

МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ С ОЧЕНЬ МАЛЫМ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ ГРУППЫ RE 01 КОМПАНИИ RENESAS

СЕРГЕЙ ВОЛКОВ, инженер

В статье рассматриваются микроконтроллеры группы RE 01 компании Renesas. Их основной особенностью является очень низкое энергопотребление и возможность работы с внешним элементом, аккумулирующим энергию окружающей среды. Микроконтроллеры позволяют создавать человеко-машинные интерфейсы, системы сбора и обработки данных.

ВВЕДЕНИЕ

В развитии технологии микроконтроллеров (МК) довольно отчетливо прослеживаются две тенденции. Первая из них заключается в увеличении производительности, а вторая – в уменьшении энергопотребления. Во многих случаях производители пытаются совместить эти тенденции; нередко эта цель достигается за счет ограничения функциональных возможностей МК и введения режимов пониженного энергопотребления.

В многочисленных МК компании Renesas также отчасти реализован подобный подход. Однако такое решение не панацея – оно применимо в ограниченном числе случаев. Например, подобное решение не годится для приложений, где, в первую очередь, важна не производительность и вычислительная мощность, а постоянное низкое или даже очень низкое энергопотребление.

Именно для таких приложений и разработаны МК группы RE 01. Низкое энергопотребление достигается в них не только и не столько за счет уменьшения функциональ-

ных возможностей, сколько благодаря проприетарной производственной технологии SOTB (Silicon on Thin Buried Oxide – кремний на тонком углубленном оксидном слое). Эта технология позволяет расширить диапазон допустимого напряжения питания до 1,62–3,6 В, причем максимальная частота тактирования 64 МГц не снижается и при минимальном напряжении питания 1,62 В. Подобный результат недостижим в случае использования традиционных кремниевых технологий. МК RE 01 показали наивысший результат 705 баллов по тесту EEMBC ULPMark, который используется для сравнения МК с очень низким энергопотреблением. Для примера приведем некоторые цифры: ток потребления 14-бит АЦП в активном режиме не превышает 4 мкА, при записи во флэш-память ток потребления составит всего лишь 0,6 мА.

Еще одной особенностью МК группы RE 01 является встроенная схема управления аккумуляцией энергии из окружающей среды, что позволяет применять эти источники для питания МК. Разумеется, для достижения очень низкого энергопотребления пришлось пожертвовать вычислительной мощностью: в качестве процессорного ядра используется ARM Cortex M0+. Однако, как правило, для приложений, где, в первую очередь, необходимо обеспечить очень низкое энергопотребление, большая вычислительная мощность и не требуется. Таким образом, МК группы RE 01 найдут широкое применение в таких приложениях как интернет вещей, интеллектуальные счетчики энергии, трекеры, носимые устройства и многие другие. Думаем, им вполне по силам стать промышленным стандартом в своем сегменте рынка.

СЛОВАРЬ

ACMP – аналоговый компаратор
ALLPWON – режим питания, при котором активны все домены
CRA, CRB – счетчики числа трансферов контроллера DTC
DAR – регистр с адресом назначения трансфера данных контроллером DTC
DIV – модуль делителя 32-бит чисел
DOC – схема обработки данных
DSTBY – полный программный режим ожидания
DTC – контроллер трансфера данных
DTCCLR – регистр управления контроллера DTC
DTCVBR – векторный регистр контроллера DTC
DTCST – стартовый регистр контроллера DTC
DTCSTS – регистр статуса контроллера DTC
ENC – контроллер управления внешним элементом, аккумулирующим энергию окружающей среды
EXFPWON – режим питания, при котором домен флэш-памяти выключен
GDT – схема преобразования графических данных
LPG – низкоскоростной генератор
MINPWON – режим минимального энергопотребления
MLCD – контроллер ЖКД с параллельным интерфейсом
MRA, MRB – регистры выбора режимов контроллера DTC
MTDV – драйвер электропривода
R12DA – модуль 12-бит ЦАП
S14AD – модуль 14-бит АЦП
SAR – регистр с адресом источника данных для трансфера контроллером DTC
SSTBY – программный режим ожидания
WUPT – таймер пробуждения

