики аналогичны характеристикам биполярных транзисторов, но его энергетические показатели и частота коммутации значительно выше, чем у других полупроводниковых приборов. Характеристики этих транзисторов постоянно улучшаются и в настоящее время уже доступны компоненты для высокого напряжения (свыше 3 киловольт) и больших токов (несколько сотен ампер).

Основные характеристики биполярных транзисторов с изолированным затвором:

- Напряжение управления обеспечивает проводимость (отпирает) или блокировку (запирает) устройства.
- В открытом (проводящем) состоянии:
  - падение напряжения, определяемое пороговым напряжением и внутренним сопротивлением;
  - максимально допустимый постоянный ток.
- В закрытом (не проводящем) состоянии: максимально допустимое прямое напряжение.
- Биполярные транзисторы с изолированным затвором, используемые в регулировании скорости, могут работать на частотах в несколько десятков килогерц.

### Транзисторы структуры Металл-Оксид-Полупроводник (MOS)

Принцип функционирования данного транзистора значительно отличается от перечисленных выше за счет модификации электрического поля в полупроводнике, получаемой методом поляризации изолированного затвора. Отсюда и название «Металло-Оксидный-Полупроводник». Его использование в регуляторах скорости ограничивается применением на низких напряжениях (частотные приводы с аккумуляторным питанием) или применениями малой мощности. Поскольку в противном случае поверхность кремния должна выдерживать высокое напряжения в закрытом состоянии и низкое падение напряжения в открытом состоянии, это оказывается экономически нецелесообразно.

Основные характеристики металл-оксид-полупроводник транзисторов:

- Напряжение управления обеспечивает проводимость (отпирает) или блокировку (запирает) устройства.
- Во включенном состоянии:
  - внутреннее сопротивление;
  - максимально допустимый постоянный ток.
- В выключенном состоянии - максимально допустимое прямое напряжение (может превосходить 1000 В).

Металл-оксид-полупроводник транзисторы, используемые в регулировании скорости, могут работать на частотах в несколько сотен килогерц.

Они нашли свое применение практически во всех импульсных источниках питания в качестве дискретных компонентов, а также в интегральных модулях, включающих в себя силовые компоненты (MOS) и командно-управляющие устройства.

### Интеллектуальный силовой модуль (IPM)

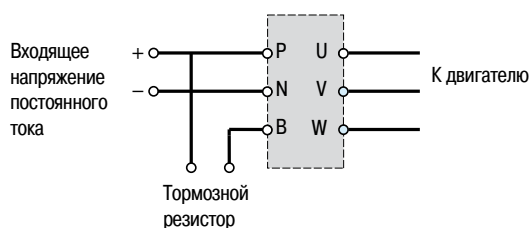
Строго говоря, это не полупроводник, но сборка IGBT транзисторов. Этот модуль (см. **Рис. 12**) объединяет в едином компактном корпусе инверторный мост с IGBT транзисторами и низковольтный электронный блок управления этими полупроводниками.

Модуль IPM содержит:

- Семь IGBT транзисторов (шесть - для инверторного моста и один - для тормозного резистора)
- Схему управления IGBT транзисторами
- Семь силовых диодов, объединенных с IGBT транзисторами для обеспечения протекания тока
- Защиту от короткого замыкания, превышения тока и повышенной температуры
- Электрическую изоляцию для этого модуля

Диодный выпрямительный мост обычно тоже входит в состав этого модуля.

Данная сборка является наилучшим способом подключения и управления с учетом ограничений для IGBT транзисторов.



**Рис. 12** : Интеллектуальный силовой модуль



## 4. Преобразователь частоты/ регулятор для двигателей постоянного тока

### 4.1. Основной принцип

Система генератор-двигатель, созданная Вардом Леонардом, была первым регулятором скорости для двигателей постоянного тока.

Эта система состоит из приводного двигателя (обычно асинхронного) и генератора постоянного тока с регулируемым возбуждением, который используется для управления одним или несколькими двигателями постоянного тока. Возбуждение генератора регулируется электромеханическим устройством (Amplidyne), Rototrol, Regulex) или статической системой (магнитный усилитель или электронный регулятор). В настоящее время эти устройства более не выпускаются и заменены полупроводниковыми статическими регуляторами скорости, которые выполняют те же функции при более высоком уровне технических характеристик.

Электронные регуляторы скорости получают питание из сети переменного тока и подают на двигатель регулируемое напряжение постоянного тока. Для питания цепи возбуждения используется диодный или тиристорный мост (обычно однофазный).

Силовая схема питания якоря также является выпрямителем. Поскольку напряжение питания двигателя должно изменяться, то выпрямитель должен быть управляемым, то есть должен состоять из силовых компонентов, проводимостью которых можно управлять (тиристоры). Выходное напряжение управляется путем большей или меньшей величины времени проводящего состояния в течение каждого полупериода. Чем больше время задержки отпирающего импульса тиристора по отношению к точке естественного отпираания, тем меньше действующее значение напряжения на якоре двигателя и, следовательно, меньше скорость двигателя (закрывание тиристора происходит автоматически, когда ток достигает нулевого значения).

Для регуляторов малой мощности или регуляторов, питаемых от аккумуляторов, силовая цепь может выполняться из силовых транзисторов (ключей). При этом выходное напряжение регулируется за счет изменения времени проводящего состояния транзисторных ключей при постоянном питающем напряжении. Этот режим работы известен как широтно-импульсная модуляция (ШИМ).

#### Регулирование

Регулирование – это точное поддержание величины скорости на заданном уровне, при воздействии внешних помех (изменение момента нагрузки, напряжения сети, температуры). Однако в процессе ускорения или в случае перегрузки, ток не должен достигать значения опасного для двигателя или преобразовательного устройства.

Внутренний контур управления привода удерживает ток в безопасном диапазоне. Это значение ограничения тока может быть доступно при настройке регулятора для соответствия конкретному применяемому двигателю.

Значение задания скорости от задающего устройства подается на регулятор через аналоговый или дискретный вход или по полевой шине или посредством любого другого устройства, вырабатывающего задание на скорость в виде электрического сигнала. Значение задания скорости может быть постоянным или изменяться в процессе цикла.

Регулируемые кривые ускорения и замедления плавно меняют значение напряжения сигнала задания до величины, соответствующей заданной скорости. Эта кривая может быть любой формы. Настройка кривых определяет длительность ускорения и торможения.

В замкнутой системе фактическая скорость постоянно измеряется с тахогенератором или импульсным датчиком и сравнивается с заданным значением.

Если обнаруживается отклонение, то электронное устройство управления будет корректировать скорость. Скорость может изменяться в диапазоне от нескольких оборотов в минуту до максимальной возможной скорости. Точность регулирования скорости этом диапазоне при возможном изменении нагрузки, колебании напряжения сети, изменении температуры и т.д. достигает значения 1% при аналоговом регулировании и 1/1000 при цифровом регулировании.

Этот способ регулирования может также применяться, используя данные измерения напряжения двигателя с учетом тока, протекающего через двигатель. В этом случае показатели качества регулирования (диапазон и точность) немного ниже. Точность составляет несколько % при изменении нагрузки от нуля до номинального значения.

