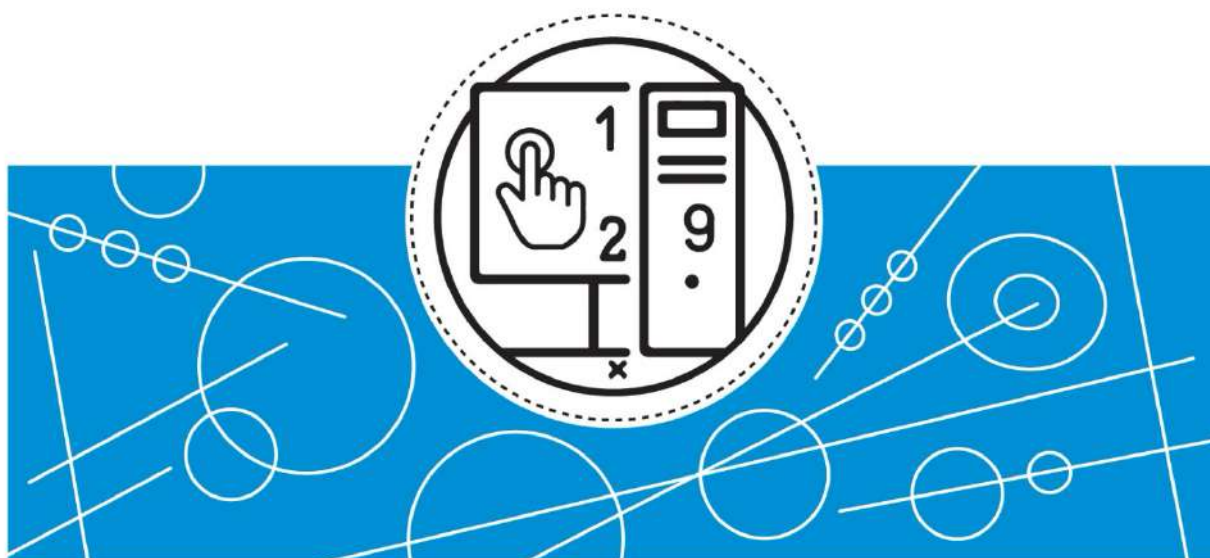


ІТМО

СИСТЕМЫ ВВОДА/ВЫВОДА



Санкт-Петербург
2026

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

СИСТЕМЫ ВВОДА/ВЫВОДА

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО

по направлениям подготовки

09.03.01 – Информатика и вычислительная техника,

09.03.04 – Программная инженерия

в качестве учебно-методического пособия для реализации основных профессиональных образовательных программ высшего образования бакалавриата

ИТМО

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2026

Системы ввода/вывода / Быковский С.В., Табунщик С.М., Гончаров А.А.[и др.]
Учебно-методическое пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2026. – 120 с.

Рецензент: Логинов Иван Павлович, кандидат технических наук, доцент факультета программной инженерии и компьютерной техники, мегафакультет компьютерных технологий и управления Университета ИТМО.

В учебном пособии представлены теоретические сведения и задания к лабораторным работам по дисциплине “Системы ввода/вывода” для обучающихся по программам бакалавриата. В рамках курса студенты изучают архитектуру систем ввода/вывода современных компьютерных систем, знакомятся с принципами работы проводных и беспроводных каналов связи, принципами работы последовательных и параллельных интерфейсов, изучают основы построения контроллерных сетей. На лабораторных работах студенты учатся работать с базовой подсистемой ввода/вывода на примере реализации OpenSBI для процессоров с архитектурой RISC-V, разрабатывать драйвера устройств для операционной системы Linux и получают навыки работы с такими аппаратными интерфейсами, как I2C, SPI, 1-Wire, UART.



ИТМО (Санкт-Петербург) — национальный исследовательский университет, научно-образовательная корпорация. Альма-матер победителей международных соревнований по программированию. Приоритетные направления: IT и искусственный интеллект, фотоника, робототехника, квантовые коммуникации, трансляционная медицина, Life Sciences, Art&Science, Science Communication.

Лидер федеральной программы «Приоритет-2030», в рамках которой реализовывается программа «Университет открытого кода». С 2022 ИТМО работает в рамках новой модели развития — научно-образовательной корпорации. В ее основе академическая свобода, поддержка начинаний студентов и сотрудников, распределенная система управления, приверженность открытому коду, бизнес-подходы к организации работы. Образование в университете основано на выборе индивидуальной траектории для каждого студента.

ИТМО пять лет подряд — в сотне лучших в области Automation & Control (кибернетика) Шанхайского рейтинга. По версии SuperJob занимает первое место в Петербурге и второе в России по уровню зарплат выпускников в сфере IT. Университет в топе международных рейтингов среди российских вузов. Входит в топ-5 российских университетов по качеству приема на бюджетные места. Рекордсмен по поступлению олимпиадников в Петербурге. С 2019 года ИТМО самостоятельно присуждает ученые степени кандидата и доктора наук.

© Университет ИТМО, 2026

© Авторы, 2026

Содержание

Введение	5
1. Основные понятия	7
1.1. Обобщенная структура вычислительной системы	7
1.2. Контроллеры и процессоры ввода/вывода	9
1.3. Интерфейс ввода/вывода	10
1.4. Способы обмена данными между устройствами	11
1.5. Порт ввода/вывода	11
1.6. Дискретные порты ввода/вывода	12
1.7. Аналоговые порты ввода/вывода	16
2. Аппаратные интерфейсы	18
2.1. Общие сведения	18
2.2. Интерфейс I2C	21
2.3. Интерфейс SPI	26
2.4. Интерфейс RS-232	31
2.5. Универсальная последовательная шина USB (Universal Serial Bus)	32
3. Проводные линии связи	35
3.1. Общие сведения о проводных линиях связи	35
3.2. Передача аналоговых сигналов	35
3.3. Типы кабелей	39
3.4. Передача цифровых сигналов	50
3.5. Стандарты электрических сигналов	53
3.6. Разводка дифференциальных пар на печатных платах	59
3.7. Разъемы проводных интерфейсов	60
3.8. Защита проводных линий связи	65
3.9. Ключевые принципы организации проводных интерфейсов	72
4. Беспроводные линии связи	74
4.1. Общие сведения о беспроводных линиях связи	74
4.2. Типы беспроводных каналов передачи	74
4.3. Методы расширения спектра	79
4.4. Стандарты беспроводной передачи данных	81
4.5. Спутниковая связь	96
4.6. Сотовая связь	98
4.7. Беспроводные сенсорные сети и IoT	100
4.8. Сравнение беспроводных технологий	101
5. Контроллерные сети	104
5.1. Понятие контроллерных сетей	104

5.2. Стандарт CAN (Controller Area Network)	105
5.3. Сети LIN (Local Interconnect Network)	109
5.4. Сети FlexRay	109
5.5. Промышленные сети на базе Ethernet	109
6. Лабораторный практикум	112
6.1. Лабораторная работа №1. Принципы организации ввода/вывода без операционной системы	112
6.2. Лабораторная работа №2. Основы написания драйверов устройств с использованием операционной системы	114
6.3. Лабораторная работа №3. Изучение протоколов передачи данных между устройствами с использованием простейших последовательных интерфейсов	116
6.4. Лабораторная работа №4. Изучение работы контроллеров ввода/ вывода на примере контроллера UART	118
Список рекомендуемой литературы	120

Введение

Настоящее учебно-методическое пособие предназначено для студентов бакалавриата, обучающихся по направлениям подготовки “09.03.01 – Информатика и вычислительная техника” и “09.03.04 – Программная инженерия”.

Теоретический материал разбит на главы и включает описание основных понятий подсистемы ввода/вывода, характеристики и принципы организации аппаратных интерфейсов, особенности передачи данных по проводным и беспроводным линиям связи, а также принципы организации контроллерных сетей.

Изучая теорию, студенты приобретают следующие знания, умения и навыки:

- умеют сравнивать интерфейсы по характеристикам;
- знают устройство портов ввода/вывода для различных интерфейсов и их ограничения;
- умеют проектировать интерфейсы и протоколы ввода/вывода, учитывая требования к количеству линий, скорости и показателям надежности;
- знают особенности передачи данных по проводным и беспроводным каналам;
- умеют выбирать тип среды передачи данных в зависимости от типа физического сигнала;
- понимают устройство пирамиды автоматизации и особенности организации передачи данных на каждом уровне.

