

Библиотека Инженера

Семенов Б.Ю.

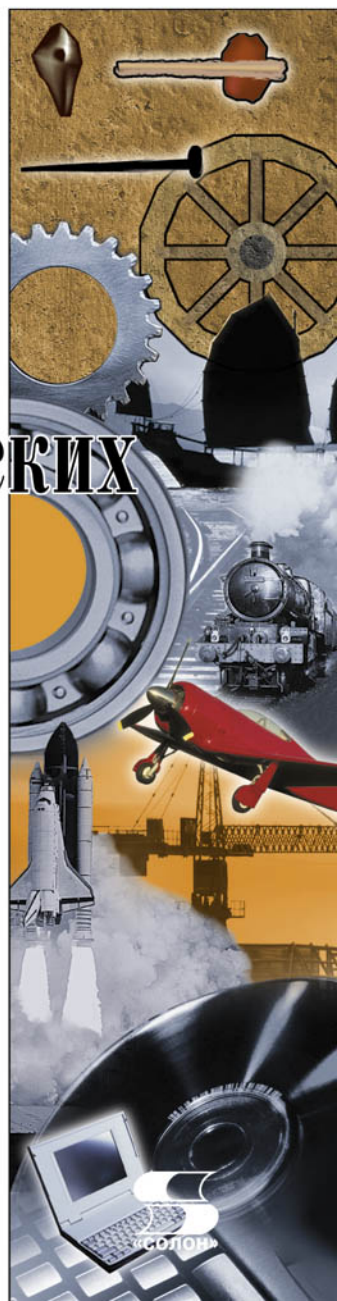
Шина I²S в радиотехнических конструкциях

2-е издание дополненное



- Микросхемы для аудиоаппаратуры
- Вспомогательные микросхемы
- Практические конструкции
- Прошивки для конструкций
- Софт для работы программатора
- Информация по микроконтроллерам

Пусть эта книга принесет вам удачу!



«СОЛОН»

ББК 32.96
УДК 681.5
С30

Б. Ю. Семенов

С30 Шина I²C в радиотехнических конструкциях. Изд. 2-е, доп. — М.: СОЛОН-Пресс, 2010. 224 с. — (Серия «Библиотека инженера»).

ISBN 5-98003-128-6

В книге рассказывается о принципах построения и логике работы последовательной шины обмена данными Inter-Integrated Circuit Bus (I²C), разработанной фирмой Philips. Приводятся сведения о микросхемах, имеющих интерфейс I²C, а также несложные конструкции на их основе, доступные для повторения радиолюбителями. Книга может быть полезна радиолюбителям, инженерам, студентам радиотехнических специальностей вузов, специалистам-ремонтникам бытовой аппаратуры.

К КНИГЕ ПРИЛАГАЕТСЯ КОМПАКТ-ДИСК.

На диске:

- **дополнительная информация по микроконтроллерам;**
- **программное обеспечение для работы программатора;**
- **прошивки для описанных в книге конструкций;**
- **и многое другое.**

Описанные в книге программы можно загрузить с сайта

<http://www.remserv.ru> (раздел «Программы»)

или с авторской страницы:

<http://www.mrezha.ru/radioland>

КНИГА — ПОЧТОЙ

Книги издательства «СОЛОН-Пресс» можно заказать наложенным платежом по фиксированной цене. Оформить заказ можно одним из двух способов:

1. Послать открытку или письмо по адресу: 123242, Москва, а/я 20.
2. Передать заказ по электронной почте на адрес: magazin@solon-r.ru.

Бесплатно высылается каталог издательства по почте.

При оформлении заказа следует правильно и полностью указать адрес, по которому должны быть высланы книги, а также фамилию, имя и отчество получателя. Желательно дополнительно указать свой телефон и адрес электронной почты.

Через Интернет вы можете в любое время получить свежий каталог издательства «СОЛОН-Пресс». Для этого надо послать пустое письмо на робот-автоответчик по адресу: katalog@solon-r.ru.

Получать информацию о новых книгах нашего издательства вы сможете, подписавшись на рассылку новостей по электронной почте. Для этого пошлите письмо по адресу: news@solon-r.ru.

В теле письма должно быть написано слово SUBSCRIBE.

Фирменный магазин издательства «СОЛОН-Пресс»

г. Москва, ул. Бахрушина, д. 28 (м. «Павелецкая кольцевая»)

Тел.: 959-21-03, 959-20-94

ISBN 5-98003-128-6

© Макет и обложка «СОЛОН-Пресс», 2010
© Б. Ю. Семенов, 2010

Содержание

От автора	3
1. Как устроена шина I²C	5
2. Адреса некоторых микросхем I²C	35
3. Представители микросхем с интерфейсом I²C	42
3.1. ЭСППЗУ с последовательным доступом	42
PCA8581	44
PCF85xx	49
24LC16B	53
24LC32A	56
K5004PC2, KP5004PP4	58
3.2. Синтезаторы частоты	59
TSA6057	60
TSA6060	69
3.3. Микросхемы для аудиоаппаратуры	72
TDA1551Q	72
TDA8424	81
TEA6360	91
3.4. Вспомогательные микросхемы	100
PCF8574	100
PCF8591	107
D/A преобразование	110
A/D преобразование	114
PCF8583	117
DS1621	129
4. Микроконтроллеры с интерфейсом I²C.	137
8XC552 [37].	139
8XC65X [36]	142
8XC751 [34].	143
8XC752 [35].	144
5. Практические конструкции.	160
Двухдиапазонный УКВ стереотюнёр	160
Электронный термометр	168
Регулятор громкости и тембра	172
Цифровое табло с интерфейсом I ² C.	175
6. Секреты работы с программируемыми компонентами	181
Приложение. Описание программного обеспечения	
электронного термометра	213
Список литературы	221

