

# Современные преобразователи частоты:

## методы управления и аппаратная реализация

**Основным элементом современных электроприводов переменного тока является преобразователь частоты (ПЧ). Несмотря на многообразие существующих на данный момент алгоритмов управления и вариантов аппаратной реализации преобразователей, можно говорить о типовых решениях, применяемых большинством производителей. Фактически, выработались негласные стандарты на структуру преобразователей частоты и выполняемые ими функции.**

### Борис Карлов

borisZV@mail.ru  
eltex@etx.ru

### Евгений Есин

esin@bk.ru

В общем случае можно выделить две основные задачи, решаемые регулируемым электроприводом: управление моментом и скоростью вращения двигателя.

Необходимость регулирования момента диктуется предъявляемыми к электроприводу техническими и технологическими требованиями. Для нормального функционирования привода необходимо ограничивать момент и ток двигателя допустимыми значениями в переходных процессах пуска, торможения и приложения нагрузки. Для механизмов, испытывающих при работе значительные перегрузки вплоть до стопорения рабочего органа (например, приводы мельниц), возникает необходимость непрерывного регулирования момента двигателя в целях ограничения динамических ударных нагрузок. Во многих случаях требуется также точное дозирование усилия на рабочем органе (приводы металлообрабатывающих станков, намоточные машины и др.).

Технологические режимы многих производственных механизмов на разных этапах работы требуют движения рабочего органа с различной скоростью, что обеспечивается либо механическим путем, либо путем электрического регулирования скорости электропривода. При этом требования к диапазону и точности регулирования скорости могут изменяться в широчайших пределах в зависимости от области применения электропривода.

### Методы управления

Для решения задач регулирования скорости и момента в современном электроприводе применяются два основных метода частотного управления:

- скалярное управление;
- векторное управление.

Асинхронный электропривод со скалярным управлением является на сегодняшний день наиболее распространенным. Он применяется в составе приводов насосов, вентиляторов, компрессоров и дру-

гих механизмов, для которых важно поддерживать либо скорость вращения вала двигателя (при этом используется датчик скорости), либо технологический параметр (например, давление в трубопроводе, при этом используется соответствующий датчик).

Основной принцип скалярного управления — изменение частоты и амплитуды питающего напряжения по закону  $U/f^n = const$ , где  $n \geq 1$ . Конкретный вид зависимости определяется требованиями, предъявляемыми к приводу нагрузкой. Обычно за независимое воздействие принимается частота, а значение напряжения при данной частоте определяет вид механической характеристики, значения пускового и критического моментов. Скалярное управление обеспечивает постоянство перегрузочной способности привода независимо от частоты напряжения, однако имеет место снижение развиваемого двигателем момента при низких частотах (при  $f < 0,1 f_{ном}$ ). Максимальный диапазон регулирования скорости вращения ротора при неизменном моменте сопротивления для приводов со скалярным управлением достигает 1:10.

Метод скалярного управления относительно прост в реализации, но обладает двумя существенными недостатками. Во-первых, при отсутствии датчика скорости на валу двигателя невозможно регулировать скорость вращения вала, так как она зависит от нагрузки. Наличие датчика скорости решает эту проблему, однако остается второй существенный недостаток — нельзя регулировать момент на валу двигателя. С одной стороны, и эту проблему можно решить установкой датчика момента, однако такие датчики имеют очень высокую стоимость, зачастую превышающую стоимость всего привода. Но даже при наличии датчика управление моментом получается очень инерционным. Более того, при скалярном управлении нельзя регулировать одновременно и момент и скорость, поэтому приходится выбирать ту величину, которая является наиболее важной для данного технологического процесса.

Для устранения недостатков, присущих скалярному управлению, фирмой SIEMENS еще в 1971 году был предложен метод векторного управления. Первые варианты приводов с векторным управлением требовали использования двигателей со встроенными датчиками потока. Это существенно ограничивало применение таких приводов.

В современных электроприводах в систему управления закладывается математическая модель двигателя, которая позволяет рассчитывать момент на валу и скорость вращения вала. При этом необходимыми являются только датчики тока фаз статора двигателя. Благодаря специальной структуре системы управления обеспечивается независимое и практически безынерционное регулирование двух основных параметров — момента на валу и скорости вращения.

