

# СТРУКТУРА И ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ПРИВОДОВ

**В.А. Дайнеко, канд.техн. наук, доцент, Д. В. Батраков, И.Н. Шаукат,  
Е. М. Прищепова, инженеры (УО БГАТУ)**

## **1. Компоненты силовой электроники для частотно-регулируемого электропривода**

Для создания современных силовых преобразователей требуются силовые полупроводниковые приборы, отвечающие следующим требованиям:

- минимальные масса и габариты при максимальной мощности;
- высокое быстродействие;
- повышенная устойчивость к электрическим воздействиям, возникающим в аварийных режимах (короткое замыкание, перегрузка по току, перенапряжение);
- умеренная стоимость и высокая надежность;
- минимальные потери мощности.

Основные полупроводниковые приборы, применяемые в современном преобразовательном оборудовании: мощные биполярные транзисторы в ключевом режиме, полевые транзисторы (MOSFET) и биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT). Подробное сравнение их свойств приведено в [1].

MOSFET (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor) – канальный полевой униполярный МОП-транзистор. Сопротивление открытого МОП-транзистора растет пропорционально квадрату пробивного напряжения. MOSFET-транзисторы выпускаются на напряжение до 1 600В. Их недостаток – большие напряжения насыщения, достигающие 7В.

IGBT (insulated gate bipolar transistor) – биполярный транзистор с МОП-управлением. IGBT-транзистор представляет собой р-п-р транзистор, управляемый от сравнительно низковольтного МОП-транзистора с индуцированным каналом через высоковольтный N-канальный полевой транзистор. Новая технология позволила соединить в одном элементе достоинства полевых и биполярных транзисторов. У IGBT-транзистора практически отсутствуют входные токи, они имеют хорошие динамические характеристики, не уступающие MOSFET. В то же время потери у них растут пропорционально току, а не квадрату тока, как у полевых транзисторов. Максимальное напряжение IGBT ограничено только технологическим пробоем, и уже сегодня выпускаются транзисторы с рабочим напряжением до 2 000В. При этом напряжение насыщения у них не превышает 2–3 В в рабочих режимах.

Основным недостатком IGBT-транзисторов пока остаются динамические потери, что снижает допустимый ток коллектора на частотах выше 10 кГц.

В настоящее время в большинстве случаев для построения автономных инверторов в качестве управляемых ключей используют IGBT- транзисторы, которые сочетают достоинства биполярных и полевых транзисторов. Благодаря малой мощности управления и низким коммутационным потерям в статических режимах, высокой скорости коммутации и стойкости к перегрузкам IGBT практически полностью вытеснили биполярные и полевые транзисторы, а также запираемые тиристоры (GTO) из области регулируемого электропривода. Силовые IGBT- модули выпускаются на токи 10...2 400 А и коммутируемые напряжения 0,6; 1,2; 1,7; 2,5 и 3,3 кВ. Начато производство IGBT-модулей, рассчитанных на коммутируемое напряжение 4,5...6,5 кВ. Для повышения универсальности, простоты и удобства применения силовых IGBT- модулей в преобразователях существуют варианты модулей, содержащих полные мостовые схемы.

Силовые модули подразделяются на обычные и "интеллектуальные" IGBT- модули. Обычные (стандартные) модули выпускаются в одно-, двух-, четырех- и шести ключевом исполнении с обратными быстро восстанавливающимися диодами (FRD) или без них.

*Интеллектуальные силовые модули.* IPM – Intelligent Power Module объединяют в одном корпусе несколько силовых ключей, драйверы для управления этими ключами с разнообразными функциями защиты каждого ключа и дополнительные датчики температуры и тока.

*Специализированные интеллектуальные силовые модули (ASIPM).* ASIPM предназначены для создания компактного, высоконадежного и экономичного регулируемого привода трехфазных электродвигателей переменного тока промышленного (380 В) и бытового (220 В) назначения.