1. Как устроена шина I²C

Классический вариант обмена данными между любыми устройствами заключается в том, что одно устройство **передает** информацию, а другое ее **принимает**. Устройства могут при необходимости поменяться ролями, то есть передатчик может стать приемником и, наоборот, приемник — передатчиком. Но в любом случае важно четко определить, какое из устройств является главным, задающим правила и последовательность обмена, а какое — подчиненным.

Устройства, подключаемые к шине I²C, также подчиняются этому принципу. Договорились, что одно из устройств будет **ведущим** (master), а остальные — **ведомыми** (slave). Такая организация шины называется master-организацией и является наиболее типичным случаем (рис. 1.1).

Master-устройством обычно назначается микроконтроллер. Именно он задает основной поток данных на шине, формирует необходимые временные интервалы и т. д.

Гораздо реже используется в аппаратуре режим multi-master (рис. 1.2), когда к одной шине подключено несколько master-устройств.

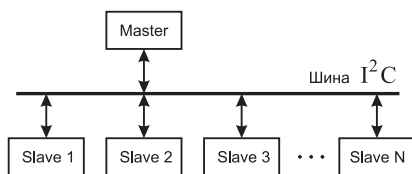


Рис. 1.1. Master-организация шины I²C

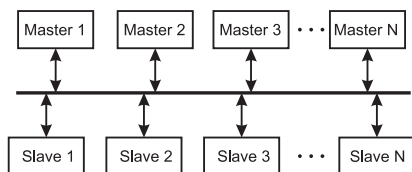


Рис. 1.2. Multi-master организация шины I²C

Сложность такой организации шины состоит главным образом в том, что master-устройства должны решать, кто из них будет работать в данный момент со slave-устройствами. Одновременно на шине может совершать операции только одно master-устройство, остальные обязаны отключаться. В противном случае возникает ситуация, называемая **шинным конфликтом**. Информация может попросту не дойти до адресата, нарушится работа устройства.

Для того чтобы исключить шинные конфликты, в режиме multi-master должны содержаться процедуры **арбитража** и **синхронизации**, устанавливающие порядок работы master-устройств. В книге мы не будем рассматривать этот режим подробно с точки зрения аппаратной реализации, разберемся лишь, как осуществляется арбитраж устройств и их синхронизация. Основное внимание сосредоточим на классическом режиме с одним master-устройством.

История шины I²C в том виде, в котором она представлена сейчас, началась в 1992 году, когда фирмой Philips была выпущена ее первая спецификация версии 1.0. Эта спецификация исключала возможность задания адреса slave-устройства программным способом как наиболее сложную процедуру. Наряду со стандартным режимом скорости передачи данных 100 кбит/с (low-speed) был введен режим быстрой передачи (fast-speed) со скоростью до 400 кбит/с. Появился также режим 10-разрядной адресации.

Версия 2.0, выпущенная в 1998 году, ввела в спецификацию шины быстродействующий режим (Hs-mode) со скоростью передачи до 3,4 Мбит/с. Причем требования предписали вводить обязательную возможность совместимости с режимами low-speed и fast-speed. К моменту появления версии 2.0 шина I²C распространилась по всему миру, став международным стандартом. Было разработано более 1000 интегральных схем, лицензия на официальное использование спецификации приобретена более чем 50 фирмами.

Версия 2.1, датируемая 2000 годом, включает в себя незначительные модификации, не нашедшие отражения в версии 2.0. На момент написания этой книги версия 2.1 является последней действующей версией, выпущенной Philips. Не исключено, что в процессе подготовки книги в печать выйдет очередная модификация. Спешу успокоить читателя — едва ли новая версия будет содержать кардинальные отличия, да и в любом случае совместимость сохранится.

Мы не будем вдаваться во все тонкости и хитросплетения названных версий, разберем лишь самые необходимые для практики положения. Желающие подробнее ознакомиться с официальной документацией [4] без труда смогут получить ее с Интернет-сервера фирмы Philips (<http://www.semiconductors.philips.com>).

Интересно отметить, что фирма Philips особо выделяет в своей документации микросхемы, оснащенные интерфейсом I²C. Обложка или первый лист фирменных datasheet обязательно сопровождается значком, показанным на рис. 1.3.



Рис. 1.3. Фирменный знак интерфейса I²C

Полная гамма микросхем с интерфейсом I²C, выпускаемых фирмой, насчитывает в настоящее время более 150 наименований, выполненных с применением как перспективной КМОП-технологии, так и с уже ставшей традиционной — биполярной. Номенклатура продолжает расти, так что следите за новинками!

Определившись с главными положениями шины, перейдем к рассмотрению ее аппаратной реализации. Взгляните на рис. 1.4, отражающий устройство современной автомобильной магнитолы.

