

# Преобразователь интерфейсов USB–SPI на новом x51-микроконтроллере EFM8UB1

## Часть 1

Алексей Кузьминов (Москва)

В статье рассмотрены аппаратные средства (принципиальные схемы, варианты разводки плат и фотографии реальных устройств) и программное обеспечение (исходные тексты программ и их оттранслированные варианты в hex-формате) устройств преобразователей интерфейсов USB–SPI на базе новейших высокоскоростных миниатюрных x51-совместимых микроконтроллеров EFM8UB1 компании Silicon Laboratories. Применение этих микроконтроллеров в подобных преобразователях кардинально снижает их стоимость и габариты, а также существенно повышает скорость обмена. Статья состоит из трёх частей.

### ВВЕДЕНИЕ

Преимущества 8-разрядных x51-совместимых микроконтроллеров (МК), разработанных ещё в 1980 г. компанией Intel, перечислять нет необходимости – они всем хорошо известны. Однако ведущие производители в последнее время перестали уделять этим МК должное внимание. Последние разработки x51-совместимых МК таких компаний, как Atmel, NXP, TI и др. прекратились несколько лет назад. Причина этого, вероятно, кроется в различных маркетинговых особенностях, требующих агрессивного продвижения на рынок 32-разрядных МК. Однако востребованность x51-совместимых МК, на взгляд автора, до сих пор высока и, к сожалению, не зависит от маркетинговых нюансов. Вероятно, поэтому топовые модели x51-совместимых МК ведущих фирм до сих пор выпускаются и пользуются неизменным спросом.

В 2015 г. после приобретения компании Energy Micro, выпускавшей 32-разрядные МК EFM32 со сверхмалым потреблением энергии, компания Silicon Laboratories сделала настоящий прорыв, разработав и выпустив целую плеяду 8-разрядных x51-совместимых МК EFM8. Среди них – EFM8BB (Busy Bee), отличающиеся большим количеством встроенных периферийных устройств, EFM8SB (Sleepy Bee) со сверхмалым потреблением энергии, а также EFM8UB (Universal Bee), поддерживающие интерфейс USB (об одном из них (EFM8UB1) и пойдёт речь в данной статье).

Однако на этом Silicon Laboratories не остановилась и уже в 2016 г. выпустила новое семейство EFM8LB (Laser Bee) со встроенным 14-разрядным АЦП с частотой дискретизации до 900 кГц, который включает входной мультиплексор и контроллер прямого доступа к памяти – DMA (в статье также будет приведён пример использования этого МК). Кроме того, эти МК оборудованы четырьмя конфигурируемыми логическими блоками (CLU), позволяющими проектировщикам реализовать комбинационную логику и/или синхронизаторы (т.е. функции И, ИЛИ, НЕ, мультиплексоры и триггеры) без применения внешних компонентов. По своим функциональным особенностям EFM8LB могут соперничать с МК C8051F06X со встроенным 16-разрядным АЦП со скоростью преобразования до 1 млн операций в секунду и имеющими прямой доступ к памяти (DMA), что позволяет записывать в память результаты АЦП без участия МК. Последний до сих пор выпускается, поскольку достаточно востребован, несмотря на относительно дороговизну и невысокую тактовую частоту 25 МГц. Все же МК EFM8 – одноктактные и могут работать на максимальной частоте 50 МГц (а EFM8LB1 – до 75 МГц), или, другими словами, максимальная скорость их работы составляет 50 млн операций в секунду (MIPS). Благодаря очень низкой цене в средних и больших партиях, МК семейства EFM8, на взгляд автора, в настоящее время не имеют альтернативы.

Ранее автором была опубликована статья о преобразователе интерфей-

сов USB–SPI на базе МК C8051F321 и бесплатно поставляемой компанией Silicon Laboratories библиотеке USBXpress, позволяющей, не вдаваясь в подробности спецификации интерфейса USB, простыми средствами производить обмен информацией C8051F321 с компьютером по этому интерфейсу [1]. В связи с выпуском нового МК EFM8UB1, оборудованного интерфейсом USB и имеющего сверхмалые габариты (корпус QFN20 размером всего 3 × 3 мм), автор решил попробовать его также в роли преобразователя интерфейсов USB–SPI. Результат превзошёл самые смелые ожидания.

Дальнейшее изложение будет вестись в следующей последовательности. Вначале будут описаны аппаратные средства преобразователей интерфейсов USB–SPI на базе МК EFM8UB1 (принципиальные схемы устройств и макетных плат, разводка плат и фотографии готовых устройств), а затем – программные средства (тексты программ, рекомендации по конфигурированию портов ввода/вывода с помощью матрицы соединений, а также по трансляции программ; снимки экранов, показывающих реальные скорости обмена USB–SPI и т.п.).

### АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ USB–SPI НА БАЗЕ МК EFM8UB1

В этом разделе представлены четыре устройства преобразователей USB–SPI на базе EFM8UB1.