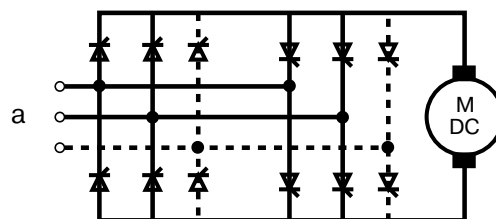
#### Реверс или вращение в обратном направлении и рекуперативное торможение

Чтобы изменить направление вращения, необходимо изменить полярность напряжения на якоре двигателя или на обмотке возбуждения. Это может быть исполнено с использованием контакторов (данное решение сейчас почти не используется) или статически путем изменения полярности напряжения на выходе преобразователя или изменением направления тока возбуждения. Использование последнего решения редко из-за большой постоянной времени обмотки возбуждения.



При необходимости управляемого торможения, или если оно обусловлено характером нагрузки (активный крутящий момент), энергия должна возвращаться в линию питания. В процессе торможения, преобразователь работает в режиме инвертера или, другими словами, направление протекания тока отрицательное.

Регуляторы, способные выполнять эти две функции (реверс и рекуперативное торможение), оборудованы двумя мостами, включенными встречно-параллельно (см. **Рис. 13**). Каждый из этих мостов может инвертировать напряжение и ток так хорошо, соответственно, и знак энергии, циркулирующей между основной сетью и нагрузкой.



**Рис. 13** : Схема регулятора с реверсом и рекуперативным торможением для двигателя постоянного тока

## 4.2. Возможные режимы работы

### Режим работы с постоянным моментом

При постоянном возбуждении, скорость вращения двигателя определяется напряжением приложенным к якорю двигателя. Управление скоростью возможно в диапазоне от 0 до номинального напряжения двигателя, который выбирается на основе напряжения питающей сети. Вращающий момент двигателя пропорционален току якоря и номинальный вращающий момент машины может быть получен непрерывно на всех скоростях вращения.

### Режим работы с постоянной мощностью

Когда на якорь двигателя подано номинальное напряжение, можно увеличить скорость двигателя путём снижения тока возбуждения. В этом случае регулятор скорости должен содержать управляемый выпрямитель для питания цепи возбуждения. Напряжение ротора в этом случае будет оставаться постоянным и равным номинальному напряжению, а ток возбуждения регулируется для получения необходимой скорости.

Мощность выражается, как:

$$P = E \times I,$$

где:

$E$  – ЭДС двигателя, примерно равная напряжению питания;

$I$  – ток якоря.

Для данного тока ротора мощность, поэтому, будет постоянной при всех значениях скорости, но максимальная скорость ограничена двумя параметрами:

- Механическими ограничениями, связанными с якорем и особенно с максимальной центробежной силой, которую может выдержать коллектор электродвигателя.
- Ограниченными коммутационными возможностями машины.

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

## 5. Преобразователь частоты для асинхронных двигателей

### 5.1. Основной принцип

Преобразователь частоты для двигателей переменного тока получает питание от силовой цепи фиксированного напряжения и частоты и преобразует его в переменное регулируемое напряжение с переменной частотой, в зависимости от заданной скорости.

Для того, чтобы обеспечить постоянство перегрузочной способности 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

Силовая часть ПЧ состоит из выпрямителя и инвертора, который использует выпрямленное напряжение для получения напряжения переменной амплитуды и частоты (см. Рис.8).

Для соответствия стандартам Европейского Союза и маркировке СЕ необходима установка сетевого фильтра перед выпрямительным мостом.

В качестве выпрямителя обычно используется диодный выпрямительный мост с фильтром, состоящим из одного или более конденсаторов, в зависимости от мощности ПЧ. Для обеспечения защиты цепей от перегрузки при подаче питания в устройство встроена схема ограничения тока заряда конденсаторов. В некоторых преобразователях для ограничения бросков тока при зарядке конденсаторов фильтра, которые заряжаются до амплитудного значения напряжения питающей сети (около 540 В при питающем напряжении 380В) используется тиристорный мост.

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

Мост инвертера, подключенного к этим конденсаторам, выполнен на шести мощных транзисторах (обычно IGBT), укомплектованных обратными диодами.

Этот тип регулятора разработан для питания асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Преобразователь частоты Altivar компании Schneider Electric может управлять двигателями разной мощности и способен работать как с одним двигателем, так и с несколькими двигателями, подключенными параллельно.

- Выпрямителя с конденсаторным фильтром
- Инвертора с шестью IGBT транзисторами и шестью диодами
- Тормозного ключа, который связан с тормозным резистором, обычно вынесенным за габариты изделия
- Схемы управления IGBT транзисторами
- Микропроцессорного блока управления инвертором
- Внутренних датчиков для 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 значения требуются для управления и защиты системы ПЧ - двигатель
- Источника низкого напряжения для питания электронных схем

Это импульсный источник питания, подключенный к клеммам конденсаторов фильтра для возможности использования сохранённого ими заряда.

В ПЧ Altivar это техническое решение использовано для обеспечения нечувствительности к краевременным провалам в сети питающего напряжения, что позволяет обеспечивать великолепные технические характеристики при питании ПЧ от сети невысокого качества.

#### Регулирование скорости

Выходное напряжение формируется из импульсов разной ширины, получаемых путем коммутации постоянного напряжения на выходе выпрямителя таким образом, что результирующей переменной ток будет практически синусоидальным (см. Рис. 14). Эта технология, известная как ШИМ (широтно-импульсная модуляция), позволяет получить равномерное вращение на невысокой скорости и ограничивает возрастание температуры.

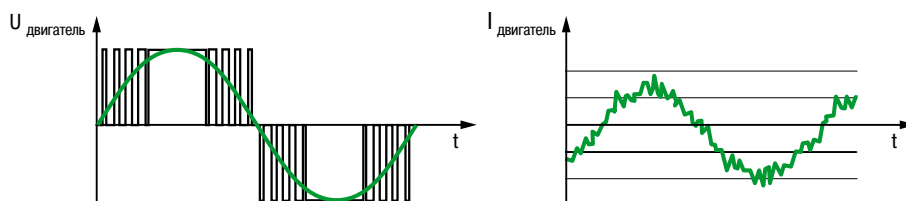


Рис. 14 : Широтно-импульсная модуляция

Частота коммутации транзисторов выбирается на основе компромисса, поскольку она должна быть высокой для снижения токовых пульсаций и акустических шумов в двигателе без значительного увеличения потерь на выпрямительном мосту и на транзисторах инвертора. Управление двумя кривыми - разгона и торможения.

