

Микроконтроллерные системы управления электроприводами: современное состояние и перспективы развития

Автор: Козаченко Владимир Филиппович

Доцент кафедры Автоматизированного электропривода МЭИ, директор Учебно-научно-консультационного центра «Texas Instruemtns-МЭИ», директор Научно-производственной фирмы «ВЕКТОР»

Преимущества цифровых электроприводов

С момента появления первого микропроцессора в 1971г. бурно развивается область цифровой управляющей электроники, относящаяся к *встраиваемым микропроцессорным системам управления реального времени*. За последние двадцать лет произошли качественные изменения в структуре электропривода, связанные в первую очередь с переходом на новую элементную базу построения силового канала (IGBT-транзисторы, интеллектуальные силовые модули IPM) и новую элементную базу канала управления – *высокопроизводительные микроконтроллерные системы прямого цифрового управления оборудованием*. Речь идет не только о прямом управлении ключами силовых преобразователей, но и о прямом сопряжении с широкой номенклатурой датчиков обратных связей (положения, скорости, ускорения), а также с элементами дискретной автоматики (релейно-контакторной аппаратурой, дискретными датчиками и дискретными исполнительными устройствами). Область управления двигателями и силовыми преобразователями стала ярким примером быстрой адаптации процессорной техники к задачам предметной области.

Функции прямого цифрового управления в современных приводах реализуются за счет использования специализированных периферийных устройств, интегрированных непосредственно на кристалл микроконтроллера и не требующих дополнительных развитых средств сопряжения, а также за счет высокопроизводительной архитектуры и системы команд центрального процессора, позволяющей решать большинство типовых задач управления двигателями программным способом (регуляторы, наблюдатели, преобразователи координат и т.п.). Основные направления развития встроенной периферии для управления двигателями на современном этапе следующие (рис. 1):

- Переход от обычных счетчиков к наборам универсальных счетчиков/таймеров со встроенными каналами сравнения/захвата и далее к *многоканальным процессорам событий*. Прецизионное формирование многоканальных последовательностей управляющих импульсов (в том числе для управления силовыми ключами в режиме ШИМ) – *функция высокоскоростного вывода* на частотах до 20-50 кГц. Прецизионная временная обработка входных многоканальных последовательностей импульсов для сопряжения с широким классом датчиков обратных связей (импульсных, индуктивных, на элементах Холла и т.д.) – *функция высокоскоростного ввода* на частотах до 100 кГц и выше;
- Создание специализированных периферийных устройств типа «*квадратурных декодеров*» для обработки сигналов наиболее распространенных датчиков обратных связей (в частности, оптических датчиков положения) - *функция идентификации положения и скорости*;
- Создание *унифицированных многоканальных ШИМ-генераторов* со встроенными возможностями прямого цифрового управления ключами инверторов, активных выпрямителей и преобразователей постоянного напряжения в постоянное в режимах фронтальной, центрированной и векторной ШИМ-модуляции – *функция прямого управления силовыми ключами*.

- Интеграция процессора событий и многоканального ШИМ-генератора в одном универсальном устройстве – *менеджере событий*;
- Создание микроконтроллеров со *сдвоенными менеджерами событий* для прямого цифрового управления приводами по системе: «Активный выпрямитель-Инвертор-Двигатель» и «Преобразователь постоянного напряжения в постоянное – Инвертор – Двигатель», а также для управления двухдвигательными приводами.