Таблица. Основные отличия МК двух серий

Модуль	МК с флэш-памятью 1,5 Мбайт	МК с флэш-памятью 250 Кбайт
Низкоскоростной генератор LPG	+	–
Таймер пробуждения (WUPT)	+	–
Хост USB 2.0	+	–
Драйвер светодиодов	+	–
12-бит ЦАП	+	–
Аналоговый компаратор (ACMP)	+	–
Драйвер электропривода (MTDV)	+	–
Схема обработки данных (DOC)	+	–

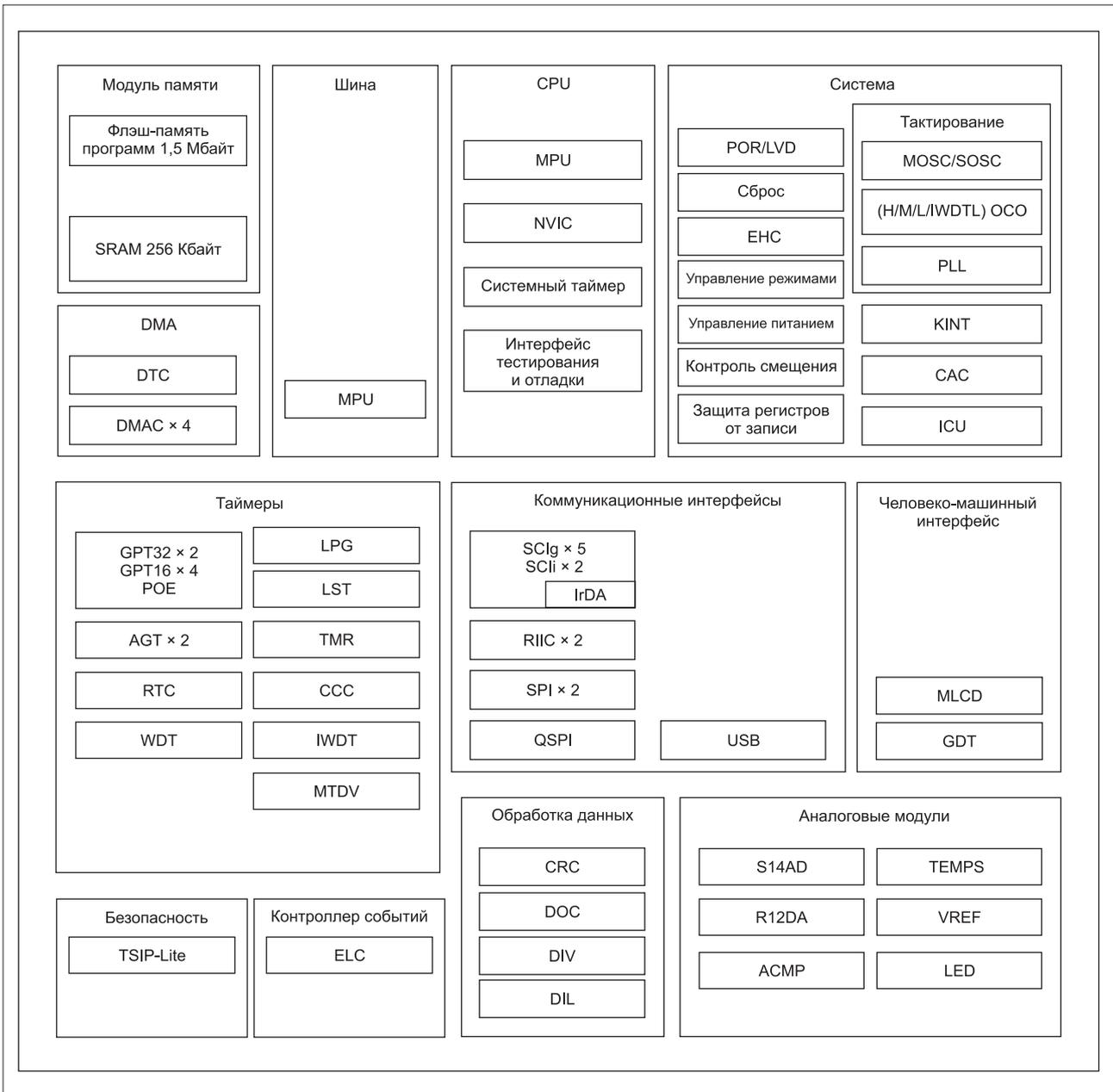


Рис. 1. Структурная схема МК

Микроконтроллеры выпускаются в корпусах PLQP0144KA-B размером 20×20 мм с шагом выводов 0,5 мм, в корпусах PLQP0100KB-B размером 14×14 мм с шагом выводов 0,5 мм и SXBG0156MA-A размером 4,3×4,3 мм с шагом выводов 0,3 мм. Диапазон рабочей температуры МК составляет –40...85°C.

АРХИТЕКТУРА И СИСТЕМНЫЕ РЕСУРСЫ МК ГРУППЫ RE 01

В состав МК группы RE 01 входят МК двух серий. В первой из них объем встроенной флэш-памяти составляет 256 Кбайт, а во второй – 1,5 Мбайт. 1,5-Мбайт МК мы и рассмотрим в настоящей статье. Помимо флэш-памяти большей емкости они также обладают немного большими функциональными возможностями. Основные отличия этих серий приведены в таблице. Отличия МК этих серий вплоть до адресов регистров и кодов подробно описаны в [1]. Структурная схема МК представлена на рисунке 1.

Процессорное ядро ARM Cortex M0+ хорошо известно. Напомним только, что его производительность составляет 0,93 DMIPS/МГц, а в его состав входит модуль защиты памяти

(MPU), рассчитанный на работу с восемью областями памяти. Объем встроенной памяти SRAM: 256 Кбайт.

Учитывая, что главным козырем МК группы RE 01 является очень низкое энергопотребление, рассмотрим этот аспект подробнее. МК может питаться от внешнего сетевого источника питания, от батареи и внешнего накопительного элемента, аккумулирующего энергию из окружающей среды. Для контроля напряжения используются три встроенных детектора напряжения, которые отслеживают напряжение внешнего источника и батареи в заданных пределах и формируют прерывания в случае, когда оно становится больше или меньше пороговых значений. В МК предусмотрены пять способов снижения энергопотребления:

- уменьшение частоты тактирования;
- отключение отдельных модулей;
- управление режимами энергопотребления;
- переход в режимы низкого энергопотребления;
- изменение режима источника питания.

При использовании первого способа сокращение энергопотребления достигается путем уменьшения частоты

