

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ МОДУЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В УПРАВЛЕНИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Современные системы цифрового управления комплектными электроприводами и силовыми преобразователями – сложные устройства, которые обеспечивают параллельное управление скоростью и моментом двигателя; регуляторами технологических переменных (давления, температуры, расхода и т. д.); дискретными автоматами группового управления оборудованием, например насосами, вентиляторами; интерфейсные функции сопряжения с оператором и системами верхнего уровня управления.

Это комплектные устройства, выполняющие функции прямого цифрового управления силовыми ключами и сопряжения с датчиками. Они обладают широкими возможностями для решения разнообразных сервисных задач: автоидентификации параметров двигателей и нагрузки, автонастройки регуляторов; диагностики состояния отдельных блоков системы управления и привода в целом; ведения электронного журнала аварий и предупреждений; местного или удаленного наблюдения в реальном времени за состоянием привода и управляемых технологических переменных; модернизации программного обеспечения непосредственно в изделии.

Микропроцессорная элементная база для подобных применений развивается в нескольких направлениях:

- повышение тактовой частоты и производительности центрального процессора (до 100–400 млн.оп./с), увеличение числа функций системы управления, реализуемых исключительно программным путем;
- переход от традиционной архитектуры фон-Неймана центрального процессора к более производительной многошинной конвейерной архитектуре, в частности модифицированной "гарвардской", т. е. переход от обычных микроконтроллеров к сигнальным;
- повышение разрядности: отказ от использования 8-разрядных, а зачастую и 16-разрядных микроконтроллеров, – применение в новых разработках только 32-разрядных микроконтроллеров;
- переход к двухъядерным архитектурам центрального процессора для поддержки эффективных вычислений как в

В.Козаченко, д.т.н., А.Жарков, к.т.н., Д.Алямкин
kozachenkoVF@mpei.ru

формате с фиксированной точкой, так и в формате с плавающей точкой;

- увеличение объема встроенной памяти на кристалле: программ (до 256 Кслов) и данных (до 34 и более Кслов);
- оптимизация трансляторов с языков высокого уровня по объему кода и быстрдействию; отказ от трудоемкого программирования на ассемблере и переход к программированию на языке высокого уровня С/С++ в интегрированных компьютерных средах;
- разработка микроконтроллеров с поддержкой большинства стандартных коммуникационных интерфейсов и широким набором специализированных периферийных устройств, которые предназначены для управления двигателями, силовыми преобразователями, сопряжения с датчиками, т. е. специализированных микроконтроллеров серии Motor Control (управление двигателями), Motion Control (управление движениями), Power Control (управление мощностью);
- создание предметно-ориентированных библиотек типовых функций и типовых решений: поддержки систем цифрового управления двигателями, источниками питания, цифровой фильтрации и т. д.

Отличительная особенность микроконтроллеров Motor Control – встроенная аппаратная поддержка прямого цифрового управления силовыми ключами в режиме широтно-импульсной модуляции, а также методов прямого сопряжения с датчиками электрических и механических координат привода.

Серии микроконтроллеров Motor Control выпускаются ведущими производителями процессорной техники – компаниями Intel, Motorola, Texas Instruments, Analog Devices и др. В составе периферийных устройств: многоканальные ШИМ-генераторы с фронтальной, центрированной модуляцией, широтно-импульсной модуляцией базовых векторов; многоканальные модули захвата и квадратурного декодирования; многоканальные модули сравнения; контроллеры сетевых промышленных интерфейсов (CAN, RS-485); расширители интерфейсов. К достоинствам этих устройств можно отнести высокий уровень интеграции, возможность создания малогабаритных,



одноплатных, унифицированных контроллеров электропривода повышенной надежности, которые предназначены для управления любыми двигателями переменного тока (асинхронными, синхронными, вентильными, вентильно-индукторными), а также силовыми источниками питания типа DC/DC, AC/DC с любым числом параллельно работающих синхронизированных каналов. Описываемая в настоящей статье серия систем управления разработана на этой элементной базе.

ВСТРАИВАЕМЫЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ И СИСТЕМ ПИТАНИЯ

За последние 12 лет на новой элементной базе в МЭИ и в "Научно-производственной фирме "Вектор" (г. Москва) разработана и запущена в производство серия универсальных модульных встраиваемых систем управления на базе контроллеров (моделей 7.1–20.1) для отечественных электроприводов переменного тока, преобразователей частоты и мощных источников питания. Система управления состоит из собственно модуля контроллера (МК), ряда модулей расширения его функций (МР), модулей дискретного и аналогового ввода-вывода (МДАВВ) и пультов оперативного управления (ПУ).

Большинство контроллеров серии реализованы на специализированных сигнальных микроконтроллерах фирмы Texas Instruments – мирового лидера в производстве процессоров типа Motor Control. Разработки выполнялись по заказам отечественных производителей преобразователей частоты и комплектных электроприводов: московских предприятий ФГУП НПП ВНИИЭМ; ООО "Цикл+"; ООО "Центртехкомплект"; АО "ВНИИКТ"; ОАО "ВНИКТИ" (г. Коломна); ООО "Энергосбережение" (г. Пушино), ОАО "Ижевский радиозавод" и др.

Контроллеры привода имеют производительность от 40 (МК10.5) до 300 млн. оп./с (МК19.1 и МК20.1). Последние изделия разработаны в 2008 году на базе новейших процессоров Texas Instruments TMS320F28335 с аппаратной поддержкой параллельных вычислений в формате с фиксированной и плавающей точкой. Сверхвысокая производительность центрального процессора позволяет реализовать самые сложные системы управления, отказаться от принятой до последнего времени практики проектирования системы управления в относительных единицах в пользу физических единиц, что расширяет динамический диапазон представления переменных.

Новейшие микроконтроллеры фирмы Texas Instruments TMS320F2833x имеют систему команд, полностью совместимую с системой команд наиболее отработанных на сегодняшний день микроконтроллеров TMS320F28xx производительностью 150 млн.оп./с, которые применяются в качестве центральных процессоров в изделиях МК17.1/3, что позволяет легко переносить ранее разработанное программное обеспечение на новую аппаратную платформу.

Кроме того, наличие в процессоре TMS320F2833x модуля обработки чисел в формате с плавающей точкой и конвейера,

допускающего параллельную работу вычислителей с фиксированной и плавающей точкой, дает возможность вдвое поднять производительность. Модуль обработки чисел в формате с плавающей точкой поддерживает не только стандартные команды, такие как сложение, вычитание, умножение, сравнение, поиск максимума или минимума, инвертирование, получения абсолютного значения числа и т. д., но и уникальные команды, например сдвоенное умножение-накопление в формате с плавающей точкой. Эту команду можно включить в цикл повторения инструкции и выполнить ее всего за два цикла. Перед разработчиком открываются неограниченные возможности реализации цифровых фильтров, регуляторов, наблюдателей непосредственно в формате с плавающей точкой. Таким образом, время отладки программного обеспечения для сложных систем векторного управления заметно сокращается.

Система команд для работы с числами в формате с плавающей точкой является функционально полной и включает в себя также команды конвертирования форматов и команды получения первого приближения обратного значения числа и корня квадратного. С помощью двух дополнительных программных итераций в соответствии с алгоритмом Ньютона-Рафсона можно быстро получить точный 32-разрядный результат. Тем самым аппаратно обеспечивается высокая эффективность любых операций с плавающей точкой, включая деление. Указанные аппаратные возможности полностью поддерживаются компилятором C/C++.

С учетом расширенных возможностей встроенных на кристалл процессора менеджера событий, модуля квадратного декодирования, модуля прямого доступа в память, а также заметно возросшего объема памяти программ (до 256 Кбайт) и данных (до 34 Кбайт) практически полностью снимаются ограничения на сложность проектируемой системы управления для привода с двигателем любого типа. Разработанные системы управления могут применяться в мощных системах питания, где требуется параллельная работа большого числа преобразователей, а также в установках нетрадиционной энергетики (солнечной, ветровой, малых рек и т. д.).