На сегодняшний день сформировалось два основных класса систем векторного управления — бездатчиковые системы (без датчика скорости на валу двигателя) и системы с обратной связью по скорости. Применение того или иного метода векторного управления определяется областью применения электропривода. При небольших диапазонах изменения скорости (не более 1:100) и требованиях к точности ее поддержания не более  $\pm 0,5\%$  применяют бездатчиковое векторное управление. Если же скорость вращения вала изменяется в широких пределах (до 1:10000 и более), имеются требования к высокой точности поддержания скорости вращения (до  $\pm 0,02\%$  при частотах вращения менее 1 Гц) или есть необходимость позиционирования вала, а также при необходимости регулирования момента на валу двигателя на очень низких частотах вращения, применяют методы векторного управления с обратной связью по скорости.

При использовании векторного управления достигаются следующие преимущества:

- высокая точность регулирования скорости даже при отсутствии датчика скорости;
- плавное, без рывков, вращение двигателя в области малых частот;
- возможность обеспечения номинального момента на валу при нулевой скорости (при наличии датчика скорости);
- быстрая реакция на изменение нагрузки: при резких скачках нагрузки практически не происходит скачков скорости;

- обеспечение такого режима работы двигателя, при котором снижаются потери на нагрев и намагничивание, а следовательно, повышается КПД двигателя.

Наряду с очевидными преимуществами, методу векторного управления присущи и некоторые недостатки, такие, как большая вычислительная сложность и необходимость знания параметров двигателя. Кроме того, при векторном управлении колебания скорости на постоянной нагрузке больше, чем при скалярном управлении. Следует отметить, что существуют области, в которых возможно использование только скалярного управления, например в групповом приводе, где от одного преобразователя питаются несколько двигателей.

### Построение силовой части

Наибольшее распространение получили преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока, построенные по схеме выпрямитель — автономный инвертор. Принцип работы и области применения таких ПЧ зависят от типа используемого выпрямителя и автономного инвертора (инвертор напряжения или инвертор тока).

Существует несколько различных схем выпрямителей. По принципу действия они могут быть разделены на три группы: управляемые, полууправляемые и неуправляемые. Схемотехнически все выпрямители строятся по трехфазной мостовой схеме.

Наибольшее распространение получили неуправляемые выпрямители. Выполняемые на самых простых и дешевых полупроводниковых приборах — диодах, они характеризуются максимальной простотой и надежностью, высоким КПД, а также достаточно высоким качеством выходного (выпрямленного) напряжения и гармонического состава тока, потребляемого из сети. Однако неуправляемость процесса преобразования энергии не позволяет реализовать режимы рекуперации, необходимые во многих случаях.

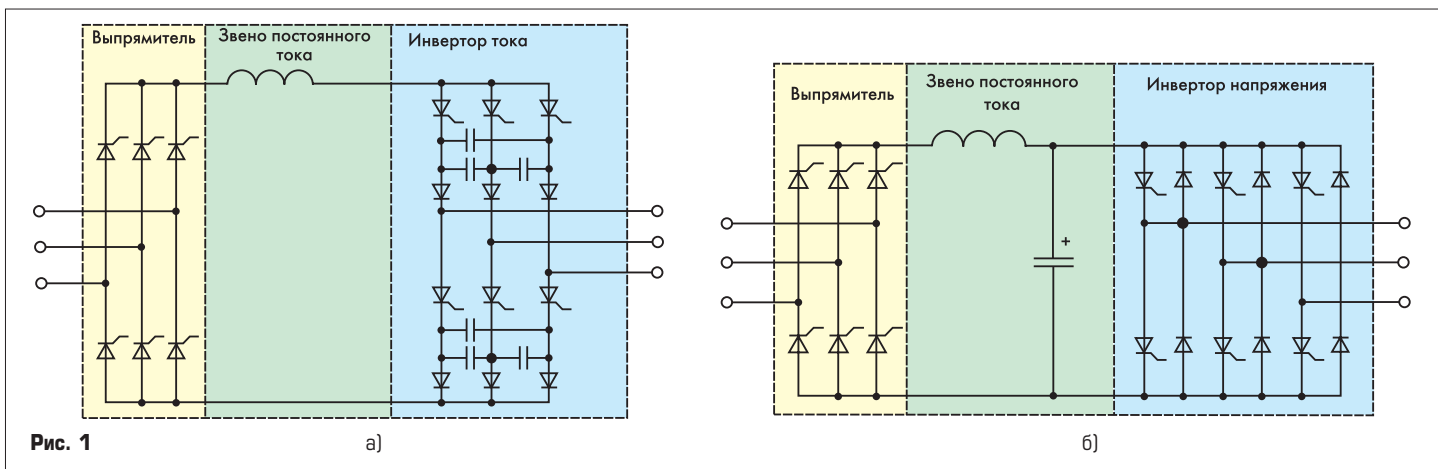
Управляемые выпрямители, выполняемые обычно на низкочастотных тиристорах, лишены как недостатков, так и большинства достоинств диодных выпрямителей. Они обладают высоким КПД и свойством обратимости по направлению преобразования энергии и обычно используются