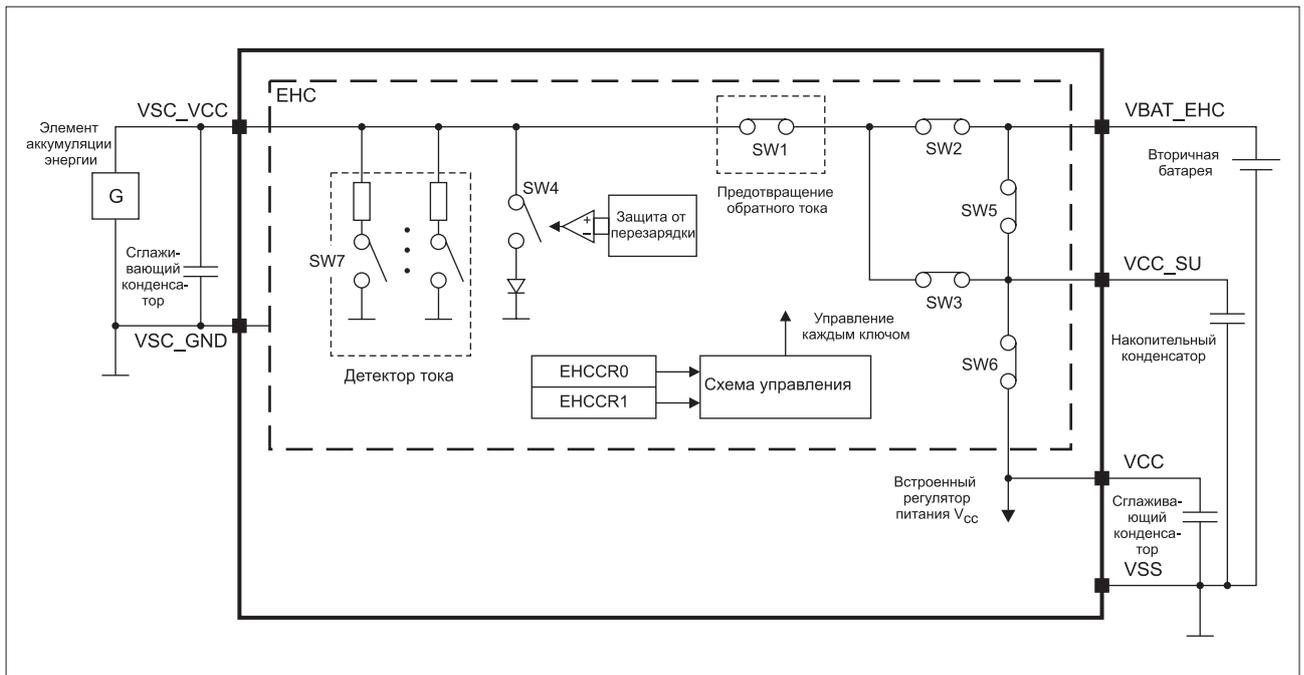


Рис. 2. Структурная схема контроллера ЕНС

тактирования, которую можно независимо установить для системы и для периферии. Второй способ подразумевает отключение любого периферийного модуля за счет отключения тактирования этого модуля; при этом питание модуля не выключается, и все записи в его регистрах сохраняются.

При использовании 3-го способа МК, работая в режимах энергопотребления OPE, SLEEP и SSTBY, может переходить в режим работы с пониженной частотой тактирования. 4-й способ позволяет перевести МК в один из пяти возможных режимов энергопотребления:

- нормальный режим работы (OPE);
- режим сна (SLEEP);
- режим полусна (SNOOZE);
- программный режим ожидания (SSTBY);
- полный программный режим ожидания (DSTBY).

В 5-м режиме выбираются активные домены питания. Существуют три режима:

- все домены активны (ALLPWON);
- домен флэш-памяти выключен (EXFPWON);
- режим минимального энергопотребления (MINPWON).

Поскольку в режиме сна (SLEEP) процессорное ядро не тактируется, но напряжение питания ядра не выключается, сохраняется содержание внутренних регистров. Все

периферийные модули активны. Выход из режима сна происходит при сбросе или прерывании. В режиме программного останова (SSTBY) процессорное ядро и большая часть периферийных модулей остановлены, но содержание их регистров сохраняется.

Переход в режим полусна (SNOOZE) происходит из режима SSTBY. В режиме SNOOZE некоторые периферийные модули активируются и работают без пробуждения процессорного ядра. Из режима SNOOZE микроконтроллер может вернуться в режим SSTBY. В режиме полного программного останова (DSTBY) большинство внутренних генераторов остановлено, содержание внутренних регистров не определено.

Возможно, главной особенностью микроконтроллеров группы RE 01 является контроллер ЕНС управления внешним элементом, аккумулирующим энергию окружающей среды. Его структурная схема представлена на рисунке 2. Насколько нам известно, на сегодняшний день среди 32-бит микроконтроллеров только МК группы RE 01 обладают такой особенностью. Накопительный элемент (НЭ), аккумулирующий энергию окружающей среды, непосредственно подключается к выводу МК, и каких-либо дополнительных внешних компонентов не требуется. Заметим, что при под-