### Встроенные защиты

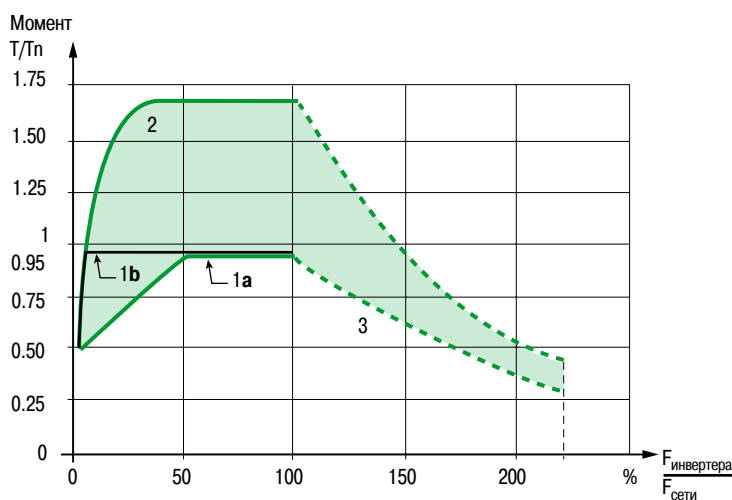
Преобразователь частоты защищает себя и двигатель от перегрева, блокируя работу до того момента, пока не будет восстановлена допустимая для работы температура.

Также обеспечивается защита от любого типа помех или проблем, которые могут воздействовать на нормальную работу устройства, таких как повышенное или низкое напряжение или отсутствие входной или выходной фазы. В некоторых ПЧ выпрямитель, инвертер, тормозной ключ, схемы управления и защиты от короткого замыкания размещаются в едином «интеллектуальном силовом модуле» (IPM).

## 5.2. Управление U/f

При данном законе регулирования сигнал задания скорости определяет частоту на выходе инвертора и, следовательно, на двигатель, который развивает заданную скорость вращения. Напряжение находится в прямом соотношении с частотой (см. **Рис. 15**). Этот тип управления часто называют управлением U/f или скалярным управлением.

Если не обеспечивается коррекция, то фактическая скорость изменяется с изменением нагрузки, которая ограничивает рабочий диапазон. Грубая компенсация может быть осуществлена путем учета падения напряжения на внутреннем сопротивлении обмотки статора двигателя, чтобы ограничить падение скорости при работе под нагрузкой.



**Рис. 15** : Характеристики момента ПЧ (Altivar71)

- 1** – длительный полезный момент двигателя с самовентиляцией (**a**) и двигателя принудительно охлаждаемого (**b**)
- 2** – динамический момент (< 1,7  $T_n$  в течение 60 секунд)
- 3** – момент при превышении номинальной скорости (работа на постоянной мощности)

### 5.3. Векторное управление

Качество регулирования может быть значительно улучшено при использовании управления основанного на управлении вектором магнитного потока (FVC) (см. Рис. 16). Большинство современных ПЧ имеют эту функцию, как стандартную. Знание или возможность оценить значения скорости в большинстве применений. В этом случае может использоваться стандартный двигатель с учетом обычных ограничений в отношении длительной работы на низкой частоте.

Преобразователь частоты на основании информации, полученной в результате измерений на клеммах двигателя (напряжение и ток), рассчитывает необходимые параметры.

Данный тип управления позволяет получить приемлемые уровни технических характеристик без увеличения стоимости.

Для достижения этих уровней рабочих характеристик требуется знать некоторые параметры двигателя.

Во время ввода в эксплуатацию наладчик оборудования должен в частности ввести данные с шильдика двигателя в соответствующие параметры ПЧ, а именно:

- UNS: Номинальное напряжение двигателя
- FRS: Номинальная частота тока статора
- NCR: Номинальный ток статора
- NSP: Номинальная скорость
- COS: Косинус двигателя

Преобразователь частоты использует эти величины для расчёта характеристик ротора ( $L_m$  и  $T_r$ ).

#### Регулятор с векторным управлением магнитным потоком без датчика обратной связи

При включении питания регулятор с векторным управлением магнитного потока без датчика обратной связи (типа преобразователя частоты ATV71 Schneider Electric) выполняет автоподстройку на подключенный двигатель для определения параметров статора  $R_s$ -активное сопротивление и  $L_f$ - индуктивность фазы. Длительность автоподстройки будет варьироваться от 1 до 10 секунд в зависимости от мощности двигателя. Эти измерения и вычисления запоминаются и позволяют устройству корректно работать в соответствии с выбранным профилем управления.

Осциллограмма на Рисунке 17 иллюстрирует процесс ускорения двигателя при номинальной нагрузке и векторном управлении от преобразователя частоты без энкодера. Можно отметить, что номинальный момент достигается очень быстро (менее чем за 0,2 секунды) и ускорение линейное. Номинальная скорость достигается за 0,8 секунды.

#### Управление вектором магнитного потока в замкнутом контуре с датчиком обратной связи

Другая форма векторного управления магнитным потоком – управление в замкнутом контуре с датчиком обратной связи.