Первое – неизолированный преобразователь USB–SPI с общими цепями «земли» и питания интерфейсов USB и SPI. В этом преобразователе интерфейс SPI работает в полном четырёхпроводном режиме, т.е. осуществляет обмен с помощью четырёх сигналов: MISO, MOSI, SCK и NSS.

Второе – изолированный преобразователь USB–SPI, у которого интерфейс SPI оборудован гальванической развязкой с помощью четырёхканального цифрового изолятора SI8642. Интерфейс SPI в этом устройстве работает в усечённом трёхпроводном режиме,

в котором используются только сигналы MISO, MOSI и SCK, а сигнал NSS не применяется.

Третье – изолированный преобразователь USB–SPI на базе 6-канального цифрового изолятора SI8662. Гальванически изолированный интерфейс SPI в этом устройстве работает в четырёхпроводном режиме.

Четвёртое – изолированный преобразователь USB–SPI, в котором осуществлена гальваническая изоляция интерфейса USB с помощью цифрового изолятора ADUM3160/4160, а интерфейс SPI не изолирован и работает в четырёхпроводном режиме.

Для тестирования этих преобразователей USB–SPI в статье представлены две макетные платы. Первая – на базе МК C8051F061, вторая – на базе EFM8LB12.

В статье [1] для тестирования преобразователя USB–SPI на базе C8051F321 был использован МК C8051F067, имеющий аналогичные характеристики (с точки зрения интерфейса SPI) с МК C8051F061. В настоящей статье использована макетная плата с C8051F061. Причины, по которым автором изготовлена новая макетная плата с МК C8051F061, состоят в следующем.

Во-первых (и это главная причина), плата-переходник для МК C8051F067 имеет двустороннюю разводку [1], которую осуществить своими силами достаточно проблематично. Поэтому автором разведена и изготовлена новая плата-переходник с односторонней разводкой, которая намного проще в изготовлении. Эта односторонняя разводка по выводам отличается от двусторонней, поэтому схема новой макетной платы отличается от схемы, приведённой в [1]. Во-вторых, макетная плата из [1] достаточно сложна, поскольку имеет несколько ненужных опций, которые в новой макетной плате отсутствуют.

Вторая макетная плата изготовлена на базе нового МК EFM8LB12 разработки 2016 г. В свою очередь, эта плата изготовлена по следующим причинам.

Во-первых, автору хотелось проверить новый МК в режиме обмена информацией с ПК по интерфейсу USB с помощью преобразователей USB–SPI на базе МК EFM8UB1. Во-вторых, автора заинтересовало сравнение скоростных характеристик обмена по интерфейсу SPI двух МК: C8051F061 и EFM8LB12. Забегая вперёд, можно отметить, что скорость обмена по SPI у EFM8LB12 превысила таковую у C8051F061 в 6 раз!

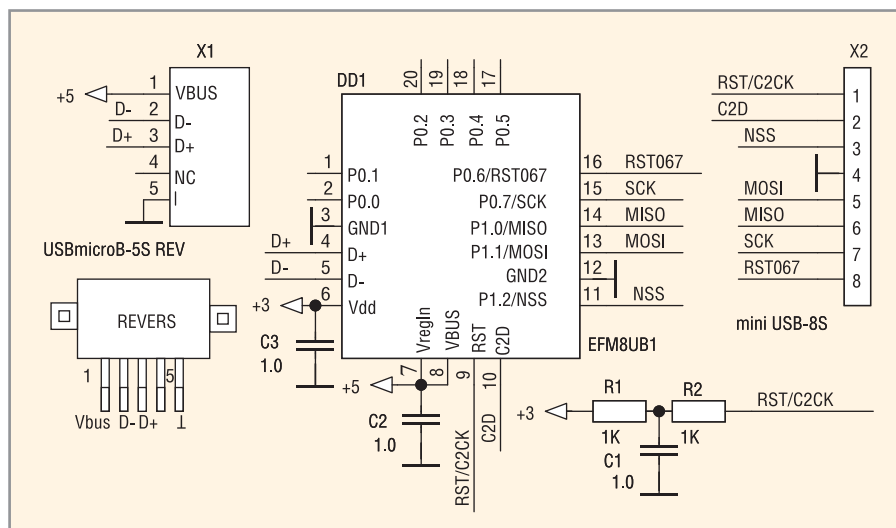


Рис. 1. Принципиальная схема неизолированного преобразователя USB–SPI на базе EFM8UB1

### ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ УСТРОЙСТВ

Принципиальная схема преобразователя USB–SPI (см. рис. 1) предельно проста и содержит собственно МК EFM8UB1 (DD1) и два разъёма. Первый – USBmicroB-5S REV (X1), к которому подключается кабель интерфейса USB, и второй – mini USB-8S (X2), на который выведены сигналы интерфейса SPI (NSS, MOSI, MISO, SCK), сигнал RST067 для сброса (Reset) МК C8051F067, с которым производится обмен информацией по интерфейсу SPI, и «земля» (эти же сигналы используются для подключения устройства к макетной плате с EFM8LB12), а также сигналы интерфейса C2 (RST/C2CK, C2D и общий), предназначенные для программирования микроконтроллера EFM8UB1 с помощью USB-Debug-адаптера. Цепочка R1–R2–C1 формирует сигнал сброса (Reset) МК при подаче питания (+3 В). Это напряжение (Vdd – 6-й вывод), в свою очередь, формируется встроенным в МК стабилизатором +3 В, если питание +5 В, присутствующее на линии  $V_{BUS}$  интерфейса USB, попадает на выводы VregIn и  $V_{BUS}$  (7-й и 8-й выводы соответственно).

Для программирования устройства, показанного на рисунке 1, необходимо изготовить два кабеля с разъёмами (см. рис. 2). Первый кабель соединяет разъём USB-Debug-адаптера SCM-10 (X1) с разъёмом устройства mini USB-8P (X2). По этому кабелю в устройство передаются сигналы интерфейса C2. Второй кабель подаёт питание +5 В с разъёма PC4TB(p) БП (X3) на МК через разъём USBmicro-5P (X4).

В качестве микроконтроллеров, с которыми сопрягается МК EFM8UB1

по интерфейсу SPI, были выбраны: C8051F067/61, который был подробно описан в статье [1], и новейший МК EFM8LB12 разработки 2016 г.

Для подключения устройства USB–SPI к макетным платам с МК C8051F061 и EFM8LB12 (их схемы приведены далее) необходимо изготовить кабель по схеме, показанной на рисунке 3.

Несколько слов о входных и выходных разъёмах устройства.

Для подключения устройства к интерфейсу USB использован относительно новый разъём USBmicro-5S REV. Он имеет зеркальное (Revers) расположение контактов интерфейса USB по сравнению со стандартным USB micro-5S. Это как нельзя лучше соответствует расположению контактов USB ИС EFM8UB1 (и C8051F321), поэтому разводка платы получается проще и надёжнее, чем при использовании стандартного разъёма. Новый разъём легко приобрести, и по стоимости он не отличается от стандартного. Внешне этот разъём отличается от стандартного тем, что его нижняя часть, где расположены контакты, шире верхней части (у стандартного разъёма всё наоборот).

Для подключения к интерфейсу SPI (в рабочем режиме) и интерфейсу C2 (для программирования) используется один 8-контактный разъём mini USB-8S. Это позволило вообще отказаться от отдельного разъёма, предназначенного для программирования МК, что упростило конструкцию устройства, уменьшило его габариты и повысило надёжность. Сам по себе разъём mini USB-8S малогабаритен (экономит место на плате), его стоимость не превышает стоимость стандартного USB micro-5S

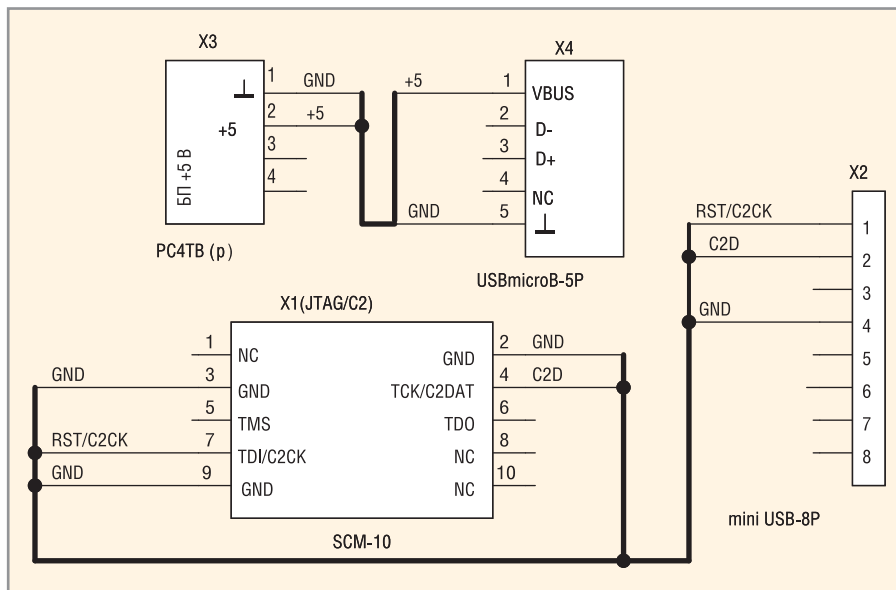


Рис. 2. Схема кабелей для программирования МК, включённого по схеме, показанной на рисунке 1