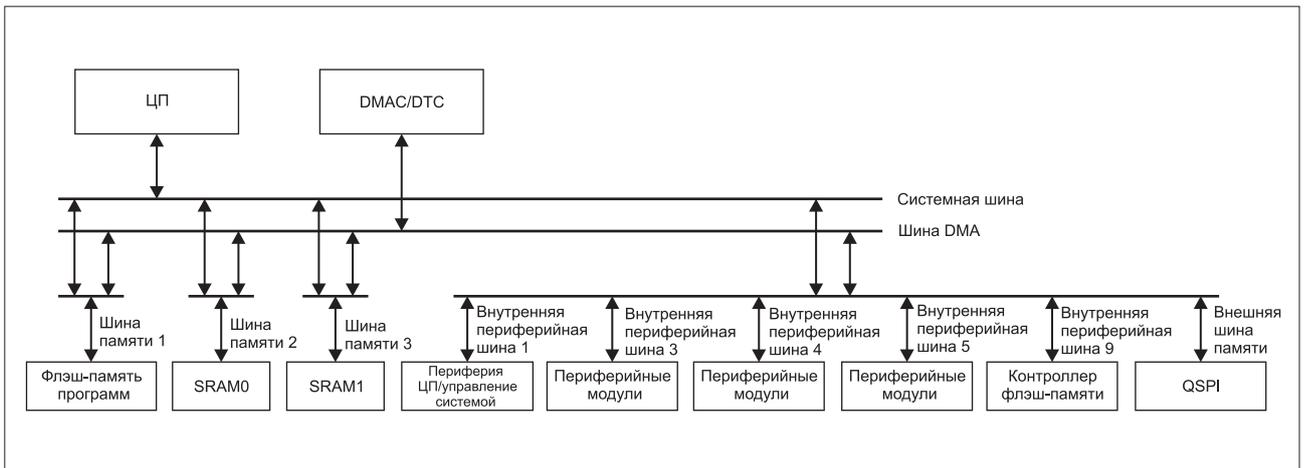


Рис. 3. Организация шин микроконтроллера

ключении НЭ нельзя использовать внешний сетевой источник питания.

Напряжение НЭ может использоваться для питания МК. Этот же элемент способен зарядить батарею, подключенную к выводу VBAT, или накопительный конденсатор, соединенный с выводом VCC_SU. При этом и батарея, и конденсатор защищены от перезаряда, а заряд прекращается при достижении заданного порога напряжения. Кроме того, предусмотрена защита от обратного тока от батареи или конденсатора к накопительному элементу. Контроллер ЕНС формирует цепь заряда конденсатора и батареи от НЭ в зависимости от напряжения их заряда. При подключении батареи или конденсатора для заряда к НЭ контроллер формирует два прерывания.

МК группы RE 01, как и микроконтроллеры других групп компании Renesas, имеют довольно оригинальную систему шин, которая позволяет увеличить производительность

МК и обеспечить ряд дополнительных возможностей для обработки данных без привлечения ресурсов процессорного ядра. Организация шин МК представлена на рисунке 3. При такой шинной архитектуре можно реализовать параллельную работу, когда разные ведущие шины запрашивают доступ к разным ведомым шинам, что позволяет увеличить производительность. Однако следует учесть, что нельзя одновременно обращаться и к внешней шине, и к любой из внутренних шин.

Мониторинг шин позволяет избежать ошибочного доступа к устройству. При ошибке доступа формируется прерывание, и корректное выполнение операции доступа к шине не гарантируется. Адрес ошибочного доступа и статус доступа (чтение или запись) сохраняются в специальном регистре.

Контроллер трансфера данных (DTC) позволяет значительно ускорить перемещение данных; при этом ресурс ЦП не используется. Передача данных осуществляется между