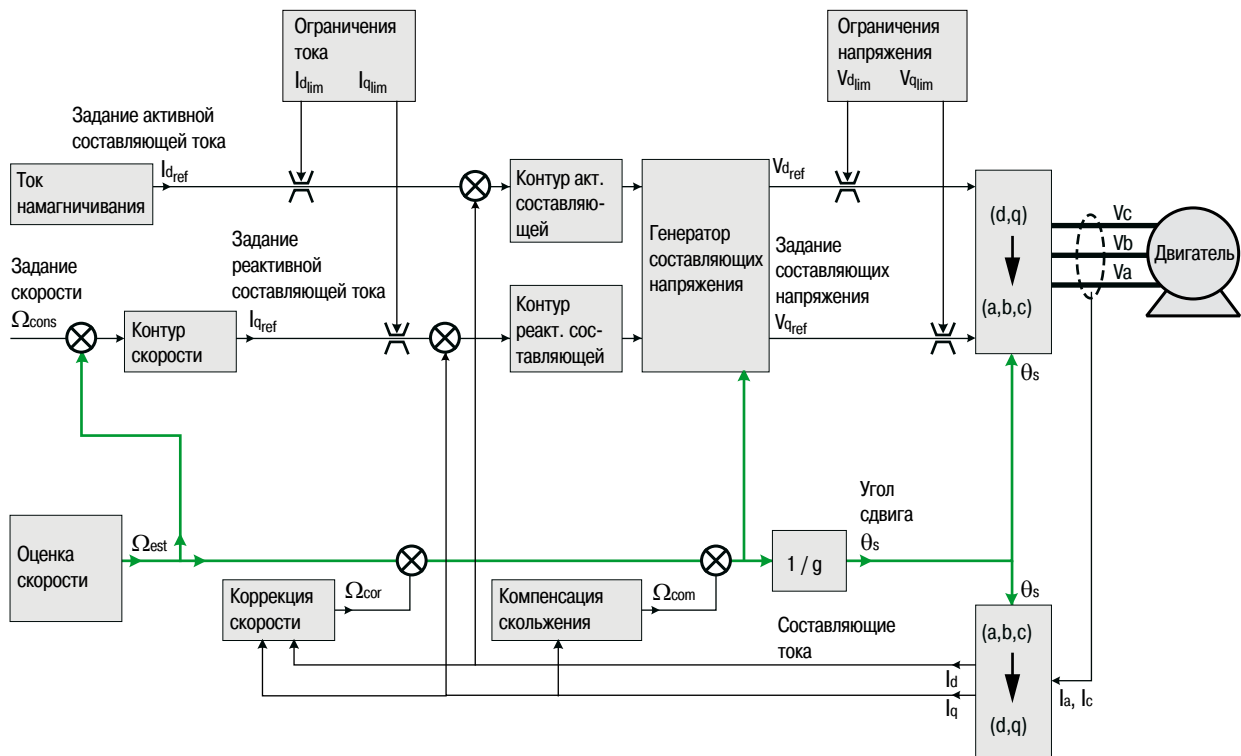


Рис. 16 : Функциональная схема регулятора скорости с векторным управлением

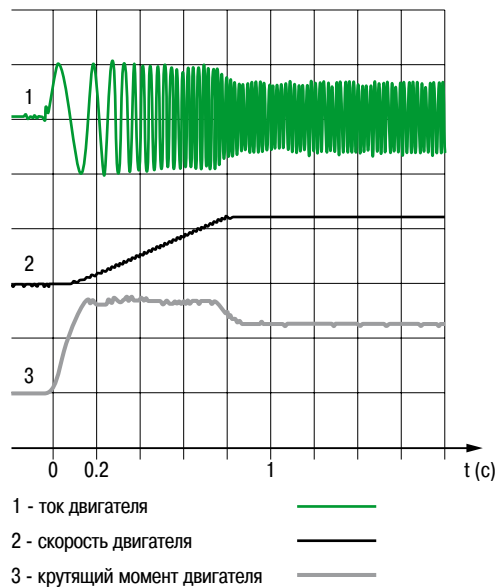


Рис. 17 : Характеристики двигателя, подключенного к приводу с векторным управлением без датчика обратной связи по скорости (Altivar71 Schneider Electric)

Это решение основано на преобразовании Парка, позволяющем осуществлять независимое управление составляющими тока  $I_d$  и  $I_q$ , определяющими поток и вращающий момент в двигателе (пропорциональный произведению токов  $I_d \times I_q$ ).

Управление асинхронным двигателем становится аналогичным управлению двигателем постоянного тока. Это решение (см. Рис. 18) удовлетворяет требованиям для сложных применений: высокая динамика при переходных процессах, точность поддержания скорости, номинальный крутящий момент при нулевой скорости.

Максимальный динамический вращающий момент равен 2-х или 3-х кратному значению номинального крутящего момента в зависимости от типа двигателя.

Максимальная скорость может достигнуть удвоенного значения номинальной скорости или даже превышать его, если это допускает механика двигателя.

Этот тип управления имеет очень высокую полосу пропускания и может обеспечить показатели регулирования, сопоставимые и даже превосходящие лучшие образцы регуляторов для двигателей постоянного тока.

С другой стороны, используются двигатели нестандартной конструкции, ввиду наличия энкодера и в некоторых случаях требуется принудительная внешняя вентиляция.

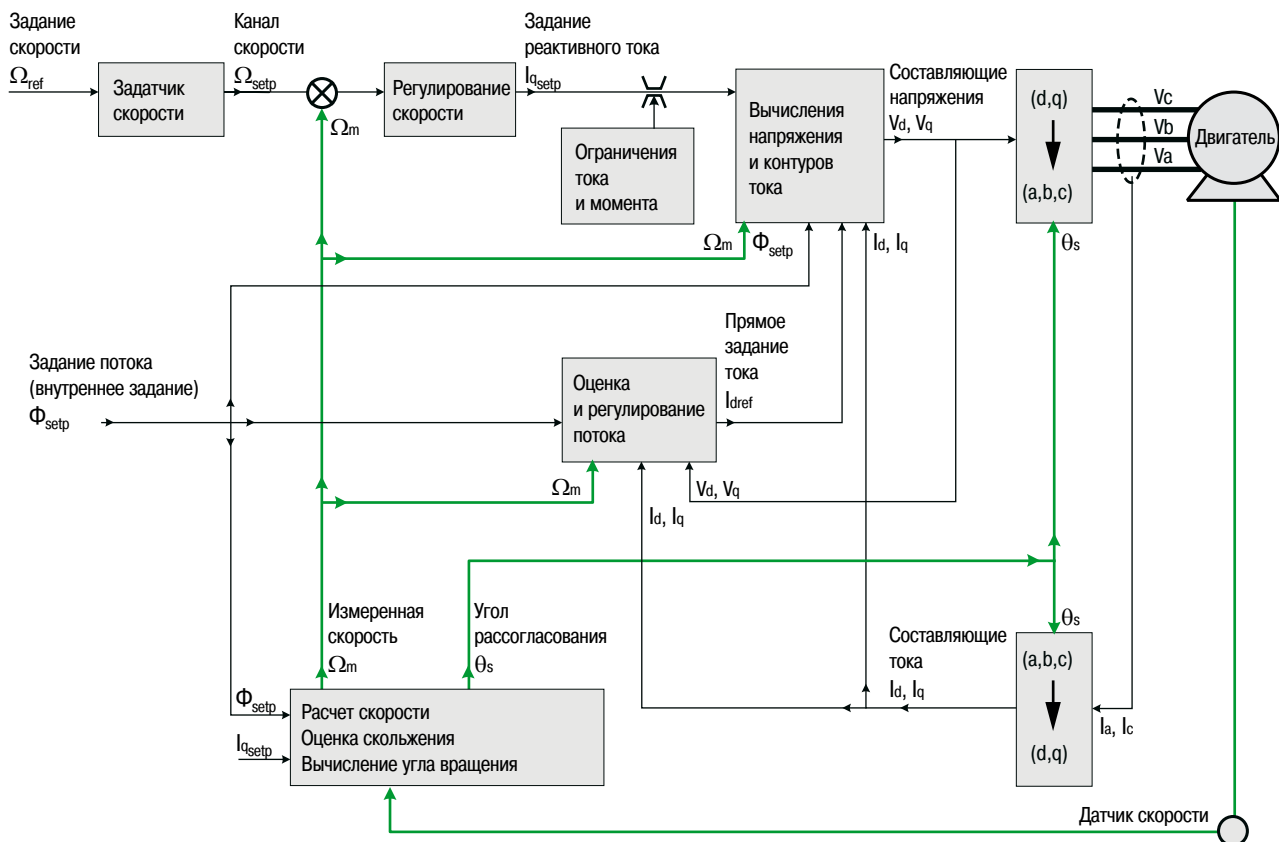
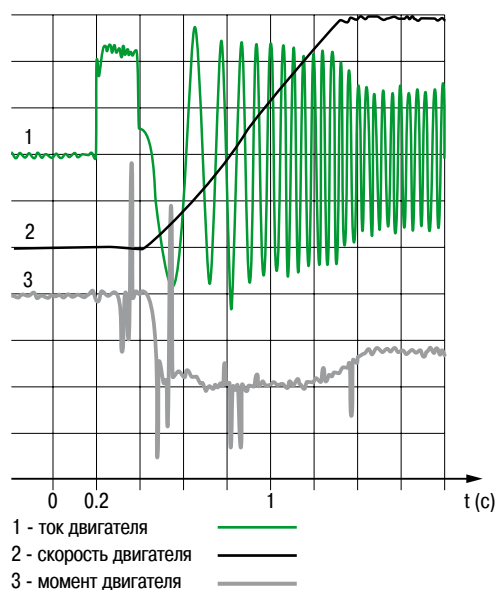


Рис. 18 : Функциональная схема регулятора скорости с векторным управлением и датчиком обратной связи



**Рис. 19** : Осциллограмма процесса ускорения двигателя, с номинальной нагрузкой и подключенного к ПЧ с векторным управлением (тип Altivar71 Schneider Electric)

Осциллограмма на **Рисунке 19** иллюстрирует ускорение двигателя с номинальным моментом нагрузки при питании от ПЧ с векторным управлением магнитного потока с датчиком обратной связи. Временная шкала графика составляет 0,1 секунды на деление. По сравнению с той же конфигурацией без энкодера имеет место значительное улучшение рабочих характеристик. Номинальный крутящий момент достигается через 80 миллисекунд и скорость достигает заданного значения за 0,5 секунды. В качестве заключения, таблица на **Рисунке 20** даёт сравнение технических характеристик привода в трёх возможных конфигурациях.