совместно с автономными инверторами тока для регулирования величины выходного тока преобразователя. Недостатки управляемых выпрямителей заключаются в повышенном уровне пульсаций выпрямленного напряжения, в пониженном значении коэффициента мощности, который уменьшается пропорционально выходному напряжению, и в одностороннем направлении выходного тока. При необходимости обеспечить протекание выпрямленного тока в обоих направлениях используют реверсивные тиристорные преобразователи, состоящие из двух включенных встречно-параллельно тиристорных выпрямителей, один из которых предназначен для протекания тока нагрузки в прямом, а другой в обратном направлении. Это усложняет и удорожает преобразователь.

Полууправляемые выпрямители занимают промежуточное положение между управляемыми и неуправляемыми выпрямителями, позволяя регулировать значение выпрямленного напряжения без возможности рекуперации энергии в сеть. В случае управляемых и полууправляемых выпрямителей появляется возможность отключения силовой схемы ПЧ от сети без использования дополнительного оборудования.

В зависимости от типа автономного инвертора контур постоянного тока может быть выполнен как звено, обеспечивающее постоянное напряжение (обычно С- или LC-фильтр), или как звено, поддерживающее постоянство тока (фильтр в виде реактора со значительной индуктивностью). Величина емкости конденсатора в звене постоянного тока обычно составляет 2000–20000 мкФ; такие конденсаторы имеют большие габариты и высокую стоимость.

Характерными особенностями автономных инверторов тока (АИТ, рис. 1а) являются питание от источника тока (в цепь источника включен дроссель значительной индуктивности), обмен реактивной энергией нагрузки с коммутирующим конденсатором, значительное колебание напряжения на входе инвертора при постоянном токе источника, а также зависимость формы кривой напряжения на выходе и входе инвертора от характера нагрузки. АИТ технически реализуются проще, чем АИН, так как в них отсутствует возвратный диодный мост. В ПЧ на ос-



нове АИТ при использовании управляемых выпрямителей возможна рекуперация энергии в сеть, что важно для электроприводов, работающих в повторно-кратковременных режимах работы.

Характерным недостатком АИТ является то, что он не может работать на холостом ходу (с отключенным двигателем). Кроме того, при использовании АИТ возможны существенные потери мощности и формирование дополнительных возмущающих моментов в двигателе, приводящих к колебаниям скорости. При необходимости формирования токов двигателя, близких к синусоидальным, требуется значительное усложнение схемы АИТ.

Особенностями автономных инверторов напряжения (АИН, рис. 1б) являются питание от источника напряжения, замыкание контура реактивного тока нагрузки через обратные диоды и независимость формы кривой напряжения на выходе инвертора от характера нагрузки. Недостатком АИН является необходимость использования реверсивных выпрямителей для организации рекуперативных режимов работы электропривода. Однако применение инверторов напряжения позволяет без усложнения схемы получить высокие энергетические показатели и обеспечить выходные токи, близкие к синусоидальным. Именно это обуславливает широкое применение АИН в современном электроприводе.

Для построения силовых ключей в области коммутируемых токов до 50 А используются биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) и полевые транзисторы с изолированным затвором (MOSFET), а также низкочастотные и высокочастотные диоды и тиристоры. Силовые биполярные транзисторы в диапазоне до 50 А находят основное применение в дешевом промышленном оборудовании. В области коммутируемых токов более 50 А основными используемыми приборами являются силовые модули на базе биполярных транзисторов, запираемые тиристоры (GTO, GCT, IGCT). Особо следует выделить транзисторные и диодно-транзисторные модули, выполненные по интегральной технологии на основе транзисторов типа IGBT. Низкие потери мощности в ключевых режимах, большие значения рабочих напряжений и токов, малые времена включений и отключений этих модулей, а также возможность их использования при параллельной работе позволяют создавать мощные и компактные преобразовательные установки с высокой частотой коммутации полупроводниковых ключей.