Стоимость и габариты системы управления могут быть оптимизированы в соответствии с требованиями конкретного заказчика. Это достигается благодаря использованию центральных процессоров разной производительности (от 40 до 300 млн. оп./с), а также за счет разработки универсальных контроллеров двух типов: для одноинверторных применений (первый тип) и для двухинверторных применений (второй тип). Они имеют одинаковую архитектуру и отличаются только числом блоков прямого цифрового управления ключами и ввода сигналов аналоговых датчиков. Установив модуль расширения (наездника), контроллер первого типа можно легко превратить в контроллер второго типа.

Контроллеры серии МК имеют встроенную систему вторичного питания с мониторингом качества питания. При авариях и перебоях в питании важнейшие параметры системы управления сохраняются в энергонезависимой памяти контроллера ("черном ящике"). Аварийные сообщения сопровождаются временными метками с часов реального времени. Оператор имеет доступ к банку аварий и предупреждений с пульта оперативного управления или по локальной промышленной сети (CAN или RS-485).

Контроллеры работают в двух режимах: загрузки программного обеспечения с компьютера во встроенную флеш-память по одному из последовательных каналов связи или в реальном времени (выполнение рабочей программы). Устройства имеют встроенную индикацию режима работы. В них поддерживается интерактивная отладка программного обеспечения в реальном времени через интерфейс JTAG, при этом используются внутрисхемные эмуляторы и интегрированные среды разработки типа Code Composer Studio.

Каждый блок прямого цифрового управления силовыми ключами обеспечивает: выдачу шести сигналов в режиме центрированной или векторной ШИМ-модуляции и двух сигналов в режиме фронтовой ШИМ, прием двух запросов прерываний по авариям или до восьми индивидуальных сигналов аварий силовых ключей. При мощностях привода до 500 кВт ШИМ-сигналы выдаются в стандарте "открытый коллектор" с допустимой нагрузкой 20 мА для непосредственного управления первичными цепями оптронов драйверов силовых ключей. При больших мощностях применяются волоконно-оптические приемники-передатчики в виде модулей расширения функций контроллера.

Аварийные сигналы вводятся с учетом специфики драйверов: от каждого из силовых ключей; общим сигналом аварии любого ключа стойки; общим сигналом аварии любого ключа инвертора. Формат ввода – "открытый коллектор". Обработка аварий унифицирована: аппаратно блокируется инвертор (за 1 мкс); идентифицируется источник аварии; выдается диагностическое сообщение на дисплей пульта управления и/или по сети; если тип аварии допускает повторное включение, то оно разрешается после отсчета заданной выдержки времени; информация о времени и типе аварии сохраняется в энергонезависимой памяти системы управления для последующего мониторинга отказов.

Устройство допускает ввод аналоговой информации: с датчиков напряжения и тока в звене постоянного тока, с датчиков фазных токов и напряжений, с помощью сигналов задания и обратной связи по технологическим переменным. Для выбора нужного формата ввода применяется аппаратный селектор формата. Контроллер оснащен преобразователем уровня сигнала, фильтром низкой частоты, схемой защиты от перенапряжений и переполновки. Для систем скалярного управления используется 10-разрядный АЦП с временем

преобразования 500 нс на канал, для систем векторного управления – 12-разрядный АЦП с временем преобразования 60–80 нс на канал. Высокая точность и помехоустойчивость достигается за счет дифференциальных аналоговых входов и узла принудительной программной калибровки АЦП.

Блок интерфейса с датчиками положения рассчитан на прием потенциальных сигналов с 3-, 4-, 5-, 6-канальных датчиков положения (индуктивных, на элементах Холла и др.), а также дифференциальных сигналов с оптических датчиков положения. В его состав входят дифференциальные приемники и триггеры Шмидта для подавления помех. Оценка механического и электрического положения, а также скорости выполняется программно с использованием модуля "квадратурного" декодирования.

Управление приводом производится с пульта оперативного управления, дистанционно, в том числе по локальной промышленной сети, а также программно – по часовым, суточным и недельным циклограммам с помощью часов реального времени. Сетевые интерфейсы CAN и RS-485 имеют встроенную программную поддержку протоколов высокого уровня CANopen и MODBUS. Это позволяет быстро интегрировать электропривод в систему комплексной автоматизации производства. Встроенная гальваническая развязка интерфейсов допускают конфигурирование сети "на ходу" без выключения питания.