### Реверс и торможение

Изменение направления вращения осуществляется посредством подачи внешней команды (на логический вход ПЧ, назначенный на эту функцию, или по коммуникационной шине), в результате чего произойдет изменение последовательности коммутации силовых ключей инвертора и реверс двигателя. Существует несколько вариантов реверса:

■ **Вариант 1:** Противовключение – мгновенное изменение порядка коммутации транзисторных ключей.

При изменении порядка чередования фаз на вращающемся двигателе изменяется направление

вращения поля и возникнет большое скольжение вследствие чего произойдет быстрое увеличение 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, рассеивается в роторе.

■ **Вариант 2:** Изменение направления вращения поля с регулированием темпа замедления или без него. Если момент сопротивления механизма такой, что естественное торможение происходит быстрее, чем по кривой замедления, установленной в ПЧ, двигатель будет действовать как гиперсинхронный генератор и возвращать энергию приводу, преобразователь продолжит снабжать энергией двигатель. Скорость будет постепенно снижаться до нуля, после чего произойдет реверс.

И наоборот, если момент сопротивления механизма такой, что естественное торможение медленнее, чем по кривой замедления, установленной в ПЧ, двигатель будет работать в генераторном режиме, возвращая энергию в ПЧ. Однако наличие диодного моста на входе ПЧ не позволяет возвращать энергию в сеть. При этом происходит зарядка конденсаторов фильтра, возрастание напряжения на них и блокировка работы ПЧ. Чтобы избежать этого и ограничить напряжение до приемлемой величины, к клеммам конденсаторов должен быть подключен резистор через тормозной ключ. В этом случае тормозной момент будет ограничен только емкостью конденсаторов в звене постоянного тока ПЧ. Скорость постепенно уменьшается и происходит реверс.

Для такого типа применения производители ПЧ поставляют тормозные резисторы с параметрами, подобранными в соответствии с мощностью двигателя и величиной энергии, которую необходимо рассеять. В большинстве случаев, тормозной ключ стандартно интегрирован в состав ПЧ. Наличие тормозного резистора отличает ПЧ, которые могут обеспечить управляемое торможение, поэтому данный тип торможения особенно экономичен. Из этого следует, что данный способ управления позволяет замедлять двигатель до остановки без изменения направления вращения.

### Динамическое торможение постоянным током

Этот режим является экономичным, поскольку может быть получен простым путем формирования на выходе ПЧ напряжения постоянного тока, питающего обмотки двигателя.

	Скалярное управление	Векторное управление без энкодера	Векторное управление с энкодером
Скоростной диапазон	от 1 до 10	от 1 до 100	от 1 до 1000
Полоса пропускания	от 5 до 10 Гц	от 10 до 15 Гц	от 30 до 50 Гц
Точность скорости	+/- 1%	+/- 1%	+/- 0,01%

**Рис. 20** : Сравнительная таблица рабочих характеристик привода в трёх возможных конфигурациях (ATV71 Schneider Electric)

Тормозной момент в этом случае не регулируется и не очень эффективен, в особенности на высоких скоростях, поскольку нет возможности управлять темпом торможения. Тем не менее, это практическое решение для снижения времени естественной остановки механизма. В связи с выделением большого количества энергии в роторе это решение имеет ограниченное применение.

#### Возможные режимы работы

##### ■ Режим работы с «постоянным моментом»

Если напряжение, подаваемое от ПЧ на обмотки двигателя, изменяется по закону  $U/f = \text{const}$  или в соответствии с законом векторного управления, что еще лучше, то магнитный поток двигателя будет постоянным, а вращающий момент двигателя – пропорциональным току. При этом двигатель может работать с номинальным моментом во всем диапазоне скоростей (см. Рис. 21). Однако длительная работа на низкой скорости возможна только в том случае, если двигатель работает с устройством принудительного охлаждения, т.е. для этого требуется специальный двигатель. 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 существует возможность получить скорость вращения двигателя выше номинальной путем подачи на двигатель номинального напряжения с частотой выше номинальной.

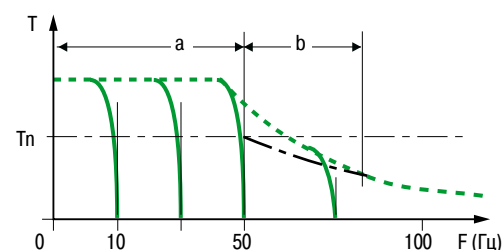


Рис. 21 : Момент асинхронного электродвигателя при работе от ПЧ: [a] - зона работы с постоянным моментом; [b] - зона работы с постоянной мощностью

Поскольку выходное напряжение инвертора не может превышать напряжение питающей сети, вращающий момент двигателя уменьшается обратно пропорционально увеличению частоты (см. Рис. 21). При работе выше номинальной скорости двигатель прекращает развивать постоянный вращающий момент и работает с постоянной мощностью ( $P = C\omega$ ) насколько это допускают технические характеристики двигателя.

Максимальная скорость ограничена двумя параметрами:

- Механическим ограничением, связанным с ротором
- Запасом по вращающему моменту. При неизменном напряжении на двигателе максимальный момент изменяется обратно пропорционально квадрату скорости, поэтому работа в режиме «постоянной мощности» возможна только в ограниченном диапазоне, определяемом характеристикой механического момента механизма.

## 5.4. Регулятор напряжения для асинхронных двигателей

Устройство регулирования напряжения, обычно используемое для освещения и нагрева, практически не применяется для регулирования скорости двигателя (см. Рис. 22). Обычно применяются трехфазные асинхронные двигатели, иногда используются однофазные для малых мощностей (приблизительно до 3 киловатт).

Эти устройства часто используются для пуска и остановки двигателя в применениях, не требующих высокого пускового момента.

Они ограничивают пусковой ток, вызывающий провалы в сети питающего напряжения и механические удары, которые возникают при внезапном приложении момента в случае прямого пуска двигателя.