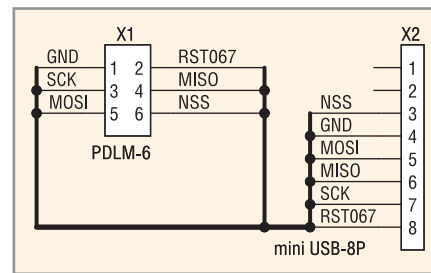


Рис. 3. Схема кабеля для подключения устройства к макетным платам с МК C8051F067 и EFM8LB1

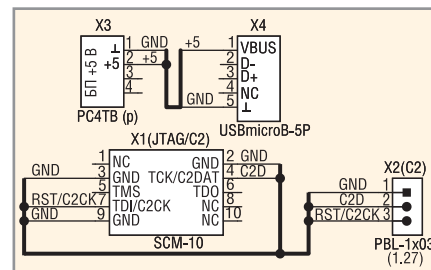


Рис. 5. Схема кабелей для программирования МК, включённого по схеме, изображённой на рисунке 4

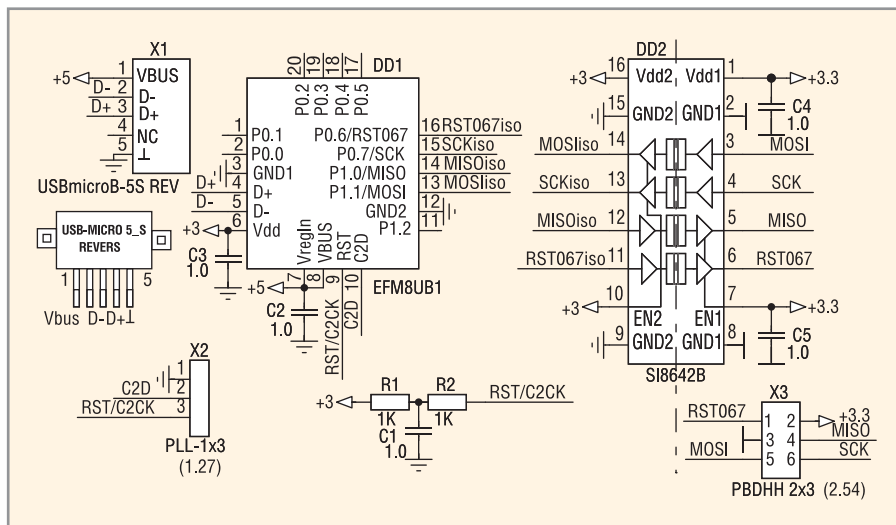


Рис. 4. Схема гальванически изолированного преобразователя интерфейсов USB-SPI (трёхпроводного)

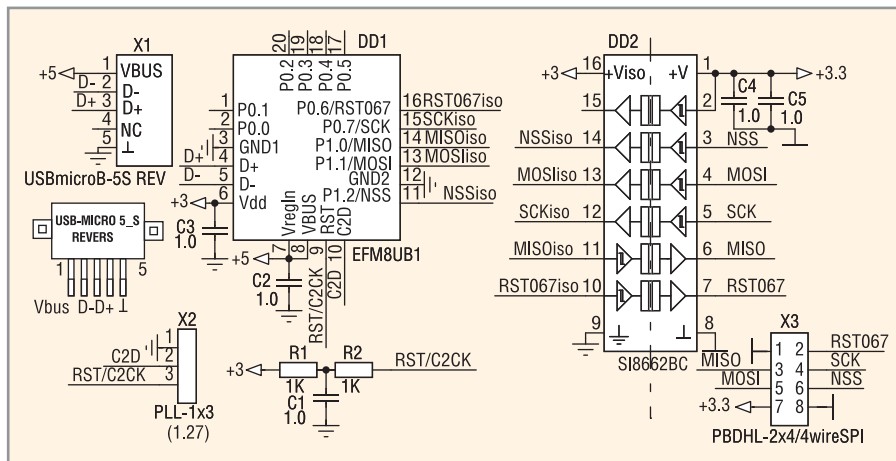


Рис. 6. Схема гальванически изолированного преобразователя интерфейсов USB-SPI (четырёхпроводного)

и, по опыту автора, он исключительно надёжен.

Для экономии места в статье схема соответствия контактов ответного разъёма (mini USB-8P), подключаемо-

го к разъёму mini USB-8S, контактам, предназначенным для пайки, приведена в дополнительных материалах к статье, которые доступны для скачивания на сайте журнала.

Как уже упоминалось, гальванически изолированный преобразователь USB-SPI представлен тремя устройствами.

