

Преобразователь интерфейсов USB-SPI с гальванической развязкой

(часть 1)

Алексей Кузьминов (Москва)

В статье описаны аппаратные и программные средства сопряжения микроконтроллера C8051F321 с компьютером по интерфейсу USB и с микроконтроллером C8051F067 по гальванически изолированному интерфейсу SPI с помощью быстродействующих цифровых изоляторов SI8663BC-B-IS, ADUM7441C и ISO7220C. Даны рекомендации по изготовлению кабеля связи по интерфейсу USB увеличенной длины. Программные средства представлены в виде текстов программ для компьютера на языке Clarion v.6.0 и для микроконтроллеров на языке Си (Keil C51 v.6.14, v.9.01) с использованием библиотеки USBXpress фирмы Silicon Labs. Описан программный способ синхронизации микроконтроллеров при обмене по интерфейсу SPI, позволяющий повысить скорость обмена в трёхпроводном режиме.

ВВЕДЕНИЕ

Интерфейс SPI, присутствующий в подавляющем большинстве микроконтроллеров (МК), широко используется для их сопряжения с периферийными устройствами (АЦП, ЦАП, различные таймеры и счётчики, датчики температуры, ЖКИ- и OSD-дисплеи и т.п.). Полное отсутствие проблем программирования, дешевизна и простота гальванической изоляции, а также высокая пропускная способность (10 Мбод и более) этого интерфейса общеизвестны. Однако компьютеры не имеют такого интерфейса, поэтому передать информацию из микроконтроллера в компьютер по интерфейсу SPI невозможно.

Интерфейс USB, который присутствует в компьютерах, также обладает высокой скоростью обмена. Однако подавляющее число МК не оборудованы таким интерфейсом, а те микроконтроллеры, в которые он интегрирован, достаточно просты и не оснащены набором необходимых устройств. Кроме того, интерфейс USB сложен в плане гальванической развязки, т.к. две его линии связи (D+ и D-) являются двуполярными/двуправленными и работают на очень высоких скоростях обмена.

Актуальная задача преобразования интерфейса USB в интерфейс SPI может быть решена несколькими способами. Например, с помощью микросхем драйверов, преобразующих сигналы интерфейса USB в ТТЛ-сигналы.

Для этого требуется написание драйверов для компьютера и микроконтроллера, которые должны поддерживать работу с микросхемой драйвера – преобразователя USB. Этот способ очень трудоёмок и не под силу разработчикам, имеющим дело с микроконтроллерами, т.к. интерфейс USB сложен в программировании.

Второй способ – использовать готовые преобразователи USB-SPI, которые сейчас очень распространены и поставляются с уже готовым программным обеспечением. Тогда всё, что требуется для их работы, – установить программное обеспечение на компьютере. Однако стоимость таких устройств может достигать нескольких тысяч рублей.

Третий способ – использовать либо микросхемы преобразователей интерфейсов (ПИ) USB-SPI, поставляемые с программным обеспечением для компьютера (драйверы и библиотеки), либо МК с интерфейсом USB, для которых также поставляются драйверы и библиотеки для написания программ обмена. Стоимость таких микросхем преобразователей интерфейсов и микросхем МК на два порядка ниже стоимости готовых преобразователей USB-SPI.

По мнению автора, третий способ является самым простым, продуктивным и требует намного меньше времени и средств на разработку.

Поскольку наибольшие сложности возникают при программировании

интерфейса USB, простота программного обеспечения при использовании поставляемых с микросхемой преобразователя или МК готовых библиотек является важнейшим фактором при выборе той или иной микросхемы. Условием выбора является наличие функций приёма и передачи массива данных по интерфейсу USB – Передать (Адрес массива) и Принять (Адрес массива), – как для компьютера, так и для микроконтроллера. Если же требуется запрограммировать многочисленные регистры USB в МК или преобразователе, это затруднит реализацию.

В таблице представлены некоторые микросхемы преобразователей интерфейсов USB-SPI и микроконтроллеров с интерфейсом USB. В дополнение следует также упомянуть новый микроконтроллер фирмы FTDI типа VNC2-32Q1, который выпускается (в том числе) в корпусе QFN32 (7 × 7 мм), стоит около 10 долл. США, имеет бесплатно поставляемое ПО, но... практически недоступен для приобретения.

В представленную таблицу вошли микросхемы с готовыми библиотеками для программирования обмена по интерфейсу USB как со стороны компьютера, так и со стороны устройства. «Отсеялись» микросхемы, запрограммировать которые достаточно сложно, т.к. их библиотеки не обладают минимумом функций для программирования USB (MAX3420-EETG и MAX3421-EETG), и крупногабаритные приборы: FT232-HQ (FTDI), AT89C5130-PUTUM (Atmel) и TUSB3210-PM (TI). Далее учитывалась доступность устройств: если микросхему нельзя приобрести со склада, то – при прочих равных условиях – она исключалась из рассмотрения. Четвёртый по важности параметр – стоимость устройства; пятый – функциональность устройства (при прочих равных условиях предпочтение отдавалось микроконтроллерам). В этом смысле преобразователи интерфейсов MAX3420/3421 и FT232 яв-

Микросхемы преобразователей интерфейсов (ПИ) USB-SPI и микроконтроллеров с интерфейсом USB

Характеристики	Max3420-EETG	MAX3421-EETG	FT232-RQ	FT232-HQ	AT89C5130-PUTUM	PIC18F13K50-I/MQ	PIC18F14K50-I/MQ	TUSB3210-PM	C8051F321-GMR
Корпус	TQFN24	TQFN32	QFN32	QFN48	QFN32	QFN20	QFN20	LQFP64	QFN28
Размер, мм	4 × 4	5 × 5	5 × 5	8 × 8	7 × 7	5 × 5	5 × 5	12 × 12	5 × 5
Стоимость, долл. США	8	9	8	8	10	4	5	10	3
Функциональность устройства	ПИ	ПИ	ПИ	ПИ	МК	МК	МК	МК	МК
Простота программного обеспечения	–	–	+	+	+	+	+	+	+
Габариты	+	+	+	–	–	+	+	–	+
Доступность	–	+	+	–	+	–	–	+	+
Стоимость	–	–	–	–	–	+	+	–	+
Функции микроконтроллера	–	–	–	–	+	+	+	+	+

но проигрывают остальным микросхемам.

Даже если исключить из рассмотрения параметр доступности, то микросхемы PIC18F13/14K50-I/MQ всё-таки уступают микроконтроллеру C8051F321. Во-первых, по функциональности (на 8 выводов меньше), во-вторых, по стоимости (они в 1,5...2 раза дороже). Кроме того, совместимые с I8051 МК до сих пор считаются промышленным стандартом. Всё вышперечисленное склонило автора к выбору именно микроконтроллера C8051F321 в качестве преобразователя интерфейсов USB-SPI.

