

УДК 621.313.3:621.316.544.1

ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ НА СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЕ ДЛЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Т. Ю. ВОЛКОВА, Ф. Р. ИСМАГИЛОВ, Р. Н. СУЛТАНГАЛЕЕВ

Факультет авиационного приборостроения УГАТУ
Тел: (3472) 23 77 87 E-mail: elm@mail.rb.ru

Рассматриваются особенности использования современной элементной базы в частотно-регулируемом электроприводе для энергосберегающих технологий. Приведены основные характеристики приводов со скалярным и векторным управлением. Дан обзор интеллектуальных силовых модулей, используемых в качестве элементной базы силового канала современного электропривода, и микроконтроллеров, используемых в информационной части электропривода

Электропривод; энергосбережение; ресурсосбережение; силовая электроника; интеллектуальные силовые модули; микроконтроллеры

1. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

Целью данной статьи является анализ современной элементной базы, предлагаемой ведущими мировыми фирмами и используемой в силовом и информационном каналах разрабатываемого частотно-регулируемого энергосберегающего электропривода, способного конкурировать с преобразователями известных фирм на рынке Республики Башкортостан.

В настоящее время остро стоит задача решения проблем энергосбережения средствами оптимального управления электродвигателями. Около половины энергии, потребляемой электродвигателями, расходуется на приводы вентиляторов, компрессоров и насосов. Как правило, вентиляторы и насосы проектируются для режима максимальной производительности системы, в которой они установлены. Реально, нагрузка не остается постоянной, а изменяется в широких пределах. В этом случае регулирование технологического процесса осуществляется дополнительными заслонками на вентиляторах и дросселирующими клапанами на насосах, что обуславливает большой расход электроэнергии.

Получили развитие новые, альтернативные методы управления насосами и вентиляторами, которые обеспечивают значительную экономию электроэнергии по сравне-

нию с традиционными методами. Применение частотно-регулируемого асинхронного электропривода на базе статического преобразователя частоты позволяет осуществить прямое изменение скорости вращения вентиляторов и насосов. Посредством регулирования частоты и величины напряжения статора асинхронного двигателя обеспечивается эффективное управление потоками воздуха или жидкости по сравнению с традиционными методами. Отпадает необходимость в дросселировании рабочей среды, что приводит к снижению расхода электроэнергии насосами и вентиляторами в среднем на 30%. Это иллюстрируется на рис. 1, где по данным АО «ВНИИЭ» приведена зависимость потребляемой электроэнергии дутьевого вентилятора при применении заслонки для одно- (кривая 1) и двухскоростного (кривая 2) двигателей, при регулировании направляющим аппаратом (кривая 3) и при применении частотно-регулируемого электропривода (кривая 4) [1].

Важным достоинством частотно-регулируемого электропривода является ресурсосбережение, которое имеет несколько составляющих:

- снижение величины пусковых токов до уровня номинальных;

- существенное снижение перегрузки по моменту на оборудование;

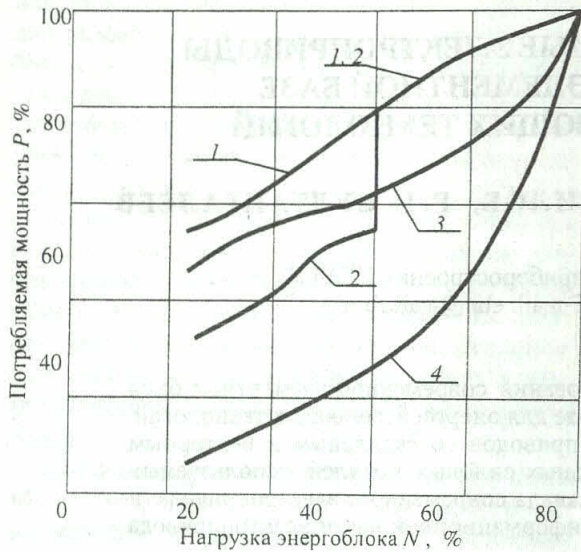


Рис. 1

- исключение из работы дросселей, заслонок, клапанов и т. п.;
- существенное снижение динамического воздействия на технологическое оборудование: исключение гидроударов в гидравлической сети, плавное изменение подачи воздуха в вентиляторах воздуходувов и др.;
- продление срока службы вращающихся частей механизмов, работающих в течение длительного времени с частотами вращения, меньшими номинальных.