### Построение системы управления

Основным элементом систем управления современных ПЧ является специализированный микроконтроллер или цифровой сигнальный процессор (DSP). Построение системы управления на базе DSP обусловлено необходимостью производства большого объема сложных вычислений в режиме реального времени для реализации современных алгоритмов управления. В наибольшей

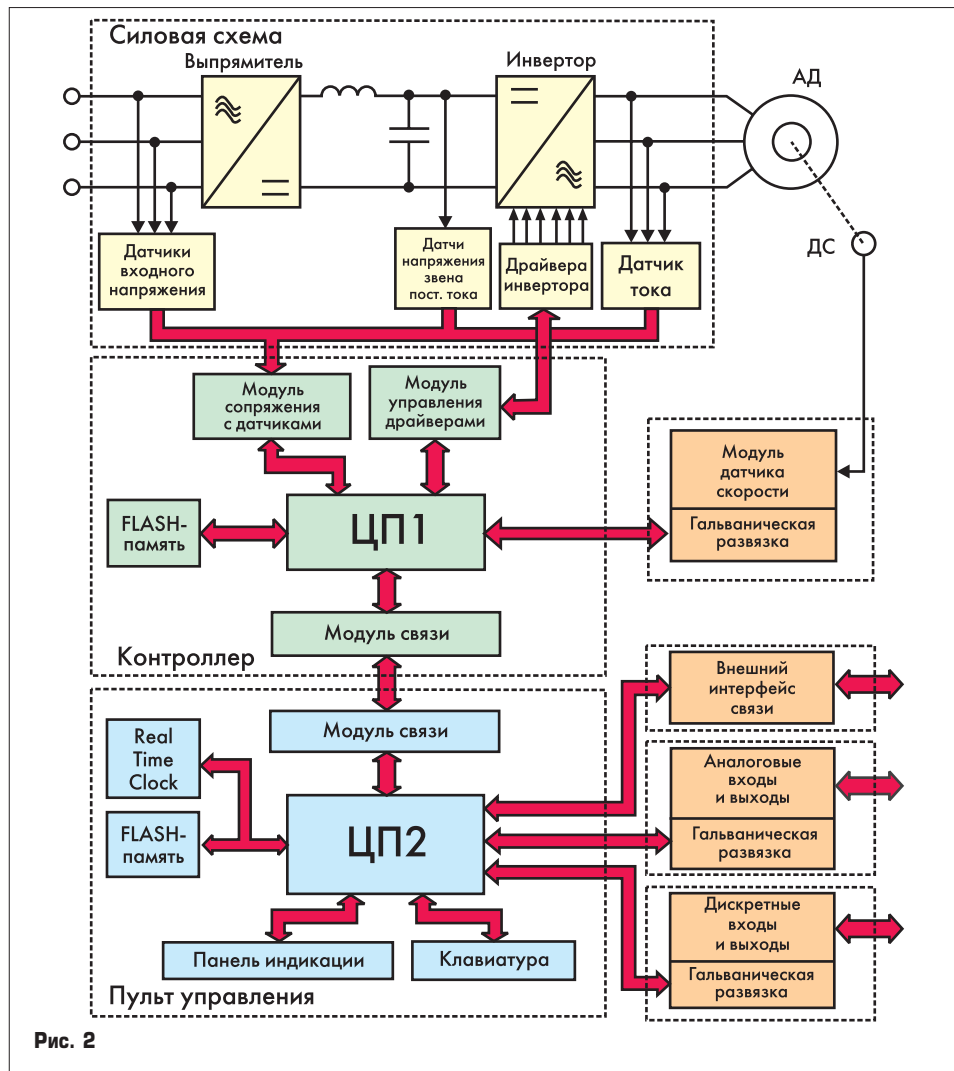


Рис. 2

степени это критично для бездатчиковых систем векторного управления.

Система управления может быть одно- или многопроцессорной. Однопроцессорные системы обладают рядом существенных недостатков: к микроконтроллеру предъявляются повышенные требования по наличию встроенных периферийных модулей и портов ввода-вывода, по быстродействию и объему памяти; значительно усложняется разработка программного обеспечения. Однако при решении задач управления невысокой сложности достоинством однопроцессорных систем является простота аппаратной и программной реализации.