Лабораторный практикум включает четыре лабораторные работы. Выполняя их, студенты постепенно знакомятся с особенностями работы подсистемы ввода/вывода современных компьютерных систем, начиная с базового программного обеспечения ввода/вывода на примере реализации BIOS OpenSBI для процессоров RISC-V и заканчивая разработкой драйверов символьных устройств для операционной системы Linux. Третья и четвертая лабораторные работы посвящены работе с физическими интерфейсами, где студенты с помощью логического анализатора учатся анализировать протоколы передачи данных и также реализовывать механизмы надежной передачи на транспортном уровне.

В процессе выполнения лабораторных работ у студентов формируются следующие навыки:

- разработка программного обеспечения загрузчика операционной системы;
- разработка драйверов символьных устройств в виде модулей ядра операционной системы Linux;
- анализ протоколов передачи данных с датчиков температуры и влажности;
- реализация механизмов надежной передачи данных по асинхронным интерфейсам;
- разработка низкоуровневого программного обеспечения для работы с контроллерами интерфейсов ввода/вывода.

Учебное пособие ориентировано на формирование у студентов достаточных компетенций для анализа и разработки аппаратных интерфейсов передачи данных разного уровня сложности.

1. Основные понятия

1.1. Обобщенная структура вычислительной системы

Говоря о системе ввода-вывода, нужно понимать, что это одна из двух основных частей вычислительной (компьютерной) системы. Вычислительную систему можно разделить на две части: вычислительное ядро с памятью и процессорами и подсистему ввода-вывода, которая на рисунке 1 представлена более разветвленной, поскольку служит своего рода органами чувств для компьютерной системы. Она содержит, помимо внешних устройств, и другие устройства, которые временно назовем адаптерами. Это контроллеры или процессоры ввода-вывода, которые позволяют сопрячь вычислительное ядро с внешними устройствами.

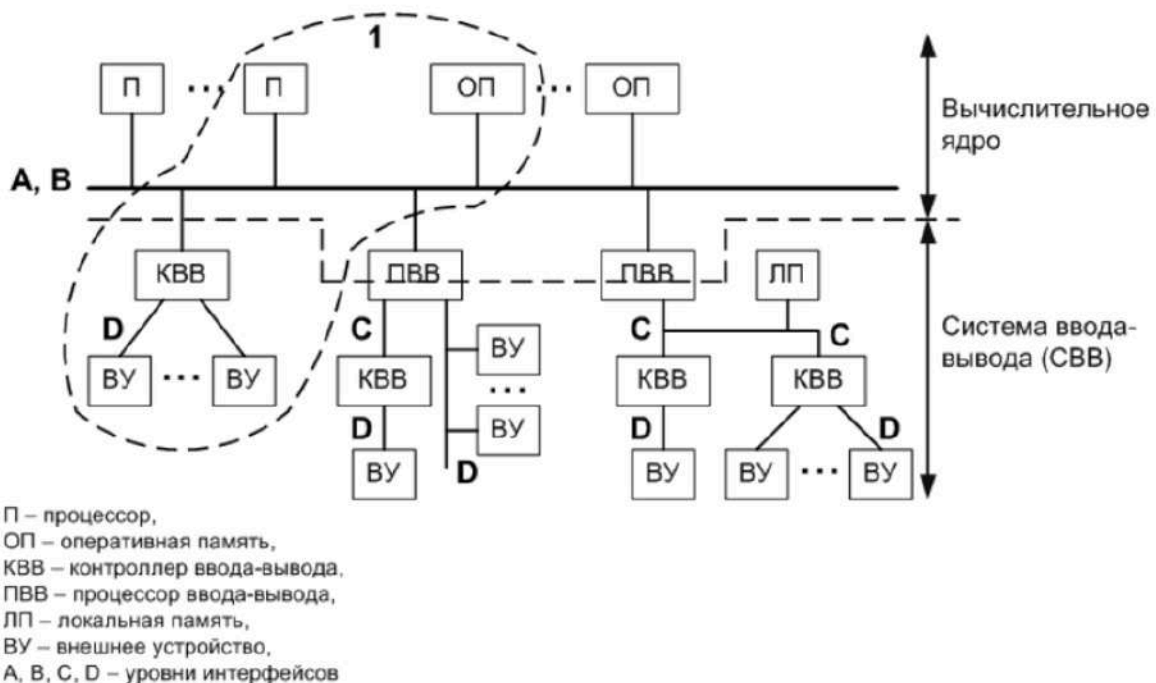


Рисунок 1 — Обобщенная схема вычислительной системы

Следует понимать, что никакое внешнее устройство не подключается к процессору напрямую. Всегда имеется посредник в виде контроллера ввода/вывода, который организует связь. Это связано с тем, что внешние устройства находятся вне системы, и их интерфейсы отличаются от внутренних интерфейсов, используемых в самой системе. Поэтому необходим такой посредник, который сопряжет эти интерфейсы. Некоторые внешние устройства достаточно сложны, и им необходимы процессоры ввода-вывода. Например, при сетевом взаимодействии нужна сетевая карта, звуковая карта, видеокarta и т.д. Это все процессоры ввода-вывода, реализующие сложные алгоритмы. Однако имеются простые контроллеры ввода-вывода, которые работают как адаптеры.

Основное, что следует запомнить, — это наличие посредника, участвующего в обмене данными между вычислительным ядром и внешним устройством. Это обусловлено эффективностью применения различных интерфейсов в различных местах компьютерной системы.

Говоря о классификации процессоров, важно понимать, что они не только являются элементами вычислительного ядра, но и могут быть периферийными и сервисными. По архитектуре процессоры могут быть аналогичны процессорам вычислительного ядра, но выполняют функции сопряжения либо сервисные функции. Например, периферийные процессоры обслуживают периферийные устройства и могут быть процессорами ввода/вывода. Сервисные блоки выполняют вспомогательные функции, к примеру, поддерживая механизм виртуальной памяти.

Существуют специализированные процессоры, которые имеют свой набор команд. Они могут быть программируемыми или непрограммируемыми. Основная идея заключается в том, что процессор может быть частью и вычислительного ядра, и подсистемы ввода-вывода, а также частью программного обеспечения.

Память как компонент вычислительного ядра имеет разные характеристики и особенности. В подсистеме ввода-вывода также есть память для контроллеров и процессоров, которая может принадлежать к категории внешних устройств. Особое внимание стоит уделить буферной памяти в контроллерах, необходимой для выравнивания скорости работы разных устройств. Знание об этом поможет предотвратить ошибки, связанные с задержками или потерей данных.

Память бывает разной. Основной способ доступа — по адресу, но буферная память может иметь последовательный доступ, когда данные необходимо выбирать по сигналу готовности. Энергозависимость и энергонезависимость памяти — важные аспекты. Оперативная память по умолчанию энергозависима, но бывают случаи, например в микроконтроллерах, когда оперативной памятью является флеш-память.

Скорость выборки не настолько важна, как сокращение объема памяти и возможность запуска без копирования данных в энергозависимую оперативную память. Поскольку оперативная память является энергозависимой, перед её использованием требуется загрузка кода с внешнего носителя, например из флеш-памяти или с жёсткого диска.

Важно понимать, что при отключении питания можно потерять данные. Если оперативная память работает как флеш-память, то чаще всего она доступна только для чтения, а для записи предназначена другая,

энергозависимая часть. Код выполняется из одной памяти, а переменные хранятся в другой.

В зависимости от системы память может подключаться через различные интерфейсы. Интерфейсы можно разделить на параллельные и последовательные. Внутренняя память, находящаяся на микросхеме, доступна, как правило, через параллельный интерфейс, а внешняя обычно подключается последовательно, что упрощает внешние коммуникации и снижает их стоимость.

Проектировщики таких систем должны соблюдать требования при разводке проводников на плате, чтобы избежать помех. Если не требуется быстрый доступ к внешней памяти, то выбирают последовательные интерфейсы, так как они меньше требуют ресурсов (место на печатной плате, количество проводов).

1.2. Контроллеры и процессоры ввода/вывода

Контроллер ввода/вывода – устройство, управляющее функционированием отдельных блоков вычислительной системы и внешних устройств, например, вводом-выводом информации, доступом к памяти, к накопителям на магнитных дисках, дисплеям.

Контроллеры ввода-вывода (контроллеры периферийных устройств, КВВ) делятся на:

- устройства сопряжения стандартного интерфейса ВС с интерфейсом внешнего устройства (функция преобразования), которые называются адаптерами;
- локальные устройства управления конечным оборудованием внешнего устройства (функция управления).

Процессор ввода/вывода (ПВВ) - устройство обработки данных, которое может самостоятельно выбирать команды из памяти, имеет собственную систему команд и ориентировано на выполнение задач взаимодействия ВС с внешними устройствами.