Первое устройство (см. рис. 4) сконструировано на основе высокоскоростного четырёхканального цифрового изолятора SI8642 (DD2), который показал идеальную работу с интерфейсом SPI, работающим в трёхпроводном режиме [1]. Для программирования EFM8UB1 (DD1) с помощью USB-Debug-адаптера сигналы интерфейса C2 выведены на трёхштырьковый разъём PLL-1x3 (X2). К интерфейсу USB МК EFM8UB1 подключается с помощью разъёма USBmicro-5S REV (X1), а к C8051F067 и EFM8LB12, расположенным на соответствующих макетных платах, по интерфейсу SPI – с помощью разъёма PBDHH 2x3 (X3), представляющего собой двухрядные гнёзда с шагом 2,54 мм. Остальные особенности схемы уже были описаны.

Для программирования МК EFM8UB1 в схеме, показанной на рисунке 4, необходимо изготовить два кабеля по схемам, приведённым на рисунке 5. Один – с разъёмом USBmicro-5P (X4) – для подачи питания +5 В описан ранее, второй – с разъёмами SCM-10 (X1) и PBL-1x03 (X2) – приведён в нижней части рисунка 5.

Хотя гальванически изолированный интерфейс, работающий в трёхпроводном режиме (см. рис. 4), показал хороший результат при работе с МК

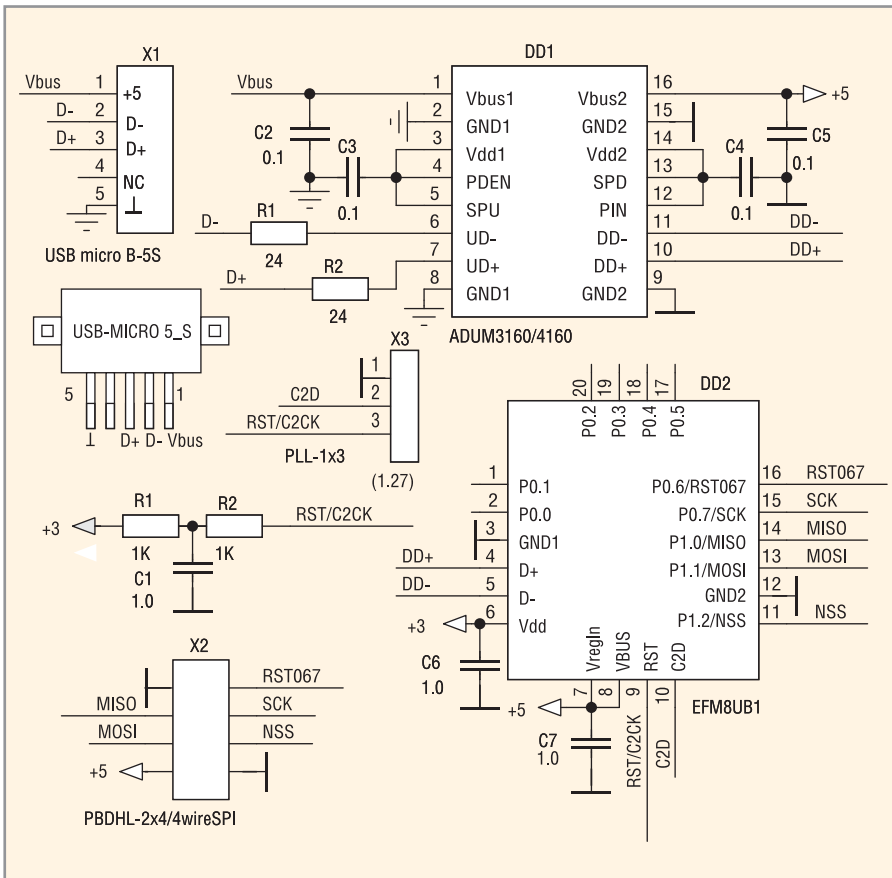


Рис. 7. Схема гальванически изолированного преобразователя интерфейсов USB-SPI на базе цифрового изолятора ADUM3160/4160 (четырёхпроводного)

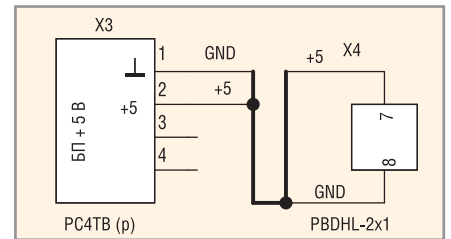


Рис. 8. Схема кабеля питания для программирования МК, включенного по схеме, приведённой на рисунке 7

C8051F067, при работе с EFM8UB1 эта схема показала довольно посредственный результат по скорости. Причины этого – более низкая тактовая частота МК C8051F067 (25 МГц) по сравнению с таковой у EFM8UB1 (50 МГц), а также усечённый трёхпроводный режим работы, в котором сигнал NSS, синхронизирующий приём/передачу каждого байта, отсутствует.