2. СКАЛЯРНЫЙ И ВЕКТОРНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ

Для управления инвертором частотно-регулируемого привода переменного тока используется широтно-импульсная модуляция (ШИМ). Схемы управления приводами с ШИМ обеспечивают скалярное или векторное управление.

Большинство задач при применении энергосберегающих частотно-регулируемых приводов насосов и вентиляторов решается методами скалярного управления, при этом не требуется прямого управления моментом двигателя, необходимо лишь эффективное управление скоростью двигателя в заданном диапазоне и поддержание ее с точностью 1... 2%. Скалярные приводы сегодня занимают заметные позиции на рынке, особенно для автономных применений и для систем, требующих

подключения нескольких двигателей к одному преобразователю. Они более просты, чем приводы с векторным управлением, проще в установке и дешевле.

Для получения высокого качества управления электроприводом в статических и динамических режимах в широком диапазоне регулирования скорости, в том числе в области нулевых скоростей, необходимо непосредственное управление моментом двигателя. Для этого в асинхронном двигателе обеспечивается управление как амплитудой, так и фазой тока статора, т. е. вектором, отсюда и название «векторное управление». По сравнению со скалярным приводом с векторным управлением может обеспечивать точное поддержание скорости и максимального вращающего момента в диапазоне скоростей от максимальной до нулевой.

Используются две схемы векторного управления — замкнутый контур управления с обратной связью, в котором датчик обратной связи по скорости измеряет положение ротора, и схема, в которой не требуется датчик обратной связи по скорости, т. е. бездатчиковая схема векторного управления.

При бездатчиковом управлении измеряются только токи и напряжения статора, а скорость ротора вычисляется микропроцессором по модели, учитывающей параметры асинхронного двигателя. Из-за сложностей точного отображения этих параметров в условиях изменяющихся нагрузок и температур диапазон регулирования при таком управлении ограничен. Такие приводы привлекательны для потребителей отсутствием датчика обратной связи по скорости, меньшей стоимостью и более простой установкой.

В таблице приведены сравнительные характеристики приводов со скалярным и векторным управлением.

В качестве альтернативы векторному управлению фирмой АВВ (Asea Brown Boveri) разработан метод прямого токового управления асинхронными двигателями (Direct Torque Control — DTC). Метод использует адаптивную модель двигателя, в которой с высокой точностью производится расчет момента и потока, причем датчик частоты вращения отсутствует. Для расчета рабочих параметров модели в реальном времени используются измеряемые значения токов и напряжений на двигателе. Разработанный фирмой новый алгоритм переключения силовых ключей инвертора без применения ШИМ по-

Таблица

Характеристики приводов со скалярным и векторным управлением

Режимы и показатели работы	Скалярное управление	Векторное управление	
		с датчиком	без датчика
Регулирование скорости	Да	Да	Да
Регулирование момента	Нет	Да	Да
Полный момент при нулевой скорости	Нет	Да	Да
Работа нескольких двигателей от одного инвертора	Да	Нет	Нет
Стоимость	Наименьшая	Наибольшая	Средняя
Быстродействие по моменту, мс	Зависит только от быстродействия по моменту двигателя	< 1	< 1
Точность поддержания скорости в диапазоне нагрузок 0...100%	1...2, с компенсацией скольжения	< 0,05	< 0,5
Линейность по скорости, %	< 1	< 0,01	< 0,01
Недостатки	<ul style="list-style-type: none"> • отсутствие управления по моменту; • средний диапазон скоростей 	<ul style="list-style-type: none"> • высокая относительная стоимость; • один двигатель — один инвертор 	<ul style="list-style-type: none"> • необходимы точные значения параметров двигателя; • один двигатель — один инвертор; • не рекомендуется при нулевой частоте

зволлил на порядок улучшить динамические характеристики привода.

3. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ ПРИВОДОВ

В структуре современного электропривода можно выделить два взаимодействующих канала: силовой, выполняющий передачу и преобразование энергии из электрической в механическую, и информационный, предназначенный для управления потоком энергии, сбора и обработки информации. В соответствии с этим при рассмотрении современной элементной базы обратимся отдельно к силовой электронике и к управляющей микропроцессорной технике.

Силовая электроника

Силовые каскады приводов, осуществляющие непосредственное управление исполнительными двигателями, являются узлами, в наибольшей степени определяющими надежность всей системы, мощностные параметры и стоимость.