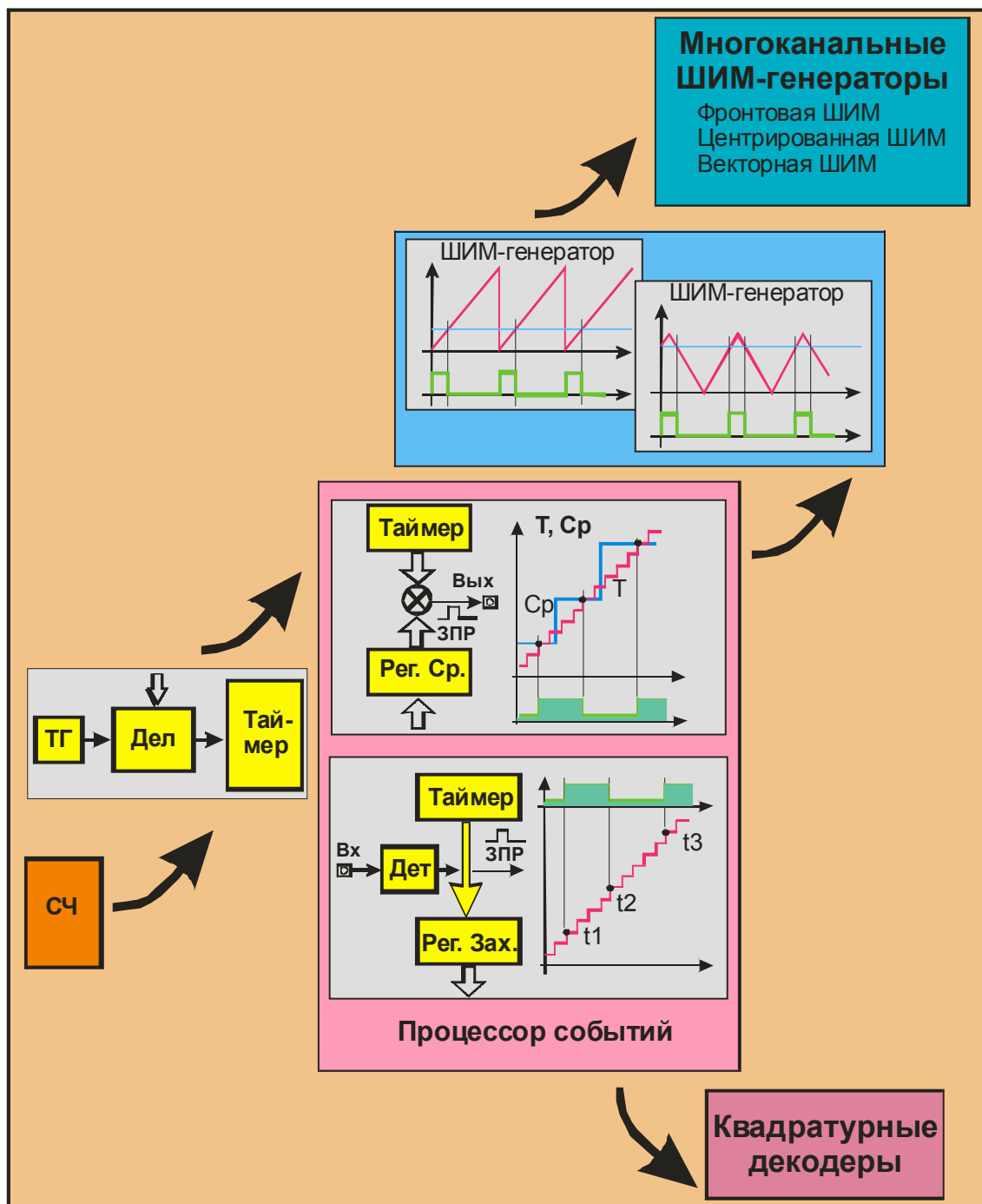


Рис.1. Основные тенденции развития встроенных периферийных устройств микроконтроллеров.

- Значительное *повышение быстродействия* аналого-цифровых преобразователей (время преобразования до 100 нс на канал), *автосинхронизация* процессов запуска АЦП с работой других периферийных устройств, в частности, ШИМ-генераторов,

автоконвейеризация процессов преобразования в АЦП по нескольким каналам (до 16)
- поддержка *функций прямого токового управления и прямого управления моментом*.

Переход к цифровым системам управления приводами на базе специализированных микроконтроллеров позволил обеспечить новый, недостижимый в аналоговых системах, уровень показателей качества:

- на порядок меньшие габариты и вес управляющей электроники;
- резкое повышение надежности (фактическое время наработки на отказ достигает 100000 час и выше) и срока службы привода (до 10 лет и более);
- быструю и качественную интеграцию привода в систему комплексной автоматизации производства с помощью унифицированных интерфейсов сопряжения с системами управления более высокого уровня и соответствующих средств программной поддержки (RS-232, RS-485, CAN);
- местное и дистанционное управление;
- интерактивный дружественный интерфейс с человеком-оператором на языке страны использования привода: отображение на встроенном дисплее информации о текущем состоянии привода и значениях наблюдаемых переменных; ввод команд оперативного управления со встроенной клавиатуры; настройка параметров привода и системы управления в процессе пуско-наладочных работ с сохранением значений в энергонезависимой памяти; интерактивная справочная система и система подсказок стратегии управления в реальном времени;
- встроенный и удаленный (по сети) мониторинг состояния привода и раннее предупреждение аварийных ситуаций в технологическом оборудовании, возникающих вследствие срабатывания защит или идентификации отказов в приводе;
- конфигурирование структуры системы управления самим пользователем в процессе запуска привода в эксплуатацию для адаптации к конкретной технологии или специфике применения привода;
- встроенное управление средствами привода сопутствующей дискретной автоматикой без использования дополнительных промышленных программируемых контроллеров и управляющих ЭВМ;
- распределенное мультимикропроцессорное управление многоосевыми приводами роботов, манипуляторов, кабельных линий и т.п. с использованием локальных промышленных сетей, например, CAN, с широкими возможностями синхронизации, вплоть до систем электрического вала, распределенного позиционного и контурного управления;
- унификацию встроенных средств управления приводами (контроллеров, модулей ввода-вывода, пультов оперативного управления) независимо от типа исполнительного двигателя, структуры силового канала, типов используемых датчиков обратных связей;
- простую систему наращивания мощности комплектного электропривода за счет использования секционируемых исполнительных двигателей (например, вентильно-индукторных), каждая секция которых управляется от отдельного типового преобразователя с объединением систем управления всеми преобразователями в локальную промышленную сеть;
- возможность использования самых современных структур и алгоритмов управления приводами, которые трудно, а порой и невозможно реализовать на аналоговой элементной базе: векторного управления двигателями переменного тока; прямого управления моментом; прямого частотно-токового управления; управления с элементами фаззи-логики; прямой программной реализации по графам переходов дискретных управляющих автоматов любой сложности и т.п.

Специализированная элементная база для построения систем управления электроприводами

К 1995 г. фирмой Intel была разработана первая в мире серия *специализированных микроконтроллеров для управления двигателями (Motor Control) и движениями (Motion Control)*. Серия состоит из трех микроконтроллеров 8xC196MC, 8xC196MD, 8xC196MH и создана на базе популярного семейства 16-разрядных микроконтроллеров для управления событиями в реальном времени MCS-96/196 с перспективной регистр-регистрационной архитектурой и мощной системой команд. Эффективная производительность процессора - 2 млн.оп./с.

Набор встроенных периферийных устройств включает в себя таймеры/счетчики, параллельные и последовательные порты ввода/вывода, многоканальный процессор событий, многоканальный АЦП, генератор частоты, 3-канальный генератор ШИМ-сигналов и универсальный 6-канальный генератор периодических сигналов.

Похожие по функциональным возможностям и производительности микроконтроллеры стали выпускать и другие фирмы, в частности Siemens (Infineon) и Motorola. Осознав преимущества для целей управления двигателями технологии цифровой обработки сигналов с 1995-96 гг. в борьбу за рынок включились ведущие компании по производству сигнальных процессоров (DSP): Texas Instruments, Motorola, Analog Devices. Имея на порядок более производительное ядро центрального процессора, они интегрировали на кристалл процессора специализированную периферию для управления двигателями, расширили ее функциональные возможности, предложили развитые интегрированные средства разработки и отладки ПО – создали новую элементную базу: *специализированные сигнальные микроконтроллеры для управления двигателями (DSP Motor Control)* высокой производительности (более 20 млн.оп. цифровой обработки/с). Возросший уровень технологии позволил производить сигнальные микроконтроллеры по цене обычных микроконтроллеров и даже ниже.