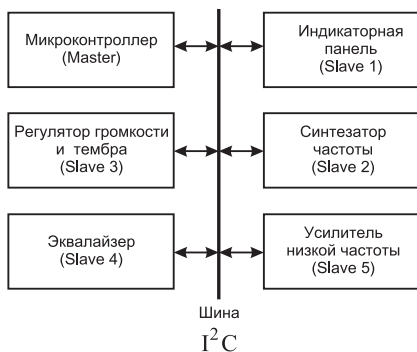


Рис. 1.4. Пример взаимодействия устройств на шине I²C

В составе магнитолы обязательно имеется микроконтроллер, выполняющий роль master-устройства, формирующий необходимые сигнальные последовательности, «рассылающий» информацию по slave-устройствам и принимающий от них какие-либо сведения. Остальные устройства, подключенные к шине, как мы уже договорились, будут подчинены микроконтроллеру. По определенному правилу, называемому **протоколом**, микроконтроллер может «отправить» на индикаторную панель (slave-устройство 1) данные, отражающие, к примеру, уровень громкости, принимаемую частоту радиостанции или хронометраж аудиокассеты. Синтезатор частоты (slave-устройство 2) по команде микроконтроллера перестроит частоту приема, регулятор громкости и тембра (slave-устройство 3) изменит громкость звука и его «окраску». И так далее...

Каким образом slave-устройства разбираются, что текущая порция информации предназначена кому-то одному и кому именно, об этом мы поговорим, но позже. А сейчас настала пора задать себе важный вопрос: «В чем заключается уникальность такого вида управления устройствами?» Действительно, в чем? Оказывается, управлять всеми подчиненными slave-абонентами можно всего по двум линиям (если не считать третью линию — общий провод схемы). Slave-абонент должен иметь два вывода, которые объединяются с такими же выводами другого slave-устройства, а также с master-абонентом. Собственно, внешне так и выглядит шина I²C.

Концепция шины настолько проста, что позволяет быстро разрабатывать принципиальную схему устройства, опробовать ее и в случае необходимости «нарастить» конструкцию новыми элементами или удалить ненужные безболезненно для других узлов. Также может быть упрощен метод разработки программного обеспечения, использованы стандартные библиотеки-подпрограммы. Практически все микросхемы с интерфейсом I²C имеют такие характеристики, которые позволяют использовать их в низковольтной портативной аппаратуре с питанием от гальванических элементов. Например, они обладают высокой помехоустойчивостью, низким потреблением тока, широким диапазоном питающего напряжения и слабой зависимостью параметров от температуры окружающей среды.

Обратим внимание на рис. 1.5.

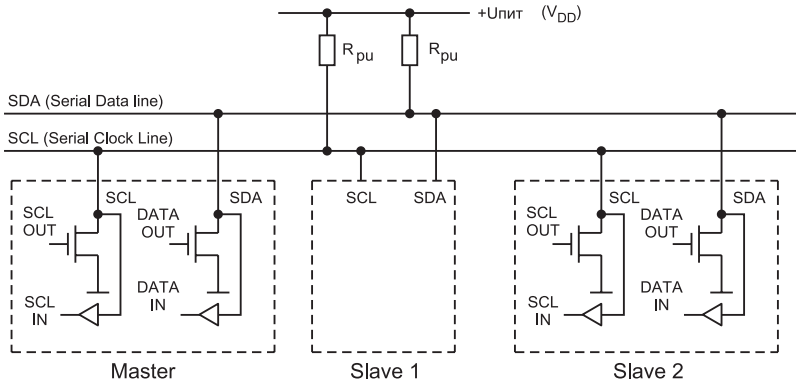


Рис. 1.5. Аппаратная реализация шины I²C в режимах low-speed и fast-speed

Интерфейс любого устройства, подключенного к шине I²C, как видно из рисунка, отличается предельной простотой. Он состоит из двух транзисторов с открытым стоком (коллектором) и двух буферных элементов с высоким входным сопротивлением. Один из выводов назван SDA (Serial Data Line), предназначается для связи с **линией последовательных данных**. Второй вывод имеет сокращенное название SCL (Serial Clock Line), предусмотрен для связи с **линией синхронизации**.

Как известно, по любым цифровым шинам передаются сигналы, характеризующиеся только двумя электрическими состояниями — «0» и «1» («низкий уровень» и «высокий уровень»). Состояние, когда обе линии (SDA и SCL) установлены в состояние «1», считается **свободным шинным состоянием**. Шина в этот момент не занята и готова к трансляции данных (иначе говорят, что шина находится в состоянии **ожидания**). Но каким образом обеспечить это состояние, если интерфейсные элементы не имеют активных выходов, если наружу выведены открытые выводы элементов? Для обеспечения логических состояний к шине подключаются два внешних резистора R_{pu} (pull-up resistors), «подтягивающие» линии к напряжению питания U_{пит}. Типичная величина этих резисторов колеблется в пределах 1...10 кОм. На рис. 1.5 эти резисторы показаны внешними, и такая ситуация прослеживается часто. Но иногда они имеются в составе master-абонента. Вообще интерфейс master-абонента желательно изучить досконально, поскольку его

выходы могут быть активными (иметь вместо pull-up резисторов транзисторные ключи) и тогда на шине возникнет конфликт.