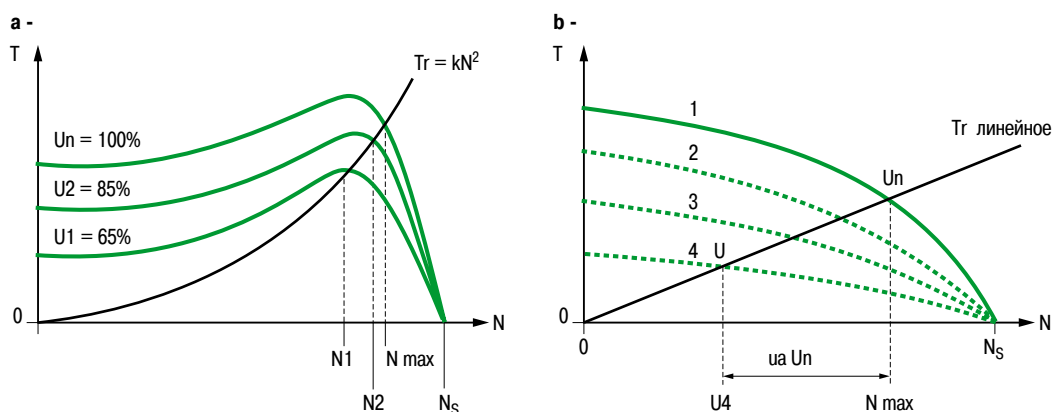


Рис. 22 : Допустимый момент для асинхронных двигателей, управляемых регулятором напряжения при квадратичной нагрузке (вентилятор): [a] - двигатель с короткозамкнутым ротором; [b] - двигатель с повышенным скольжением



Наиболее часто встречающиеся применения данного регулятора – запуск центробежных насосов и вентиляторов, ременных конвейеров, механизмов с ременной передачей, эскалаторов, систем конвейерной мойки машин и т.д. и в управлении скоростью двигателей очень малой мощности или универсальных двигателей, как, например, в портативных электрических инструментах.

В некоторых случаях, например, при регулировании скорости маленьких вентиляторов, регуляторы напряжения заменяются преобразователями частоты, как более экономичными в применении.

При использовании в электроприводе насосов, функция плавной остановки может быть использована для предотвращения гидроударов.

При выборе этого устройства в качестве регулятора скорости должны быть приняты некоторые меры предосторожности. При работе двигателя потери в нем пропорциональны вращающему моменту и обратно пропорциональны скорости. Регулятор работает по принципу снижения напряжения для того, чтобы сбалансировать момент сопротивления нагрузки на требуемой скорости. Двигатели с клеткой, обладающей повышенным сопротивлением, должны, поэтому, быть способны рассеивать свои потери на маленькой скорости (маленькие двигатели до 3 киловатт обычно выполняют эти требования). Для более высоких мощностей для этой цели используются двигатели с принудительным охлаждением. Для двигателей с контактными кольцами резисторы должны быть подобраны в соответствии с рабочим циклом механизма. Решение должно быть принято специалистом, который может правильно подобрать двигатель в соответствии с рабочим циклом.

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 с низкой нагрузкой.

### Основные принципы

Силовая цепь выполнена на основе двух встречно-параллельно включенных тиристоров в каждой фазе (см. Рис. 9). Изменение напряжения достигается изменением времени проводимости этих тиристоров в течение каждой половины цикла. Чем позже происходит их включение, тем ниже величина напряжения на выходе.

Управление тиристорами осуществляется микропроцессором, который также выполняет следующие функции:

- Управление темпом роста и снижения регулируемого напряжения. Замедление с заданным темпом выполняется только в случае, если время замедления меньше времени свободного выбега
- Настраиваемое ограничение тока
- Регулируемый пусковой момент

- Динамическое торможение постоянным током
- Защита регулятора от перегрузки
- Защита двигателя от перегрева из-за перегрузки или частых пусков
- Обнаружение асимметрии фаз, отсутствия фазы, неисправности тиристора

Панель управления отображает различные рабочие параметры, облегчает настройку, эксплуатацию и обслуживание.

Некоторые регуляторы, такие как Altistart (Шнейдер Электрик) могут управлять запуском и остановкой:

- одного двигателя
- нескольких двигателей одновременно, в пределах диапазона номинальной мощности
- нескольких двигателей, включаемых последовательно с переключением. В установленном режиме каждый двигатель подключен напрямую от питающей сети через контактор.

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

### Реверс и торможение

Реверс достигается изменением порядка последовательности 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 постоянным током

Экономичное динамическое торможение может быть получено при функционировании выходного каскада УПП как выпрямителя и подачи постоянного тока в обмотки двигателя. В этом случае тормозной момент не регулируется и торможение не очень эффективно, особенно при высоких скоростях. Поэтому управление темпом торможения не выполняется. Однако это решение позволяет сократить время остановки механизма по сравнению с естественным выбегом. Поскольку энергия рассеивается в роторе, этот способ торможения используется достаточно редко.



## 5.5. Синхронные приводы

### Общий принцип

Синхронные приводы (см. **Рис. 23**) состоят из преобразователя частоты и синхронного двигателя с постоянными магнитами, оснащенного встроенным датчиком.

Эти сервоприводы разработаны для специфических применений, таких как робототехника или станкостроение, где востребованы двигатели малых габаритов при высокой динамике и расширенной полосе пропускания.

### Двигатель

Ротор двигателя, оснащен постоянными магнитами из редкоземельных металлов для получения сильного магнитного поля в небольшом объёме. На статоре размещена трёхфазная обмотка. Эти двигатели могут выдерживать значительные токовые перегрузки для достижения высокого ускорения. Они оборудованы встроенным датчиком для измерения углового положения полюсов ротора, необходимого для управления коммутацией напряжения на обмотках.

### Преобразователь

Преобразователь устроен по принципу, аналогичному преобразователю частоты для асинхронных двигателей. Он также имеет выпрямитель и инвертор с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) транзисторов, которая позволяет получить синусоидальную форму тока на выходе регулятора.

Часто можно встретить несколько сервоприводов подключенных к общему источнику постоянного тока.



**Рис. 23** : Фотография сервопривода и синхронного двигателя (Lexium32 сервопривод + двигатель производства Schneider Electric)

На станке каждый регулятор управляет одним двигателем, связанным с осью станка. Общий источник постоянного тока питает блок параллельно подключенных осей.

Это решение позволяет сделать использовать энергию, создаваемую торможением одной из осей, другими осями, входящими в состав блока.

Аналогично преобразователям частоты, тормозной резистор совместно с тормозным ключом используется для рассеивания избыточной энергии торможения.

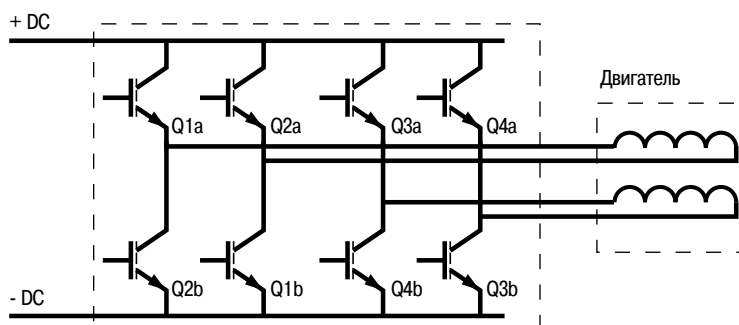
Функции электронного сервоуправления, невысокие механические и электрические временные константы позволяют обеспечить высокие ускорения или более широкую полосу пропускания при высоких динамических характеристиках.

