

# Микроконтроллеры с FRAM: архитектура и особый подход к разработке программного обеспечения

Штефан ШОЕР (Stefan SCHAUER)  
epic@ti.com  
Вячеслав ПРОКОПИЙ  
ti@compel.ru

При программировании микроконтроллера следует учитывать некоторые аспекты, касающиеся структуры программного обеспечения и обработки потока информации. В настоящее время разработчикам ПО известны критические особенности таких типов энергонезависимой памяти, как PROM, EPROM и Flash, и методы работы с ними. Для устройств с FRAM-памятью следует принимать во внимание некоторые новые аспекты. Авторы статьи освещают эти особенности и рассказывают о возможных методах работы с новой архитектурой памяти.

## Введение

Совсем недавно компания Texas Instruments выпустила новое поколение микроконтроллеров в семействе изделий MSP430. В этих устройствах в качестве основной памяти программ используется память, реализованная по технологии FRAM.

Микроконтроллеры семейства MSP430FR59xx, как и вся линейка MSP430, разработаны специально для приложений с низким энергопотреблением. Благодаря использованию памяти FRAM среднее энергопотребление этих микроконтроллеров в активном режиме составляет не более 100 мкА/МГц, а время выхода из сна не превышает 7 мкс. Но сфера применения этих микроконтроллеров не ограничивается только энергосберегающими приложениями. Эти устройства подходят для реализации различных электронных систем, в том числе и беспроводных. К ним относятся датчики безопасности и автоматизация зданий; измерения и сбор данных в промышленности; потребительская электроника и управление небольшими двигателями; всевозможные приборы учета электрической энергии, газа, воды и тепла; портативные гаджеты для здоровья и спорта.

Структурная схема микроконтроллера MSP430FR5969 приведена на рис. 1.

Набор периферийных устройств микроконтроллеров семейства MSP430FR59xx включает в себя стандартные для микроконтроллеров общего назначения модули:

- модуль аппаратного перемножения двух 32-битных величин;
- 3-канальный DMA-контроллер;
- набор таймеров;
- последовательные интерфейсы UART, I<sup>2</sup>C и SPI.

Но есть и дополнительные преимущества, на которые следует обратить внимание.

## Энергосбережение

В семействе MSP430FR59xx предусмотрено семь различных режимов пониженного энергопотребления. Каждому из режимов соответствует свой набор тактовых доменов для ядра и различных периферийных устройств. Отдельно можно выделить режим LPM3.5. В этом режиме отключается тактирование всей периферии и питание ядра, но остается работать модуль часов реального времени с календарем — RTC. Потребление тока в этом режиме составляет менее 0,5 мкА. В режиме хранения достигается рекордно низкое энергопотребление — около 10 нА.

## Высокопроизводительная, малопотребляющая аналоговая периферия

В этом семействе впервые за историю существования MSP430 реализован АЦП последовательного приближения со сверхнизким током потребления — 75 мкА. АЦП содержит до 16 каналов и способен преобразовывать напряжение в 12-разрядный код с частотой до 200 000 выборок/с. Также в новом семействе микроконтроллеров с FRAM-памятью появилась возможность оцифровки дифференциальной подачи сигнала. Поддерживается функция оконного компаратора, позволяющая формировать прерывания при выходе измеряемого сигнала за пределы окна, устанавливаемого разработчиком.

Отдельный многофункциональный модуль компаратора может обрабатывать до 15 каналов, позволяя контролировать уровень напряжения батареи или состояние внешних сигналов.

## Сравнение различных технологий энергонезависимой памяти, используемых в микроконтроллерах

ROM — постоянное запоминающее устройство. Является самым выгодным при производстве большого количества приборов, но вместе с тем и самым неприспособленным к изменению кода, так как всегда требует создания новой маски ПЗУ в процессе производства микросхемы, что приводит к значительному удорожанию внедрения и доставки новых версий кода. Обновление встроенного ПО на месте эксплуатации невозможно. Во время циклов включения/выключения питания никакие данные не могут быть сохранены.