Для увеличения скорости обмена по интерфейсу SPI был изготовлен ещё один изолированный преобразователь USB-SPI, но уже работающий в полном четырёхпроводном режиме (см. рис. 6). В схеме используется высокоскоростной 6-канальный цифровой изолятор SI8662 (DD2), позволяющий добавить четвёртый сигнал интерфейса SPI – NSS. Благодаря этому сигналу схема, представленная на рисунке 6, показала более высокую скорость обмена по интерфейсу SPI, чем схема, изображённая на рисунке 4. Разъём X3 – четыре двухрядных цанговых штыря с шагом 2,54 мм. Для программирования МК EFM8UB1 в схеме на рисунке 6 используются те же кабели (см. рис. 5), что и для программирования МК по схеме, приведённой на рисунке 4.

Как показало тестирование устройств, схемы которых изображены на рисунках 4 и 6, изолированные преобразователи USB-SPI по скорости обмена не могут соперничать с неизоллированным (см. рис. 1).

Гальванически изолированный преобразователь интерфейсов USB-SPI может быть основан не только на принципе гальванической изоляции интерфейса SPI (см. рис. 4 и 6), но и на ином принципе, а именно – на гальванической изоляции самого интерфейса USB с помощью хорошо известных цифровых изоляторов ADUM3160/4160 [1]. Преимущество этих микросхем в том, что они не снижают скорость обмена по интерфейсу USB. А вот цифровые изоляторы интерфейса SPI снижают скорость обмена (особенно

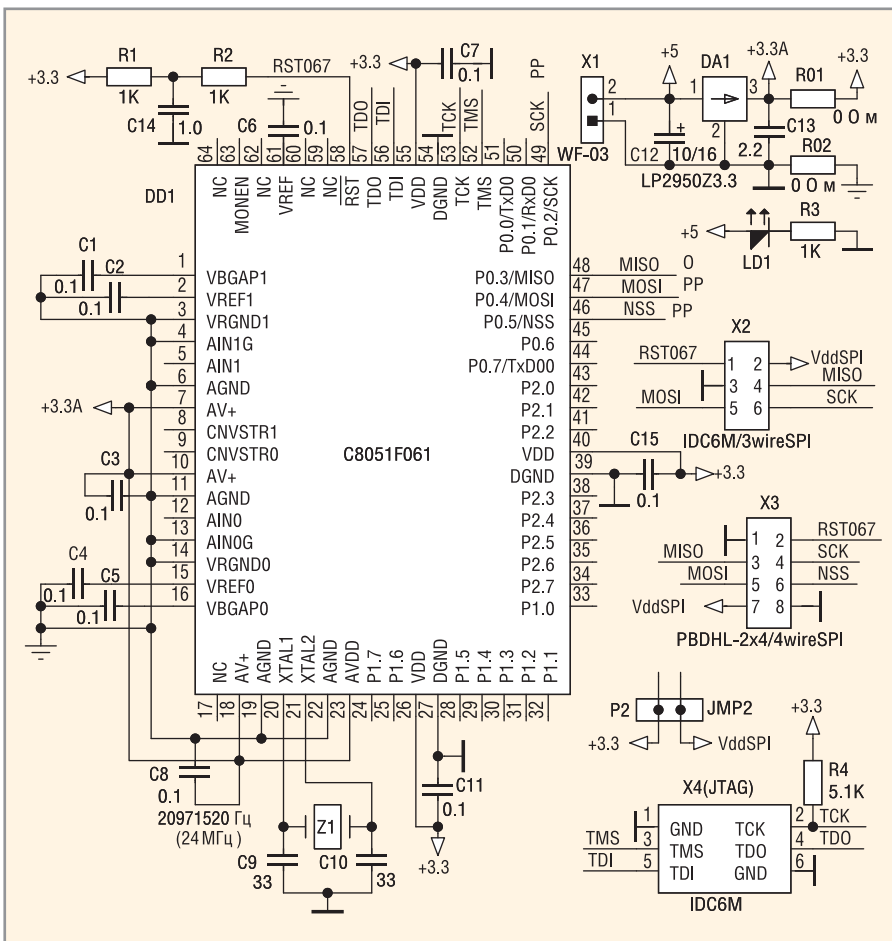


Рис. 9. Схема макетной платы с МК C8051F061/067

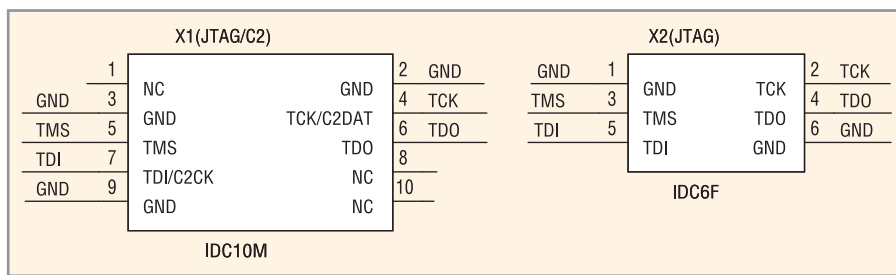


Рис. 10. Схема кабеля для программирования МК C8051F061/67 с помощью USB-Debug-адаптера по интерфейсу JTAG