Функции базового контроллера могут быть расширены по трем быстродействующим интерфейсам: параллельному, синхронному периферийному SPI (до 5 Мбит/с) и многоканальному последовательному буферизированному McBSP (до 20 Мбит/с). Они предназначены для: подключения прецизионных ЦАП и АЦП (например, для станочных приводов); модулей сопряжения с резольверами (ВТ) и другими датчиками абсолютного положения ротора; модулей поддержки нетрадиционных (инфракрасный) и перспективных интерфейсов (беспроводной радиосвязи Zig Bee).

Ядром системы управления отечественной серии преобразователей частоты "Универсал" мощностью от 1,5 до 220 кВт является контроллер МК10.5 на базе сигнального процессора TMS320LF2406A с производительностью 40 млн.оп./с. Его функции могут быть расширены с помощью платы расширения МК10.5Е, интеллектуального пульта оперативного управления ПУ12.2 (встроенного или выносного), нужного числа модулей дискретного ввода-вывода МДВВ10.5 (рис.1). С помощью контроллера привода можно управлять технологическими переменными (давлением, расходом и т. д.) и дополнительной коммутационной аппаратурой, что позволяет создавать на базе ПЧ станции группового управления насосами (СГУ).

Дополнительные модули расширения функций контроллера привода выпускаются в нескольких модификациях: устанавливаемые на плату контроллера в виде наездников;



Рис. 1. Система управления ПЧ на базе контроллера МК10.5 с модулями ввода-вывода и пультом оперативного управления

подключенные по синхронному периферийному интерфейсу SPI с возможностью каскадирования модулей (удаление от контроллера не более 2–3 м); интеллектуальные модули, подключаемые через промышленный интерфейс CANopen (удаление до сотен метров, возможность монтажа непосредственно в шкафах релейно-контакторной аппаратуры). К интеллектуальным относятся модули пультов оперативного управления, а также дискретного и аналогового ввода-вывода.

Высокопроизводительный контроллер МК17.1 на базе сигнального процессора TMS320F2810 имеет производительность 150 млн. оп./с и ориентирован на сложные системы векторного, в том числе бездатчикового управления электроприводами. Контроллер МК19.1 на основе сигнального процессора TMS320F28335 обладает еще большей производительностью (300 млн.оп./с) и поддерживает вычисления в формате с плавающей запятой.

В рамках создания контроллеров МК19.1 (рис.2) была разработана новая концепция соединения всех интеллектуальных устройств в составе преобразователя: модули расширения подключаются к модулю контроллера по кабелю локальной промышленной сети CANopen одновременно с разводкой питания. Все межмодульные соединения выполняются одним кабелем. Число используемых модулей расширения и их удаленность от модуля контроллера могут быть любыми. Внутренняя CAN-шина и внешняя CAN-шина для соединения с устройствами управления верхнего уровня физически разделены.

По требованию заказчиков разрабатываются и поставляются контроллеры, предназначенные для беспроводного монтажа в силовой преобразователь (например, МК20.1, рис.3), что зна-

чительно упрощает сборку изделия. Разумеется, контроллеры являются специализированными, так как все интерфейсы, в том числе с датчиками и внешними устройствами, выполняются через силовую плату.

На основе контроллера МК17.1 реализована мультимикропроцессорная система управления новым отечественным многосекционным вентильно-индукторным электроприводом мощностью 315, 400 и 630 кВт для ответственных энергосберегающих устройств жилищно-коммунального хозяйства: сетевых насосов, дымососов, дутьевых вентиляторов районных тепловых станций. Привод по кооперации производят несколько предприятий – ООО "Центр-техкомплект", ООО "Энергосбережение", ООО "Цикл+", ООО "НПФ Вектор", "Сафоновский электромеханический завод". За счет применения двух питающих фидеров, секционирования двигателя и преобразователя обеспечиваются надежность и резервирование, даже если пропадает напряжение питания по одному из силовых вводов.