Дальнейшее изложение будет построено следующим образом. Вначале будут описаны аппаратные средства сопряжения МК типа C8051F321 с компьютером по интерфейсу USB и по интерфейсу SPI с МК типа C8051F067, у которого интерфейс USB отсутствует. Затем будут описаны программные средства сопряжения с использованием драйвера для компьютера и готовых функций из библиотеки USBXpress, бесплатно предоставляемой фирмой Silicon Labs для микроконтроллера C8051F321 и компьютера с интерфейсом USB.

АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА

В этой части статьи будут приведены схемные решения для устройств сопряжения интерфейсов USB-SPI, включая топологии печатных плат и фотографии работающих устройств. Также будут даны рекомендации по выбору кабеля связи по интерфейсу USB и способу его удлинения до 13 м и более.

Принципиальные схемы устройств

На рисунке 1 представлена схема сопряжения микроконтроллера C8051F321 (DD1) с интерфейсом USB и с интерфейсом SPI, по которому этот МК, работающий в режиме ведомого,

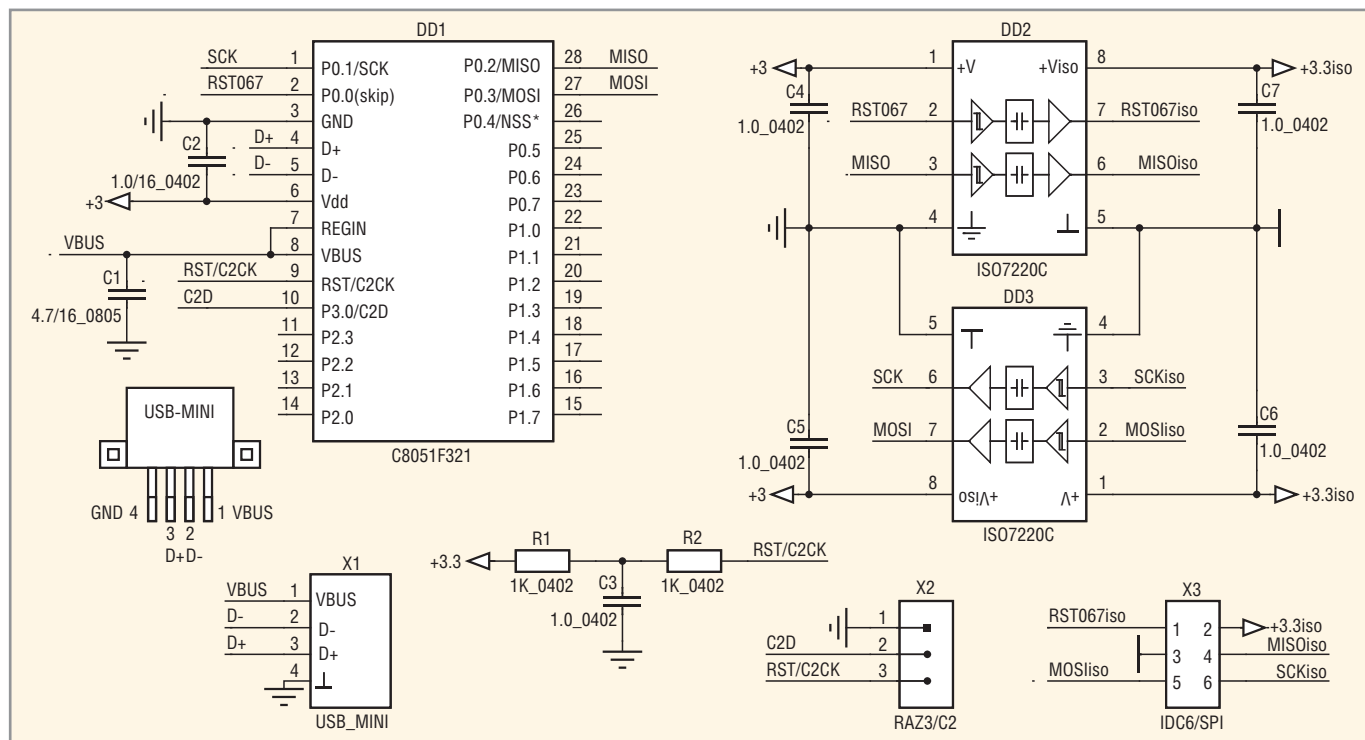


Рис. 1. Схема гальванически изолированного преобразователя USB-SPI, работающего в трёхпроводном режиме, на базе цифровых изоляторов ISO7220C

связывается с ведущим МК. Линии данных (D+ и D-) и линии питания VBUS и «земли» интерфейса USB подключаются к DD1 с помощью четырёхконтактного разъёма X1 (USB-mini). Линии интерфейса SPI (MOSI, MISO и SCK), работающего в трёхпроводном режиме (3-wire), а также сигнал сброса для ведущего МК (RST067) подключены к соответствующим выводам гальванических развязок ISO7220C (DD2 и DD3) фирмы Texas Instruments. Эти же линии (MOSIiso, MISOiso, SCKiso и RST067iso) используются на изолированной стороне и выведены на разъём X3.

Для программирования микроконтроллера C8051F321 используются сигналы C2D и RST/C2CK интерфейса C2, поступающие из адаптера USB-Debug, применяемого, в частности, при программировании большинства МК фирмы Silicon Labs. Эти сигналы (и «земля») подключаются к микроконтроллеру DD1 через трёхконтактный разъём X2. Цепочка R1, R2 и C3 используется для сброса МК при включении питания.

В качестве источника питания всей схемы используется линия VBUS интерфейса USB, на которой присутствует напряжение +5 В. Для питания микроконтроллера C8051F321 (DD1) и гальванических развязок ISO7220C (DD2 и DD3) используется напряжение +3 В, которое вырабатывается стабилизатором напряжения, встроен-

ный в МК. Вместо микросхем развязок ISO7220C можно использовать приборы ADUM1200B (Analog Devices), выполняющие аналогичные функции. Для краткости дальнейшего изложения назовём описанное выше устройство «3-wireSPI».

На рисунке 2 представлена схема, аналогичная схеме рис. 1, но работающая в четырёхпроводном режиме. Для этого используется один дополнительный сигнал NSS. В этой схеме микроконтроллер C8051F321 также работает в ведомом режиме. Вместо двух двухканальных цифровых изоляторов, применённых в схеме рис. 1, используется одна четырёхканальная гальваническая развязка (DD2, цифровой изолятор ADUM7441C фирмы Analog Devices), с помощью которой в МК передаётся дополнительный сигнал NSS, поступающий на вход развязки (NSSiso) на изолированной стороне из ведущего МК. Поэтому количество выводов разъёма X3 увеличено до 8. В связи с тем что цифровой изолятор ADUM7441C имеет только четыре канала, сигнал сброса ведущего микроконтроллера RST067 на изолированную сторону передаётся с помощью дополнительного (пятого) изолирующего канала, реализованного на оптроне TLP281 (TLP280) фирмы Toshiba.