Здесь мы можем четко сказать, в чем главное отличие master-абонента от slave-абонента. Это очень просто: **только master-абонент может генерировать сигнал SCL**.

Важнейшим критерием, определяющим возможность использования той или иной шины, является ее спектр технических характеристик. Шина I²C относится к классу **двухнаправленных асинхронных шин с последовательной передачей данных** и, как следствие, обладает достаточно низкой пропускной способностью. Поэтому ее почти не используют в составе персональных компьютеров, разве что как вспомогательную для идентификации установленных устройств [1]. А вот для согласования работы устройств, наполняющих изделия бытовой техники, она вполне годится.

Основные технические характеристики шины I²C по спецификации 1.0 приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Основные технические характеристики шины I²C (спецификация 1.0)

Наименование параметра	Значение параметра
Скорость обмена low-speed	не более 100 кбит/с
Скорость обмена fast-speed	не более 400 кбит/с
Число адресуемых устройств (7 бит)	до 128
Суммарная длина линий SCL и SDA	не более 4 м
Суммарная паразитная емкость относительно общего провода	не более 400 пФ
Входная емкость на каждый вывод абонента	не более 10 пФ

Изучая данные табл. 1.1, можно сделать заключение, что шина I²C совершенно не подходит для связи между удаленными абонентами, а значит, может быть использована только в составе одного прибора. Главным образом этот вывод исходит из малой протяженности линий SDA и SCL. Собственно говоря, в интернете автором была найдена страница, на которой ее создатель сообщил о том, что его конструкции без проблем работают при суммарной длине шины около 100 метров (естественно, с понижением скорости обмена данными). Но этот режим уже не нормиру-

ется оригинальной спецификацией, а значит, и надежная работа устройств не гарантируется.

Пропускная способность шины определяется как параметрами интерфейсов, так и паразитными параметрами линий SDA и SCL. На рис. 1.6 показаны эти паразитные параметры:

- $C_{пр}$ — распределенная емкость линии относительно общего провода;
- $C_{вх}$ — входная емкость интерфейса;
- $L_{пр}$ — индуктивность проводника линии.

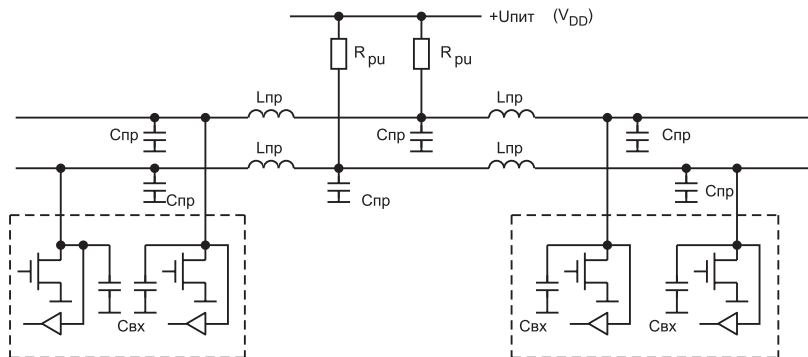


Рис. 1.6. Паразитные параметры, влияющие на пропускную способность шины I²C

В протоколе обмена по шине используются не только статические состояния линий («0» и «1»), но и перепады уровней («0» → «1» и «1» → «0») и наличие паразитных параметров выражается в «затягивании» фронтов, а также спадов импульсов, как показано на рис. 1.7, что может нарушить нормальный обмен данными.



Рис. 1.7. «Затяжка» импульса при передаче по шине — результат влияния паразитных параметров

Еще одна опасность, скрытая в слишком длинных проводниках, связана с перенапряжениями, которые могут возникнуть на интерфейсных элементах при значительных величинах паразитной индуктивности проводов ($L_{\text{пр}}$). Эта ситуация отражена на рис. 1.8.

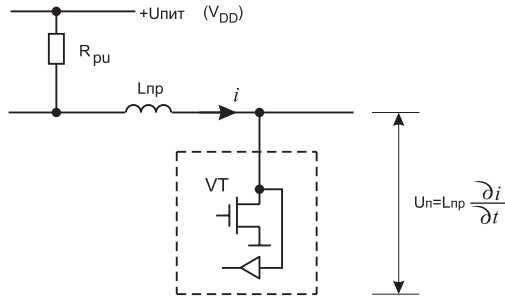


Рис. 1.8. Перенапряжения, связанные с наличием паразитной индуктивности линии связи

Как показано в [3], резкое закрытие транзистора VT характеризуется индуктивным выбросом на его стоке. Это явление используется в так называемых бустерных схемах источников питания, но здесь оно крайне вредно. И хотя в подавляющем большинстве случаев внутри микросхем предусматривается защита входных цепей, например, по варианту рис. 1.9, а, позволяющая «сбросить» энергию импульса в источник питания, все же лучше дополнительно ввести защиту по варианту рис. 1.9, б. Когда может потребоваться