PROM/EPROM/EEPROM в статье не рассматриваются, так как в настоящее время обычно не используются в качестве основной памяти микроконтроллеров.

Flash — память, которая сейчас чаще всего используется в микроконтроллерах для кода и постоянного запоминания. Содержимое памяти сохраняется во время цикла включения/выключения. Для чтения из Flash-памяти требуется больший ток, чем для чтения из RAM. Для циклов записи необходимо больше времени, чем для циклов чтения. Стирание осуществляется только сегментами, специально предусмотренными в архитектуре и включающими определенное количество байт (обычно 64–1024). Циклы стирания/записи: 100–100 000.

FRAM — сегнетоэлектрическое ОЗУ, новейшая технология энергонезависимой памяти. Этот тип памяти можно использовать для хранения кода, констант и переменных. Чтение является разрушающим, что означает необходимость выполнения системой цикла записи после чтения. Как правило, эта операция выполняется внутри FRAM. Для выполнения кода это означает отсутствие различий между доступом для чтения и доступом для записи. Стандартные циклы чтения/записи:  $6,6 \times 10^{10}$ .

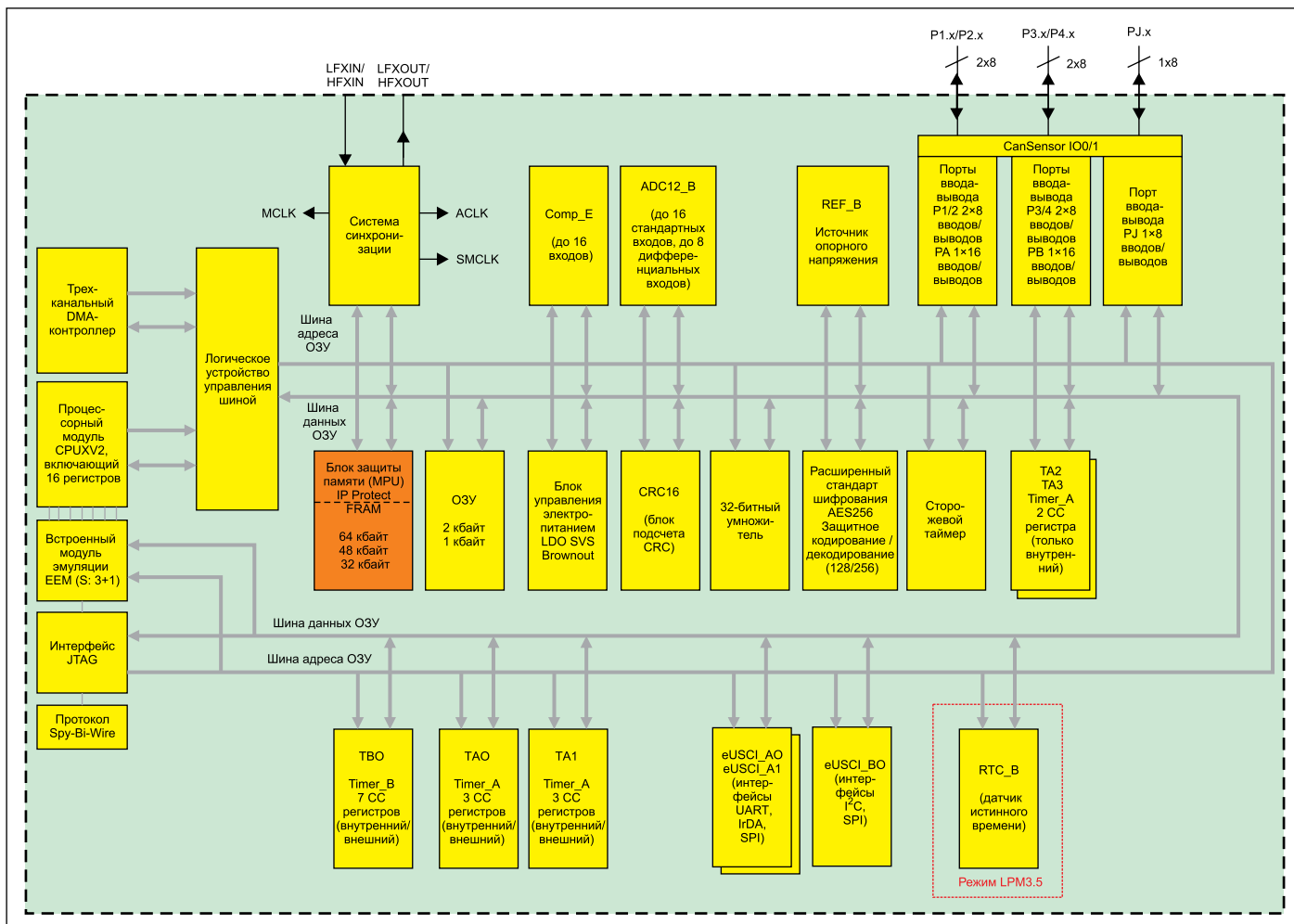


Рис. 1. Структурная схема MSP430FR5969

### Расширенные возможности GPIO

Наряду со стандартными функциями портов, такими как настройка на вход или на выход, возможность подключения подтягивающих резисторов, работа в качестве источника внешнего прерывания или выхода из спящего режима, модуль GPIO в семействе MSP430FR59xx поддерживает дополнительную функцию — *CapSense*. Это позволяет реализовать сенсорные органы управления без дополнительных электронных компонентов.