Необходимость использования ПВВ обусловлена следующими факторами:

- процессор ввода-вывода предназначен для работы в рамках системы ввода-вывода с целью увеличения производительности системы;
- увеличение производительности происходит за счет разгрузки центрального процессора и организации параллельной работы СВВ и основного процессора.

Примеры ПВВ:

- акселераторы 2D- и 3D-графики;
- звуковая карта;
- сетевая карта.

1.3. Интерфейс ввода/вывода

Интерфейс ввода/вывода - соглашение о взаимодействии объектов: перечень средств взаимодействия, их параметры, в случае аппаратных интерфейсов – параметры сигналов, способы доступа к средствам взаимодействия, правила взаимодействия и т.д.

Определение интерфейса включает:

- описание и параметры портов взаимодействующих устройств;
- описание и параметры канала связи устройств;
- протокол взаимодействия на разных уровнях (физическом, канальном и т.д.).

Классификация интерфейсов по типу взаимодействующих объектов:

- **аппаратный** (устройство-устройство) – совокупность алгоритмов обмена и технических средств, обеспечивающих обмен между устройствами. Примеры: PCI, RS-232, I2C, Ethernet;
- **программный** – соглашение о связях в программной среде между программными модулями. Примеры: Win32, POSIX, API любого программного модуля (интерфейс прикладного программирования – набор функций, предоставляемый для использования в прикладных программах);
- **пользовательский** (ВС – пользователь) – сценарии, по которым строится общение оператора с вычислительной системой, и стиль их реализации. Примеры: интерфейс пользователя в Microsoft Visual Studio.

Классификация интерфейсов по назначению (см. рисунок 1):

- **внутрисистемный** («А») – это группа интерфейсов, которая обеспечивает взаимодействие компонент ядра ВС. Интерфейсы этого уровня должны, очевидно, удовлетворять критерию максимальной производительности, например, интерфейс между процессором и памятью (AXI, OCP, Wishbone);
- **системный** («В») – группа интерфейсов, обеспечивающих сопряжение элементов вычислительного ядра и подсистемы

ввода-вывода. Данные интерфейсы предназначены для расширения системы (ISA, PCI, PCI Express), то есть для наращивания характеристик вычислительного ядра, и рассматриваются как компромиссное решение при построении недорогих вычислительных систем;

- **уровень стандартных интерфейсов ввода-вывода («С»)**
– группа интерфейсов, объединяющая контроллеры ввода-вывода с процессорами ввода-вывода. Характеристики этих интерфейсов сильно отличаются от характеристик первых двух групп: критерием является удобство и эффективность управления большим числом периферийных устройств. Примеры: интерфейс SCSI, SAS;
- **уровень малых периферийных интерфейсов («D»)**
– сопрягают контроллеры (процессоры) ввода-вывода непосредственно с внешними устройствами (RS-232, SPI, Centronics, SATA). Для каждого внешнего устройства требуется свой оптимальный интерфейс.

1.4. Способы обмена данными между устройствами

Программно-управляемые методы обмена включают: — синхронный обмен; — асинхронный обмен с программной проверкой готовности (полинг, «по опросу»); — асинхронный обмен с аппаратной проверкой готовности (обмен по прерываниям).

Отдельно выделяется режим прямого доступа к памяти (ПДП).

1.5. Порт ввода/вывода

Порт ввода/вывода - точка, через которую осуществляется взаимодействие с каким-либо блоком в системе ввода-вывода.

Порт ввода/вывода является логической адресуемой единицей системы ввода/вывода, которая характеризуется адресом, форматом данных и набором операций, которые к этому порту можно применять.

Взаимодействие может осуществляться как **программным** путем, так и **аппаратным** (порт – разъем устройства, рисунок 2).

Через порты устройства взаимодействуют друг с другом: считывают значения входных сигналов и устанавливают значения выходных сигналов.

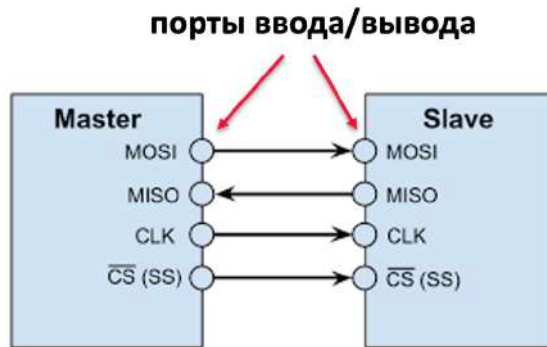


Рисунок 2 — Аппаратные порты ввода/вывода

Классификация портов по типу сигнала:

- аналоговые;
- дискретные.

Классификация портов по направлению передачи сигнала:

- однонаправленные;
- двунаправленные.

1.6. Дискретные порты ввода/вывода

1.6.1. Однонаправленный порт ввода

На рисунке 3 представлена схема однонаправленного порта ввода.

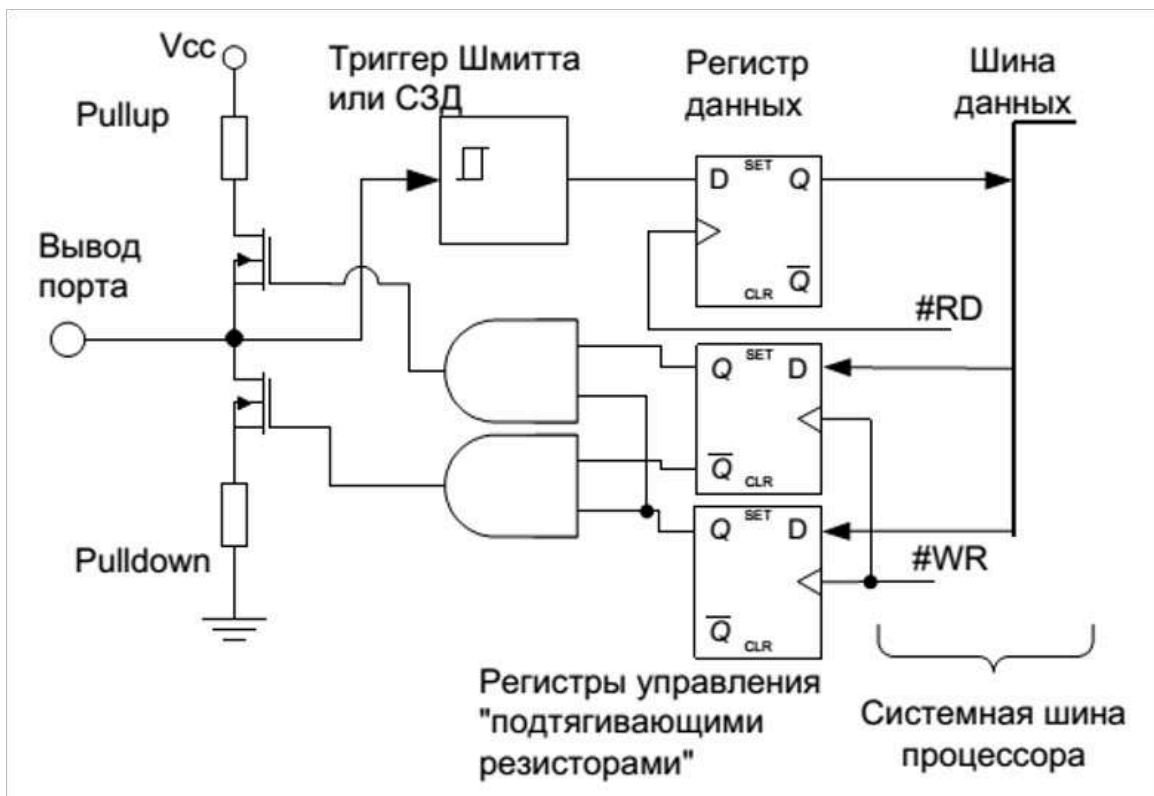


Рисунок 3 — Схема однонаправленного порта ввода

1.6.2. Однонаправленный порт вывода с двухтактной выходной схемой

На рисунке 4 представлена схема однонаправленного порта вывода с двухтактной схемой.