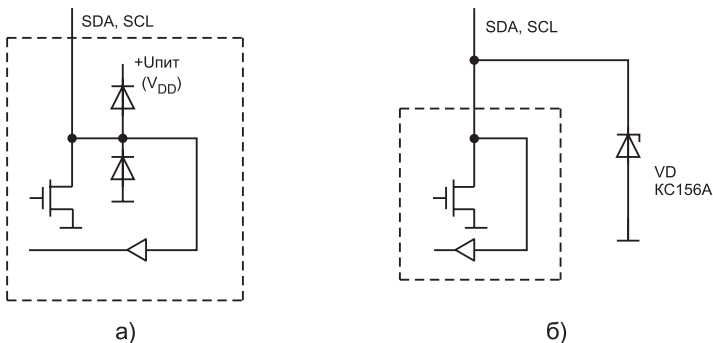


Рис. 1.9. Варианты защиты: а) внутренняя, б) внешняя

такая защита? В процессе экспериментов и отладки схемы, когда обычно микроконтроллер и slave-устройства устанавливаются на отдельных платах и связи между ними не удастся сделать короткими. Напряжение пробоя стабилитрона VD следует выбирать на 0,5...1 В больше уровня «1» на линиях SDA и SCL. И хотя в документации [4] такой способ защиты не встречается по вполне понятной причине — профессиональные разработчики обладают гораздо более солидными возможностями по выполнению макетных работ, — радиолюбителю лучше обезопасить себя от возможных путей выхода микросхем из строя. Поиск причины пробоя — долгое и мучительное занятие, связанное к тому же с дополнительными финансовыми расходами, так что осторожность не помешает! Стабилитрон можно не устанавливать на печатной плате в законченной и отлаженной конструкции.

Рассмотрим теперь способ защиты от высоковольтных наводок, приведенный в фирменной документации [4] и отраженный на рис. 1.10. Важно отметить, что данный способ предпочтительнее использовать в режиме Hs-mode. Согласно рекомендациям, в схему вводятся защитные резисторы R_S . Чтобы сократить время нарастания сигнала синхронизации, в интерфейс master-устройства вводится источник тока MCS. Сами же сигналы SDA и SCL здесь именуются SDAH и SCLH соответственно (индекс «H» — это сокращение от слова high — высокий).

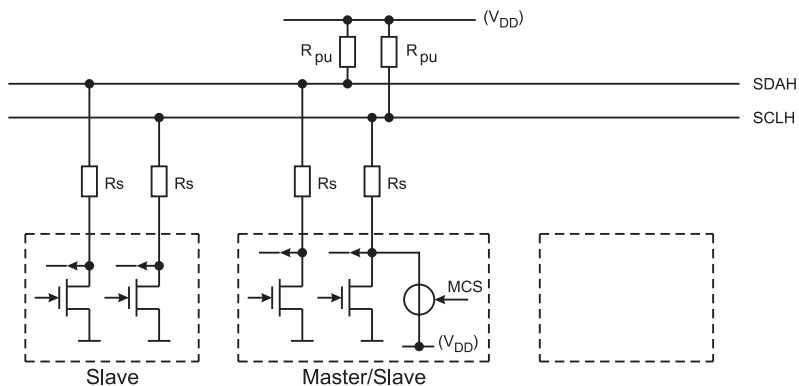


Рис. 1.10. Структура шины I²C в режиме Hs-mode

Каким способом можно определить величину резисторов R_{pu} и R_S ? В фирменной документации [4] есть ответ на этот вопрос. Там приводятся графики, оптимизирующие способ выбора резисторов. Графики отнормированы относительно разных напряжений питания, но поскольку наиболее вероятным видится вариант использования микросхем при $V_{DD} = 5 \text{ В}$, то сведения ограничены только этим напряжением.

Вначале производится выбор резистора R_{pu} по рис. 1.11. Рассматривая этот рисунок, можно сделать попутный вывод о том, что паразитная емкость практически не оказывает влияния на методику выбора резистора R_S . Читатель также вправе задать следующий вопрос: Как определить величину паразитной емкости? Действительно, сделать это не так-то просто. Современные пакеты компьютерного схемотехнического моделирования при «разводке» печатных плат позволяют отмоделировать паразитные элементы, определить их величину. Однако такие программы доступны далеко не всем и далеко не все умеют ими правильно пользоваться, поэтому при разработке радиолюбительских конструкций можно придерживаться «золотой середины», приняв значение паразитной емкости не более 100...200 пФ.

Итак, после определения R_{pu} по рис. 1.13 определяем номинал резистора R_S (если, конечно, его предполагается ввести в схему). В заключение проверяем по рис. 1.12 номинал резистора R_{pu} .

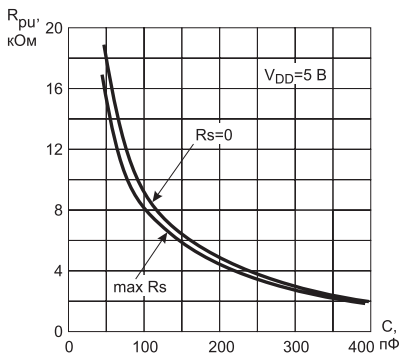


Рис. 1.11. Зависимость максимальной величины резистора R_{pu} от емкости шины

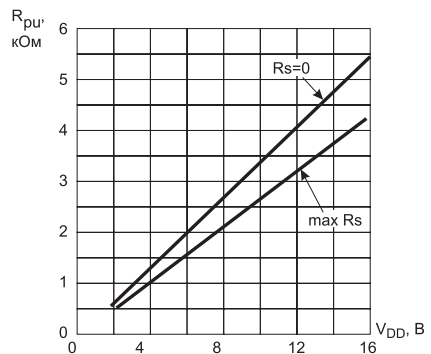


Рис. 1.12. Зависимость минимальной величины резистора R_{pu} от напряжения питания