### Безопасность

Для обеспечения безопасной передачи данных предусмотрен сопроцессор AES256. Этот модуль аппаратно выполняет операцию кодирования/декодирования данных с помощью 128-, 192- или 256-битного ключа по стандарту шифрования FIPS PUB 197. Есть также модуль для создания генератора случайных чисел.

Для проверки целостности информации предусмотрен специальный модуль подсчета контрольной суммы — CRC16. Подсчет контрольной суммы производится на основе стандарта CRC-CCITT.

### Особенности работы с FRAM

При разработке программного обеспечения для этой новой технологии памяти необходимо принимать во внимание определенные особенности, которые отличают ее от ранее используемых технологий. FRAM обеспечивает полную универсальность при распределении памяти между переменными, константами и сегментами памяти, содержащими основную программу. В зависимости от применения это предоставляет программисту большую свободу действий, но также требует более детального планирования архитектуры и структуры программного обе-

сечения, особенно при расширенном использовании этой свободы. Разделение данных между имеющейся RAM-памятью и сегнетоэлектрической оперативной памятью, а также использование FRAM в качестве памяти данных и кода должны быть спланированы заранее, так, чтобы можно было перестроить структуру ПО для такого разделения (рис. 2). Разработчику ПО необходимо принимать верные решения и понимать различия типов памяти, а также знать о побочных эффектах.

Микроконтроллер MSP430FR5969 предназначен для применения в условиях со сверхнизким потреблением энергии, например в устройствах с батарейным питанием или с источником альтернативной энергии (солнечные батареи, пьезоэлементы и др.). При таком ис-