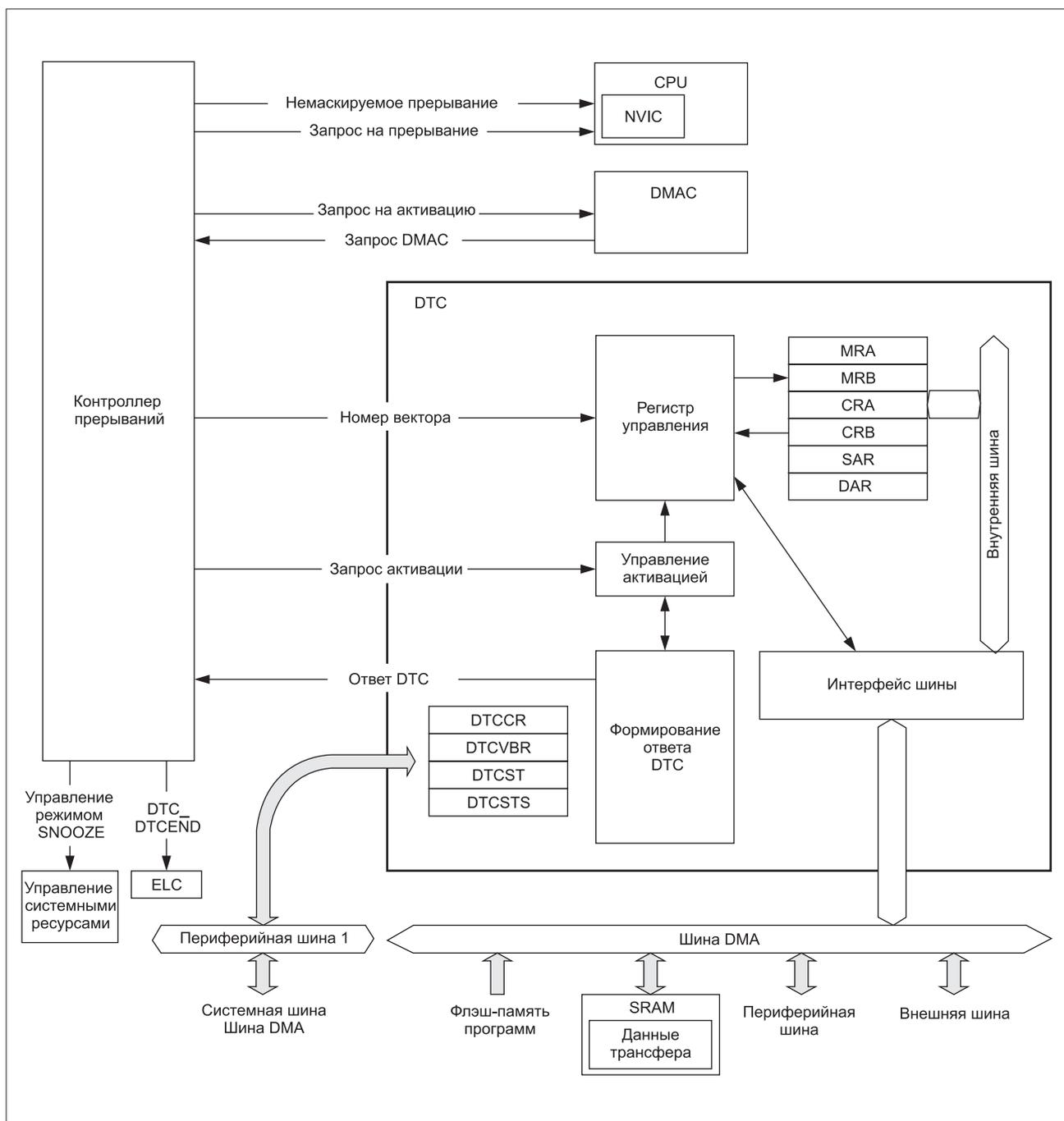


Рис. 4. Структурная схема контроллера DTC

встроенными периферийными модулями МК, а также между этими модулями и внешними устройствами. Структурная схема контроллера DTC и его соединение с другими модулями показана на рисунке 4. Инициализация передачи данных происходит по запросу прерывания. Контроллер DTC реализует три сценария передачи данных.