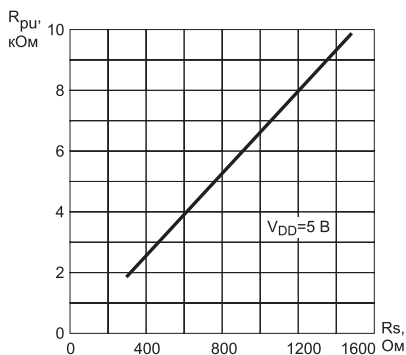


Рис. 1.13. Зависимость максимальной величины резистора R_S от величины резистора R_{pu}

К примеру, для напряжения питания 5 В оно должно быть не менее 1,5...2 кОм. Выполнение требований графиков позволит получить в режиме Hs-mode максимальную скорость передачи.

Не следует также забывать и о топологии печатной платы. Линии подвержены не только внешним помехам, но также и перекрестной связи, когда сигнал SDA наводится в линию SCL, и наоборот. Если суммарная длина линии превышает 10 см, рекомендуется располагать токоведущие дорожки в такой последовательности:

SDA

V_{DD}

Общий

SCL

Хорошо использовать печатные платы с отдельными слоями, специально выделенными под общий провод и провод V_{DD} , что, конечно, в радиолюбительских условиях едва ли осуществимо. Удачным также является использование экранированных кабелей, экранная жила которых соединена с общим проводом схемы. Возможно также применить скрученные попарно проводники.

Как уже было сказано ранее, скорость передачи по шине I²C ограничена не только внешними факторами, но и внутренними параметрами интерфейсов, их схемотехникой. Едва ли разработчик принципиальных схем сможет исправить интерфейс, заставить его работать быстрее — эта задача под силу только разработчику интегральной схемы. Но узнать, почему это ограничение

наложено, полезно будет даже радиолюбителю. Итак, взглянем на рис. 1.14 и рис. 1.15.

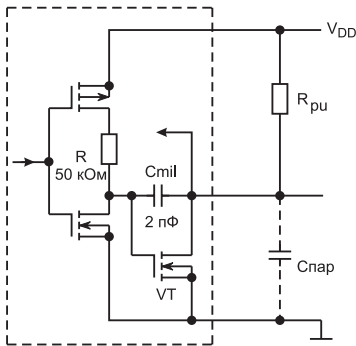


Рис. 1.14. Упрощенная схема интерфейса I²C, выполненного по КМОП-технологии

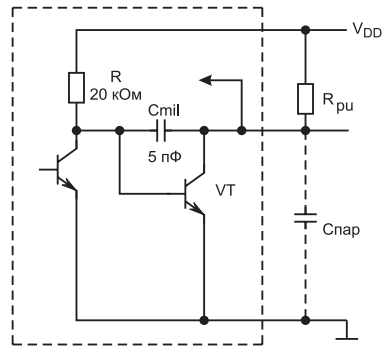


Рис. 1.15. Упрощенная схема интерфейса I²C, выполненного по биполярной технологии

В обеих схемах очень важно сделать так, чтобы транзистор VT открывался и закрывался как можно быстрее. Кажется бы, нет никаких препятствий, чтобы его открывание происходило мгновенно. Однако (и это показано в [3]) из-за наличия так называемой емкости Миллера C_{mil} образуется местная отрицательная обратная связь, которая не дает транзистору быстро войти в состояние насыщения. Читатель может возразить, обратив внимание на величину резистора R, и предложить уменьшить его номинал. Но тогда мы столкнемся со значительным увеличением тока потребления микросхем, что, конечно, тоже нехорошо.

Ограничения, накладываемые на минимальную величину резистора R_{pu} , связаны с тем, что через него в состоянии линии «0» должен протекать ток не более 3 мА. Легко заметить, что для напряжения питания $V_{DD} = 5$ В величина R_{pu} ограничена номиналом 1,7 кОм. Соответственно емкость линии не должна превышать 200 пФ. Но если линия имеет большее значение паразитной емкости? Тогда можно использовать схему, изображенную на рис. 1.16. В течение времени нарастания или спада сигнала линии микросхема НСТ4066 подключает в промежутке между 0,8 и 2,0 В форсирующий резистор R_{pu2} .

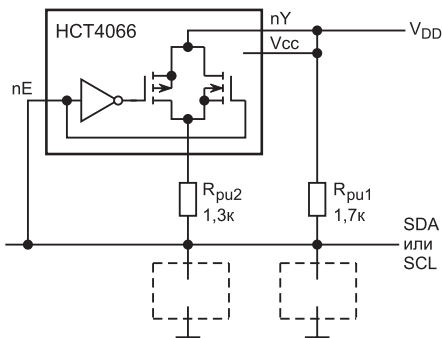


Рис. 1.16. Использование способа динамического подключения резистора R_{pu} для выполнения требований спецификации шины I²C

Еще одной важной технической характеристикой шины является ее **совместимость**. Ранее разработанные элементы, обладающие только возможностями низкоскоростного обмена, должны без проблем связываться с высокоскоростными, и наоборот. Давайте сейчас рассмотрим поподробнее вопрос совместимости устройств, подключаемых к шине, тем более что мы не вернемся к нему в рамках этой книги.