Качественный скачок в развитии силовой техники начался в 80-е годы с появлением технологии мощных полевых транзисторов

MOSFET, биполярных транзисторов с изолированным затвором (БИТЗ) IGBT, управляемых симисторов TRIAC, тиристоров с управляемым затвором ГТО. Одновременно создавались интегральные схемы (ИС) управления этими приборами — драйверы, осуществляющие, кроме того, ряд сервисных функций: защиты от перегрузки, формирования сигналов ОС, контроля и индикации [2, 3].

К 90-м годам появился новый класс приборов — интеллектуальные силовые интегральные схемы и модули. К 2001 году при сохранении или незначительном уменьшении объемов производства тиристоров и диодов их доля в общем объеме производства приборов силовой электроники сократится до 35% и 18% соответственно. Доля полностью управляемых приборов, в основном за счет IGBT, вырастет до 47%. Годовые темпы прироста: MOSFET к 1999 году 46%, силовых ИС — 32%. К 2001 году объем производства IGBT превысит производство остальных модулей, вместе взятых.

Более половины силовых полупроводниковых (ПП) приборов выпускаются в модульном исполнении — 1-, 2-, 4- и 6-ключевые модули с изолированным основанием позволяют создавать компактные, надежные преобразователи.

Сегодня MOSFET и IGBT, силовые интегральные схемы и модули на их основе вытесняют практически из всех областей применявшиеся ранее тиристоры, биполярные транзисторы (БПТ), запираемые тиристоры, так как при тех же коммутируемых токах и напряжениях (до 3,5 кВ и до 1200 А) они имеют значительно меньшую мощность управления и время коммутации, большую стойкость к перегрузкам по току и напряжению, более широкую область безопасной работы, более высокие частоты коммутации (до 50 кГц). Простота и меньшие мощности схем драйверов и ограничителей перенапряжений обеспечили дальнейшее улучшение технико-экономических показателей преобразователей — снижение массогабаритных показателей, повышение надежности, КПД и др.

К 2001 году IGBT заменят БПТ и GTO в преобразователях до единиц МВ·А. В области больших мощностей (выше 3 МВ·А) будут доминировать GTO. В области малых мощностей и низковольтных преобразователей будут доминировать MOSFET.

Ряд зарубежных фирм, например "Еурес", серийно выпускают IGBT-модули до 3...3,5 кВ на 1200 А. В ближайшем будущем лучшие, по сравнению с GTO, статические и динамические характеристики IGBT-модулей с такими же предельными параметрами позволят сделать прогноз о вытеснении ими GTO в областях до 3,5 кВ и 3 кА.

Среди отечественных предприятий электронной промышленности, имеющих соответствующий научный и технический потенциал, где освоено промышленное производство MOSFET и IGBT, можно отметить НПП «ИНЭЛС» (Москва), а также крупнейший

производитель силовой электроники в России ОАО «Электровыпрямитель» (Саранск), где в настоящее время выпускаются GTO на токи до 2500 А, напряжение до 4500 В и IGBT-модули на токи до 400 А и напряжение до 1700 В. Готовятся к выпуску GTO до 3000 А, 6000 В и IGBT-модули до 2400 А, 3500 В.

Появившийся на российском рынке новый вид тиристоров GCT (Gate Commutated Thyristor) является дальнейшим усовершенствованием GTO. Основной особенностью тиристоров GCT, по сравнению с приборами GTO, является быстрое выключение, что достигается как изменением принципа управления, так и совершенствованием конструкции прибора. Быстрое выключение реализуется превращением тиристорной структуры в транзисторную при запираии прибора, что делает прибор нечувствительным к эффекту du/dt . Тиристоры GCT рассчитаны на напряжение до 4500 В и ток до 4000 А.

Области применения силовых полупроводниковых элементов

На рис. 2 приведены диаграммы, на которых показаны области применения силовых компонентов в зависимости от мощности и частоты, а также тенденция их развития.

Тиристоры (SCR) — преобразователи с естественной коммутацией на мощности свыше 1 МВ·А, для высоковольтных регулируемых приводов.