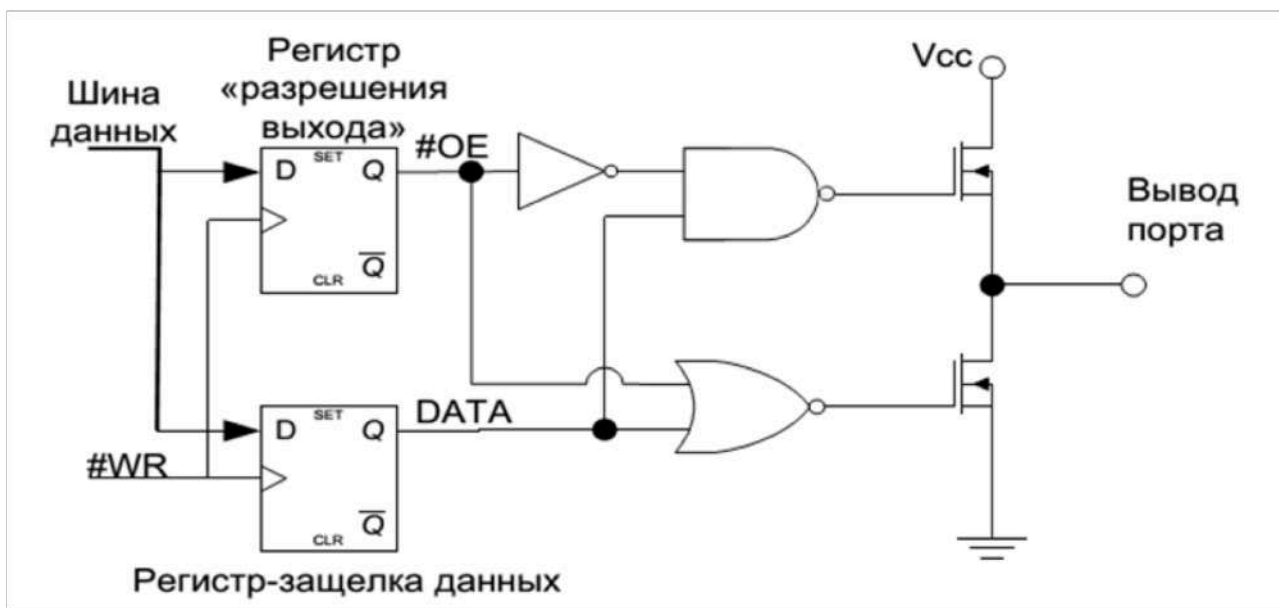


Рисунок 4 — Схема однонаправленного порта вывода с двухтактной выходной схемой

Достоинства:

- высокая нагрузочная способность выхода (большой выходной ток);
- возможно управлять мощной нагрузкой: светодиодами, реле, мощным электронным ключом (транзистор, тиристор).

Недостатки:

- высокое энергопотребление и уровень помех при переключении;
- сложное внутреннее устройство.

1.6.3. Однонаправленный порт вывода с одноконтурной выходной схемой и внутренней нагрузкой

На рисунке 5 представлен схема однонаправленного порта вывода с одноконтурной выходной схемой и внутренней нагрузкой.

Достоинства:

- внешнее напряжение питания нагрузки $V_{cc\ ext}$ может быть иным – большим или меньшим, чем питание устройства;
- необходимо управлять только одним регистром;
- простая схема;

- возможность без дополнительных схем организовать подключение на одну внешнюю шину несколько таких выходов.

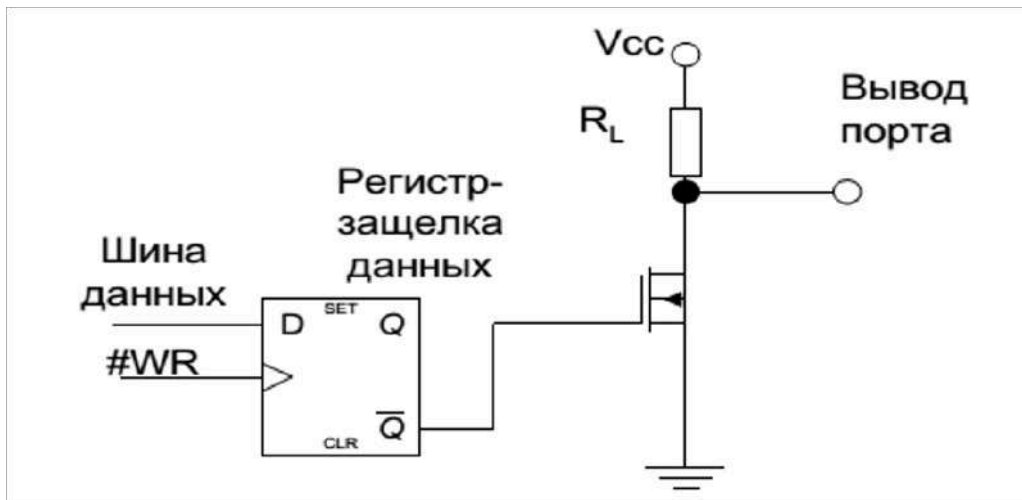


Рисунок 5 — Схема однонаправленного порта вывода с однотоктной выходной схемой и внутренней нагрузкой

Недостатки:

- требуется внешняя нагрузка;
- малый вытекающий ток, ограниченный внешним нагрузочным резистором.

1.6.4. Однонаправленный порт вывода с открытым выходом (коллектором или стоком)

На рисунке 6 представлена схема однонаправленного порта вывода с открытым выходом (коллектором или стоком).

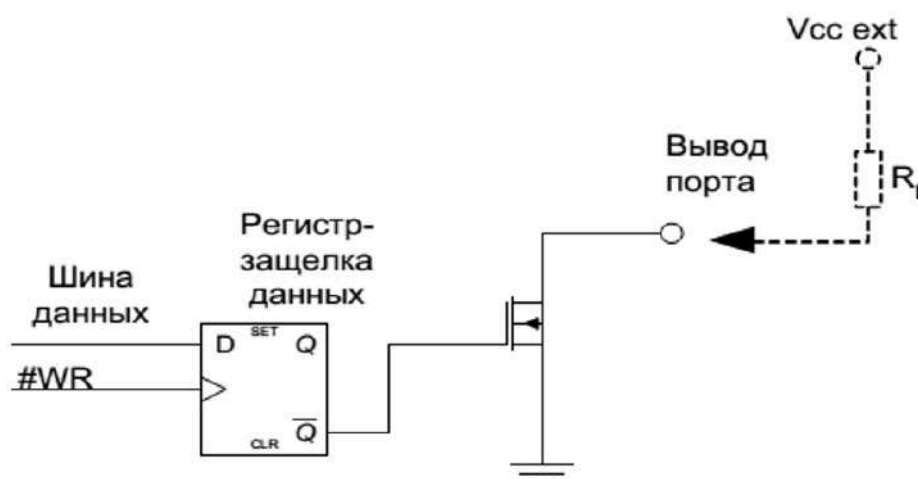


Рисунок 6 — Схема однонаправленного порта вывода с открытым выходом (коллектором или стоком)

Достоинства:

- внешнее напряжение питания нагрузки $V_{cc\ ext}$ может быть иным – большим или меньшим, чем питание устройства;
- необходимо управлять только одним регистром;
- простая схема;
- возможность без дополнительных схем организовать подключение на одну внешнюю шину несколько таких выходов.

Недостатки:

- требуется внешняя нагрузка;
- малый вытекающий ток, ограниченный внешним нагрузочным резистором.

1.6.5. Двухнаправленный одноканальный порт ввода/вывода

На рисунке 7 представлена схема двухнаправленного одноканального порта ввода/вывода. Данная схема характеризуется теми же преимуществами и недостатками, как и одноканальный порт вывода с одноканальной выходной схемой и внутренней нагрузкой. Данный порт уже умеет осуществлять передачу данных в обоих направлениях: на вход и на выход.