ASIPM содержат 6 или 7 IGBT-транзисторов (трехфазный мост и транзистор управления тормозом), базовые элементы IPM и опторазвязки по входам управления. В некоторых модулях содержится трехфазный диодный выпрямительный мост.

*Гибридные силовые модули.* В гибридных силовых

модулей в одном корпусе совмещены несколько силовых ключей с общим теплоотводом и вспомогательные элементы. Применение гибридных модулей упрощает конструкцию преобразователя и повышает надежность его работы.

Структура силовых гибридных модулей весьма разнообразна. Наиболее распространенные силовые гибридные модули ориентированы на типовую схему частотно-регулируемого электропривода (рис. 1).

Существуют полностью "законченные" модули, которые в одном корпусе объединяют трехфазный выпрямитель, инвертор и силовой ключ цепи торможения. Дополнительно может содержаться датчик температуры модуля, как правило, для этих целей используется транзистор.

**Микросхемы драйверов IGBT.** Для управления мощными полупроводниковыми ключами разработаны специальные интегральные схемы (ИС) драйверов.

Эти микросхемы обеспечивают надежную работу силовых ключей инвертора. Они создают импульсы управления затворами IGBT с необходимой скоростью нарастания входного тока  $di/dt$ , кроме того имеют дополнительные функции (защита по току, обеспечение "мертвого времени"; контроль за напряжением звена постоянного тока и др.).

Поскольку управление затвором IGBT и MOSFET во многом аналогично, ИС драйверов применяются для управления обоими типами приборов.

Микросхемы драйверов управляются непосредственно с логических выходов ТТЛ (транзисторно-транзисторная логика) или КМОП (комплементарная структура «металл-окисел-полупроводник»).

На рис. 1 приведена классическая схема современ-

ного преобразователя частоты со звеном постоянного тока на IGBT-транзисторах.

Входное сетевое напряжение поступает на вход трехфазного мостового неуправляемого выпрямителя 1. К выходу выпрямителя через емкостной фильтр  $C1$  подключается трехфазный мостовой инвертор 2 на IGBT. Параллельно каждому транзисторному ключу подключаются диоды. Они обеспечивают протекание тока, создаваемого ЭДС-самоиндукции при закрывании транзисторного ключа, что приводит к уменьшению перенапряжений на переходах транзисторов при быстром закрывании ключа (из-за высокой индуктивности обмоток АД и больших значений  $di/dt$ , наведенные напряжения могут приводить к сбоям в работе управляющих схем, ложным срабатываниям и пробоям транзисторов).

В приводах малой и средней мощности, имеющих в циклах работы участки рекуперации механической энергии или высокую интенсивность тормозных режимов, предусматривается схема торможения, подключаемая к шине постоянного тока. Схема торможения состоит из тормозного ключа  $VT7$  и  $VD7$  и тормозного резистора  $R_r$ , на котором рассеивается рекуперированная энергия. Это необходимо, так как выпрямитель неуправляемый и не может проводить ток в обратном направлении.

Силовая часть преобразователя содержит также датчики тока, предназначенные для обеспечения обратной связи, которые выполнены в виде шунтов. Схема управления содержит драйверы 3, формирующие импульсы управления транзисторами инвертора и тормоза со схемами защиты;