Запираемые тиристоры (GTO) — преобразователи с естественной коммутацией на мощности до 1 МВ·А и в дальнейшем выше, для тягового и технологического электропривода переменного тока, для высоковольтно-

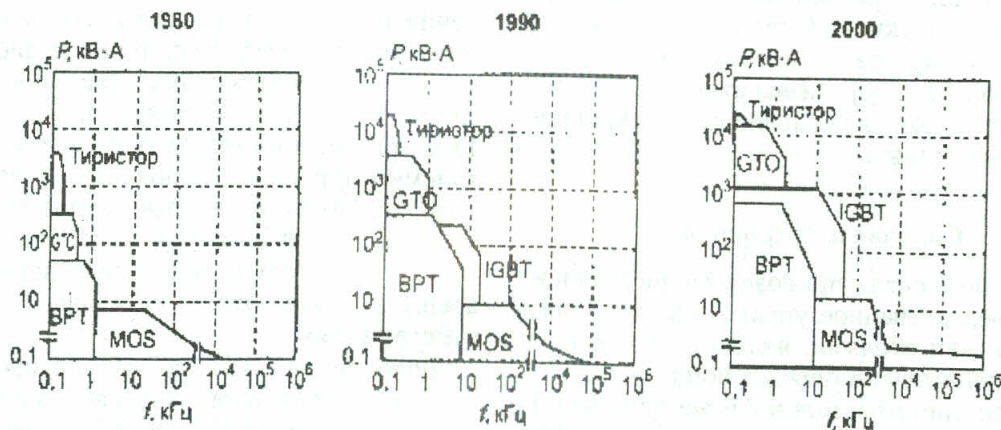


Рис. 2

го привода вентиляторов, компрессоров, насосов.

Транзисторы (IGBT) — преобразователи частоты на мощности до единиц МВ·А для электроприводов переменного тока.

Полевые транзисторы (MOSFET) — ВЧ-преобразователи (до сотен кГц) для приводов вентиляльных двигателей.

Интеллектуальные силовые модули

Среди представленных на современном российском рынке элементов силовой электроники необходимо отметить рост числа интеллектуальных силовых модулей (ИСМ), поставляемых известными мировыми производителями (Semikron, Eupec, IR, Concept). Это трехфазные мостовые инверторы на базе IGBT с возможностью прямого микропроцессорного управления и встроенной системой защит. Такие устройства ориентированы на общепромышленное применение, предназначены для использования в преобразователях частоты, управляющих асинхронными двигателями, и используются в приводах российских фирм серий АТ (С.-Петербург), Универсал (Москва) и др.

Наиболее широко, с точки зрения спектра мощностей и функциональной насыщенности, представлены ИСМ фирм Semikron (Германия) — SKiiP- и MiniSKiiP-модули [4].

Модули SkiiP (рис. 3) предназначены для улучшения электрических и тепловых характеристик инвертора мощностью до 200 кВт и повышения надежности его работы.

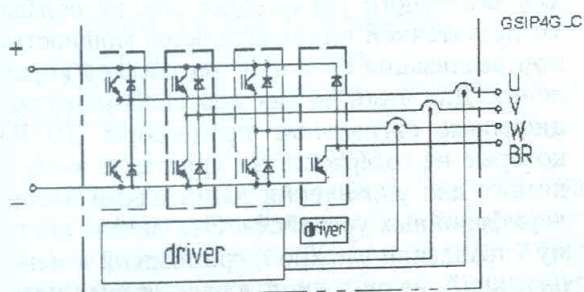


Рис. 3

В состав модуля входят силовые IGBT-ключи, радиатор, драйвер с цепями защиты и мониторинга, датчики тока и датчики температуры. Сигналы датчиков тока используются схемой встроенного драйвера для защиты от КЗ и перегрузки. Сигналы напряжений, пропорциональные измеренным величинам токов статора, температуры радиатора и постоянного напряжения на входе инвертора,

выводятся на разъем схемы управления. Модули выпускаются на токи от 200 до 1000 А и на напряжения от 600 до 1700 В. В качестве примера на рис. 3 приведен SkiiP-модуль SKiiP342GD120-314CTV на 1200 В, 300 А. Габаритные размеры 27×21×8 см без радиатора. Модуль установлен в трехфазном мостовом ШИМ-инверторе на 73 кВт·А со следующими характеристиками: $U_{\text{пост.}} = 600 \text{ В}$, $U_{\text{вых}} = 3 \times 420 \text{ В}$, $f = 0,05...60 \text{ Гц}$, $I_{\text{н.вых}} = 100 \text{ А}$, $I_{\text{перегр.}} = 165 \text{ А}$, частота ШИМ 1,5 кГц, емкость блока конденсаторов 9900 мкФ.