В настоящее время большинство преобразователей строятся на двухпроцессорной основе. Первый процессор (ЦП1) выполняет основные функции ПЧ (реализация алгоритмов управления инвертором, выпрямителем, опрос датчиков и т. д.), второй (ЦП2) обеспечивает работу пульта управления, связь с системой верхнего уровня и другие сервисные функции. Следует отметить, что распределение функций между микроконтроллерами может быть произведено и другим способом.

Достоинства двухпроцессорной системы по сравнению с однопроцессорной — снижение требований к ЦП1 и ЦП2 по встроенной периферии, быстродействию и объему памяти; возможность применения единого интерфейса для связи центрального контроллера с пультом управления и с системой автома-

тизации верхнего уровня; значительное упрощение разработки программного обеспечения для каждого из контроллеров.

Управление драйверами инвертора осуществляется посредством формирования шестиканального ШИМ-сигнала с автоматическим добавлением «мертвого времени». В большинстве микроконтроллеров модуль ШИМ реализован аппаратно. Для получения формы выходного напряжения, близкой к синусоидальной (что особенно критично при скалярном управлении), может использоваться программная или аппаратная коррекция «мертвого времени». Также в большинстве случаев реализуется аппаратная блокировка сигналов ШИМ в случае аварии.

Управление преобразователем может осуществляться с помощью пульта (возможно, удаленного), дискретных или аналоговых входов.

Преобразователи конструктивно строятся по модульному принципу, позволяющему вводить в них дополнительные функциональные модули, которые в сочетании со встроенными программными средствами позволяют получить различную конфигурацию электропривода, отвечающую требованиям заказчика, — от простейших разомкнутых до точных замкнутых систем позиционирования. Как правило, такие модули (платы) расширения содержат в своем составе аналоговые и дискретные входы и выходы, а также интерфейсы связи.

**Таблица 1.** Типовые характеристики плат расширения

Аналоговые выходы	Выход напряжения: 0...10 В, $I_{\text{вых, макс}} = 2 \text{ мА}$
	Выход тока: 0/4...20 мА, $R_{\text{норр}} < 600 \text{ Ом}$
Аналоговые входы	Вход напряжения: $\pm 10 \text{ В}$ ( $R_{\text{вх}} = 20 \text{ кОм}$ )
	Вход тока: 4...20 мА ( $R_{\text{вх}} = 250 \text{ Ом}$ )
	Вход датчика частоты: $R = 4,7...10 \text{ кОм}$
Дискретные входы	Тип входов – «открытый коллектор», $U_{\text{вх, макс}} = 24 \text{ В}$ , $I_{\text{мкс}} = 8 \text{ мА}$
Дискретные выходы	«Релейные» выходы: 30 В 3 А постоянного тока или 250 В 1 А переменного тока
	Выходы «открытый коллектор»: 24 В 50 мА
Сетевые интерфейсы	RS-422 (RS-485), Modbus, Profibus, Interbus, CANOpen и Device Net.

Все аналоговые входы и выходы на платах расширения имеют встроенный источник питания и обычно выполняются гальванически развязанными от системы управления и дискретных входов и выходов. Функции, выполняемые аналоговыми входами и выходами, программируются с пульта управления. Наиболее часто аналоговые входы служат для подключения датчиков обратной связи по технологическим параметрам (для этих целей, как правило, предусматривается один вход напряжения и один вход тока). В большинстве ПЧ имеется также вход для подключения потенциометра, используемого в качестве датчика выходной частоты (для ПЧ со скалярным управлением) или частоты вращения ротора двигателя (для ПЧ с векторным управлением), при этом для питания датчика частоты используется встроенный источник питания (как правило, 10 В). Возможно также наличие дополнительного входа для подключения датчика температуры двигателя (терморезистора).

Аналоговые выходы служат для индикации одного из параметров состояния ПЧ (например, текущей выходной частоты или расчетного значения момента на валу двигателя). Возможность подключения к выходам как вольтметров, так и амперметров достигается за счет наличия выхода напряжения и выхода тока. Выходные аналоговые сигналы формируются с помощью ЦАП (как правило, 10-битных); в отдельных случаях выходное напряжение формируется методом широтно-импульсной модуляции.

Дискретные входы и выходы на платах расширения используются для подключения внешних управляющих сигналов, поступающих с электромагнитных реле, а также для формирования сигналов управления такими реле.

Обычно в ПЧ имеется от четырех до восьми дискретных входов типа «открытый коллектор», выполняющих следующие функции: выбор одной из трех выходных частот (или скоростей вращения ротора), управление отключением и реверсом, аварийное отключение ПЧ. Все дискретные входы выполняют гальванически развязанными от системы управления.