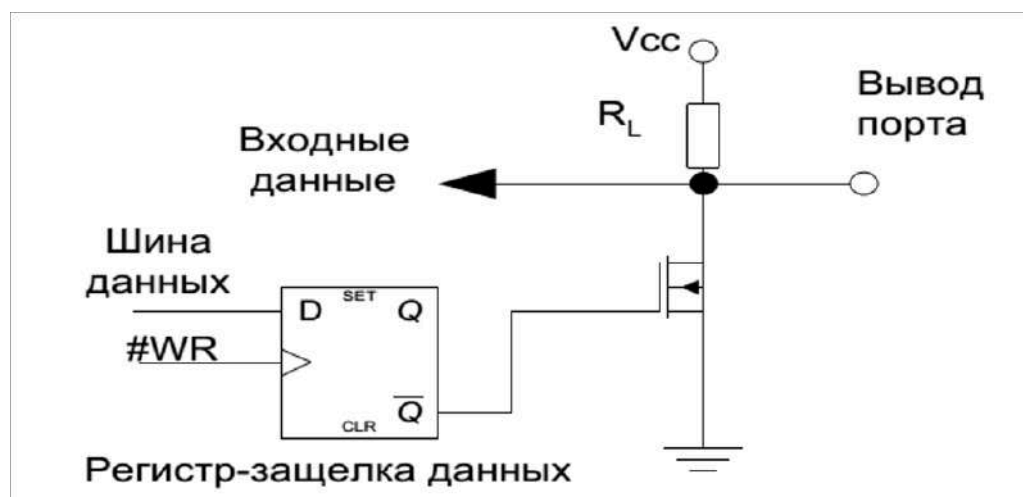


Рисунок 7 — Схема двухнаправленного одноканального порта ввода/вывода)

1.6.6. Двухнаправленный порт ввода/вывода с комплементарным выходным каскадом

На рисунке 8 представлена схема двухнаправленного порта ввода/вывода с комплементарным выходным каскадом. Данная схема характеризуется теми же преимуществами и недостатками, как и схема двухканального порта вывода.

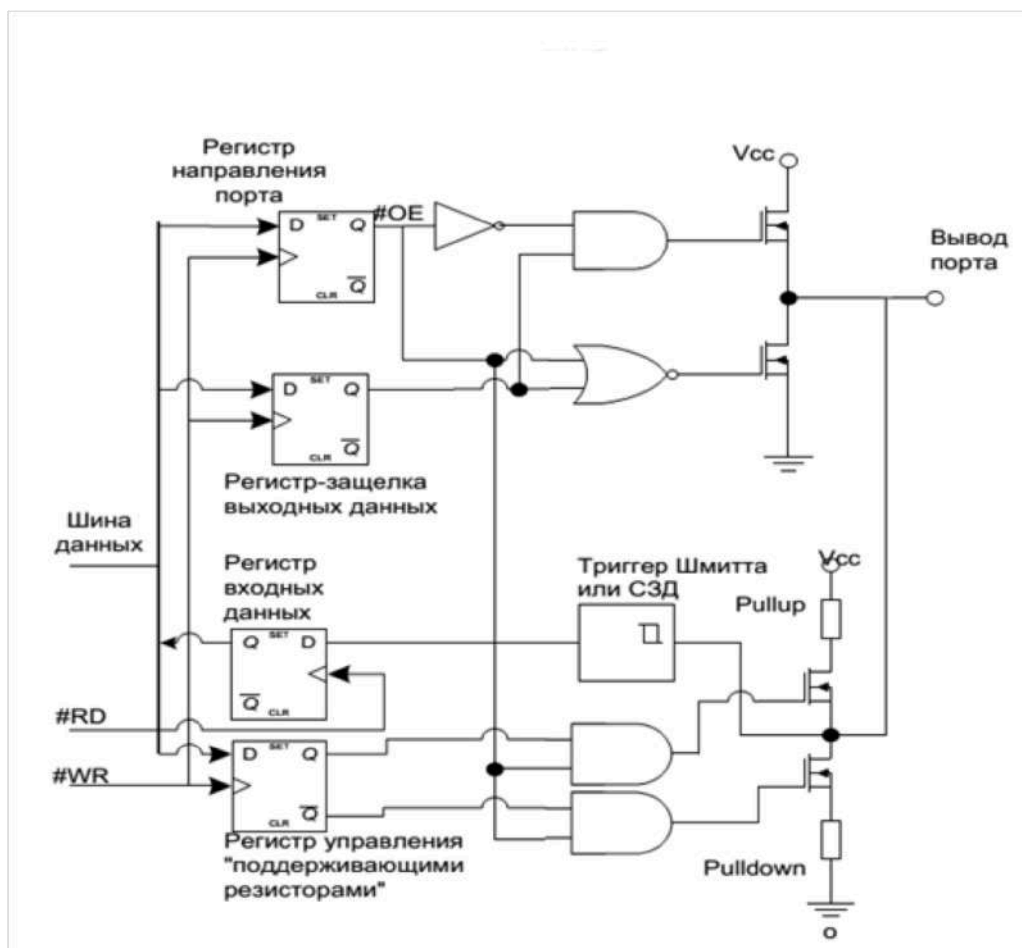


Рисунок 8 — Схема двунаправленного порта ввода/вывода с комплементарным выходным каскадом

1.7. Аналоговые порты ввода/вывода

Через аналоговые порты вводятся сигналы на вход АЦП или других аналоговых схем и выводятся выходные сигналы ЦАП или других аналоговых схем.

АЦП (аналого-цифровой преобразователь) – устройство, которое предназначено для ввода в процессор аналоговых сигналов с датчиков физических величин и преобразования значения напряжения этих сигналов в двоичный код с целью дальнейшей программной обработки.

ЦАП (цифро-аналоговый преобразователь) – устройство, которое предназначено для преобразования числа, представленного, как правило, в виде двоичного кода, в напряжение или ток, пропорциональные этому числу.

Характеристики АЦП:

- разрядность АЦП. Характеризует количество дискретных значений, которые преобразователь может выдать на выходе;

- разрешение АЦП. Минимальное изменение величины аналогового сигнала, которое может быть преобразовано данным АЦП. Обычно измеряется в вольтах, поскольку для большинства АЦП входным сигналом является электрическое напряжение;
- частота дискретизации;
- точность.

Характеристики ЦАП:

- разрядность ЦАП. Характеризует количество дискретных значений, которые преобразователь может выдать на выходе;
- динамический диапазон. Соотношение наибольшего и наименьшего сигналов, которые может воспроизвести ЦАП;
- частота дискретизации;
- точность.

2. Аппаратные интерфейсы

2.1. Общие сведения

Аппаратный интерфейс – это совокупность технических средств (сигнальных линий, соединителей, схем сопряжения) и алгоритмов обмена, обеспечивающих взаимодействие между устройствами вычислительной системы. Он определяет физические параметры сигналов, электрические характеристики линий связи, логические форматы данных и протоколы передачи.

2.1.1. Уровни описания интерфейсов

Аппаратные интерфейсы могут быть описаны на физическом или логическом уровне. Представьте, что физический уровень – это розетка и вилка (какие контакты, какое напряжение), а логический – правила, кто когда говорит и как понимать друг друга.

На физическом уровне определяются:

- набор сигнальных линий (шины данных, адреса, управления);
- типы соединительных элементов (разъёмы, контакты);
- характеристики сигналов (уровни напряжений, импеданс, крутизна фронтов);
- нагрузочная способность линий связи;
- физическая топология (звезда, шина, кольцо);
- максимальная длина линий связи;
- требования к помехоустойчивости и заземлению.

На логическом уровне определяются:

- формат пакетов данных (размеры полей, порядок битов);
- логическая топология (способ адресации, маршрутизации);
- протокол передачи данных (последовательность действий, квитирование);
- система адресации (типы адресов, широковещательные рассылки).

2.1.2. Основные характеристики

Основные характеристики аппаратных интерфейсов:

- скорость передачи данных (пропускная способность) – измеряется в бит/с или байт/с; термин “бод” технически корректен только при двоичном кодировании, но часто

используется как синоним. Для последовательных интерфейсов скорость может варьироваться от нескольких килобит до десятков гигабит в секунду;

- способ передачи слова данных (параллельный, последовательный) – параллельный (одновременно несколько бит по разным линиям) или последовательный (бит за битом по одной или двум линиям);
- протяженность линий связи – максимальное расстояние между устройствами без применения повторителей. Для разных скоростей это расстояние может меняться (например, для CAN – 40 м при 1 Мбит/с и 1 км при 50 кбит/с);
- количество подключаемых устройств – максимальное число узлов, которое может быть объединено в одну сеть;
- топология – способ соединения устройств (звезда, общая шина, кольцо);
- наличие синхронизации (синхронный, асинхронный) – синхронные интерфейсы используют отдельную тактовую линию, асинхронные – выделяют тактовую информацию из потока данных;
- возможные направления передачи данных (симплексный, полудуплексный, дуплексный) – симплекс (однаправленный), полудуплекс (попеременная двусторонняя передача), дуплекс (одновременная двусторонняя).

2.1.3. Типы передаваемых данных

По функциональному назначению различают следующие виды передаваемых данных:

- прикладные данные – собственно информация, которой обмениваются устройства (измеренные значения, команды, файлы);
- адрес – идентификатор устройства или области памяти, с которой производится обмен;
- данные управления – служебные сигналы, управляющие потоком, подтверждения приёма, запросы прерываний.