1. Нормальный режим. В нем происходит однократная инициализация контроллера и, следовательно, однократная передача данных.
2. Повторяющийся режим. В данном случае также происходит однократная активация, но после окончания передачи данных контроллер DTC вновь обращается к начальному адресу и повторяет трансфер. Допускается не более 256 повторных обращений, в каждом из которых можно передать не более 32 бит. Таким образом, максимальный объем передаваемых данных в этом режиме составляет $256 \times 32 \text{ бит} = 1024 \text{ байт}$.
3. Блочный режим передачи. Однократная инициализация приводит к передаче блока данных с максимальным размером 1024 байт.

Единичный пакет передачи может состоять из одного байта, из половины слова (16 бит) и из целого 32-бит слова. Максимальный размер передаваемых данных не превышает 256 единичных пакетов. После окончания передачи контроллер формирует сигнал события. Вся информация о трансфере данных содержится в памяти SRAM и записывается в нее до трансфера.

Еще одним модулем, облегчающим обработку и перемещение данных, является контроллер событий (ELC). Активация этого контроллера, как и контроллера DTC, происходит по запросу прерывания. Контроллер использует эти запросы для коммутации периферийных модулей между собой. При этом ресурсы ЦП не используются. Всего контроллер ELC формирует 124 события, которые используются для активации контроллера трансфера данных (DTC). И DTC, и ELC могут выключаться для снижения энергопотребления.

Выше мы привели описание режимов энергопотребления и контроллера EHC для управления внешним элементом, аккумулирующим энергию окружающей среды. Мы рассмотрели также два контроллера DTC и ELC, облегчающих передачу данных без привлечения ресурсов процессорного ядра. Поскольку описанные функции являются специфичными именно для МК компании Renesas, мы остановились на них более подробно.

К модулям обработки данных относятся:

- делитель 32-бит чисел DIV;
- модуль инвертирования 32-бит данных DIL;
- модуль обработки данных (DOC), реализующий операции сравнения, сложения и вычитания 16-бит чисел.

Остальные системные модули в той или иной степени характерны для других МК и детально описаны.

ПЕРИФЕРИЙНЫЕ МОДУЛИ МК ГРУППЫ RE 01

Цифровые периферийные модули позволяют организовать человеко-машинный интерфейс. В их состав входят три драйвера светодиодов, контроллер ЖКД и схема преобразования 2D графических данных. Драйверы светодиодов обеспечивают выходной ток 0,5 или 1 мА. Контроллер MLCDD управляет панелью ЖКД с параллельным интерфейсом и поддерживает технологию MIP (memory-in-pixel).

Схема преобразования 2D графических данных GDT осуществляет обработку изображений, в т. ч. композицию и масштабирование двумерных изображений. Одной операцией обрабатывается изображение размером до 32 байт. Также контроллер GDT реализует поворот изображения на 90° , преобразует глифы в изображения, осуществляет цветовую компоновку переднего плана и фонового изо-

бражения. Заметим, что данные R, G и B хранятся в разных областях памяти.

МК содержит богатый набор аналоговой периферии, что позволяет дополнить человеко-машинный интерфейс и построить относительно простую систему сбора и обработки данных или, учитывая наличие встроенного модуля управления электроприводом (MTDV), систему управления. В состав аналоговой периферии входят:

- модуль 14-бит АЦП S14AD;
- модуль 12-бит ЦАП R12DA;
- аналоговый компаратор (ACMP);
- источник опорного напряжения (VREF);
- датчик температуры (TEMP).

Модуль 14-бит АЦП S14AD в зависимости от модификации МК содержит до 18 входных каналов. Возможны три режима опроса каналов:

- единичное сканирование;
- продолжительное сканирование;
- групповое сканирование.

При единичном сканировании происходит однократный опрос выбранных каналов в порядке возрастания их номеров. При продолжительном сканировании осуществляется непрерывный опрос выбранных каналов в порядке возрастания их номеров. При групповом сканировании каналы разбиваются на две или три группы, и происходит последовательный опрос каждой группы. Инициализация АЦП осуществляется программно, аппаратно по сигналам таймера или контроллера событий ELC, а также по сигналу внешнего устройства на выводе ADTRG0 микросхемы. АЦП может работать в режиме 12- или 14-бит преобразования.