На сегодняшний день абсолютным мировым лидером в производстве цифровых сигнальных микропроцессоров и микроконтроллеров является фирма Texas Instruments (TI), владеющая примерно половиной рынка. В последние годы она вышла на первое место в мире по производству и аналоговых микросхем. Быстро прогрессирует компания Analog Devices, сигнальные процессоры которой имеют оригинальную архитектуру и удобный для пользователей язык программирования.

Наиболее полную номенклатуру сигнальных микроконтроллеров для управления двигателями предлагает фирма Texas Instruments (TI) - семейство TMS320C2000 – рис. 2. Её микроконтроллеры ориентированы на использование: а) в массовом, встраиваемом, дешевом приводе изделий бытовой техники (стиральные машины, пылесосы, кондиционеры и т.д.); б) в приводах общепромышленного назначения, в том числе в преобразователях частоты; в) в ответственных прецизионных приводах роботов, манипуляторов и станков с числовым программным управлением.

DSP-микроконтроллеры TI отличаются улучшенной периферией: 1) один или два менеджера событий со встроенной поддержкой широтно-импульсной модуляции базовых векторов для прямого цифрового управления приводами по структуре «Активный выпрямитель – Инвертор – Двигатель»; 2) встроенный контроллер локальной CAN-сети для поддержки распределенного управления; 3) многоканальное быстродействующее АЦП с режимами автовыборки данных сразу по нескольким каналам для систем векторного управления; 4) полный спектр быстродействующих интерфейсных устройств для межмодульных соединений и подключения к системам управления верхнего уровня. Широкая номенклатура позволяет оптимизировать систему управления привода по критерию: требуемые функциональные возможности за минимум цены (Таблица 1).

В качестве памяти программ используется надежная флэш-память, допускающая многократное перепрограммирование непосредственно в изделии, или однократно-программируемое на заводе изготовителе масочное ПЗУ (для массового производства).

Микроконтроллеры TI имеют производительную модифицированную Гарвардскую архитектуру центрального процессора с конвейерной обработкой команд и выполнением любой команды за один такт. Последние представители семейства - микроконтроллеры 'C28, объединяют в себе достоинства всех трех процессорных архитектур: обычных микроконтроллеров, DSP-микропроцессоров и RISC-процессоров. Они имеют встроенную библиотеку трансцендентных функций, допускают программирование и отладку непосредственно на языке высокого уровня СИ в реальном времени.



Рис.2. Сигнальные микроконтроллеры серии Motor Control фирмы Texas Instruments

Использование в качестве памяти программ флэш-памяти не требует никаких специальных программаторов, так как алгоритм стирания и «прожига» реализуется собственно DSP-процессором, а *загрузка программного обеспечения* может быть выполнена *непосредственно в изделии* от компьютера по последовательному каналу связи.

Новейшие микроконтроллеры 'C28 являются *альтернативой процессорам с плавающей точкой*. Имея в несколько раз меньшую стоимость они позволяют работать с 32-разрядными данными с точностью, достаточной для самых сложных задач управления. Так, необходимые в системах векторного управления операции, например, сдвоенного умножения с накоплением 16×16 , умножения с накоплением 32×32 выполняются за один такт, длительностью всего 6,67 нс и даже сложная система дифференциальных уравнений наблюдателя состояния 100-го порядка может быть решена за время, меньшее 1 мкс, что занимает не более 1% ресурсов центрального процессора при частоте ШИМ 10 кГц.

Таблица 1. Основные технические характеристики семейства сигнальных микроконтроллеров типа Motor Control фирмы Texas Instruments

Устройство	Млн. оп.с	Частота (МГц)	ОЗУ Слов	ПЗУ Слов	Флэш Слов	Загрузчик	Интерф. внеш. памяти	Число каналов ШИМ	АЦП (разр./каналов)	Время преоб. (мкс)	CAN-модуль	Таймеры	Число посл. портов	Число выводов/Корпус	Особенности
Микроконтроллеры TMS320x24x, 16 разрядные															
SM320F240	20	40	544		16К	Флэш	Есть	12	10/2	6.1 мкс		3	2	132CFP	Военн. испол.
SMJ320F240	20	40	544		16К	Флэш	Есть	12	10/2	6.1 мкс		3	2	132CFP	Военн. испол.
TMS320C242	20	20	544	4К				8	10/8	900 нс		2	1	64QFP	5 В
TMS320F240	20	20	544		16К	Флэш	Есть	12	10/16	6.1 мкс		3	2	132BQFP	5 В
TMS320F241	20	20	544		8К	Флэш		8	10/8	900 нс	Есть	2	2	68PLCC 64QFP	5 В
TMS320F243	20	20	544		8К	Флэш	Есть	8	10/8	900 нс	Есть	2	2	144LQFP	5 В
Микроконтроллеры TMS320Lx24xx, 16 разрядные															
TMS320LC2401A	40	40	1К	8К				7	10/5	500 нс		2	1		3.3 В
TMS320LC2402A	40	40	544	6К				8	10/8	425 нс		2	1	64QFP 64TQFP	3,3 В
TMS320LC2404A	40	40	1.5К	16К				16	10/16	375 нс		4	2	100LQFP	3,3 В
TMS320LC2406A	40	40	2.5К	32К				16	10/16	375 нс	Есть	4	2	100LQFP	3,3 В
TMS320LF2401A	40	40	1К		8К	ПЗУ		7	10/5	500 нс		2	1	32LQFP	3,3 В
TMS320LF2402A	40	40	1К		8К	ПЗУ		8	10/8	500 нс		2	1	64QFP	3,3 В
TMS320LF2403A	40	40	1К		16К	ПЗУ		8	10/8	500 нс	Есть	2	2	64TQFP	3,3 В
TMS320LF2406A	40	40	2.5К		32К	ПЗУ		16	10/16	500 нс	Есть	4	2	100LQFP	3,3 В
TMS320LF2407A	40	40	2.5К		32К	ПЗУ	Есть	16	10/16	500 нс	Есть	4	2	144LQFP	3.3 В
Микроконтроллеры TMS320F28xx, 32 разрядные															
TMS320F2810	150	150	18К		64К	ПЗУ		16	12/16	200/60 (конв.) нс	Есть	7	4	McBSP SPI 2- SCI	128LQFP 3.3 В 1,8 В
TMS320F2812	150	150	18К		128К	ПЗУ	Есть	16	12/16	200/60 (конв.) нс	Есть	7	4	McBSP SPI 2- SCI	179BGA 176LQFP 3,3 В 1,8 В