Дискретные выходы можно разделить на две категории: силовые («релейные») выходы для управления внешними электромагнитными реле и выходы типа «открытый коллектор» для работы с внешними логичес-

кими схемами. Платы расширения обычно содержат два релейных выхода, имеющих пару нормально замкнутых и пару нормально разомкнутых контактов, а также четыре выхода типа «открытый коллектор». Функции выходов можно запрограммировать с пульта управления; обычно это: готовность, перегрузка, авария, выход на заданную частоту. Все дискретные выходы гальванически развязаны от системы управления, при этом релейные выходы развязаны между собой, а выходы типа «открытый коллектор» имеют общий нулевой сигнал.

Для построения систем с обратной связью по скорости в ПЧ предусматривают входы для подключения датчика скорости типа «энкодер». Модуль сопряжения с датчиком скорости может входить в стандартную поставку ПЧ или выполняться в виде платы расширения. Для питания дискретных входов и датчика скорости используется встроенный источник питания (обычно 24 В).

Преобразователи легко встраиваются в современные системы автоматизации. Широко используется управление в реальном времени несколькими преобразователями, для чего предлагаются решения с различными интерфейсами связи и топологиями сети. Большинство преобразователей частоты комплектуется стандартным интерфейсом RS-422 или RS-485. При этом взаимодействие осуществляется с использованием протоколов Modbus или Profibus, или их упрощенных модификаций. При использовании модулей расширения доступны дополнительные интерфейсы (например, CAN) и протоколы (Interbus, CANOpen, DeviceNet).

Как правило, ПЧ в своем составе имеет пульт управления, который располагается на лицевой панели корпуса преобразователя. Пульт содержит несколько специализированных кнопок, в отдельных случаях может присутствовать цифровая клавиатура. Вывод информации осуществляется посредством одно- или двухстрочного специализированного ЖКИ или нескольких семисегментных индикаторов, а также светодиодов, отображающих режимы работы. На этапе ввода ПЧ в эксплуатацию пульт служит для конфигурирования преобразователя и настройки соответствующих параметров; во время работы — для наблюдения за параметрами рабочего режима. В процессе обслуживания на индикаторе отображается информация о возникших неисправностях, что обеспечивает возможность постоянного контроля состояния привода. Пульт управления, как правило, выполняется съемным, что позволяет подключать его к ПЧ только при необходимости и использовать один пульт для нескольких ПЧ.

Для хранения настроек системы, калибровочных параметров, журнала аварий и другой информации используется дополнительная энергонезависимая память. Часто она выполняется на основе микросхем Flash-памяти (как правило, с последовательным интерфейсом I<sup>2</sup>C или SPI). Кроме того, многие микроконтроллеры и DSP имеют возможность сохранения данных во внутренней энергонезависимой памяти.

**Таблица 2.** Методы управления

Метод формирования выходного напряжения	– Синусоидальная ШИМ; – метод пространственной модуляции базовых векторов (Space Vector Modulation).
	Частота ШИМ настраиваемая, 8...16 кГц для мощностей от 0,75 до 30 кВт и 4...8 кГц для мощностей выше 37 кВт. Для снижения уровня акустического шума используется метод «мягкой» ШИМ.
Метод управления двигателем	Скалярное управление: – классическое скалярное управление по заданной характеристике U/f; – скалярное управление с компенсацией падения напряжения на статоре (IR-компенсация); – скалярное управление с компенсацией скольжения.
	Векторное управление: – бездатчиковое векторное управление скоростью; – бездатчиковое векторное управление моментом; – векторное управление скоростью с датчиком обратной связи по скорости; – векторное управление моментом с датчиком обратной связи по скорости.
Методы торможения двигателя	– Постоянным током; – динамическое торможение с использованием встроенного или внешнего тормозного резистора.