Основные параметры АЦП:

- время преобразования: 1 мкс;
- абсолютная погрешность: $\pm 4 \text{ МЗР}$;
- дифференциальная нелинейность (DNL): $\pm 1 \text{ МЗР}$;
- интегральная нелинейность (INL): $\pm 2,5 \text{ МЗР}$;
- число эффективных бит (ENOB): 13.

Модуль 12-бит ЦАП R12DA имеет один выходной канал. Инициализация модуля осуществляется так же, как и модуля АЦП. Основные параметры ЦАП:

- время преобразования: 50 мкс;
- абсолютная погрешность: $\pm 20 \text{ мВ}$;
- дифференциальная нелинейность (DNL): $\pm 1 \text{ МЗР}$;
- интегральная нелинейность (INL): $\pm 4 \text{ МЗР}$;

ВЫВОДЫ

В статье рассмотрены микроконтроллеры группы RE 01 компании Renesas. Их основной особенностью является очень малое энергопотребление, достигнутое не только за счет развитой системы режимов энергопотребления, но и с помощью использования проприетарной производственной технологии SOTB, которая помогла добиться желаемого результата без ограничения функциональных возможностей МК.

Встроенные аппаратные модули перемещения и обработки данных без использования ресурсов процессорного ядра позволяют увеличить производительность микроконтроллера и снизить его энергопотребление. Функциональные возможности МК делают возможным построение человеко-машинного интерфейса, систем сбора и обработки данных, а также несложных систем управления.

Встроенный контроллер EHC для управления внешним элементом, аккумулирующим энергию окружающей среды, заметно расширяет область применения МК. 

ЛИТЕРАТУРА

1. RE01 Group Differences Between 1500KB Products and 256KB Products//www.renesas.com/eu/en.

КОММЕНТАРИЙ СПЕЦИАЛИСТА

Андрей Лебедев, руководитель направления полупроводников, ООО «Сканти», laa@scanti.ru

Техпроцесс Renesas SOTB позволил в 10 раз сократить потребление энергии по сравнению с существующими микроконтроллерами. В рабочем режиме – 10 мкА/МГц, в режиме сна – до 140 нА. При этом у контроллеров RE01 довольно сложная схема переходов режимов питания и автономного использования периферии. Цены на контроллеры RE 01 – выше, чем у множества «обычных кортексов» на рынке.

Тогда для чего нужны эти контроллеры Renesas, выполненные с использованием уникального техпроцесса? В каких применениях имеет смысл переплачивать?

Например, в «умном земледелии». На полях агрокомплекса развернута сеть LoRa, оконечные узлы которой, распределенные по полям, периодически измеряют температуру и влажность почвы. Контроллер RE 01 управляет устройством. Данные тут же отправляются с LoRa-трансивера на шлюз или базовую станцию. Сотрудники агрокомплекса получают сводки с полей и оперативно орга-

низируют полив и другие действия, чтобы получить урожай.

Эти устройства не требуют обслуживания (не имеют батарей) – достаточно разницы потенциалов на концах металлического кола с термистором, воткнутого в почву, миниатюрной солнечной панели и ионистора.

Еще один пример – «умная» одежда для спортсменов или пациентов. Вшитая в ткань гибкая электроника – биометрические датчики, токопроводящие дорожки, измерительные электроды – требует питания. Контроллеры Renesas RE 01 позволяют избавиться от регулярных подзарядок или замены батареек в одежде. Вся схема питается от статического электричества, возникающего от трения при движении человека!

Найдется масса новых применений с автономными «безбатарейными» устройствами, соединенными в общий «интернет». К числу этих применений относится, например, контроль зданий, мониторинг животных, носимые или возимые трекеры и т. д. Устройства будут дополняться функциями ввода и вывода



информации (человеко-машинный интерфейс). Управляющий элемент для таких устройств уже есть – это RE 01.

Компания Renesas развивает направление на техпроцессе SOTB. Планируется выпуск контроллеров со встроенным BLE-приемопередатчиком и МК на более мощных ядрах Arm Cortex-M33.