В качестве исполнительного применяется вентильный индукторный двигатель оригинальной конструкции с радиально-аксиальным потоком и несколькими независимыми в магнитном отношении трехфазными обмотками – секциями, обра-



Рис.2. Контроллер МК10.5 для систем управления ПЧ "Универсал"



Рис.3. Специализированный контроллер МК20.1 на базе TMS320F28335 для преобразователей частоты мощностью до 7,5 кВт



Рис.4. Преобразователь частоты мощностью до 3,7 кВт с высокопроизводительным контроллером МК20.1

зованными сосредоточенными катушками и одной общей обмоткой возбуждения (также катушечной). Все обмотки расположены на статоре, ротор – пассивный, ферромагнитный. Машина оптимизирована под синусоидальное векторное управление каждой секцией с суммированием моментов секций непосредственно на валу. По техническим характеристикам этот низковольтный привод (напряжение питания – 380 В, трехфазное) успешно конкурирует с высоковольтными частотно-регулируемыми электроприводами зарубежных производителей.

В состав системы управления входят: четыре секционных контроллера МК17.1, четыре пульта оперативного управления ПУ12.2, четыре модуля дискретного ввода-вывода МДВВ17.1, модуль периферийного контроллера МК17.1 для удаленного тактирования абсолютного датчика положения. Все модули объединены локальной промышленной сетью CANopen и реализуют согласованное векторное управление четырьмя секциями машины. Также поддерживаются оригинальные алгоритмы "безмастерного" управления. Это означает, что функции мастера может выполнять любой исправный секционный контроллер, который получил команду от оператора непосредственно с пульта управления или от системы управления верхнего уровня по интерфейсу MODBUS RTU. Информация о положении ротора поступает в каждый секционный контроллер по синхронному последовательному интерфейсу на скорости 20 Мбит/с. Таким образом, все контроллеры, входящие в систему управления, объединены тремя сетями: MODBUS RTU – связь с верхним уровнем; CANopen – внутренняя локальная сеть привода; SCI – связь с датчиком положения.

Еще один пример использования контроллеров серии МК. Указанными выше предприятиями и ОАО "НИПТИЭМ" (г. Владимир) разработан комплектный электропривод на базе конструктивно простой и дешевой двухфазной вентильно-индукторной машины с самовозбуждением (SRD). Простота маши-