Серия отечественных модульных микроконтроллерных систем управления электроприводами

На базе лучших зарубежных специализированных микроконтроллеров для управления двигателями в МЭИ по кооперации с рядом предприятий (НПФ «Вектор», г. Москва, «Цикл+», г. Москва, ЭЗАН, г. Черноголовка, ИБП РАН, г. Пущино и др.) разработана серия модульных цифровых систем управления для современных электроприводов с исполнительными двигателями различных типов: от асинхронных до многофазных вентильно-индукторных, а также для преобразователей частоты «Универсал». В состав системы управления входят унифицированные модули:

1. **Модуль контроллера привода (МК)** – выполняет функции прямого цифрового управления элементами силового канала и сопряжения с датчиками, управления дополнительными модулями: ввода/вывода, пультами оперативного управления. Имеет необходимые интерфейсы сопряжения с системами управления более высокого уровня. Для повышения модульности и удешевления системы управления может конструктивно разбиваться на *плату базового контроллера* и одну или несколько *плат расширения* функций базового контроллера. Вся серия контроллеров привода имеет единую архитектуру и отличается производительностью центрального процессора и объемом памяти.
2. **Модуль расширения функций базового контроллера (МР)** – позволяет в зависимости от типа привода и специфики его применения расширить функции базового контроллера, например, обеспечить: управление сразу двумя инверторами, сопряжение с двумя датчиками положения, расширить память, сетевые или загрузочные возможности контроллера. Номенклатура модулей расширения изменяется в соответствии с вновь возникающими потребностями. Конструктивно модули расширения выполняются как «*платы-наездники*», соединяемые с базовым контроллером через специальные разъемы для минимизации общих габаритов системы управления.
3. **Модуль ввода/вывода (МВВ)** - обеспечивает сопряжение системы управления приводом с другими системами: промышленными программируемыми контроллерами, датчиками, технологическим оборудованием. Для большинства применений разработаны *пассивные модули ввода/вывода дискретных сигналов «сухим» контактом реле или напряжением 24 В (МДВВ)*, имеющие гальваническую развязку и подключаемые к контроллеру привода по одному из интерфейсов: параллельному или последовательному синхронному SPI. Конструктивно монтируются в составе преобразователя. Для *распределенных систем управления* разработаны *активные процессорные модули удаленного дискретного и аналогового ввода/вывода*, подключаемые к контроллеру привода по сетевому CAN-интерфейсу. Могут устанавливаться непосредственно в технологическое оборудование, в частности в станции группового управления насосами.
4. **Пульт оперативного управления (ПУ)** с дисплеем и клавиатурой обеспечивает интерфейс привода с человеком оператором. Разработаны несколько типов ПУ с различными дисплеями, вплоть до графического, и специализированными клавиатурами. Для подключения к контроллеру привода предусмотрены интерфейсы: параллельный, синхронный последовательный SPI и сетевой CAN. В двух первых случаях ПУ монтируется непосредственно на переднюю панель преобразователя, а в последнем – может быть *съемным* или *удаленным*.

Все контроллеры привода, независимо от типа центрального процессора имеют *унифицированную блочно-модульную архитектуру*, оптимизированную по числу входов/выходов и функциям и для эффективного решения типовых задач прямого цифрового управления компонентами привода с различными типами исполнительных двигателей и структурой силовой части – рис. 3:

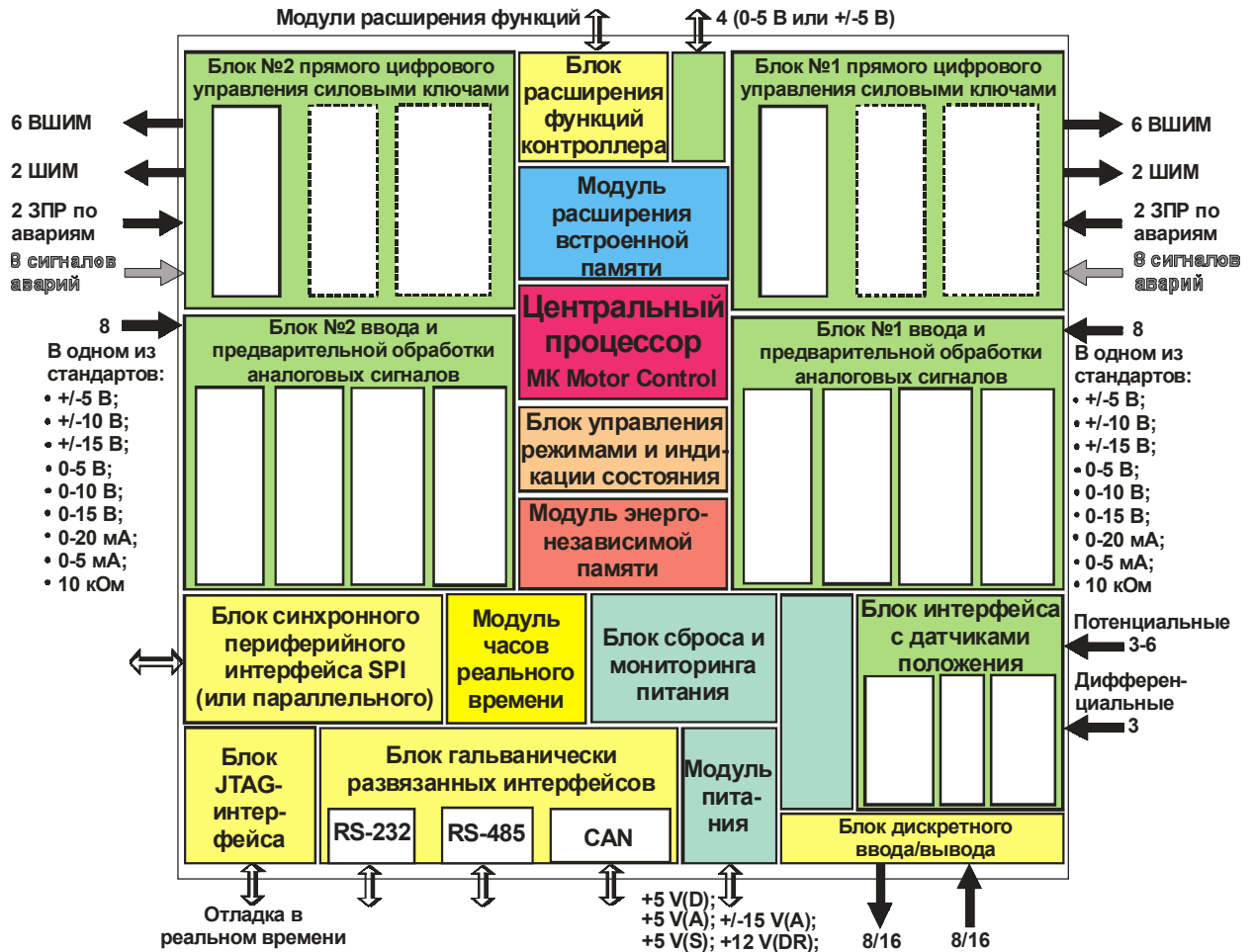


Рис. 3. Унифицированная модульная архитектура универсального контроллера привода

Для оптимизации стоимости и габаритов системы управления в серию входят универсальные контроллеры двух типов: *I* – для одноинверторных применений и *II* – для двухинверторных применений. Они отличаются числом блоков прямого цифрового управления ключами и ввода аналоговых сигналов. Кроме того, в универсальных контроллерах второго типа используется более мощный центральный процессор со сдвоенным менеджером событий и 16-канальным быстродействующим АЦП.

Центральный процессор - *специализированный микроконтроллер для управления двигателями*, частота работы которого определяется блоком тактового генератора. Модуль питания формирует необходимые уровни вторичных напряжений и содержит фильтры защиты от помех. Блок сброса и мониторинга питания обеспечивает начальную инициализацию контроллера и постоянный контроль качества системы питания. При раннем предупреждении об исчезновении любого уровня питания код аварии и важнейшие параметры системы управления сохраняются в модуле энергонезависимой памяти контроллера. Блок управления режимами обеспечивает: загрузку программного обеспечения во встроенную флэш-память контроллера по одному из последовательных каналов связи с компьютера или выполнение рабочей программы. Состояние контроллера для наладки и диагностики отображается в блоке светодиодной индикации. Для решения сложных задач векторного и бездатчикового управления, мониторинга переменных привода, память центрального процессора расширяется в модуле расширения встроенной памяти до требуемого объема. Интерактивная отладка и загрузка программного

обеспечения выполняется по *JTAG-интерфейсу* с использованием внутрисхемных эмуляторов и интегрированных средств разработки типа Code Composer.

Блок прямого цифрового управления силовыми ключами обеспечивает: выдачу 6 сигналов в режиме центрированной или векторной ШИМ-модуляции и 2 сигналов в режиме фронтовой ШИМ, прием 2 запросов прерываний по авариям или до 8 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. При больших мощностях применяются волоконно-оптические приемники/передатчики в виде модулей расширения функций контроллера.

Аварийные сигналы могут вводиться *с учетом специфики драйверов*: от каждого из ключей; от двух ключей стойки; общим сигналом аварии инвертора. Формат ввода – «открытый коллектор». Технология обработки аварий унифицируется: блокируется инвертор (за 1 мкс); производится идентификация источника аварии; оператору выдается соответствующее диагностическое сообщение; 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 *мониторинга отказов*.

Блок ввода и предварительной обработки аналоговых сигналов обеспечивает ввод сигналов с датчиков напряжения и тока в звене постоянного, датчиков фазных токов и напряжений, сигналов задания и обратной связи по технологическим переменным. Для выбора формата ввода используется селектор форматов. Имеется схема преобразования входного формата к формату АЦП процессора, фильтр низкой частоты, схема защиты от перенапряжений и переплюсовки. Для систем скалярного управления *время аналого-цифрового преобразования* на канал не более 10 мкс, *разрядность* – 8 двоичных разрядов, для систем векторного управления – от 500 до 60 нс, *разрядность* - не менее 10 разрядов.

Блок интерфейса с датчиками положения обеспечивает 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 Шмитта для подавления синфазной составляющей напряжения и уменьшения влияния помех.

Выдача аналоговых сигналов управления, например, инверторами тока для шаговых двигателей, производится в *блоке цифроаналогового преобразования* или с помощью дополнительных RC-фильтров на выходе блока прямого управления ключами.

На рис. 4 в качестве примера показаны варианты построения систем управления приводами на базе: а) контроллера МК10.3; б) контроллера МК10.3 с платой расширения функций МК10.3L – дополнительные возможности управления по часам реального времени, энергонезависимая память, гальванически-развязанный интерфейс с компьютером RS-232 для загрузки программного обеспечения и мониторинга переменных в реальном времени; в) контроллера МК10.3 и платы расширения МК10.3E – дополнительные функции управления двумя инверторами одновременно, сопряжения с двумя датчиками положения для двухдвигательных приводов, управления по часам реального времени, несколько гальванически развязанных интерфейсов (RS-232, RS-485, CAN) для включения привода в системы комплексной автоматизации производства.

Системы управления могут комплектоваться удаленными или встраиваемыми в силовой преобразователь модулями дискретного ввода/вывода г) и пультами оперативного управления д) как пассивными, так и интеллектуальными.