Итак, к шине I²C могут быть подключены интерфейсы трех типов: low-speed, fast-speed, Hs-mode. Понятно, что обмен данными может быть осуществлен со скоростью, доступной самому медленному интерфейсу. В табл. 1.2 приведены возможные предельные скорости обмена по совмещенной шине.

Таблица 1.2. Скорость обмена данными в совмещенных шинах

Направление передачи	Конфигурация шины I ² C			
	Hs + fast + low	Hs + fast	Hs + low	fast + low
Hs – Hs	0...3,4 Мбит/с	0...3,4 Мбит/с	0...3,4 Мбит/с	–
Hs – fast	0...100 кбит/с	0...400 кбит/с	–	–
Hs – low	0...100 кбит/с	–	0...100 кбит/с	–
fast – low	0...100 кбит/с	–	–	0...100 кбит/с
fast – fast	0...100 кбит/с	0...400 кбит/с	–	0...100 кбит/с
low – low	0...100 кбит/с	–	0...100 кбит/с	0...100 кбит/с

Если соединить устройства разных типов по классической схеме, то разные скорости обмена могут быть и не реализованы. Поэтому приходится группировать эти устройства, как показано на рис. 1.17, и вводить между группами мосты (bridge). Назначение моста — отсоединить более медленные элементы в моменты обмена между более быстрыми.

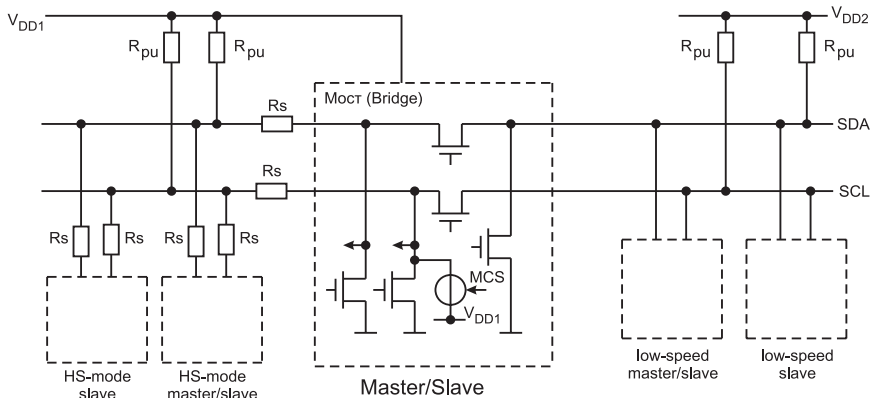


Рис. 1.17. Совмещенная шина I²C

Дополнительное удобство, обеспечиваемое мостом, — возможность использования для питания шины двух напряжений (V_{DD1} и V_{DD2}). Мост включается как master/slave-устройство Hs-режима и управляется сигналами SDAH, SCLH, SDA, SCL. Он может также присутствовать в составе отдельных микросхем (например, микроконтроллеров) как самостоятельное устройство.

Отметим также, что шина I²C позволяет совмещать устройства с разными напряжениями питания. Pull-up резисторы желательно подключать к питающему напряжению 5 В, как показано на рис. 1.18.

Прежде чем перейти к описанию протокола обмена по шине, отметим, что собственно ее устоявшееся название (ай-ту-си), равно как и наименования линий (SDA и SCL), является зарегистрированным наименованием. Авторские права на эти названия принадлежат фирме Philips. Соответственно другие фирмы, производящие микросхемы с интерфейсом I²C и указывающие его наличие, как такового, в технической документации, делают это по лицен-

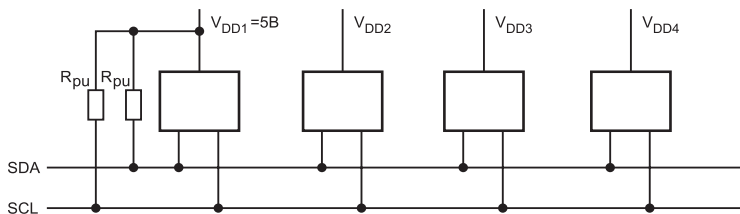


Рис. 1.18. Соединение элементов с разными напряжениями питания

зии разработчика [2]. К примеру, фирма Microchip, специализирующаяся на выпуске микроконтроллеров, имеет такую лицензию. Однако и фирмы, не имеющие лицензии, производят микросхемы с интерфейсом, очень похожим на I²C, но как I²C его не обозначают, а значит, протокол обмена может немного отличаться от стандартизованного. Делается это для обеспечения чистоты правовых отношений, которые за рубежом соблюдаются несколько более жестко, нежели у нас в стране. В любом случае, используя в своих разработках аналоги фирменных микросборок, рекомендуется внимательно ознакомиться с технической документацией.

Самой простой конфигурацией шины I²C, как уже было сказано, является master-организация. С нее мы и начнем рассмотрение протокола обмена данными.

Передача любого бита по шине происходит при условии **стробирования** данных SDA по линии SCL. Предположим, что master-устройство выставило бит данных «0» или «1» на линию SDA. Slave-устройство получит этот бит только тогда, когда на линии SCL произойдет перепад сигнала из низкого уровня в высокий (так называемый положительный перепад). Отсюда следует первое правило организации протокола шины: **смена информации на линии SDA может быть произведена только при нулевом состоянии линии SCL**.