Различные типы данных могут передаваться как на физическом, так и на логическом уровне. На физическом уровне для разных типов данных выделяют отдельные сигнальные линии. На логическом уровне для разных

типов данных выделяют специальные поля на уровне пакетов передачи данных.

2.1.4. Способы подключения устройств

Топология определяет способ физического соединения узлов интерфейса. Наиболее распространённые схемы приведены на рисунке 9. Общая шина — все устройства подключаются к одной линии (или набору линий). Характеризуется простотой реализации и возможностью расширения, однако при одновременной передаче возможны коллизии. Звезда — каждое устройство соединяется с центральным узлом (концентратором) отдельной линией. Обеспечивает высокую помехозащищённость и легкость диагностики, но требует большего числа линий. Кольцо — устройства соединяются последовательно, образуя замкнутую цепь. Данные передаются от узла к узлу.

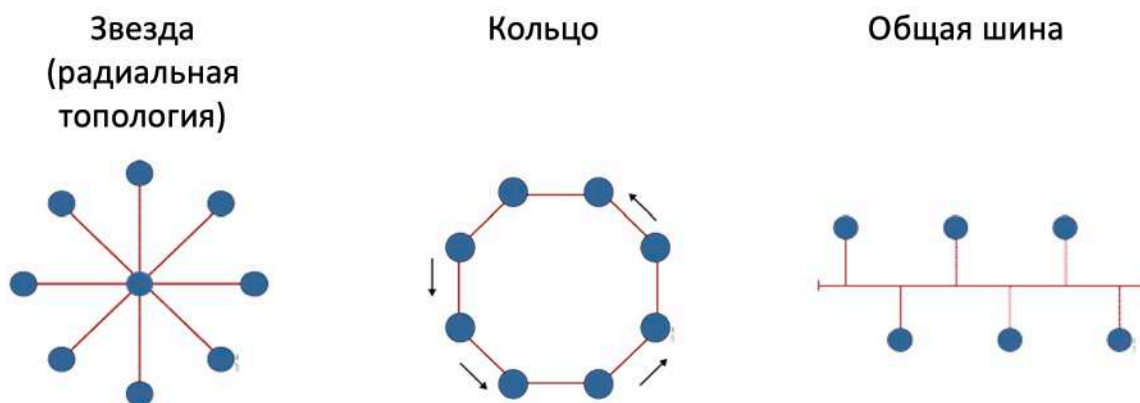


Рисунок 9 — Основные схемы подключения устройств

2.1.5. Виды синхронизации

Синхронизация определяет, каким образом передатчик и приёмник согласуют моменты выдачи и приёма битов. Асинхронный интерфейс не имеет отдельной линии тактирования (рисунок 10). Каждый байт обрамляется стартовым и стоповым битами, что позволяет приемнику синхронизироваться в начале передачи. Примеры: RS-232, USB, SATA. Синхронный интерфейс использует отдельную линию для тактового сигнала (SCK), который задаёт темп передачи (рисунок 11). Данные передаются непрерывно пакетами. Примеры: SPI, I²C.

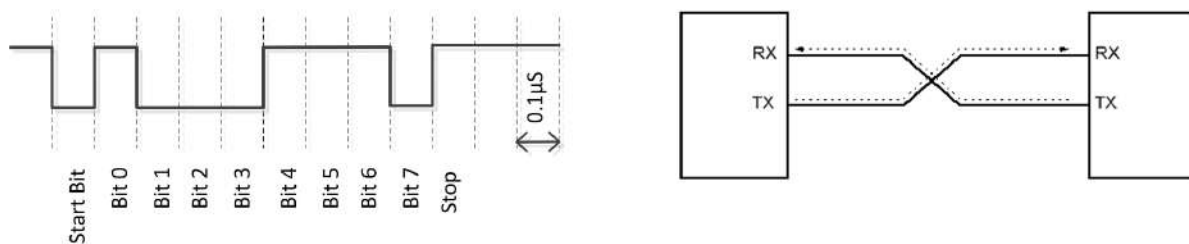


Рисунок 10 — Асинхронный интерфейс

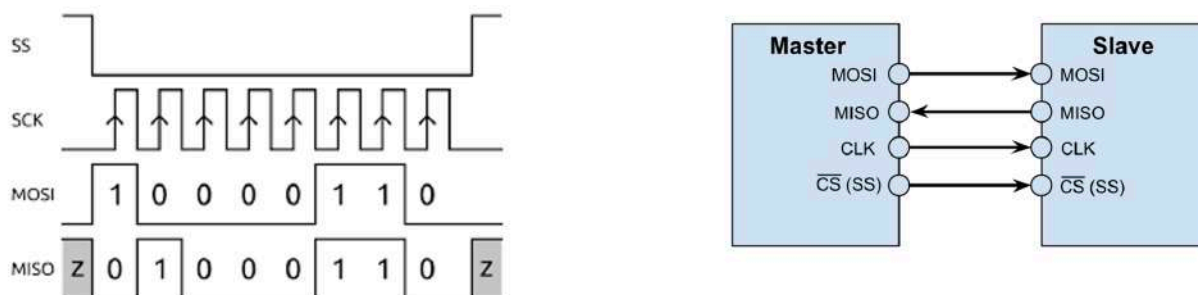


Рисунок 11 — Синхронный интерфейс

2.2. Интерфейс I2C

I²C – последовательная двунаправленная шина, разработанная компанией Philips (ныне NXP) для связи интегральных схем внутри устройства. Использует всего две линии: SDA (данные) и SCL (тактовая частота).

2.2.1. Физический уровень

Линии SDA и SCL являются двунаправленными и требуют подтяжки к напряжению питания через резисторы. Все устройства подключаются параллельно к этим линиям (рисунок 12). Каждому устройству присваивается уникальный 7-битный (или 10-битный) адрес. Интерфейс поддерживает несколько ведущих (master) устройств.

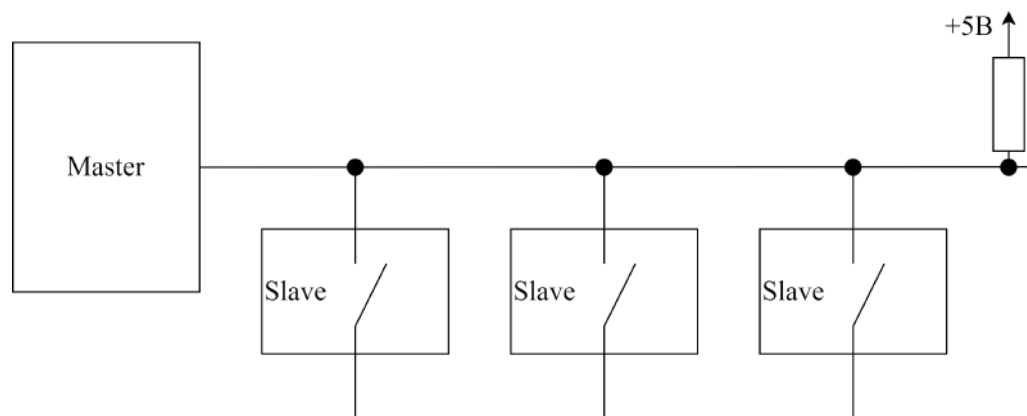


Рисунок 12 — Подключение по I²C ведомых по схеме монтажного И

2.2.2. Протокол передачи данных

Ведущий (master) всегда начинает обмен, формируя условие START (рисунок 13): линия SDA переходит из высокого уровня в низкий при высоком уровне SCL. После этого все ведомые (slave) начинают слушать шину.