Низкая помехоустойчивость оптрона к наводкам сети подавляется большой ёмкостью конденсатора C7, шунтирующего выходной транзистор.

Постоянная времени цепочки R4C7 составляет 100 мкс, что в несколько раз больше времени срабатывания оптрона. В программном обеспечении (см. далее) для сброса ведущего МК сигнал RST067 подаётся и сбрасывается с задержкой около 200 мкс. Для краткости дальнейшего изложения назовём описанное выше устройство «4-wireSPI_AD», ввиду использования в нём цифрового изолятора фирмы Analog Devices.

На рисунке 3 представлена схема изолированного преобразователя USB-SPI, работающего в четырёхпроводном режиме. Вместо цифрового изолятора ADUM7441C и оптрона TLP281 (см. рис. 2) применена одна шестиканальная гальваническая развязка (DD2, цифровой изолятор SI8663BC фирмы Silicon Labs). Для краткости дальнейшего изложения назовём это устройство «4-wireSPI_SI». Кроме того, в контексте изложения устройства 4-wireSPI_AD и 4-wireSPI_SI могут быть обобщённо названы «4-wireSPI».

На рисунке 4 представлена вспомогательная схема, которая использовалась автором при разработке всех аппаратных и программных средств, приведённых в статье. Помимо интерфейса SPI, в микроконтроллере C8051F321 аппаратно присутствуют такие интерфейсы, как RS232 (т.е. преобразователь USB-RS232), I²C (SMBUS) и CAN. Кроме того, высокая скорость (тактовая частота 24 МГц) и

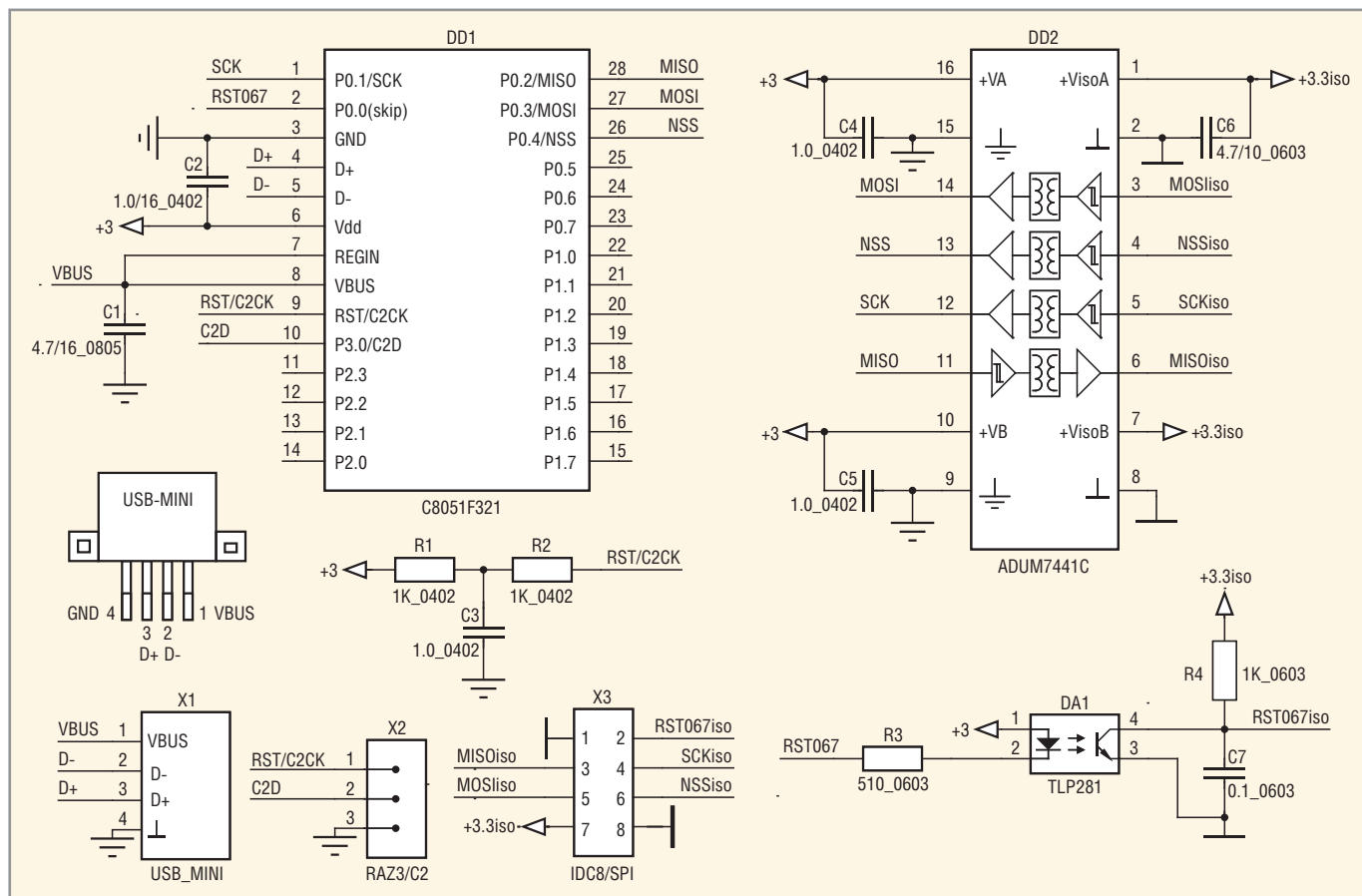


Рис. 2. Схема гальванически изолированного преобразователя USB-SPI, работающего в четырёхпроводном режиме, на базе цифрового изолятора ADUM7441C и оптрона TLP281