Системы управления приводами на базе МК10.3



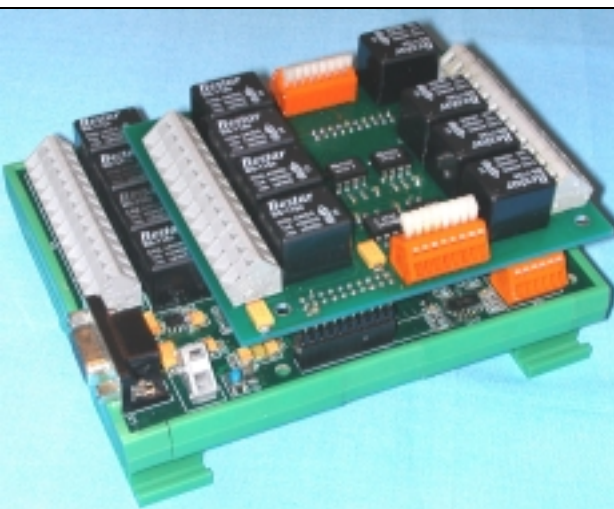
а) Контроллер привода МК10.3



б) Контроллер МК10.3 с платой расширения МК10.3L



в) Контроллер МК10.3 с платой расширения МК10.3E



г) Интеллектуальный модуль дискретного и аналогового ввода/вывода МДВВ10



д) Интеллектуальный пульт оперативного управления ПУ10.1 с графическим дисплеем и специализированной клавиатурой

Рис. 4. Элементы системы управления приводами на базе контроллера МК10.3

Высоко-производительный контроллер привода, разработанный совместно с предприятием «Электротранссервис», г. Москва, для систем векторного управления

тяговыми асинхронными приводами, показан на рис. 5. Он обеспечивает программирование и отладку систем управления приводами практически неограниченной сложности непосредственно на языке высокого уровня СИ.

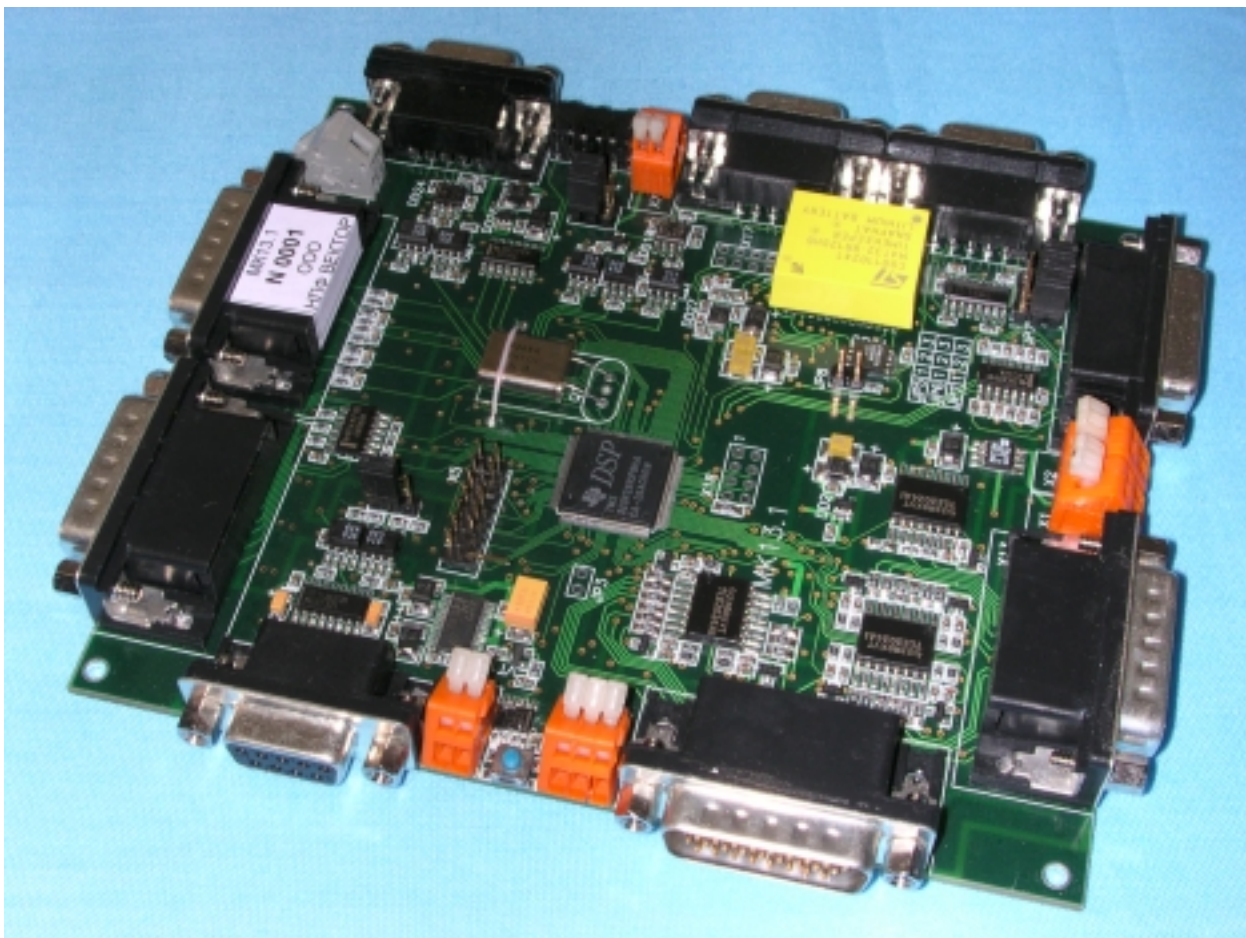


Рис. 5 Контроллер привода МК13.1 производительностью 150 млн.оп./с

Основные технические характеристики контроллеров привода серии МК представлены в Таблице 2.

Выводы

Доступность современной, высокопроизводительной элементной базы – специализированных контроллеров для управления двигателями, накопленный опыт проектирования позволяет отечественным разработчикам:

1. Создавать системы управления, удовлетворяющие возросшим требованиям по точности, быстродействию, диапазонам регулирования переменных привода.
2. Унифицировать аппаратную часть системы управления независимо от типа исполнительного двигателя и структуры силовой части.
3. Обеспечивать оперативную программную адаптацию систем управления к типу исполнительного двигателя, типам датчиков обратной связи, структуре силовой части и структуре системы управления.
4. Реализовывать самые перспективные алгоритмы управления, вплоть до векторного бесдатчикового управления и прямого управления моментом.
5. Разрабатывать новые типы приводов, в частности, с вентильно-индукторными двигателями.