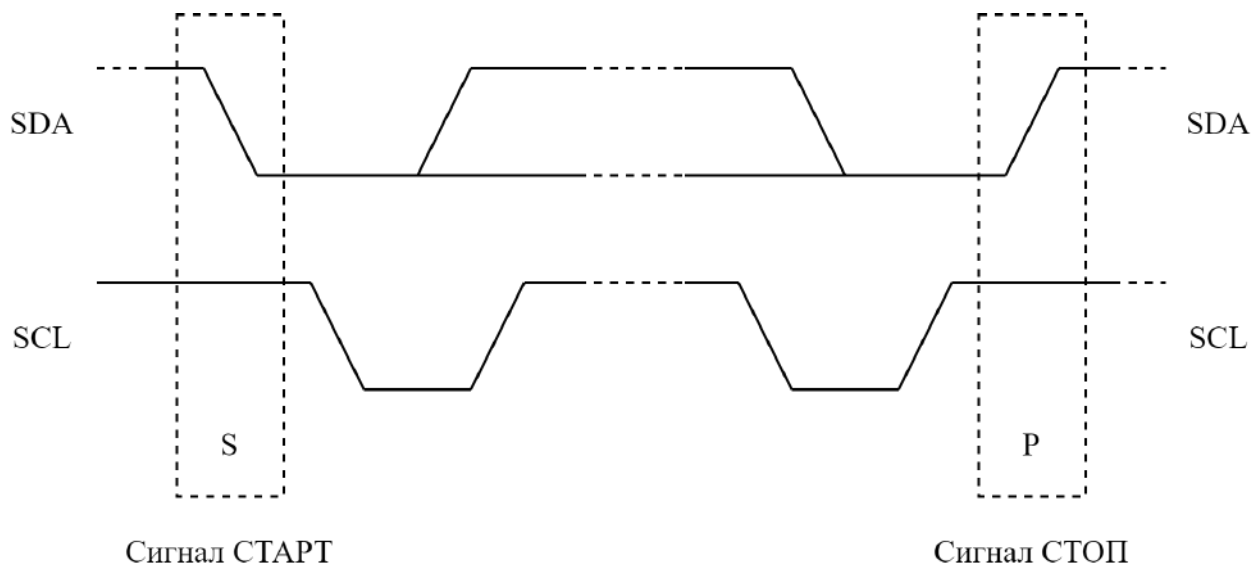


Рисунок 13 — Состояния START и STOP

Данные на SDA устанавливаются, пока SCL находится в низком уровне, а фиксируются при переходе SCL в высокий уровень. Передача всегда идёт байтами. Каждый байт сопровождается битом подтверждения ACK (низкий уровень на SDA), который выдаёт принимающая сторона. Если подтверждения нет (NACK), ведущий может прекратить передачу.

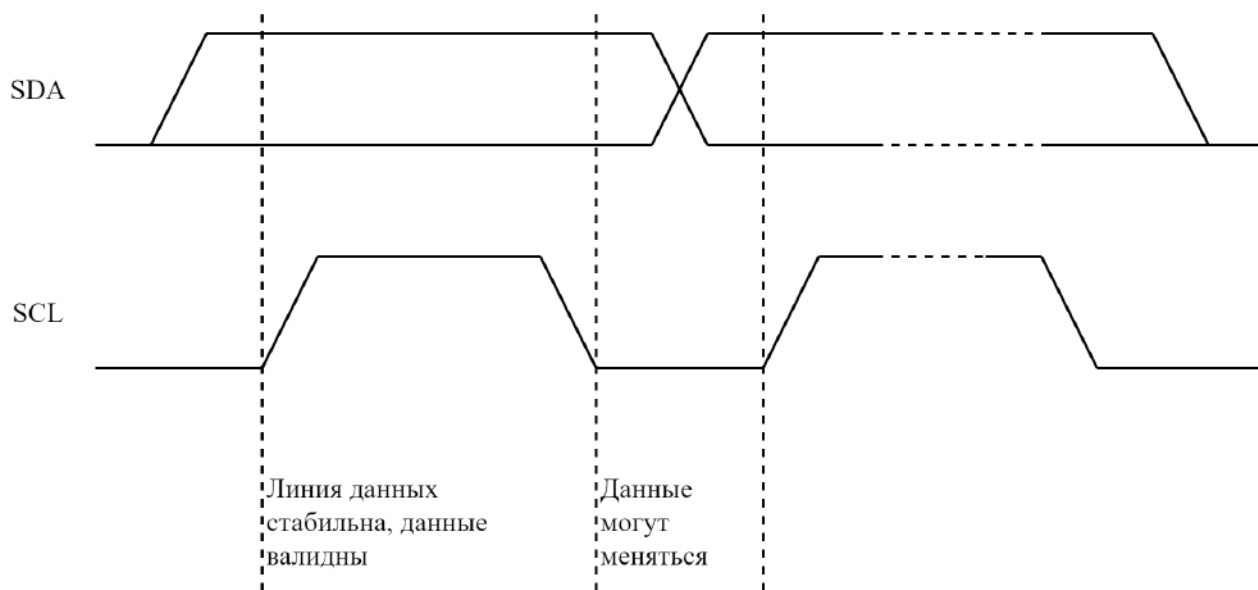


Рисунок 14 — Пересылка бита по шине I²C

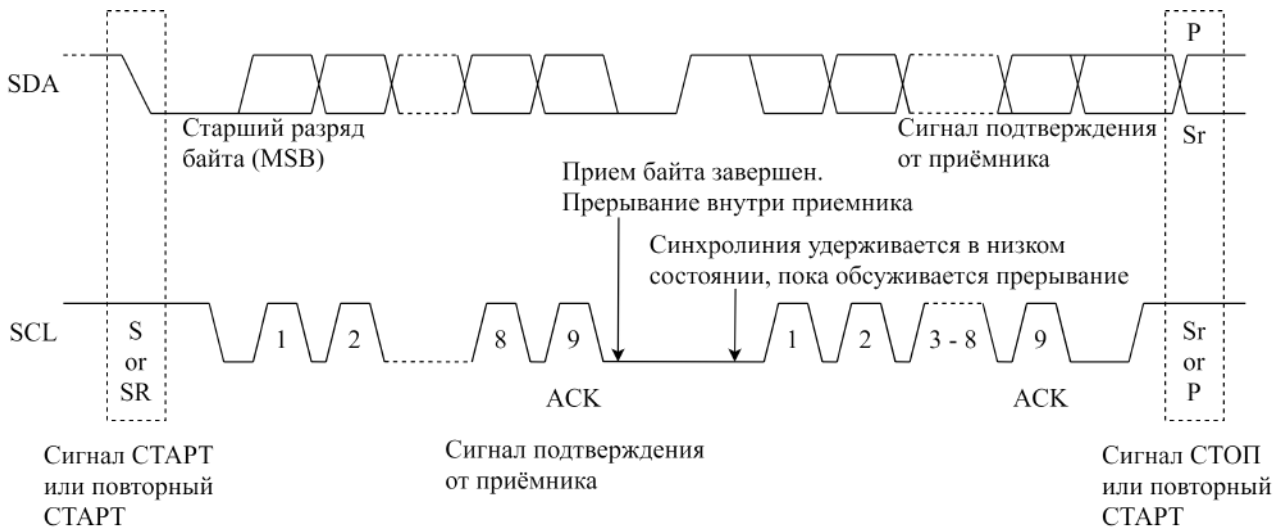


Рисунок 15 — Пересылка байта по шине I²C

Первый байт после START – это адресный (рисунок 16). Он содержит 7-битный адрес ведомого и бит направления:

- 0 – ведущий будет писать данные в ведомого;
- 1 – ведущий собирается читать данные от ведомого.



Рисунок 16 — Адресация в шине I²C

На рисунке 17 представлена операция записи данных по интерфейсу I²C. Ведущий передаёт адресный байт с битом записи, затем один или несколько байт данных. Каждый байт подтверждается ведомым. В конце ведущий формирует STOP.

На рисунке 18 представлена операция чтения данных по интерфейсу I²C. Ведущий отправляет адресный байт с битом чтения, после чего сам переходит в режим приёма. Ведомый выдаёт запрошенные байты, а ведущий подтверждает их приём (ACK). Когда нужное количество байт прочитано, ведущий выдаёт NACK и STOP.