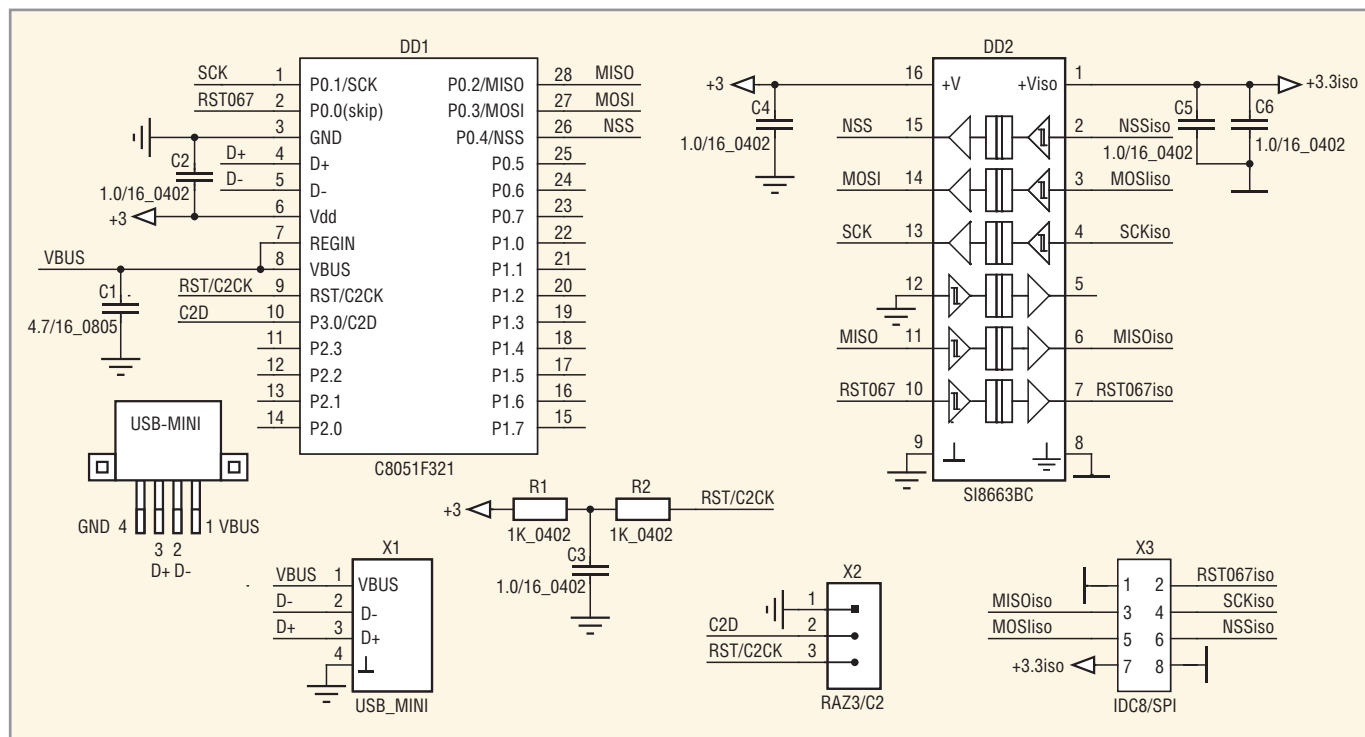


Рис. 3. Схема гальванически изолированного преобразователя USB-SPI, работающего в четырёхпроводном режиме, на базе цифрового изолятора SI8663BC

однотактный режим работы этого МК позволяют программно конструировать на его основе как последовательные интерфейсы (например, C2), использующиеся для программирования

многих МК (например, P89LPC9XX фирмы NXP в режиме ICP), так и параллельные интерфейсы (4-, 8- и даже 16-разрядные), которые применяются в ЖКИ- и ОСД-дисплеях, во многих

микросхемах памяти (ОЗУ) и других устройствах (быстродействующих АЦП, ЦАП, таймерах/счётчиках и т.п.). На достаточно распространённую панель DIP22 шириной 0,4 дюйма выведены все соединения МК, кроме выводов, связанных с интерфейсом USB это позволяет макетировать любое устройство, – достаточно установить такую панель на плату. Для краткости дальнейшего изложения назовём это устройство «DIP22».

Для программирования микроконтроллера C8051F321 используются сигналы C2D и RST/C2CK. Эти два сигнала вместе с «землёй» выведены на разъёмы X2 во всех четырёх схемах (см. рис. 1 – 4). Для сопряжения этих разъёмов с разъёмом JTAG адаптера USB-Debug, предназначенного, в частности, для программирования МК фирмы Silicon Labs, используется кабель, схема которого приведена на рисунке 5.

Кабель состоит из трёх проводов, защёлкнутых на соответствующие разъёмы (фотография кабеля будет приведена ниже). Сопряжение каждого из устройств (3-wireSPI, 4-wireSPI и DIP22) с микроконтроллером C8051F067 организовано на макетной плате. Схема такого сопряжения приведена на рисунке 6. На этой же схеме показано подключение этого МК к интерфейсу JTAG адаптера USB-Debug с целью его (микроконтроллера) программирования.

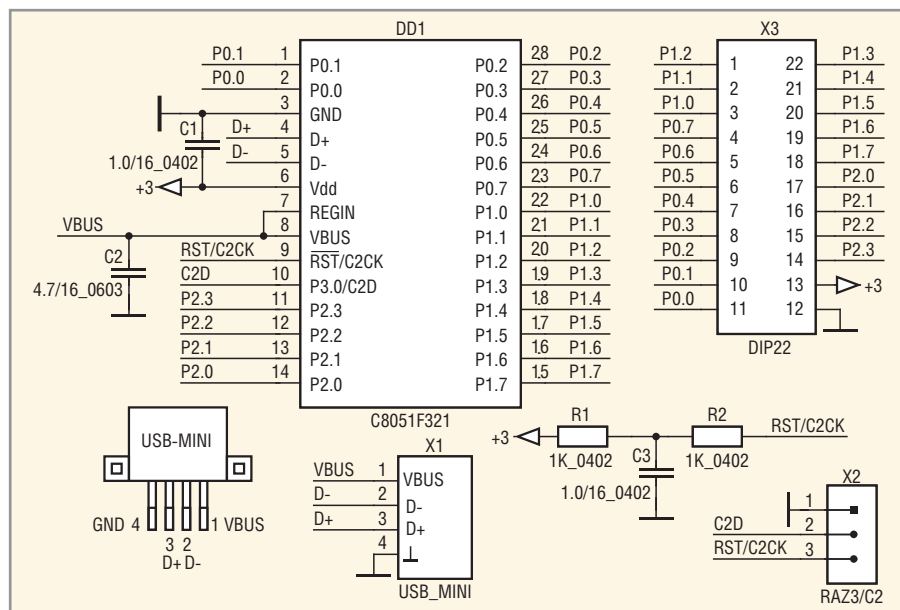


Рис. 4. Вспомогательная схема сопряжения микроконтроллера C8051F321 с интерфейсом USB и панелью DIP22

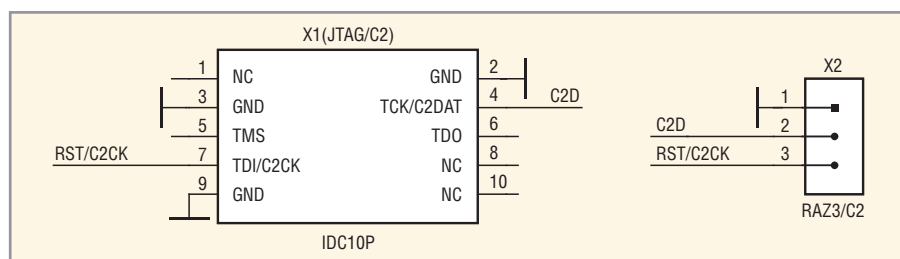


Рис. 5. Схема кабеля для программирования микроконтроллера C8051F321

В качестве ведущего МК в интерфейсе SPI представлен микроконтроллер C8051F067 (DD1). Почему этот МК должен работать в качестве ведущего, а микроконтроллер C8051F321 – в качестве ведомого? Во-первых, ведущий МК должен иметь возможность обмениваться информацией по интерфейсу SPI не только с ведомым МК, но и с другими периферийными устройствами, работающими в режиме ведомых. Другими словами, для микроконтроллера C8051F067 микроконтроллер C8051F321 должен являться одним из ведомых устройств. В свою очередь, микроконтроллер C8051F321 ни с каким устройством, кроме как с C8051F067, по интерфейсу SPI не обменивается.