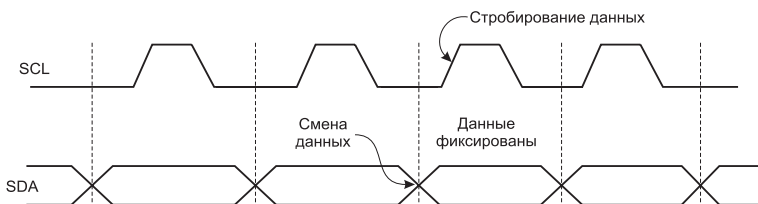


Рис. 1.19. Передача бита по шине I²C

Мы уже знаем, что шина в неактивном состоянии имеет на линиях SDA и SCL высокие уровни. Но каким образом slave-устройства могут узнать, что началась передача и что она окончилась? Для распознавания начала и конца передачи в спецификацию шины были введены условия **Start** и **Stop**. На рис. 1.20 представлено условие Start, на рис. 1.21 — условие Stop. В фирменной документации условие Start имеет условное сокращение «S», условие Stop — «P».

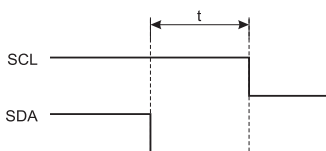


Рис. 1.20. Условие START

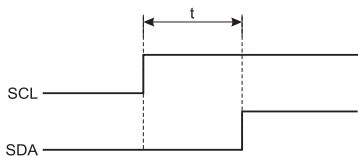
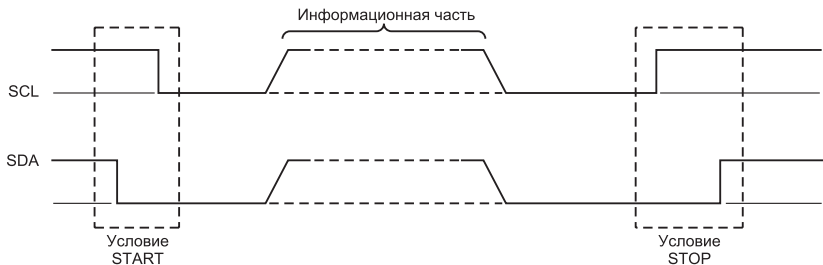


Рис. 1.21. Условие STOP

Условие Start образуется при отрицательном перепаде сигнала на линии SDA при единичном состоянии линии SCL. И наоборот, условие Stop возникает при положительном перепаде линии SDA при единичном состоянии линии SCL. Эти состояния всегда должны генерироваться master-устройствами. Таким образом, укрупненно информационный пакет, передаваемый по шине I²C, выглядит так, как показано на рис. 1.22.

Для определения состояний Start и Stop в составе slave-устройства обычно предусматривается специальная аппаратная схема, так как реализовать программно интерфейс slave-абонента довольно трудно: появляется необходимость постоянной проверки линии SDA на предмет опознавания данных.

Рис. 1.22. Информационный пакет данных на шине I²C

Существует также состояние «повторный Start», которое может возникнуть в середине информационного пакета. Чуть позже мы рассмотрим ситуации, когда появляется условие «повторный Start».

Передача данных по шине производится по 8 битов, после чего следует **сигнал подтверждения** (acknowledge). Сигнал подтверждения свидетельствует о том, что данные нормально приняты и обработаны... Но обо всем по порядку! Взгляните на рис. 1.23, отражающий процесс передачи байта по шине I²C.

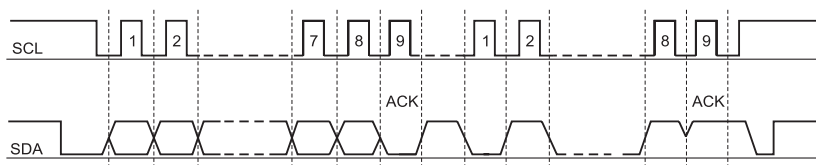


Рис. 1.23. Передача байта по шине I²C

После обработки состояния Start передатчик последовательно выставляет на линии SDA данные, начиная со старшего бита (MSB) и заканчивая младшим (LSB). Данные стробируются по линии SCL импульсами 1...8.

Обратите внимание: линия SDA приемника (slave-абонента) в момент приема информационных битов (MSB-LSB) должна быть выставлена в единичное состояние. Физически это означает, что транзистор, подключенный к линии SDA, должен быть закрыт. В момент отрицательного перепада импульса 8 на линии SCL slave-абонент должен выставить на линию SDA нулевой уровень — открыть транзистор. Тем самым приемник подтверждает нормальный прием байта. Передатчик (master-абонент) должен выставлять на линию SDA единичное состояние. Благодаря тому что линия организована по способу «монтажное И», ее состояние будет определяться только slave-абонентом. Передатчик должен проверить состояние линии SDA, затем выдать девятый стробирующий импульс, с которым slave-абонент выставит на линию SDA высокий уровень, проверить выполнение этой операции и лишь после продолжить передачу (рис. 1.24). В случае неподтверждения нормального приема (сигнал ACK имеет высокий уровень) передатчику желательно выполнить условие Stop и повторить передачу.