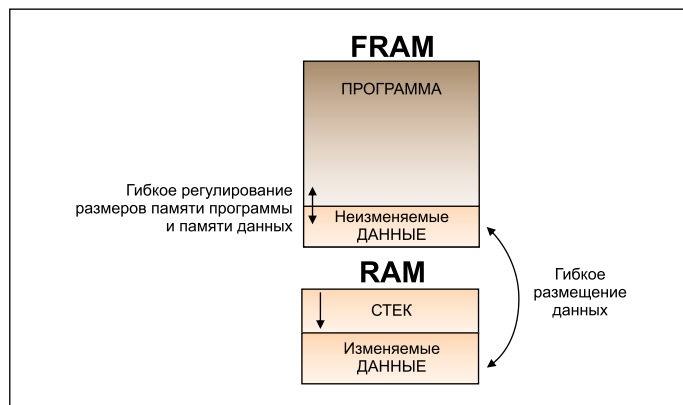


Рис. 2. Варианты гибкого конфигурирования памяти внутри устройства с FRAM

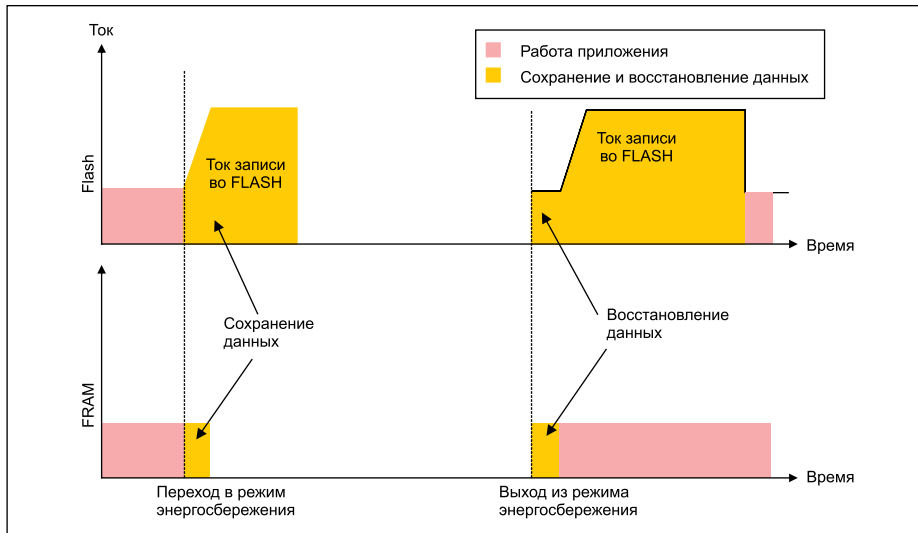


Рис. 3. Сравнение потребления тока Flash- и FRAM-памяти микроконтроллера при сохранении и восстановлении данных

пользовании необходимо тщательно сбалансировать расход тока. В связи с этим нужно отметить, что для доступа к данным, находящимся во FRAM, требуется несколько большее потребление, чем для доступа к данным, находящимся в RAM. Из этого следует, что размещение всех данных внутри FRAM для их автоматического сохранения при отключении питания не всегда является оптимальным решением.

Рассмотрим абстрактный пример. Допустим, что необходимо осуществить доступ к 128 байтам данных 100 раз в секунду. Потребление тока при доступе к памяти в MSP430FR5969 имеет следующие значения:

- доступ к RAM: 65 мкА/МГц;
- доступ к FRAM: 160 мкА/МГц.

Рассчитаем потребление тока при доступе к обоим типам памяти:

- доступ к RAM:  $65 \times 128 \times 100 = 0,832$  мкА;
- доступ к FRAM:  $160 \times 128 \times 100 = 2,048$  мкА.

Расположение всех данных во FRAM-памяти приведет к увеличению тока по сравнению с RAM:  $2,048 - 0,832 = 1,216$  мкА.

Таким образом, ту часть данных, доступ к которой осуществляется часто, целесообразнее разместить в RAM-памяти. А данные, которые должны быть сохранены при отключении питания, следует разместить во FRAM-памяти.