Во-вторых, если даже микроконтроллер C8051F321 является единственным устройством связи по SPI для микроконтроллера C8051F067, для достижения максимальной скорости обмена (и, соответственно, высокой надёжности) один из двух МК должен иметь высокостабильный генератор тактовой частоты с кварцевым резонатором. Частота резонатора, в частности, определяется функциями, которы-

ми должен обладать главный МК. Если требуется измерение интервалов времени с помощью таймеров, входящих в состав C8051F067, то частота кварцевого резонатора после деления должна составлять целые доли секунды. В других случаях частота резонатора зависит от свойств периферийных устройств.

Ведомый микроконтроллер, в данном случае C8051F321, должен быть универсальным, «подстраиваться» под ведущий и не должен определять ни частоту работы ведущего МК, ни скорость обмена по интерфейсу SPI. Эти параметры определяет ведущий МК. Поэтому микроконтроллер C8051F321 может обойтись встроенным генератором 24 МГц.

Следует отметить, что при работе главного МК в качестве ведущего в четырёхпроводном режиме SPI на каждое из ведомых устройств подаются сигналы типа выбора устройства (CS) и сигнал синхронизации SCK. Один из таких сигналов CS (NSS) предусмотрен и в SPI-контроллере, аппаратно встроенном в микроконтроллер C8051F067. Остальные сигналы CS на другие периферийные устройства подаются с дру-

гих цифровых выводов микроконтроллера. При получении такого сигнала ведомое устройство откликается, и обмен информацией происходит именно с ним. Остальные периферийные устройства, не получив свой сигнал CS, игнорируют сигнал синхронизации SCK.

Как поступить, если требуется организовать трёхпроводной режим работы SPI по связи ведущего микроконтроллера C8051F067 с ведомым C8051F321, а с другими периферийными устройствами – четырёхпроводной режим? В этом случае можно использовать несложные решения, показанные на рисунке 7. Во-первых, необходимо запретить прохождение сигнала SCK в ведомый МК, когда этого не требуется, и, во-вторых, перевести сигнал MISO, поступающий от ведомого микроконтроллера в ведущий, в высокоимпедансное состояние или вообще отключить. Запрет прохождения сигнала SCK можно организовать с помощью логических схем «И» (1G08), «ИЛИ» (1G32), либо с помощью SPDT-коммутатора (1G3157). Вариант, при котором сигнал NSS имеет низкий уровень, отмечен на рисунке 7 звездочкой (*). Пере-

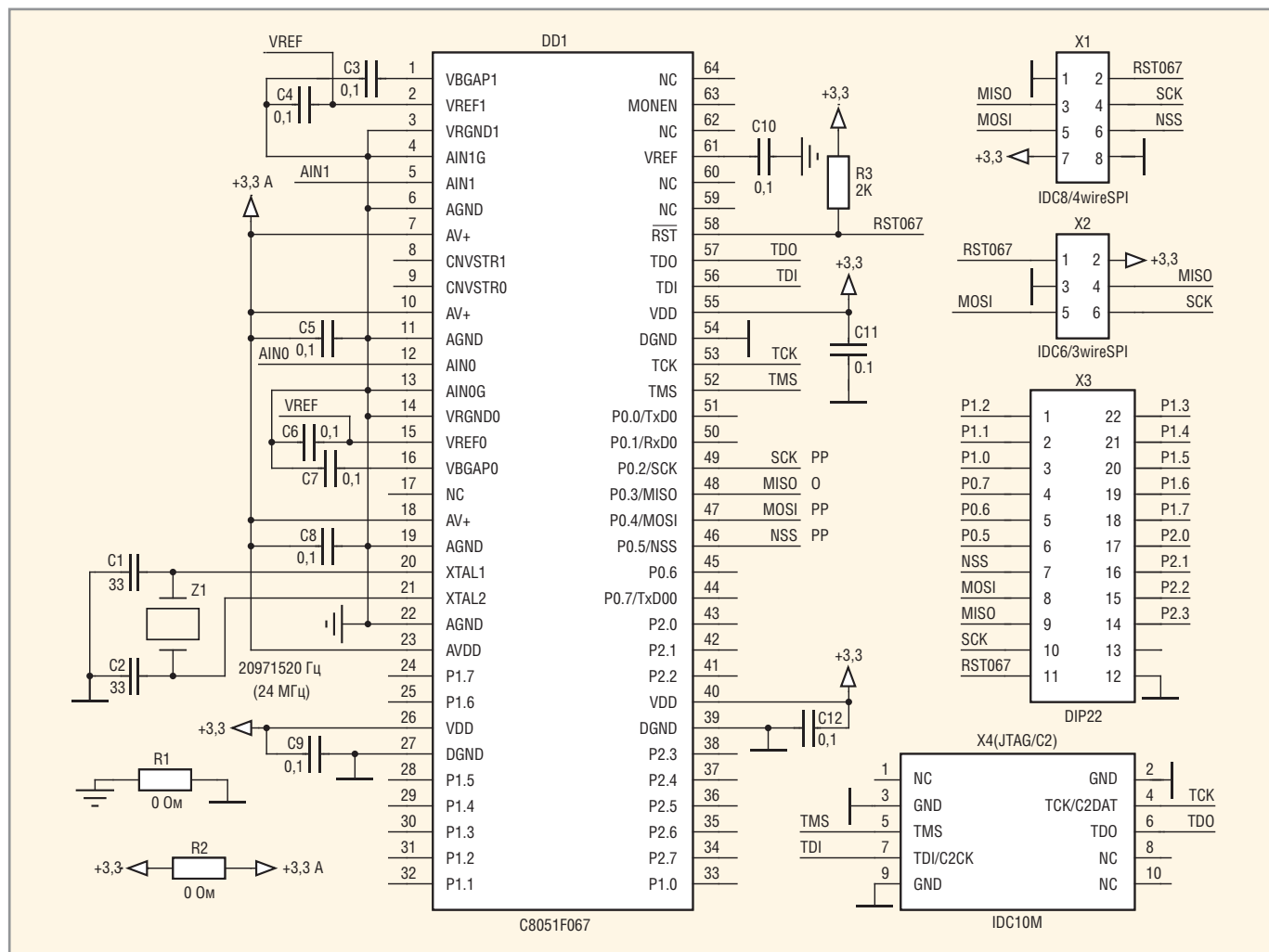


Рис. 6. Схема сопряжения микроконтроллера C8051F067 с устройствами 3-wireSPI, 4-wireSPI и DIP22 и с интерфейсом адаптера JTAG USB-Dedug