Для диапазона нагрузок 0,37...15 кВт поставляются модули MiniSKiiP на токи до 125 А и напряжение 1200 В.

ИСМ фирмы EUPEC содержат элементы нового поколения в корпусе типа ECONOPACK, что позволило получить высоконадежную, компактную и легкую конструкцию инвертора в диапазоне мощностей 0,5...200 кВт. Основными достоинствами этих силовых модулей являются: легкость и быстрота конструирования силовой части инвертора; автоматизация пайки модулей на печатную плату; низкоиндуктивная конструкция.

Новое поколение IGBT-модулей Eсоо-РIM фирмы EUPEC содержит в корпусе модуля входной выпрямитель, трехфазный инвертор, тормозной транзистор с диодом, датчик температуры. ИСМ поставляются на токи от 10 до 100 А и напряжения до 1200 В.

Фирма IR (США) предлагает ИСМ типа POWIRTRAIN [5], в котором интегрированы выпрямитель, инвертор, драйвер, датчики тока, напряжения и температуры. Предназначены для эффективного и гибкого конструирования инверторов на 0,75...11 кВт и напряжение на нагрузке до 380...480 В. ИСМ поставляется как полностью тестированная подсистема для встраивания в систему пользователя по принципу plug-and-play, что позволит существенно уменьшить время разработки преобразователя частоты. Модуль на 11 кВт имеет габаритные размеры 25×15×18 см. По утверждению фирмы применение подобных устройств позволяет уменьшить на треть стоимость изделия.

Микроконтроллеры

В качестве информационной части современного электропривода выступает микропроцессорный контроллер. В его задачу входит управление силовым преобразователем, обработка сигналов обратной связи по току, напряжению и скорости, а также обеспечение

интерфейсных функций связи с оператором и устройством верхнего уровня.

Основные требования к микроконтроллеру следующие. Наличие программируемых ШИМ-контроллеров для управления силовыми ключами преобразователя, получающих от процессора только уставки частоты от 1 до 20...50 кГц и скважности от 0 до 100% с точностью 8...16 разрядов. Наличие многоканального АЦП для ввода аналоговых сигналов от датчиков (4...8 каналов, 8...12 разрядов). Наличие процессора событий или таймерного сопроцессора для ввода и обработки информации от импульсных датчиков без привлечения ЦП. Наличие многоуровневой системы прерываний и механизма векторного прерывания, сторожевого таймера, последовательного интерфейса для связи с внешними устройствами. Среди общих тенденций развития микропроцессоров можно отметить интегрирование Flash-памяти на кристалл процессора, рост тактовой частоты, расширение номенклатуры интегрированных периферийных устройств для специализированных применений. Указанный набор свойств содержит однокристалльные микроконтроллеры, специализированные для применения в электроприводе. Наибольшее применение на российском рынке нашли ОЭВМ фирм Intel, Motorola и Siemens.

Семейство микропроцессоров MCS-96 фирмы INTEL содержит специализированный 16-разрядный микроконтроллер для управления двигателями 8х196МН. Интегрированные на его кристалле периферийные устройства оптимизированы для эффективного управления асинхронными и вентильными двигателями. Обеспечивается прямое цифровое управление ключами инвертора в режиме центрированной синусоидальной широтно-импульсной модуляции (частота несущей от 4 МГц до 62,5 Гц). Все каналы ШИМ имеют генератор «мертвого времени» для предотвращения сквозных токов в инверторе с длительностью от 0 до 125 мкс и быстродействующую защиту, обеспечивающую формирование запирающих сигналов на драйверы инвертора в случае идентификации микропроцессором сигнала аварии [6].

Фирма Motorola поставляет 8-, 16- и 32-разрядные МП, ориентированные на работу в электроприводе [7]. Это семейства 68HC08, M68HC16 и M68300. Среди 8-разрядных микропроцессоров MC68HC908MR24 специализирован для работы с асинхронным двигателем. Кроме тех же средств управления инвертором и защиты, как у семейства MCS-

96, имеются входы для распознавания полярности токов в фазах двигателя с целью коррекции искажений от наличия «мертвого времени» при переключении силовых ключей инвертора. Высокопроизводительный 32-разрядный МП с тактовой частотой 25 МГц и циклом шины 80 нс MC68336 ориентирован на применение с интенсивным по времени управлением движением.