Большим преимуществом технологии FRAM является то, что такая память характеризуется как энергонезависимая. Это означает, что при цикле включения/выключения питания данные будут сохранены автоматически, без каких-либо дополнительных действий. Такой режим работы не требует дополнительных аппаратных или программных решений от разработчика. Все сохраненные данные также будут защищены при сбросе или цикле включения/выключения питания (рис. 3). Если приложение начинает работать нестабильно из-за данных, сохраненных во FRAM, пользовательскую программу в та-

кой ситуации нельзя будет восстановить посредством сброса или цикла включения/выключения питания, что в прошлом широко использовалось в любых приложениях для микроконтроллеров.

В этом случае программное обеспечение должно предпринять предупредительные действия для обеспечения целостности данных и безопасности приложения во время запуска, например осуществлять проверку контрольной суммы и целостности данных перед их использованием.

Применение Flash-памяти обеспечивает внутреннюю защиту памяти от перезаписи, так как обычный доступ не вызывает изменения ее содержимого без включения режима записи. В режиме записи включается генератор подкачки заряда для создания программирующего напряжения, контролирующей требуемую процедуру программирования. Таким образом, «неконтролируемый» код приложения обычно не может повредить сохраненный во Flash-памяти программный код. Для технологии FRAM это имеет большее значение, так как без специальной защиты доступ для записи будет осуществлен незамедлительно, и возникнет вероятность изменения кода приложения.

Другая проблема обусловлена физическим аспектом, который заключается в том, что этот тип памяти может осуществлять только разрушающее чтение. Это означает, что при доступе для чтения данные изменяются, и возникает необходимость их восстановления системой. В устройствах MSP30FR59xx реализована внутренняя защита от такого явления. Тем не менее во время выполнения программы может возникнуть ошибка, результатом которой может стать запись в область памяти с программой и данными, что приведет к повреждению приложения. Следовательно, системе необходима защита от этого типа доступа. Устройство MSP430FR59xx оснащено модулем защиты

памяти (MPU), позволяющим управлять различными типами доступа к памяти (чтение, запись и выполнение кода). Этот конфигурируемый пользователем и удобный в обращении модуль гарантирует, что для заданной пользователем области памяти будут возможны только разрешенные виды доступа. Запрещенный доступ к памяти блокируется до того, как будет осуществлен физический доступ. После этого система получает информацию об ошибке доступа, и, таким образом, пользовательское ПО может предпринять попытку восстановления и обеспечить стабильность и безопасность приложения.

Энергочувствительные приложения могут оказаться более эффективными, если смогут полностью отключить питание системы. Это позволит избежать утечки тока в то время, когда активность приложения не требуется. Использование такой системы может быть особенно важным в применении с возобновляемыми источниками, в условиях недостаточного энергоснабжения, например для фотоэлементов при отсутствии света. В этом случае приложение следует отключить и возобновить его работу, только когда освещение будет восстановлено. Безусловно, накопленные данные и полученную информацию необходимо обработать и сохранить для дальнейшего использования. Для этого в микроконтроллерах, оснащенных Flash-памятью, можно воспользоваться ею, но это потребует высоких значений тока в течение длительного времени цикла записи. Необходимая энергия должна быть предварительно сохранена во внешнем конденсаторе. Память FRAM обеспечивает все это без каких-либо дополнительных затрат.

## Заключение

Микроконтроллеры с FRAM-памятью обладают определенным преимуществом перед микроконтроллерами с Flash-памятью. Высокая скорость, практически неограниченное количество циклов перезаписи и, что самое главное, низкий ток записи позволяют реализовывать на их основе более эффективные в плане энергопотребления приложения. Новая технология памяти предоставляет разработчикам программного обеспечения большую гибкость при изменении объема их приложений и разбиении имеющейся памяти, так как память для программного кода также может использоваться для хранения данных. Находящаяся во FRAM информация автоматически сохраняется при потере питания, но это также требует принятия во внимание некоторых новых факторов, касающихся выполнения и запуска приложения. Использование микроконтроллера, основанного на этой технологии энергонезависимой памяти, значительно расширяет область применения приложений, охватывая, например, безбатарейные системы или системы с ограниченным энергоснабжением. ■