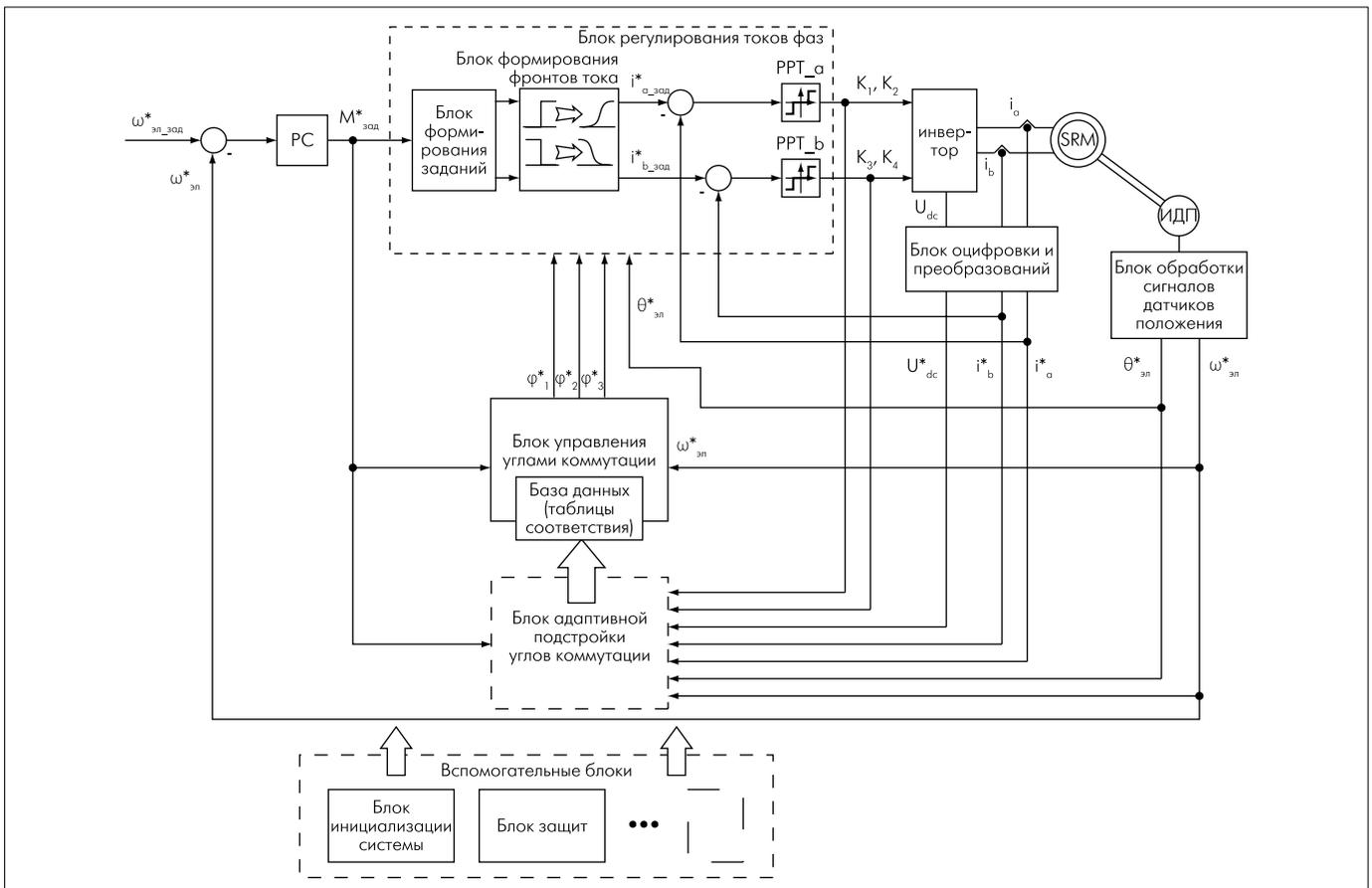


Рис.5. Структурная схема системы управления двухфазным ВИД в режиме "вентильной" машины



ны компенсируется наличием преобразователя частоты с высокопроизводительным контроллером МК20.1 (рис.4).

Его вычислительные возможности позволяют реализовать не только классическую систему управления вентильным двигателем с управлением углами коммутации в функции скорости (включением, выключением, переходом в режим мягкой расфорсировки), но и профилировать оптимальную форму тока на интервале коммутации (рис.5). Это позволяет значительно снизить пульсации электромагнитного момента, присущие машинам такого класса. Кроме того, можно создать адаптивный регулятор углов коммутации, работающий в реальном времени.

За счет того, что основные проблемы были перенесены в сферу программной реализации сложных алгоритмов управления, существенно упростился и удешевился сам электромеханический преобразователь. Это удалось благодаря, казалось бы, избыточным ресурсам контроллера МК20.1 по производительности и по объему памяти. В результате была разработана система управления, близкая к векторной с высокими показателями КПД. Так, для мощностей 1,1 и 2,2 кВт (номинальная скорость 3000 об./мин) КПД всей системы "преобразователь–двигатель" достигает 70% в диапазоне регулирования скорости 10:1, что не уступает показателям обычного асинхронного электропривода.

Использование элементной базы ведущих мировых производителей позволяет отечественным разработчикам создавать высокоэффективные встраиваемые системы управления с развитыми функциональными возможностями, а также комплектные электроприводы и системы силового питания на их основе, не уступающие зарубежным аналогам. С учетом наметившейся в России консолидации производителей электрооборудования появляется реальный шанс создать отечественную индустрию комплектованных электроприводов и преобразователей энергии, которая будет обеспечивать не только модернизацию энергетики страны, но и внедрение энергосберегающих технологий во все сферы хозяйства.

ЛИТЕРАТУРА

- Козаченко В.Ф.** Заказные разработки микропроцессорных контроллеров управления комплектными электроприводами и преобразователями энергии – *Электронные компоненты*, 2005, №3, с.144–147.
- Козаченко В.Ф.** Новые возможности семейства специализированных микроконтроллеров TMS320F2833x. – *Новости электроники*, 2008, №14(60), с. 7–15.