## 5.6. Шаговые приводы

### Общий принцип

Шаговые приводы включают в себя электронный блок управления, конструктивно аналогичный преобразователю частоты, и шаговый двигатель (см. **Рис. 24**).

Они работают в разомкнутой системе без датчика обратной связи и используются для позиционирования.



**Рис. 24** : Упрощённая схема регулятора для биполярного шагового двигателя

### Двигатель

Шаговые двигатели могут быть с переменным магнитным сопротивлением, с постоянными магнитами или их комбинацией (смотри выпуск "Cahier Technique" № 207 "Знакомство с электродвигателями").

### Регулятор

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

Однако его функционирование существенно отличается, поскольку он предназначен для подачи в катушки постоянного тока. Иногда для этого используется широтно-импульсная модуляция (ШИМ), которая используется для улучшения характеристик, в особенности времени нарастания тока (см. Рис. 25), и позволяет расширить рабочий диапазон.

Режим дробления шага с микрошагами (см. Рис. 26) используется для искусственного увеличения числа возможных позиций ротора в соответствии с последовательностью импульсов в катушках. Токи в двух обмотках, поэтому подобны переменным токам, смещенным на  $90^\circ$ . Результирующее поле представляет собой композицию полей, созданных двумя катушками. Ротор поэтому может занимать все возможные промежуточные позиции.

Диаграмма ниже иллюстрирует формирование питающего тока обмоток В1 и В2 и позиции ротора обозначены вектором.

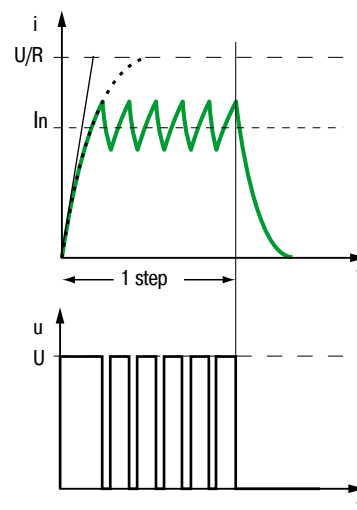


Рис. 25 : Форма тока, получаемого при помощи ШИМ

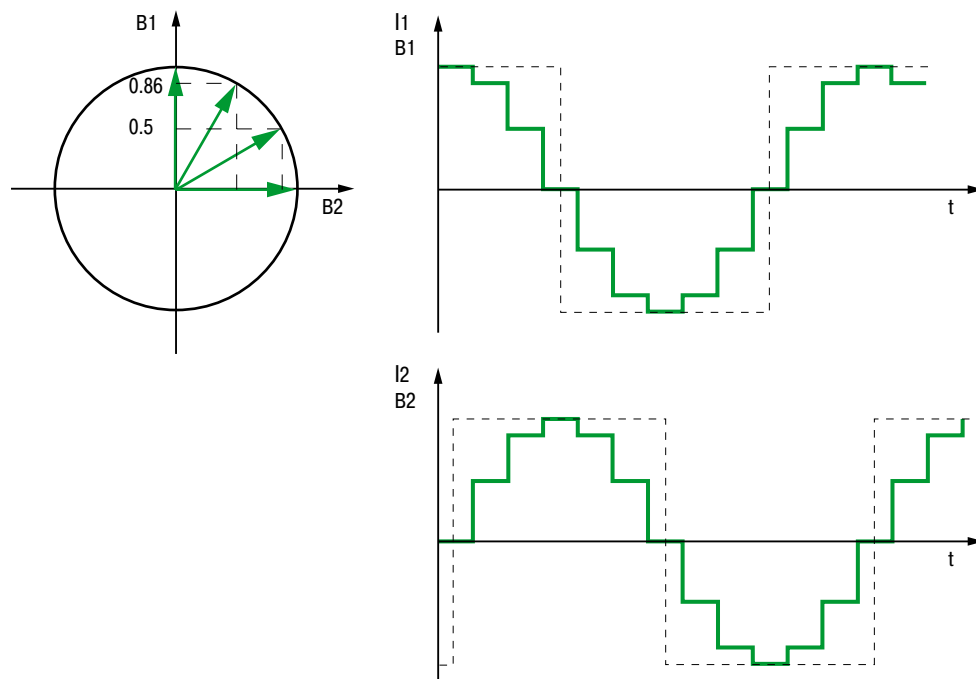


Рис. 26 : Диаграмма графика изменения тока и принцип управления дроблением шага с микрошагами

## 6. Дополнительные функции преобразователей частоты

### 6.1. Диалоговые возможности

Для того, чтобы обеспечивать корректную работу двигателя, преобразователи частоты снабжены датчиками для мониторинга напряжения, токов двигателя и его теплового состояния. Эта информация, необходимая для функционирования преобразователя частоты, может быть полезна для расширения его возможностей.

Современные ПЧ и УПП обладают коммуникационными возможностями и могут подключаться к полевым шинам. Это обеспечивает возможность передачи информации, которая используется контроллером и оператором для управления машиной. Управляющие команды передаются контроллером также по этому каналу.

Передаваемая информация может содержать:

- Задание скорости
- Команды пуска или остановки
- Исходные параметры регулятора или их изменение в процессе 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 при наладке (загрузка параметров) или для архивирования первоначальных установок.

### 6.2. Встроенные функции

Чтобы эффективно работать с различными приложениями, регуляторы предоставляют широкие возможности по регулировке параметров и настройке режимов, включая:

- Времена разгона и замедления
- Профиль кривых разгона и замедления (линейный, S-образный или U-образный)
- Переключение темпов, которое может быть использовано для получения двух темпов разгона или торможения, например, для получения плавного приближения
- Уменьшение максимального вращающего момента, по дискретному входу или заданному значению
- Толчковый режим (пошаговая работа)
- Управление тормозом для подъемно-транспортных применений
- Выбор предварительно заданных скоростей
- Суммированных сигналов на аналоговых входах, которые могут быть использованы для суммирования заданий скорости
- Переключение сигналов задания на входе ПЧ
- Наличие ПИ-регулятора для простого управления (например, скорость или расход)
- Автоматическое замедление при потере питающего напряжения, позволяющее осуществить управляемую остановку двигателя
- Автоматический подхват вращающейся нагрузки с определением скорости двигателя (подхват на ходу)
- Тепловая защита двигателя на основе тепловой модели, вычисляемой преобразователем

- Подключение датчиков температуры РТС (положительный температурный коэффициент), встроенных в двигатель
  - Пропуск резонансных частот механизма, критическая скорость пропускается для предотвращения работы на данной частоте
  - Ограничение времени работы на низкой скорости в насосных системах, где жидкость используется для смазки насоса для предотвращения заклинивания
- В современных регуляторах эти функции уже встроены производителем, как стандартные, например, Altivar71 Schneider Electric (см. **Рис. 27**).