### Основные задачи, решаемые программным обеспечением ПЧ

1. Реализация различных методов управления двигателем и методов формирования выходного напряжения.
2. Управление входным выпрямителем (в случае использования управляемого или полупроводящего выпрямителя) — выдача импульсов управления на силовые ключи в соответствии с заданным углом открытия тиристоров. При этом необходима синхронизация с питающей сетью, то есть определение момента прохождения фаз входного напряжения через ноль и корректировка моментов открытия ключей выпрямителя.
3. Прием и обработка информации с датчиков. Данная информация используется для определения текущего состояния ПЧ и двигателя, что необходимо для реализации требуемых законов управления, отслеживания аварийных ситуаций и т. д.
4. Взаимодействие с периферийными модулями контроллера (работа с Flash-памятью, часами реального времени и прочими устройствами, обеспечивающими дополнительные сервисные функции).
5. Взаимодействие с системой автоматизации верхнего уровня. Осуществляется по принципу «ведущий — ведомый» (Master — Slave), причем ПЧ выступает в роли ведомого устройства. Программное обеспечение реализует требуемый протокол обмена, обеспечивает прием и выполнение команд управления, а также выдачу требуемой информации о текущем режиме работы, состоянии датчиков и параметрах ПЧ. В случае двухпроцессорной системы обеспечивается возможность совместной работы основного контроллера и контроллера пульта управления.

6. Обработка внешних сигналов и выдача управляющих воздействий на внешнюю аппаратуру в случае управления преобразователем частоты через дискретные или аналоговые входы.
7. Обеспечение интерфейса с пользователем. Следует отметить, что сложность реализации удобного интерфейса определяется набором средств управления и индикации, предусмотренных на пульте.
8. Диагностика аппаратуры и самодиагностика. Диагностика заключается в определении работоспособности различных модулей, входящих в состав ПЧ (как силовых, так и управляющих) и подключенного двигателя. Кроме того, производится контроль целостности программы и данных, хранимых в энергонезависимой памяти.
9. Реализация защитных функций. Современные ПЧ реализуют максимально-токовую защиту, защиту от перегрева двигателя и преобразователя, от перегрузки, чрезмерных отклонений напряжения питания, обрыва фазы, межфазного короткого замыкания, замыкания фазы на землю и ошибок связи.  
Корректный выход из состояния аварии возможен, только если ликвидированы причины ее возникновения. Для отдельных видов аварий (например, пропадание напряжения в сети, авария связи) система в состоянии самостоятельно отследить возможность продолжения работы. Восстановление после других аварий требует вмешательства обслуживающего персонала.
10. Сохранение информации о режимах, длительности работы, периодичности

- включения ПЧ; подсчет показателей эффективности за определенный период; ведение журнала произошедших сбоев и аварий. Это позволяет проанализировать эффективность использования ПЧ и облегчает поиск причин сбоев в работе оборудования.
11. Реализация дополнительных функций. Различные модификации преобразователей обладают набором таких возможностей, как задание программируемых фиксированных установок скорости; управление режимом торможения привода; управление несколькими двигателями; осуществление работы ПЧ по расписанию.

К программируемым управляющим функциям, обеспечивающим возможность адаптации статических и динамических характеристик привода под условия нагрузки, относят:

- плавный пуск и остановку двигателя с выбором формы кривой изменения скорости (обычно используют линейную, S- и U-образную характеристики изменения скорости) и отдельной настройкой времени разгона и торможения с автоматической коррекцией ускорения и замедления в случае превышения допустимого момента;
- режим «подхвата» двигателя, используемый при включении ПЧ на вращающийся двигатель (например, после кратковременного пропадания напряжения сети);
- пропуск частот, при которых работа привода нежелательна;
- компенсацию падения напряжения на активном сопротивлении статора (IR-компенсация), которая может быть заменена

- настройкой требуемого профиля кривой «напряжение — частота» для обеспечения работы с минимальным током потребления;
- поддержку высокого пускового момента на низких частотах за счет дополнительного увеличения напряжения;
  - стабилизацию скорости вращения путем воздействия на частоту в функции нагрузки (компенсация скольжения);
  - настройку реакции на скачок скорости или момента нагрузки с учетом инерционных свойств механизма;
  - автоматическое определение параметров подключенного двигателя.

### Заключение

Современный асинхронный электропривод динамично развивается и характеризуется широким спектром предлагаемых технических и алгоритмических решений. В данной статье приведен обзор методов управления, применяемых в современном регулируемом асинхронном электроприводе, даны характеристики типовых модулей, входящих в состав силовой части и системы управления, а также описаны основные задачи, стоящие перед программным обеспечением.

При подготовке материала статьи использовались результаты анализа современных тенденций построения ПЧ, предлагаемых ведущими мировыми производителями, а также опыт, накопленный авторами при разработке серийно выпускаемых преобразователей частоты и устройств плавного пуска асинхронных двигателей.