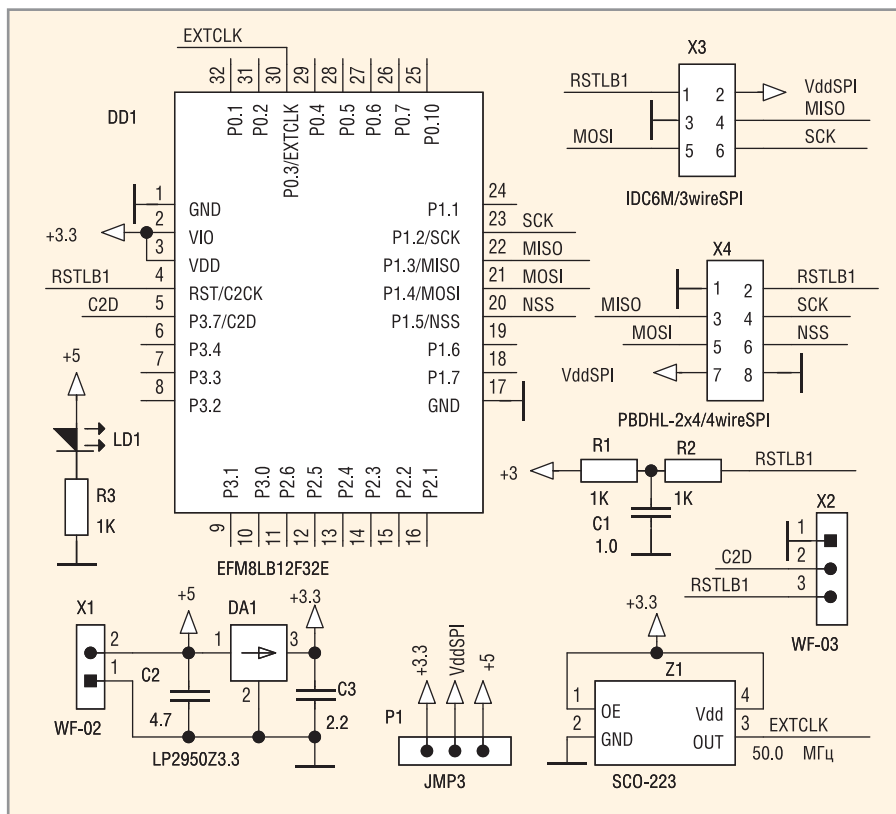


Рис. 11. Схема макетной платы с МК EFM8LB12

в трёхпроводном режиме). Недостатки ADUM3160/4160 – более крупный корпус (SOIC16W размером 10 × 10 мм), чем у цифровых изоляторов интерфейса SPI, а также достаточно высокая цена, которая на момент написания статьи [1] в 2012 г. составляла около 1000 руб. за штуку. Однако к настоящему времени цена на изоляторы (ADUM3160) упала почти в 2,5 раза и сравнялась с ценой 6-канальных цифровых изоляторов SI8662BC (около 400 руб.), используемых в схеме, показанной на рисунке 6. Кроме того, микросхемы ADUM3160 более доступны, чем SI8662BC.

Поэтому было принято решение сконструировать преобразователь интерфейсов USB–SPI на базе цифровых изоляторов ADUM3160/4160 (см. рис. 7). Забегая вперёд, отметим, что скоростные характеристики получившегося преобразователя не уступают

характеристикам неизолированного преобразователя USB–SPI (см. рис. 1), являющегося самым скоростным из всех преобразователей, представленных в настоящей статье. Что касается схемы, приведённой на рисунке 7, то она достаточно проста и в отдельных комментариях не нуждается.

Для программирования МК EFM8UB1 в схеме, изображённой на рисунке 7, требуется два кабеля. Первый – для сопряжения с сигналами C2 USB-Debug-адаптера. Этот кабель аналогичен кабелю с разъёмами X1–X2, показанному в нижней части рисунка 5. Второй кабель подаёт питание на устройство (7 и 8 выводы X2 на рисунке 7) с помощью двух цанговых гнёзд (X4 на рисунке 8).

Схема макетной платы с МК C8051F061 (см. рис. 9) по сравнению со схемой, приведённой в [1], значительно упрощена и содержит мини-

мум необходимого для тестирования устройств преобразователей интерфейсов USB–SPI.

В ней используется стабилизатор +3,3 В LP2950Z3.3 (DA1), к которому с разъёма X1 подаётся питание +5 В от стабилизированного источника с током не менее 100 мА. Устройство изолированного преобразователя USB–SPI, работающего в трёхпроводном режиме, подключается к разъёму X2, представляющему собой 6-контактный штыревой разъём с расстоянием между штырями 2,54 мм. Устройства неизолированного преобразователя USB–SPI и изолированного преобразователя, работающего в четырёхпроводном режиме, подключаются к разъёму X3, представляющему собой четыре двухрядных цанговых гнезда с расстоянием между ними 2,54 мм.