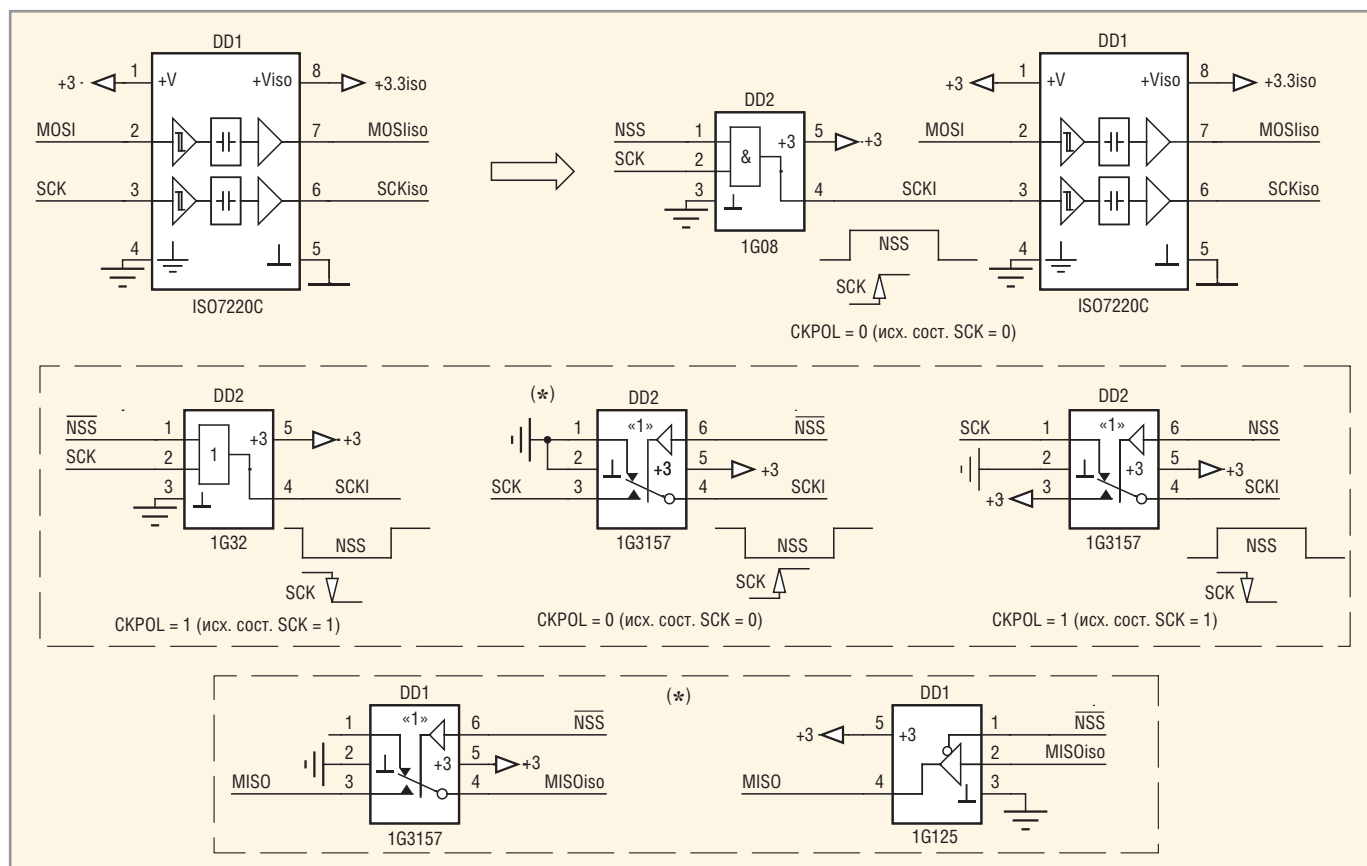
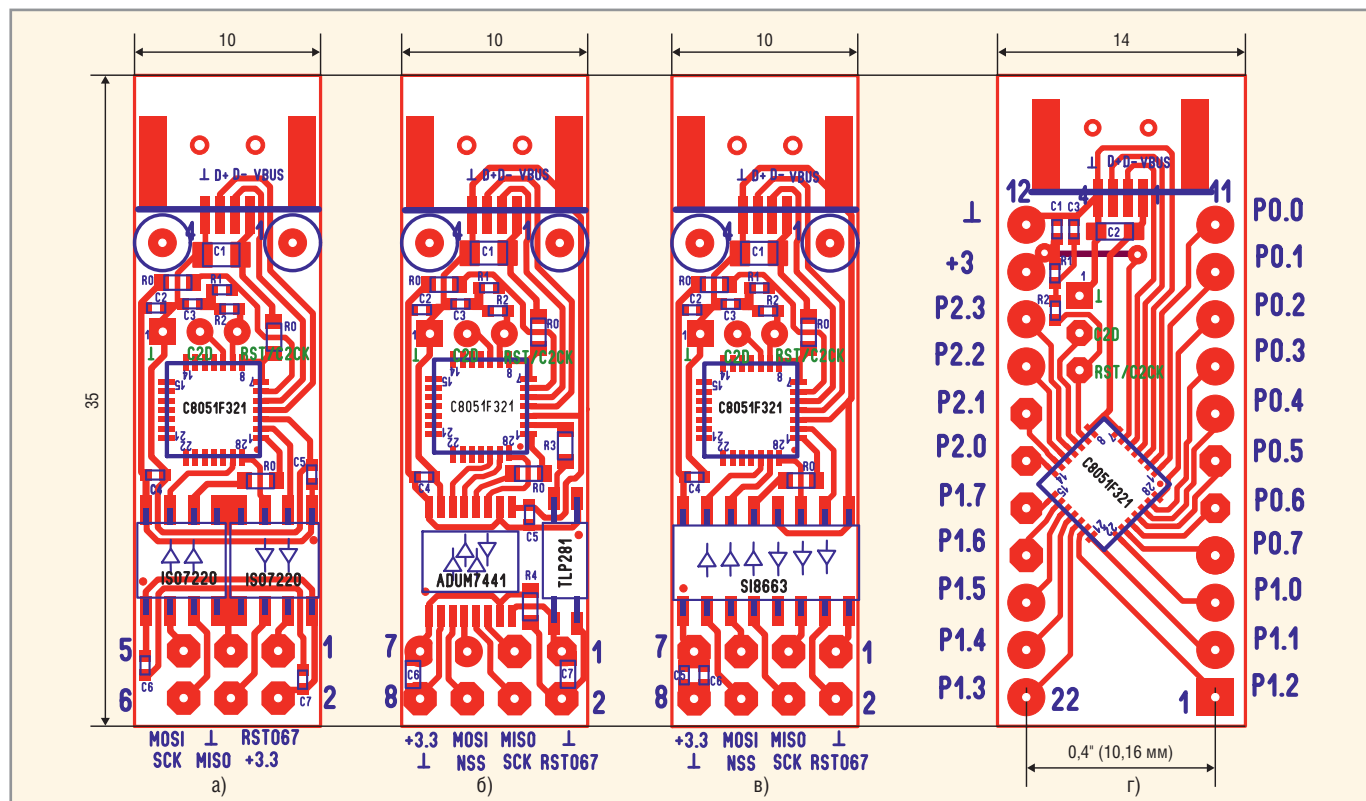