Для работы с электроприводом фирмой Siemens выпускаются 8-разрядные МП C504, C508 и 16-разрядный C164. Наилучшим выбором для приложений средней производительности фирма считает применение недорогих МП C504 и C508, которые обеспечивают наилучшее соотношение цена/производительность для многих применений в энергосберегающем электроприводе [8]. Кристалл содержит мощный 6-канальный 16-разрядный таймерный модуль для прямого цифрового управления ключами инвертора. Высокая тактовая частота процессора, равная 40 МГц, позволяет получить частоту ШИМ 20 кГц (10 разрядов). Кристалл также содержит генератор мертвого времени и 8-канальный 10-разрядный АЦП. Высокопроизводительный 16-разрядный МП C164 с минимальным временем цикла 100 нс, помимо устройств, содержащихся у C504 и C508, имеет встроенный CAN-модуль, обеспечивающий интерфейс, ставший фактическим стандартом современных промышленных систем.

Большинство перечисленных ОЭВМ со встроенными функциями управления двигателями эффективно используются для скалярного управления приводом, в то время как для векторного управления они не обладают достаточной вычислительной мощностью при реализации сложных алгоритмов управления. Для этого до сих пор использовались цифровые сигнальные процессоры (ЦСП), которые не содержали на кристалле необходимого для управления двигателями набора периферийных устройств. Это делало систему управления сложной, громоздкой и менее надежной, непригодной для массовых недорогих промышленных приводов.

В последние годы ряд фирм выпустили на рынок элементную базу, которая позволяет создавать недорогие системы управления приводом, удовлетворяющие современным требованиям. Фирма Analog Devices выпустила семейство ЦСП ADMC300, содержащее на кристалле ПУ, необходимые для эффективного управления современными приводами (слеящими, замкнутыми и разомкнутыми регулируемые). Предназначены для

применения в высокопроизводительных и следящих приводах с асинхронными двигателями, двигателями с постоянными магнитами и БДПТ [9].

4. РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Зарубежными фирмами ведется активное освоение российского рынка в области регулируемого привода. Анализ функциональных возможностей таких приводов ведущих зарубежных фирм, таких как: ABB, Siemens, GE и др. — показывает, что на российском рынке во многих случаях они функционально избыточны, содержат излишнюю аппаратуру и программное обеспечение, что крайне невыгодно российскому потребителю, покупательная способность которого низка. В ряде случаев у потребителя возникают проблемы привязки импортного оборудования к конкретным условиям эксплуатации, а также отсутствия или дороговизны оперативного конструкторского и сервисного сопровождения со стороны разработчиков и изготовителей.

На кафедре электромеханики УГАТУ разработан частотно-регулируемый привод для энергосберегающих технологий на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, не уступающий по основным характеристикам зарубежным аналогам, в котором в максимальной степени учтены потребности рынка РБ [10].

В разработке использована классическая схема частотно-регулируемого привода со статическим преобразователем частоты:

- неуправляемый выпрямитель;
- звено постоянного тока;
- автономный инвертор напряжения с ШИМ-модуляцией;
- асинхронный двигатель.

Силовой преобразователь состоит из неуправляемого выпрямителя, подключенного к однофазной или трехфазной сети, и инвертора, работающего в режиме синусоидальной широтно-импульсной модуляции, выполненного по стандартной шестиключевой схеме на транзисторах IGBT. Индуктивный характер нагрузки учитывается подключением параллельно транзисторным ключам диодов, обеспечивающих непрерывность цепи протекания тока в обмотке при отключении ее от источника питания и возврат запасенной магнитной энергии в конденсатор фильтра. В приводах, имеющих высокую интенсивность тормозных режимов, для «слива» рекуперир-

рованной энергии предусматривается дополнительный ключ и резистор, рассеивающий эту энергию. Инвертор управляется микропроцессором посредством драйверов.

Микропроцессорная система выполняет функции прямого цифрового управления ключами инвертора, функции защиты, обработки сигналов датчиков обратной связи (датчики тока и напряжения в звене постоянного тока, датчики фазных токов, датчики температуры двигателя и преобразователя, датчик скорости, который может быть использован для более точной компенсации скольжения в функции нагрузки для расширения диапазона регулирования), функции интерфейса с импульсными сигналами. Связь с системой верхнего уровня управления осуществляется посредством интерфейсов RS-232 или RS-485. Имеется интерфейс для интерактивного взаимодействия с оператором для настройки параметров преобразователя, режимов его работы, наблюдения за информацией, отображаемой на индикаторе.