Работой ШИМ-генератора, драйверов, схем защит

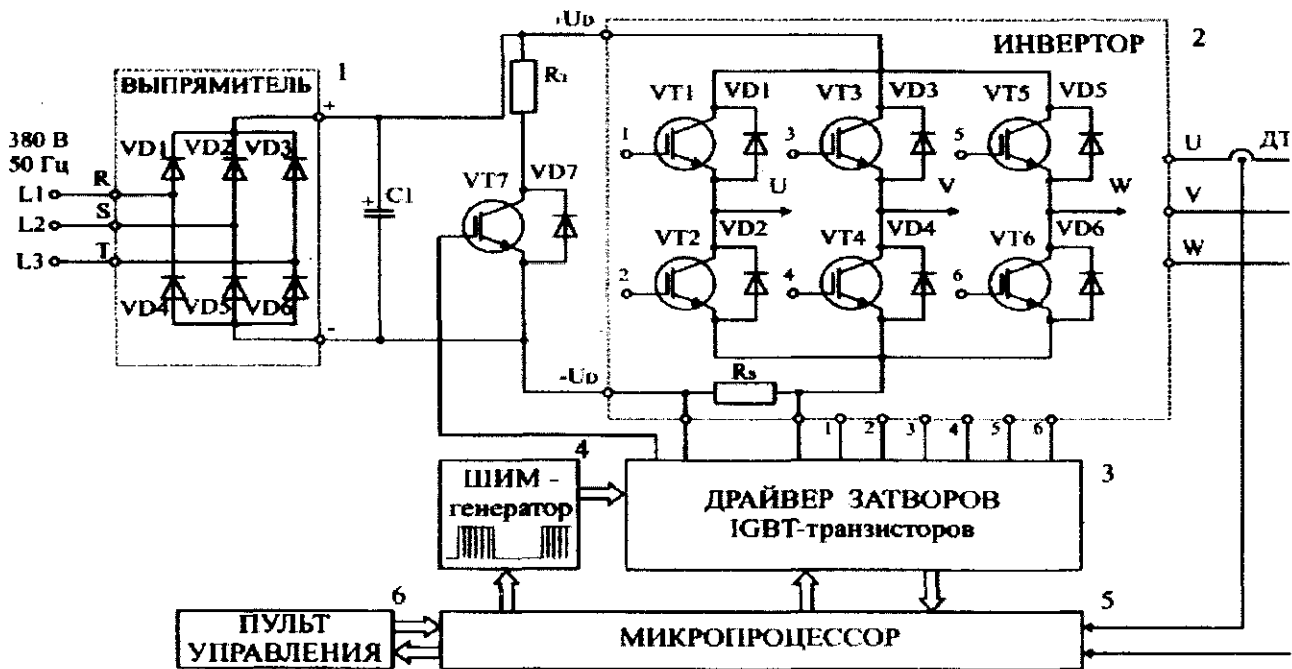


Рис. 1. Схема преобразователя частоты на IGBT- транзисторах

и обратных связей управляет специализированный микропроцессор 5. Программирование процессора и оперативное управление преобразователем частоты (ПЧ) осуществляется пультом управления 6

Драйвер выполняет все функции, необходимые для работы инвертора, а также обеспечивает постоянный контроль тока и температуры силового блока. Сигналы, пропорциональные току и температуре инверторного модуля, поступают на входы управляющего процессора и используются при непрерывном контроле состояния силовых цепей

Защита от перегрузки по току срабатывает при 140-процентном превышении допустимого значения. Отключение происходит не мгновенно, а по определенному закону. Такое "мягкое" отключение снижает скорость уменьшения тока  $di/dt$  и импульс перенапряжения при разрыве цепи с индуктивностями.

При перегрузке напряжение на затворах силовых транзисторов инвертора снижается, что приводит к ограничению токов коллектора. Если через 5-10 мкс перегрузка не прекращается, напряжение на затворе снижается до нуля.

## 2. Применение современных преобразователей частоты

Управление процессами в электроприводе, в общем случае, может быть сведено к управлению крутящим моментом и частотой вращения электродвигателя.

Все выпускаемые в настоящее время ПЧ имеют функции выбора закона частотного управления. Пользователь имеет возможность со встроенного пульта управления или по интерфейсу задать соответствующие параметры в зависимости от характера нагрузки на валу АД.

При управлении по вольт-частотной характеристике (ВЧХ) предусматриваются следующие законы управления:

- закон  $U/f = const$  - для механизмов с постоянным статическим моментом;
- закон  $U/f^2 = const$  - для механизмов с "вентиляторной" характеристикой.