Рис. 7. Варианты решения проблемы одновременной работы 3- и 4-проводного режимов по интерфейсу SPI



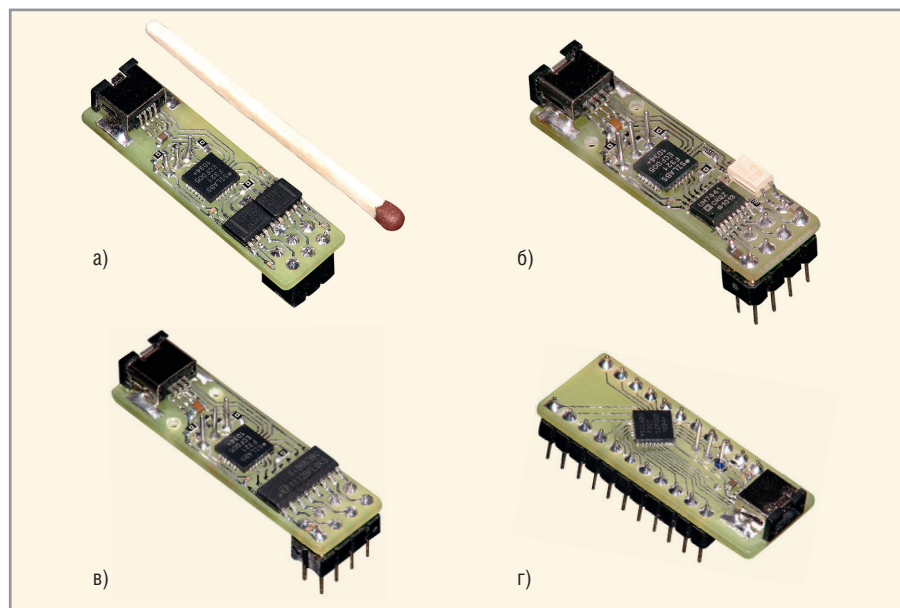


Рис. 9. Готовые устройства 3-wireSPI (а), 4-wireSPI_AD (б), 4-wireSPI_SI (в) и DIP22 (г)

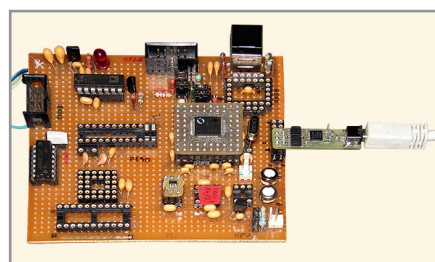


Рис. 10. Подключение устройства 3-wireSPI к микроконтроллеру C8051F067

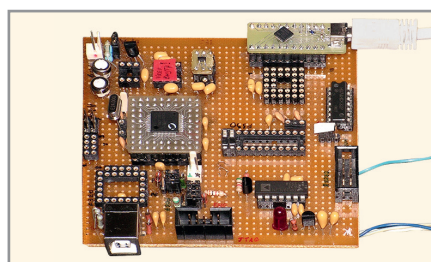


Рис. 11. Подключение устройства DIP22 к микроконтроллеру C8051F067

4-wireSPI, а в нижней левой части фотографии можно заметить панель DIP22, предназначенную для подключения устройства DIP22. Подключение устройства DIP22 к микроконтроллеру C8051F067 показано на рисунке 11.

Для программирования микроконтроллера C8051F321 в устройствах 3-wireSPI, 4-wireSPI и DIP22 необходимо изготовить кабель по схеме рис. 5, кабель для питания МК (см. рис. 12а) и соединить программируемое устройство этими кабелями соответственно с кабелем адаптера USB-Debug и блоком питания +5 В (см. рис. 12б). Устройство можно также соединить кабелем с интерфейсом USB компьютера (тогда кабель для соединения с блоком

питания и сам блок питания не нужны). Рисунок 13 иллюстрирует процесс программирования микроконтроллера C8051F067 по интерфейсу JTAG с помощью адаптера USB-Debug (см. схему рис. 6).

Кабель связи с компьютером по интерфейсу USB

Кабель связи с компьютером по интерфейсу USB – важный атрибут надёжного обмена информацией компьютера с микроконтроллером. От того, насколько качественно сделан такой кабель, зависит надёжность связи по интерфейсу USB. Согласно спецификации USB 2.0, кабель должен быть выполнен из одной витой пары 28AWG

(диаметр жилы 0,32 мм) для передачи данных и одной пары проводников от 20AWG (диаметр 0,81 мм) до 28AWG для питания, в зависимости от длины кабеля. Если длина кабеля 0,8 м, он должен состоять из одной витой пары 28AWG и двух проводников 28AWG для питания. На качественных кабелях такой длины обычно нанесена надпись 28AWG/28AWG. При длине 5 м кабель должен состоять из одной витой пары 28AWG и двух проводников 20AWG и иметь маркировку 28AWG/20AWG. Кроме того, кабель должен быть экранированным. Желательно, чтобы кабель был оснащён специальным ферритовым фильтром для подавления ВЧ-помех. По спецификации USB максимальная длина кабеля не должна превышать 5 м. При увеличении длины стандартного кабеля свыше 5 м интерфейс USB действительно неработоспособен.

Если требуется соединить устройства по интерфейсу USB на расстоянии более 5 м, то обычно применяют дорогостоящие удлинители, в которые встроены специальные усилители сигнала. Однако достаточно длинный (до 13 м и более) качественно работающий и недорогой кабель можно изготовить, если использовать обычный коаксиальный кабель. У автора был моток такого кабеля (RG-6U) длиной 26 м, оставшийся от разводки телевизионной антенны. Разрезав его пополам, припаяв две центральные жилы к контактам линий данных D+ и D– разъёма USB и соединив контакты линий питания (VBUS и «землю») с оплётками (экранами) двух кабелей, автор был приятно удивлён безукоризненной работой такого 13-м удлинителя USB.