**Рис. 27** : Фотография привода, отличающегося большим количеством встроенных функций (Шнейдер Электрик ATV71)

### 6.3. Дополнительные карты

Для более сложных применений изготовители предлагают дополнительные карты, которые могут использоваться как для специальных функций, например, управление вектором магнитного потока с помощью датчика, так и как карты готовых решений для некоторых применений. Такими картами являются:

- Карты «переключения насосов» для обеспечения экономичной работы насосной станции, обеспечивающие управление несколькими насосами в определенной последовательности от одного преобразователя частоты

- «Мультидвигательные» карты

- Карты «Мультипараметров», которые могут быть использованы для автоматической загрузки наборов параметров в регулятор

- Специальные карты, разработанные для специальных применений по требованию пользователя

Некоторые производители также предлагают карты контроллеров, встраиваемые в регулятор, для решения простейших прикладных задач. Они имеют дополнительные входы и выходы и программируются для решения задач, где использование внешнего ПЛК не является экономически целесообразным.

## 7. Заключение

Поскольку выбор устройства плавного пуска или преобразователя частоты зависит от типа нагрузки и требуемых технических характеристик, при выборе преобразователя частоты необходимо провести анализ технических требований к механизму и техническим характеристикам двигателя.

Работа с постоянным моментом, переменным моментом, с постоянной мощностью, управление вектором магнитного потока, реверсивный привод и т.д. - это характеристики, находящиеся в документации производителя. По существу, все эти данные Вам будут нужны для выбора наиболее подходящего преобразователя

Ошибка при выборе привода может привести к неправильному функционированию. Также очень важно учитывать требуемый диапазон скорости для подбора наиболее подходящего сочетания двигатель/ преобразователь.

Информация данного выпуска «Технической коллекции» гарантирует, что у вас в руках есть все необходимые данные, которые помогут Вам сделать правильный выбор, если имеется документация производителя. Более надёжное средство- спросить совет специалиста, который может Вам помочь выбрать регулятор скорости с наилучшим соотношением между ценой и техническими характеристиками.

## Schneider Electric в странах СНГ



Пройдите бесплатное онлайн-обучение в Энергетическом Университете и станьте профессионалом в области энергоэффективности.

Для регистрации зайдите на [www.MyEnergyUniversity.com](http://www.MyEnergyUniversity.com)

### Беларусь

**Минск**  
220006, ул. Белорусская, 15, офис 9  
Тел.: (37517) 226 06 74, 227 60 34, 227 60 72

### Казахстан

**Алматы**  
050009, пр-т Абая, 151/115  
Бизнес-центр «Алатау»  
Тел.: (727) 397 04 00  
Факс: (727) 397 04 05

**Астана**  
010000, ул. Бейбитшилик, 18  
Бизнес-центр «Бейбитшилик 2002»  
Офис 402  
Тел.: (3172) 91 06 69  
Факс: (3172) 91 06 70

**Атырау**  
060002, ул. Абая, 2 А  
Бизнес-центр «Сутас-С», офис 407  
Тел.: (3122) 32 31 91, 32 66 70  
Факс: (3122) 32 37 54

### Россия

**Волгоград**  
400089, ул. Профсоюзная, 15  
Офис 12  
Тел.: (8442) 93 08 41

**Воронеж**  
394026, пр-т Труда, 65, офис 227  
Тел.: (4732) 39 06 00  
Тел./факс: (4732) 39 06 01

**Екатеринбург**  
620014, ул. Радищева, 28, этаж 11  
Тел.: (343) 378 47 36, 378 47 37

**Иркутск**  
664047, ул. 1-я Советская, 3 Б, офис 312  
Тел./факс: (3952) 29 00 07, 29 20 43

**Казань**  
420107, ул. Спартаковская, 6, этаж 7  
Тел./факс: (843) 526 55 84 / 85 / 86 / 87 / 88

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

**Краснодар**  
350063, ул. Кубанская набережная, 62 /  
ул. Комсомольская, 13, офис 224  
Тел.: (861) 278 00 62  
Тел./факс: (861) 278 01 13, 278 00 62 / 63

**Красноярск**  
660021, ул. Горького, 3 А, офис 302  
Тел.: (3912) 56 80 95  
Факс: (3912) 56 80 96

**Москва**  
129281, ул. Енисейская, 37, стр. 1  
Тел.: (495) 797 40 00  
Факс: (495) 797 40 02

**Мурманск**  
183038, ул. Воровского, д. 5/23  
Конгресс-отель «Меридиан»  
Офис 739  
Тел.: (8152) 28 86 90  
Факс: (8152) 28 87 30

**Нижний Новгород**  
603000, пер. Холодный, 10 А, этаж 8  
Тел./факс: (831) 278 97 25, 278 97 26

**Новосибирск**  
630132, ул. Красноярская, 35  
Бизнес-центр «Гринвич», офис 1309  
Тел./факс: (383) 227 62 53, 227 62 54

**Пермь**  
614010, Комсомольский пр-т, 98, офис 11  
Тел./факс: (342) 290 26 11 / 13 / 15

**Ростов-на-Дону**  
344002, ул. Социалистическая, 74, литера А  
Тел.: (863) 200 17 22, 200 17 23  
Факс: (863) 200 17 24

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

**Санкт-Петербург**  
196158, Пулковское шоссе, 40, кор. 4, литера А  
Бизнес-центр «Технополис»  
Тел.: (812) 332 03 53  
Факс: (812) 332 03 52

**Сочи**  
354008, ул. Виноградная, 20 А, офис 54  
Тел.: (8622) 96 06 01, 96 06 02  
Факс: (8622) 96 06 02

**Уфа**  
450098, пр-т Октября, 132/3 (бизнес-центр КПД)  
Блок-секция № 3, этаж 9  
Тел.: (347) 279 98 29  
Факс: (347) 279 98 30

**Хабаровск**  
680000, ул. Муравьева-Амурского, 23, этаж 4  
Тел.: (4212) 30 64 70  
Факс: (4212) 30 46 66

### Украина

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

**Донецк**  
83087, ул. Инженерная, 1 В  
Тел.: (38062) 385 48 45, 385 48 65  
Факс: (38062) 385 49 23

**Киев**  
03057, ул. Смоленская, 31-33, кор. 29  
Тел.: (38044) 538 14 70  
Факс: (38044) 538 14 71

**Львов**  
79015, ул. Тургенева, 72, кор. 1  
Тел./факс: (38032) 298 85 85

**Николаев**  
54030, ул. Никольская, 25  
Бизнес-центр «Александровский», офис 5  
Тел./факс: (380512) 58 24 67, 58 24 68

**Одесса**  
65079, ул. Куликово поле, 1, офис 213  
Тел./факс: (38048) 728 65 55, 728 65 35

**Симферополь**  
95013, ул. Севастопольская, 43/2, офис 11  
Тел.: (380652) 44 38 26  
Факс: (380652) 54 81 14

**Харьков**  
61070, ул. Академика Проскуры, 1  
Бизнес-центр «Telesens», офис 569  
Тел.: (38057) 719 07 79  
Факс: (38057) 719 07 49

### Центр поддержки клиентов

Тел.: 8 (800) 200 64 46 (многоканальный)  
Тел.: (495) 797 32 32, факс: (495) 797 40 04  
[ru.csc@ru.schneider-electric.com](mailto:ru.csc@ru.schneider-electric.com)  
[www.schneider-electric.ru](http://www.schneider-electric.ru)