Системы управления трехфазными электроприводами непрерывно развиваются на базе современных высокопроизводительных DSP- процессоров [5, 6]. Вычислительная способность 16-битного DSP процессора достигает 26 миллионов операций в секунду, что позволило создать современные векторные системы управления асинхронными электродвигателями. Такие системы обеспечивают быстрое и точное управление непосредственно крутящим моментом электродвигателя.

В векторных системах управления частота вращения АД измеряется датчиком, установленным на валу ротора, благодаря чему программное обеспечение DSP может вычислять скорость ротора в любой момент времени. Преобразователи, имеющие функцию векторного управления, применяют в случаях, когда необходимо

поддерживать момент на валу электродвигателя при малых частотах вращения и при необходимости обеспечить стабилизацию скорости при скачках нагрузки. Таким образом, векторное управление позволяет получать максимальный момент АД во всем диапазоне, начиная от нулевых частот вращения и в ряде случаев обойтись без редуктора.

В более дешевых бездатчиковых системах управления DSP-процессор вычисляет скорость ротора в зависимости от измеренных значений напряжений и токов обмотки статора.

Бездатчиковые алгоритмы могут успешно использоваться на средней и высокой частотах вращения, когда не требуется непрерывное измерение частоты вращения при низкой и нулевой скоростях.

### 2.1. Режимы работы ЭП и выбор режима управления ПЧ.

В зависимости от требований технологического процесса приводной электродвигатель может работать в режиме заданной преобразователем частоты питающего напряжения или в режиме стабилизации внешнего параметра (скорости, давления, температуры и т.д.).

Задание частоты может производиться с пульта управления ПЧ, с аналогового входа, с дискретных входов при помощи внешних управляющих устройств.

Система стабилизации внешнего параметра строится на основе встроенного ПИД - регулятора, на входы которого подаются сигнал задания параметра и сигнал с датчика выходной величины.

При ручном управлении оператор непосредственно управляет электроприводом при помощи подачи команд с пульта управления ПЧ. В режиме ручного управления преобразователь сохраняет все свои защитные функции и обеспечивает индикацию аварийных режимов.

Программное управление реализуется при помощи программирования таймеров преобразователя. Можно запрограммировать время и продолжительность пуска, торможения, реверса АД.

Все преобразователи имеют несколько гальванически изолированных дискретных входов управления ("сухих контактов"). Они могут выполнять функции ступенчатого изменения скорости, разгона, торможения, реверса. Эти входы предназначены для подключения дискретных устройств внешнего управления.

Для внешнего управления используется встроенный интерфейс RS-485. При этом в качестве внешнего устройства может использоваться персональный компьютер (ПК) со специальным программным обеспечением, обеспечивающим обмен между ПК и ПЧ.

В некоторых преобразователях имеются дополнительные сервисные функции.

Функция энергосбережения используется для экономии энергии на пониженных нагрузках. При снижении нагрузки или при завершении пуска преобразователь снижает напряжение на обмотках электро-

двигателя; при этом увеличивается коэффициент мощности.

Функция «статистика работы» применяется для определения выработанного ресурса двигателя. Время работы учитывается в памяти микропроцессора преобразователя и может учитываться в статистических расчетах прогнозирования надежности электропривода.

Функция «статистика аварий» сохраняет в энергонезависимой памяти историю срабатывания защит и аварий с указанием причины и времени срабатывания защиты.

Новые серии преобразователей, выпускаемые ведущими производителями в области силовой электроники, совмещают в себе функциональность приводов механизмов с вентиляторной нагрузкой и алгоритм упрощенного векторного управления.

Упрощенное векторное управление представляет собой компромисс между дешевыми приводами с простым управлением по вольт-частотной характеристике и более дорогими приводами с векторным управлением.

В большинстве ПЧ функция энергосбережения реализуется за счет снижения напряжения на электродвигателе после выхода двигателя на постоянную скорость, причем снижение напряжения продолжается до тех пор, пока ток не начнет возрастать.