Для удобства концы кабеля с припаянными разъёмами были помещены в небольшие корпуса, состоящие из двух половинок с защёлками. Чтобы кабели с разъёмами хорошо держались в этих корпусах, в них были вставлены кусоч-

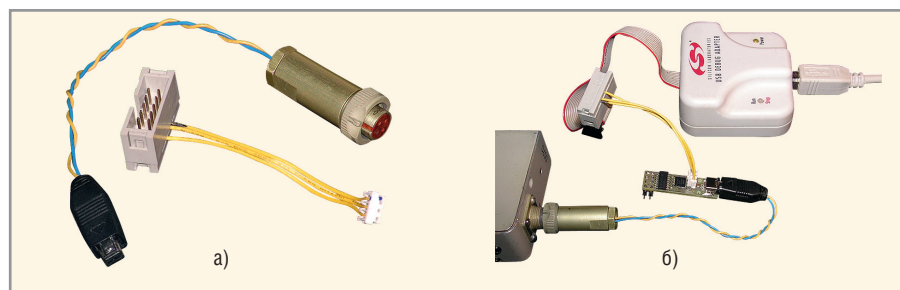


Рис. 12. Программирование микроконтроллера C8051F321 по интерфейсу C2
а) Кабели питания и сопряжения с адаптером USB-Debug, б) процесс программирования

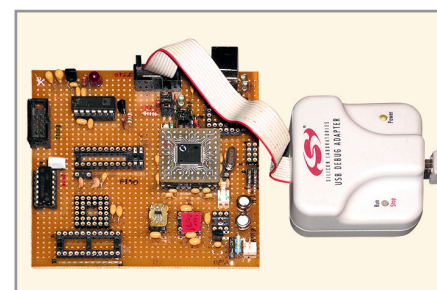


Рис. 13. Программирование микроконтроллера C8051F067 по интерфейсу JTAG

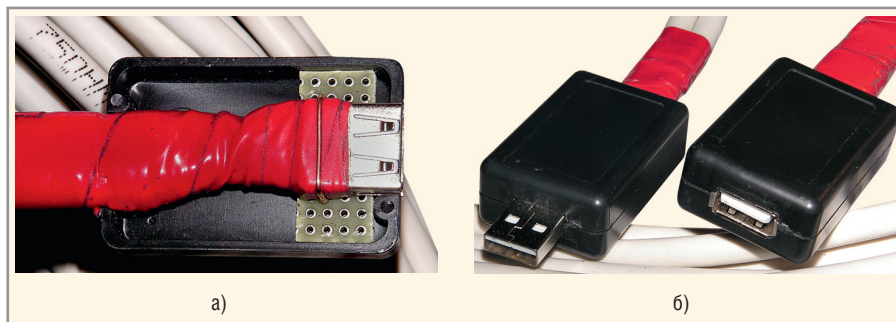


Рис. 14. Установка корпусов на разъёмы USB кабеля

а) Вид внутренней части корпуса, б) корпуса в сборе

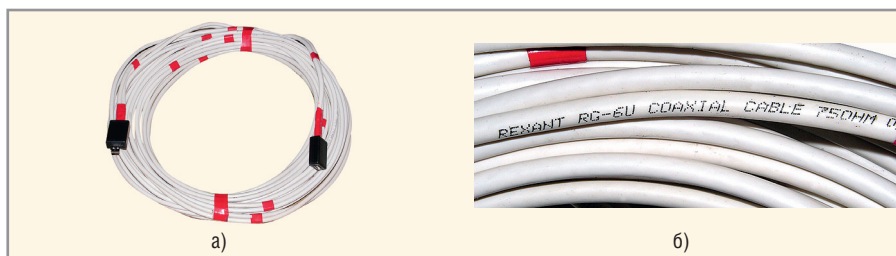


Рис. 15. Кабель 13 м в сборе (а), маркировка кабеля RG-6U (б)

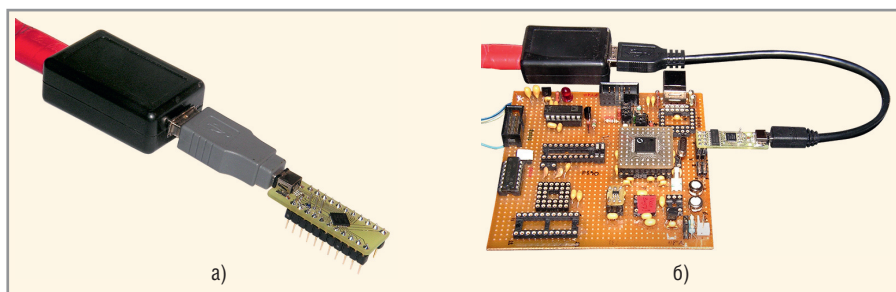


Рис. 16. Тестирование работы кабеля при работе по интерфейсу USB (а) и при работе по двум интерфейсам – USB и SPI (б)

ки макетной платы, к которым медной проволокой были прикручены сами разъёмы USB (см. рис. 14а). После этого половинки корпусов были склеены дихлорэтаном (рис. 14б), и получилась довольно удобная и жёсткая конструкция. Фотография самодельного кабеля приведена на рисунке 15а, а фотография маркировки кабеля – на рисунке 15б. Для проверки работы кабеля к нему были подключены устройства DIP22 (см. рис. 16а) и 4-wireSPI (см. рис. 16б), которые показали идеальную работу.

Необходимо отметить, что дешёвый кабель RG-6U китайского производства, использованный автором, является не лучшим выбором для удлинителя USB по двум причинам. Во-первых, его центральная жила выполнена из стали, покрытой медью. Во-вторых, металлическая оплётка сделана из тонких алюминиевых нитей, поэтому с ними были скручены медные жилы провода МГТФ, припаянного к контактам разъёма USB. Лучшим выбором является коаксиальный кабель, у кото-

рого внутренняя жила выполнена из чистой меди, а оплётка представляет собой свитые медные нити (например, отечественный РК75). Тогда длину кабеля USB можно увеличить до 20...30 м.



Продолжение следует

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьминов А. Метод фоторепродуцирования для изготовления фотошаблона печатных плат в домашних условиях. Технологии в электронной промышленности. № 5–7.
2. Кузьминов А. Изготовление устройств на печатных платах с высоким разрешением в домашних условиях. Технологии в электронной промышленности. 2010. № 8–10.
3. Кузьминов А. Современные аппаратные средства связи микроконтроллера с компьютером по интерфейсу RS232. Компоненты и технологии. 2006. № 3–5.
4. www.microcompsys.narod.ru.
5. www.silabs.com. AN169.pdf. USBXpress® Programmer's Guide.
6. www.silabs.com. FileTransfer Example.