Двухконтактная перемычка P2 предназначена для подачи или снятия (при необходимости) питания (VddSPI) на разъёмы X2 и X3 с помощью джампера. Цепочка R1–R2–C14 предназначена для формирования сигнала сброса МК. Кварцевый резонатор с частотой 20 971 520 Гц подключён к выводам XTAL1 и XTAL2 МК с заземляющими конденсаторами C9 и C10. Остальные конденсаторы служат для штатной работы микроконтроллера. Для индикации присутствия питания на плате используется светодиод LD1 с токоограничительным резистором R3.

Для программирования МК по интерфейсу JTAG с помощью USB-Debug-адаптера используется 6-штырьковый разъём IDC6M, к которому подключается кабель программирования, соединяющий выводы адаптера с выводами разъёма X4. Схема такого кабеля приведена на рисунке 10.

Схема макетной платы с МК EFM8LB12 (см. рис. 11) несколько проще предыдущей. В ней используются такие же разъёмы X3 и X4 для подключения устройств, работающих соответственно с трёхпроводным и четырёхпроводным интерфейсом SPI. Цепочка R1–R2–C1 служит для формирования сигнала сброса МК (RSTLB1). Стабилизатор LP2950Z3.3 (DA1) обеспечивает питание платы напряжением 3,3 В. К этому стабилизатору с разъёма X1 подаётся питание +5 В от стабилизированного источника с током не менее 100 мА.

Трёхконтактная перемычка P1 служит для подачи питания +3,3 В (на устройства с изолированным интерфейсом SPI (см. рис. 4 и 6)) или +5 В (на устройство

с изолированным интерфейсом USB (см. рис. 7)) на разъёмы X3 и X4. Подача питания осуществляется путём установки двухконтактного джампера в соответствующее положение.

В схеме используется внешний кварцевый генератор SCO-223 (Z1) частотой 50 МГц, выходной сигнал которого подключён к выводу EXTCLK (30-й вывод).

Причина, по которой используется именно внешний кварцевый генератор, состоит в следующем. Дело в том, что МК EFM8LB12 оборудован двумя высокочастотными внутренними генераторами частотой 25 и 75 МГц, стабильность которых, как было выяснено в статье [1], не позволяет производить высокоскоростной обмен по интерфейсу SPI с необходимой надёжностью. Надёжный высокоскоростной обмен возможен только при условии, что частота генератора стабилизируется кварцевым резонатором. МК EFM8LB12 оборудован внутренним генератором, предназначенным для подключения внешнего кварцевого резонатора к выводам XTAL1 и XTAL2 (как и C8051F061). Однако максимальная частота такого генератора состав-

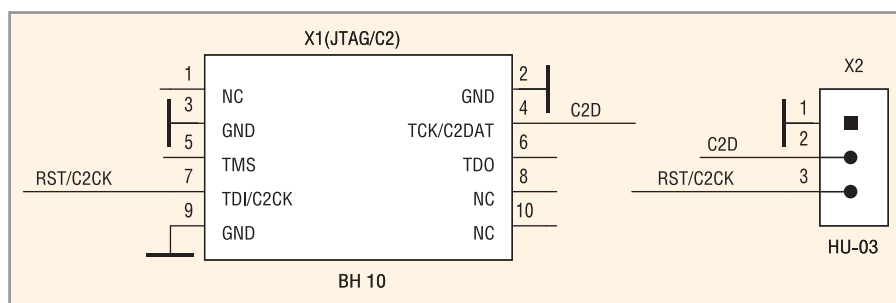


Рис. 12. Схема кабеля для программирования МК EFM8LB12 с помощью USB-Debug-адаптера по интерфейсу C2

ляет только 25 МГц. А вот максимальная частота внешнего кварцевого генератора может достигать 50 МГц, поэтому он и был использован автором. Такой генератор достаточно дешёв, имеет малые размеры (2 × 2,5 мм), и всё, что требуется для его работы, – это подать на него питание +3,3 В (на 4-й вывод Vdd), соединить разрешающий вывод OE (Output Enable – 1-й вывод) с напряжением питания, заземлить вывод GND (2-й вывод) и соединить выходной сигнал OUT (3-й вывод) со входом МК (EXTCLK), предназначенным для подключения внешнего генератора (30-й вывод DD1).

Для программирования МК по интерфейсу C2 с помощью USB-Debug-адаптера используется трёхштырьковый разъём WF-03 (X2). К этому разъёму подключается кабель, соединяющий выходной разъём адаптера с разъёмом X2. Схема такого кабеля приведена на рисунке 12.

*Продолжение статьи читайте в следующем номере журнала.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьминов А. Преобразователь интерфейсов USB–SPI с гальванической развязкой. Современная электроника. 2012. № 1, 2.