Режим энергосбережения особо эффективен при регулировании скоростных вентиляторов и насосов, при управлении оборудованием с переменной нагрузкой, при управлении машин, работающих с недогрузкой.

Энергосберегающие алгоритмы современных ПЧ обеспечивают 20% снижения энергопотребления по сравнению с традиционными алгоритмами управления по соотношению  $U/f$  за счет применения оптимального адаптивного управления магнитным потоком и нагрузкой электродвигателя.

В преобразователях ведущих мировых фирм имеется функция автоматической настройки при остановленном двигателе.

Энергосбережению способствует функция автоматического управления потерь в преобразователе. При работе инвертора существует область, в которой допустимый выходной ток составляет 100%, и область, в которой дальнейшее увеличение частоты ШИМ требует снижения допустимого выходного тока инвертора.

С увеличением частоты коммутации транзисторов качество синусоиды возрастает, но потери мощности в преобразователе увеличиваются. В современных инверторах предусмотрена возможность автоматической коррекции частоты ШИМ в зависимости от загрузки.

## 2.2. Примеры применения преобразователей частоты

На рис. 2 приведена схема функционирования преобразователя в режиме с обратной связью по входу 4 – 20 мА. В таком режиме ПЧ автоматически поддерживает какой-либо технологический параметр (давление, расход, температура) на заданном уровне.

Схема позволяет переключать электродвигатель на питающую сеть при аварии преобразователя.

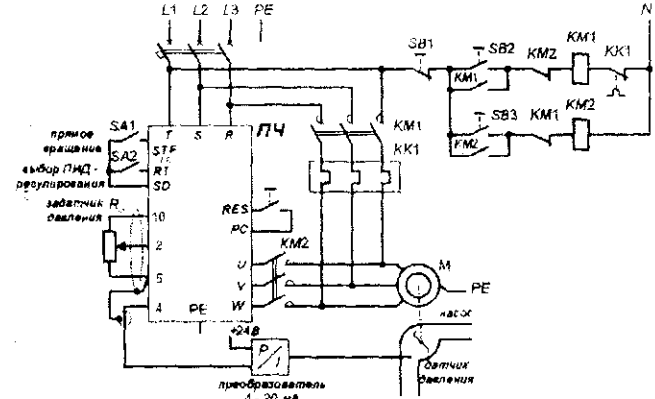


Рис. 2. Схема включения преобразователя частоты для стабилизации давления жидкости

При замыкании SA2 происходит включение функции ПИД-регулирования. При разомкнутом контакте SA2 регулирование частоты вращения электродвигателя может осуществляться с пульта управления ПЧ или при помощи  $R_3$ .

При аварии преобразователя KM2 отключают, а электродвигатель получает питание через KM1. Защита от перегрузки в этом случае осуществляется электротепловым реле KK1. Кнопка SB4 предназначена для «сброса» защиты после устранения аварийного режима.