Таблица 2. Серия контроллеров МК для систем встроенного управления двигателями и преобразователями энергии

Тип контроллера	Класс контроллера	Плата расширения функций контроллера	Центральный процессор			Память					Часы реального времени
			Тип	Тактовая частота, МГц	Производительность, млн.оп./с	Встроенная		Расширение памяти			
						Программ	ОЗУ данных/ Кодовое ОЗУ	Программ	Данных	Энерго-независимая память параметров	
МК7.3	Универсальный №1	Нет	Intel 80C196MH/87C196MH	20	2	Нет/ 32 К байта	744 байта/ Нет	32 К байта	32 К байта	8÷32 К байта	Есть, 10 лет
МК8.1	Универсальный №1	Нет	Analog Devices ADMC300	25	25	4 К*24 слов (RAM)	1 К*16 слов/ Нет	Нет	Нет	512 байт	Нет
МК9.1	Универсальный №1	Нет	Texas Instruments TMS320F241 (68 PLCC)	20	20	8 К слов (FLASH)	544/544 слов (DARAM)	Нет	Нет	128/256/512 байт	Нет
МК10.1	Специализированный	Нет	Texas Instruments TMS320F241 (PGA)	20	20	8 К слов (FLASH)	544/544 слов (DARAM)	Нет	Нет	Нет	Нет
МК10.2	Специализированный	Нет	Texas Instruments TMS320F241 (PGA)	20	20	8 К слов (FLASH)	544/544 слов (DARAM)	Нет	Нет	128/256/512 байт	Нет
МК10.3	Универсальный №2	-	Texas Instruments TMS320LF2406A (PZA)	40	40	32 К слов (FLASH)	2,5 К слова/ 2,5 К слова (2 К SARAM) 544 DARAM)	Нет	Нет	256/512/1К/2К/ 4К слов	Нет
		МК10.3L	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	Есть, 10 лет
		МК10.3E	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	Есть, 10 лет
МК11.3	Универсальный №2	Нет	Texas Instruments TMS320LF2407A (PGEA)	40	40	32 К слов (FLASH)	2,5 К слова/ 2,5 К слова (2 К SARAM) 544 DARAM)	32 К слова (RAM)	32 К слова (RAM)	512 байт	Нет
МК12.1	Универсальный №2	Нет	Texas Instruments TMS320LF2407A (PGEA)	40	40	32 К слов (FLASH)	2,5 К слова/ 2,5 К слова (2 К SARAM) 544 DARAM)	32 К слова (RAM)	32 К слова (RAM)	256/512/1/2К/ 4К слов	Нет
МК13.1	Универсальный №2	Нет	Texas Instruments TMS320F2810 (PBKA)	150	150	64 К слов (FLASH)	18 К слов/ 18 К слов (SARAM)	Нет	Нет	8/16/32 К слова	Есть, 10 лет

Таблица 2. Серия контроллеров МК для систем встроенного управления двигателями и преобразователями энергии (Прод.-ние)

Тип контроллера	Защита программ кодами секретности	Плата расширения функций контроллера	Интерфейс с силовыми ключами преобразователей					Интерфейс с датчиками аналоговых сигналов			
			Всего ШИМ-выходов/Тип	В том числе, в режиме:			Всего входов приема аппаратных аварий/Тип	Всего аналоговых входов	В том числе в форматах	Разрядность АЦП/Время преобразования на канал	
				векторной ШИМ	центрированной ШИМ	фронтальной ШИМ					
МК7.3	Есть	Нет	8/5В-24В	6 (прог.)	6	2	8/ТТЛ	8	8*{(0÷5 В) ∨ (0÷10 В) ∨ (±5 В) ∨ (0÷5 мА) ∨ (4÷20 мА) ∨ (10 кОм вн.), КП}	10 p/10 мкс	
МК8.1	Нет	Нет	7/ТТЛ	6 (апп.)	6	1	1/ОК	12	7* (±2 В); 1* (±5 В); 1* (±10 В); 1* (0÷5 мА); 1* (4÷20 мА); 1*(10 кОм вн.)	12 p/ 30 мкс	
МК9.1	Нет	Нет	8/ОК	6 (апп.)	8	8	1/ОК	8	3*{(0÷5 В) ∨ (0÷10 В) ∨ (±5 В) ∨ (±10 В) ∨ (0÷5 мА) ∨ (4÷20 мА) ∨ (10 кОм вн.), КП}; 5 * (0÷5 В)	10 p/ 850 нс (сдв. 1,7 мкс)	
МК10.1	Нет	Нет	8/ОК	6 (апп.)	8	8	2/ОК	5	5 * (0÷5 В)	10 p/ 850 нс (сдв. 1,7 мкс)	
МК10.2	Нет	Нет	8/ОК	6 (апп.)	8	8	2/ОК	5	2*{(0÷5 В) ∨ (0÷10 В) ∨ (±10 В) ∨ (0÷5 мА) ∨ (4÷20 мА) ∨ (10 кОм вн.), КП}; 3 * (0÷5 В);	10 p/ 850 нс (сдв. 1,7 мкс)	
МК10.3	Есть	-	8/ОК	6 (апп.)	8	8	2/ОК	8	5* (0÷5 В); 1* (0÷10 В); 2* {(0÷5 мА) ∨ (4÷20 мА), КП}	10 p/ 375 нс автовыборка	
		МК10.3L	8/ОК	6 (апп.)	8	8	2/ОК	-//-	-//-	-//-	
		МК10.3E	16/ОК	6*2 (апп.)	16	16	4/ОК	15	7* {(±5 В) ∨ (±10 В), КИ}; 5* (0÷5 В); 1* (0÷10 В); 2* {(0÷5 мА) ∨ (4÷20 мА), КП};	10 p/ 375 нс автовыборка	
МК11.3	Есть	Нет	16/ОК	6*2 (апп.)	16	16	4/ОК	16	7*{(±5 В) ∨ (±10 В) ∨ (±15 В), КИ }; 2*{(±5 В) ∨ (±10 В), КП ∨ (±15 В), КИ}; 2* (0÷5 В); 1* (0÷10 В); 2* (0÷5 мА); 2* (4÷20 мА)	10 p/ 375 нс автовыборка	
МК12.1	Есть	Нет	14/ВОКС	6*2 (апп.)	14	14	14/ВОКС	16	7*{(±5 В) ∨ (±10 В) ∨ (±15 В), КИ}; 2*{(±5 В) ∨ (±10 В), КП ∨ (±15 В), КИ}; 2* (0÷5 В); 1* (0÷10 В); 2* (0÷5 мА); 2* (4÷20 мА)	10 p/ 375 нс автовыборка	
МК13.1	Есть	Нет	16/ОК	6*2 (апп.)	16	16	10/ОК	16	2* {4*[(±5 В) ∨ (±10 В), КП ∨ (±15 В), КИ]; 3*[(0÷5 В) ∨ (0÷10 В), КП ∨ (0÷15В), КИ]; 1*[(0÷5 мА) ∨ (4÷20 мА), КП]}	12 p/ 200 нс одиноч./60 нс конвейерное	