Выбор элементной базы, как силовой, так и управляющей, определяется с точки зрения обеспечения высокого качества, надежности, хороших регулировочных свойств и характеристик привода. Силовой канал преобразователя реализован на модулях фирм IR и ICM фирмы Semikron. В качестве формирователей управляющих сигналов IGBT-модулей применены специализированные интегральные драйверы фирмы IR, которые выполняют функции аварийного выключения транзисторов в режимах токовой перегрузки, что повышает надежность системы защиты преобразователя. В качестве датчиков тока и напряжения использованы интегральные модули LEM российской фирмы ТВЕЛЕМ. Информационный канал реализован на микропроцессоре C504.

В разработанном частотно-регулируемом электроприводе в максимальной степени учтены потребности рынка Республики Башкортостан и Уральского региона. Период окупаемости привода не превышает двух лет, если учитывать только фактор энергосбережения. При учете ресурсосбережения период окупаемости не превышает 1,5 года. Применение современной элементной базы позволило обеспечить достаточную функциональность, простоту конструкции, высокую степень интеграции и надежность, при цене разработанного электропривода на 25...30% ниже импортных аналогов. Технические средства такого частотно-регулируемого привода для энергосберегающих технологий позволяют

использовать разработанные на кафедре электромеханики методы уменьшения бросков тока и перенапряжений при коммутации двигателей для собственных нужд, что позволит существенно увеличить надежность систем электроснабжения и качество электроэнергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Берсенов А. П., Шейко П. А., Шакарян Ю. Г., Лазарев Г. Б.** Техническое перевооружение и реконструкция ТЭС России с применением энергосберегающих технологий на основе регулируемого электропривода механизмов собственных нужд // Проблемы регулируемого электропривода для электроэнергетики: Информ. матер. междунар. науч.-техн. семинара. М., 1999. С. 1–15.
2. **Флоренцев С. Н., Ковалев Ф. И.** Современная элементная база силовой электроники // Электротехника. 1996. № 4. С. 6–8.
3. **Пелли Б. Р.** IGBT-биполярные транзисторы с изолированным затвором // Электротехника. 1996. № 4. С. 16–20.
4. **SEMIKRON**, innovation + service // Power Electronics. Ident. No. 11230380. 1998. P. B7-1–69.
5. **PowReview**. The Technology Update for People in Power // Int. Rectifier. 1997. Issue 21. Fall. P. 6–7.
6. **Микроконтроллеры:** руководство по применению 16-разрядных микроконтроллеров Intel MCS-196/296 во встроенных системах управления / В. Ф. Козаченко. М.: ЭКОМ, 1997. 688 с.
7. **Микроконтроллеры** фирмы Motorola / Г. Ю. Костин. М.: КТЦ-МК, 1998. 38 с.
8. **Чучалов В. А.** Новые микроконтроллеры фирмы Siemens в промышленных системах управления // Электротехника. 1998. № 3. С. 56–59.
9. **Козаченко В. Соловьев А.** Новые DSP-микроконтроллеры фирмы Analog Devices ADMC300/330 для высокопроизводительных систем векторного управления электроприво-

дами переменного тока // Chip news. 1998. № 5. С. 16–21.

10. **Мухин М. А., Султангалеев Р. Н., Хайруллин И. Х.** Частотно-регулируемый электропривод на современной элементной базе для энергосберегающих технологий // Энергоресурсосбережение в Республике Башкортостан: Матер. второй науч.-практ. респ. конф. Уфа: УГАТУ, 1999. С. 242–246.

ОБ АВТОРАХ



Волкова Татьяна Юрьевна, ст. преп. кафедры электромеханики УГАТУ. Дипл. инж.-электрик (Уфимск. нефтяной ин-т, 1980). Исследования в области электромеханических преобразователей энергии.



Исмагилов Флюр Рашитович, профессор, зав. каф. электромеханики УГАТУ. Дипл. инж.-электромеханик (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по элементам и устройствам управления (УГАТУ, 1998). Труды в области электромеханических преобразователей энергии.



Султангалеев Рафил Наилович, доцент той же кафедры. Дипл. инж.-электромеханик (УАИ, 1980). Канд. техн. наук по элементам и устройствам вычислительной техники и систем управления (УГАТУ, 1986). Труды по электромеханическим преобразователям энергии.