Схема на рис. 3 иллюстрирует пример подключения

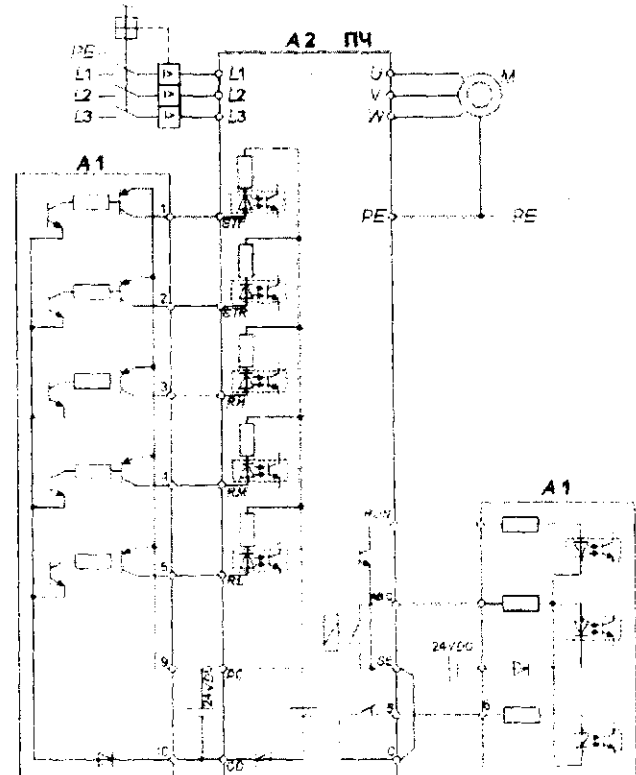


Рис. 3. Схема ступенчатого управления преобразователем частоты при помощи программируемого контроллера

1. Требования, предъявляемые к ПЧ асинхронных приводов различных рабочих машин

Требования предъявляемые к ПЧ	Рабочие машины				
	Насосы и компрессоры	Вентиляторы	Транспортеры	Деревообрабатывающие станки	Мешалки, смесители
1	2	3	4	5	6
Обеспечение закона управления $U/f$	•	•	—	—	—
Обеспечение векторного управления	—	—	•	•	•
Обеспечение энергосбережения	•	•	—	—	—
Наличие частоты ШИМ	4-15кГц	15кГц	4кГц	4-15кГц	4кГц
Наличие динамического торможения	—	—	•	•	•
Наличие торможения на резисторе	—	—	•	•	•
Наличие автоподстройки	—	—	—	—	•
Наличие ПИД-регулятора	•	•	—	—	—
Наличие автоматического повторного пуска	•	•	—	—	—
Наличие реверса	—	—	•	•	•
Наличие пошагового режима	—	—	•	•	•
Обеспечение заданной скорости	—	•	•	•	•
Наличие релейных выходов	•	•	•	—	—
Наличие аналоговых выходов	•	•	•	•	•

(блок А1) к входам ПЧ (блок А2) в режиме ступенчатого задания скорости. Сигнализация текущего состояния преобразователя реализуется с помощью программируемых логических выходов, сигналы с которых также обрабатываются входным модулем контроллера.

2.3. Выбор преобразователей частоты для типичных областей применения

Применение частотного электропривода технически целесообразно при создании системы регулирования, предназначенной для поддержания заданного параметра какого-либо технологического процесса.

В настоящее время рынок насыщен преобразователями различной сложности и стоимости. Для экономически обоснованного решения нужно знать механическую характеристику рабочей машины (механизма) и особенности технологического процесса. Это позволит избежать приобретения преобразователя с избыточным набором рабочих и сервисных функций.

В табл. 1 приведены сведения, позволяющие определить требуемый минимальный набор функций, конфигурацию и комплектность ПЧ к асинхронным приводам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бычков М., Ремизевич Т. Современные электронные компоненты для электропривода / Электронные компоненты, № 7, 2002. - С. 85...90.
2. Башкиров В. Интеллектуальные силовые модули компании International Rectifier для электроприводов малой мощности / Компоненты и технологии: Силовая электроника, №2, 2005. - С. 30...35.
3. Волопин С. Современные управляющие устройства для силовой электроники / Электронные компоненты, №7, 2002. - С. 77...81.
4. Дармавака Г. Использование микроконтроллеров для управления процессом коррекции коэффициентов мощности / Электроника инфо, 2005. - С. 42...44.
5. Finbar Moynihan. Fundamentals of DSP-Based Control for AC Machines / Analog Dialogue, № 34, 2000. - С.3..6.
6. Гончаров Ю. DSP- микроконтроллеры для систем управления. Особенности архитектуры и преимущества использования / Электронные компоненты, №7, 2004. - С. 71...74.
7. Козаченко В., Ремизевич Т. Микроконтроллеры для встраиваемых систем управления электроприводом / Электронные компоненты, № 7, 2002. - С. 83.