Таблица 2. Серия контроллеров МК для систем встроенного управления двигателями и преобразователями энергии (Прод.-ение)

Тип контроллера	Плата расширения функций контроллера	Индикация состояния контроллера	Интерфейсы общего назначения				Интерфейс расш. ввода-вывода/ Число плат	Интерфейсы с датчиками положения			ЦАП/ Число каналов/ Тип	Встроенные дискретные	
			RS-232	RS-485	CAN	JTAG		Импульсными		Индуктивными, на элементах Холла/Каналов/Тип		входы	выходы
								с потен. выходами/Каналов/Тип	с дифф. выходами/Каналов/Тип				
МК7.3	Нет	Светод.	Есть	Есть	Нет	Нет	Паралл./ Неогран.	Есть/3/ ТТЛ	Нет	Есть/6/ТТЛ	Есть/8/ (0÷5 В) √ (±5 В)	8*ТТЛ; 8*15 В, ТШ; 8*24 В, ГР	16*ТТЛ; 16*(5÷24 В)
МК8.1	Нет	Светод.	Есть	Нет	Нет	Нет	SPI/9	Есть/3/ ТТЛ	Есть/3/ ТШ	Нет	Нет	Нет	Нет
МК9.1	Нет	Линейка светод.	Есть	Нет	Есть, 500 Кбод	Есть	SPI/6	Есть/3/ ТТЛ	Есть/3/ ТШ	Есть/3/ТТЛ	Нет	8*ТТЛ	6*ТТЛ
МК10.1	Нет	Нет	Есть	Нет	Нет	Есть	Нет	Есть/3/ ТТЛ	Нет	Есть/3/ТТЛ	Нет	7*ТТЛ	8*ТТЛ
МК10.2	Нет	Светод.	Есть	Нет	Есть, 1 Мбод	Есть	SPI/6	Есть/3/ ТТЛ	Нет	Есть/3/ТТЛ	Нет	7*ТТЛ	8*ТТЛ
МК10.3	-	Светод.	Нет	Нет	Есть, ГР, ГК, 1 Мбод,	Есть	SPI/6	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
	МК10.3L	Светод.	Есть, ГР	Нет	Есть, ГР, ГК, 1 Мбод	Есть	SPI/6	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
	МК10.3E	Светод.	Есть, ГР	Есть, ГР	Есть, ГР, ГК, 1 Мбод	Есть	SPI/6	Есть/2*3/ ТШ	Есть/3/ ТШ	Есть/6/ТШ	Нет	Нет	Нет
МК11.3	Нет	Светод.	Есть, ГР	Есть, ГР	Есть, ГР, ГК, 1 Мбод	Есть	SPI/6 и Паралл./ Неогран.	Есть/2*3/ ТШ	Есть/3/ ТШ	Есть/6/ТШ	Нет	Нет	Нет
МК12.1	Нет	Светод.	Есть, ГР	Есть, ГР	Есть, ГР, ГК, 1 Мбод	Есть	Нет	Есть/2*3/ ТШ	Есть/3/ ТШ	Есть/6/ТШ	Нет	8*ТТЛ	8*ТТЛ
МК13.1	Нет	Светод.	Есть, ГР	Есть, ГР	Есть, ГР, ГК, 1 Мбод	Есть	McBSP/ Неогран.	Есть/2*3/ ТШ	Есть/3/ ТШ	Есть/6/ТШ	Есть/4/ (0÷5 В)	Нет	Нет

Примечание. Используются следующие обозначения и сокращения: RAM – ОЗУ; FLASH – Флэш память; DARAM – ОЗУ двойного доступа; SARAM – ОЗУ однократного доступа; ТТЛ – уровень транзисторно-транзисторной логики; ОК – открытый коллектор; ВОСК – волоконно-оптический канал связи; КП – конфигурируется пользователем; КИ – конфигурируется изготовителем; ГР – гальваническая развязка; ГК – горячее конфигурирование; SPI – синхронный периферийный интерфейс; McBSP – многоканальный буферизованный синхронный порт; ТШ – вход, буферизованный Триггером Шмитта.

Литература

1. Козаченко В.Ф., Обухов Н.А., Трофимов С.А., Чуев П.В. Применение DSP-микроконтроллеров фирмы «Texas Instruments» в преобразователях частоты «Универсал» с системой векторного управления// Электронные компоненты. №4, - 2002, -с. 61-64
2. Козаченко В.Ф., Обухов Н.А., Анучин А.С., Жарков А.А. Модульная микроконтроллерная система управления для отечественной серии преобразователей частоты «Универсал»// Труды V Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии и электроматериаловедение» МКЭЭЭ-2003. Ч.1. Крым, -2003. с. 725-726.