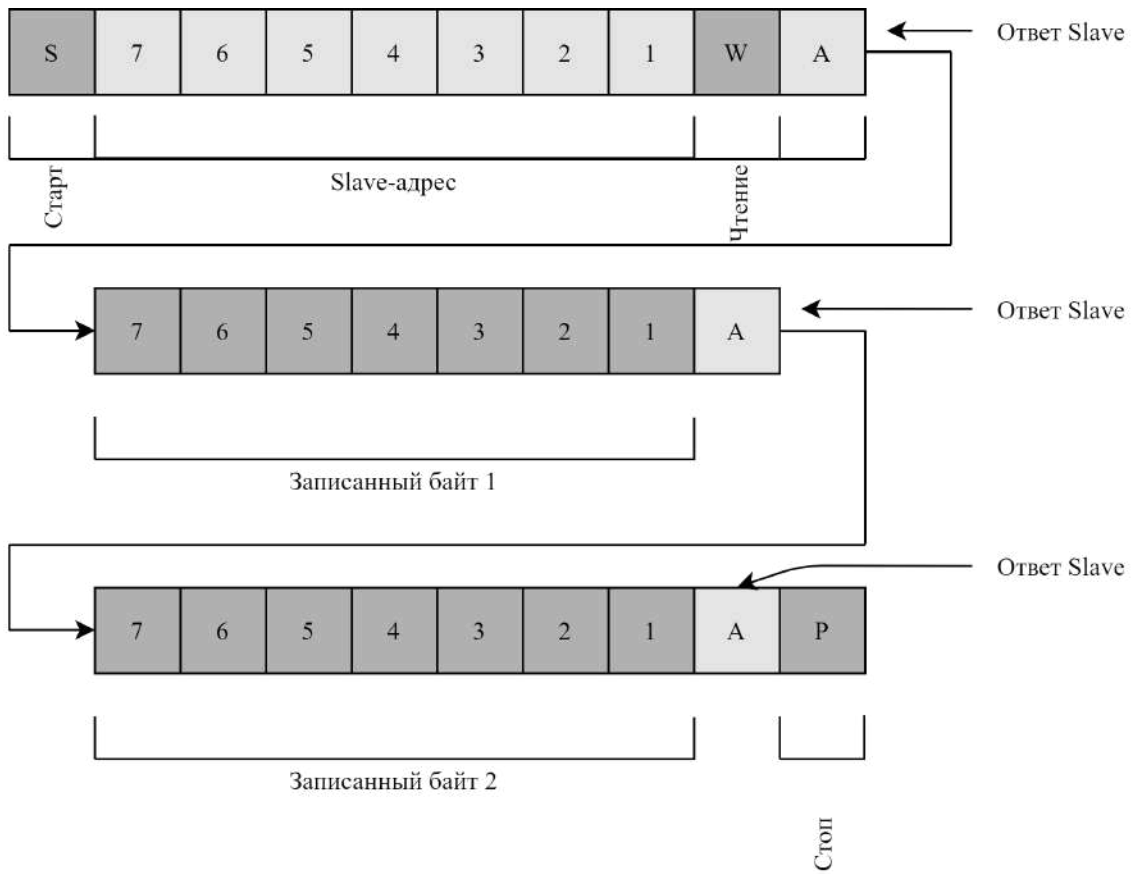


Рисунок 17 — Операция записи, формат данных

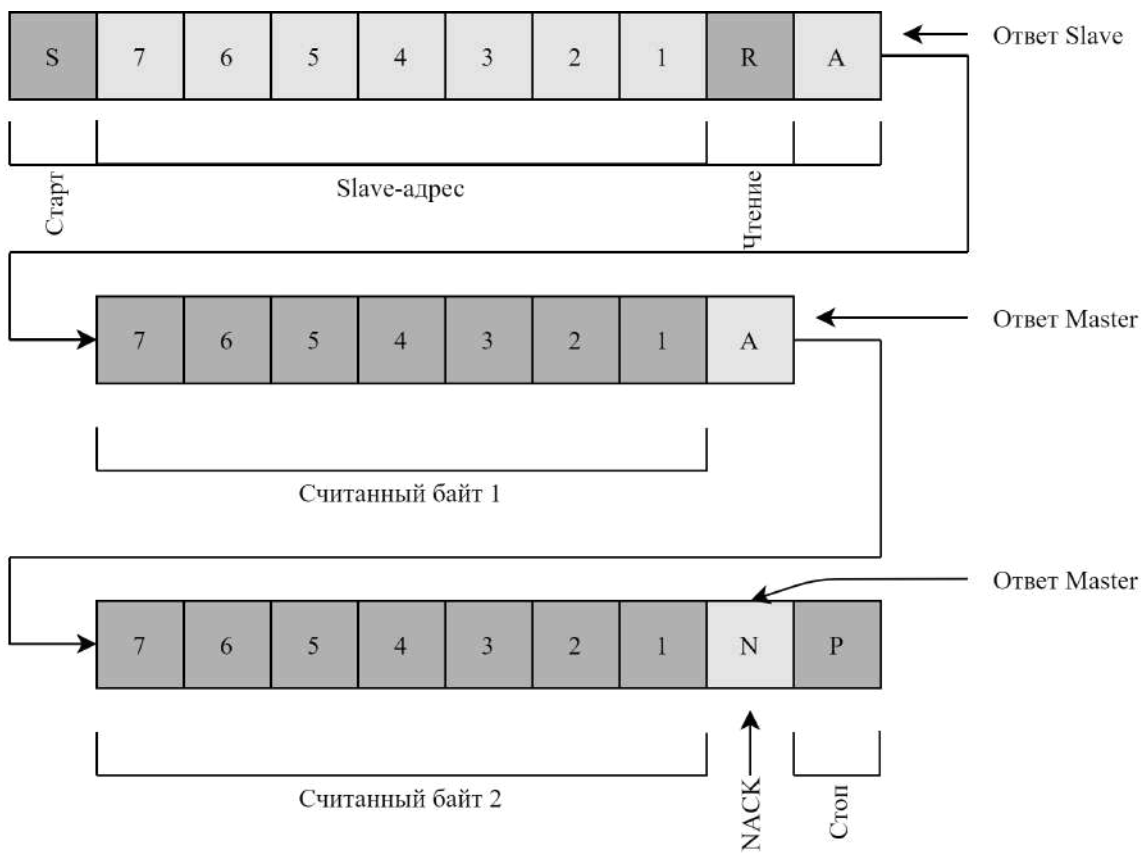


Рисунок 18 — Операция чтения по интерфейсу I2C

I²C – это протокол с подтверждением, где каждое действие начинается со START, затем идёт адрес, а потом поток данных. Простота (всего 2 провода) и встроенные механизмы арбитража делают его идеальным для внутриплатных коммуникаций.

2.2.3. Арбитраж

I²C допускает наличие нескольких ведущих на одной шине. Арбитраж осуществляется на уровне сигналов: если два ведущих пытаются выставить разные уровни на SDA, тот, который пытается установить низкий уровень, «выигрывает», а проигравший отключается и переходит в режим ведомого. Арбитраж не приводит к потере данных.

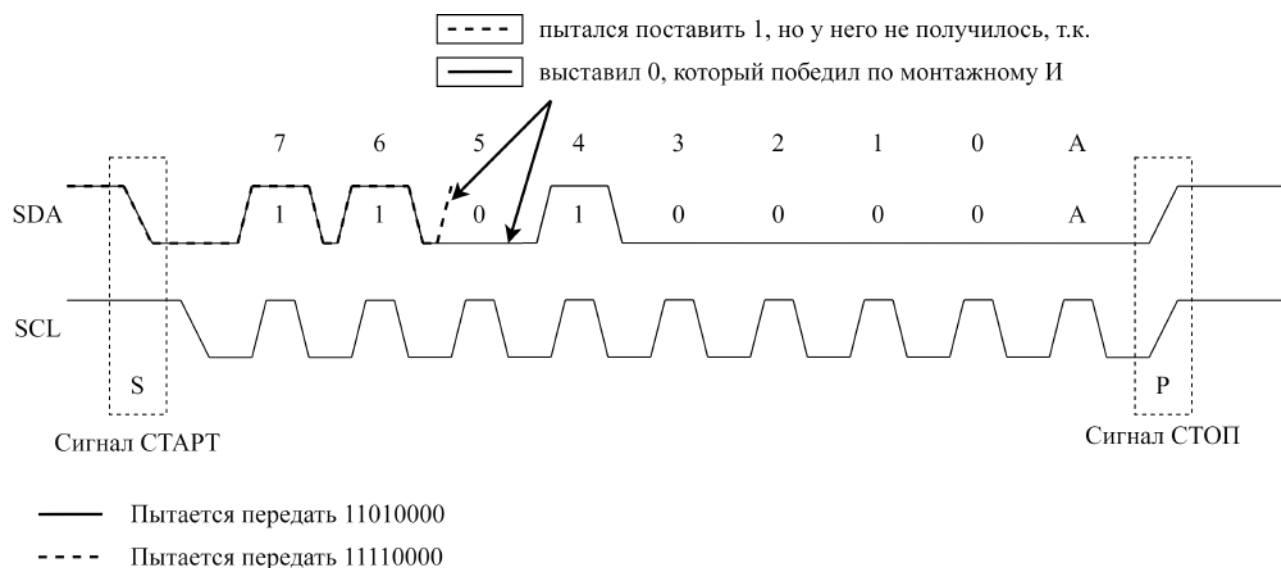


Рисунок 19 — Арбитраж между двумя ведущими

На диаграмме 19 показано, как ведущий, выставивший «0», сохраняет управление, а ведущий, выставивший «1», прекращает передачу.

2.2.4. Сферы применения, преимущества и недостатки

I²C широко используется во встроенных системах благодаря своей простоте и экономичности. Области применения:

- доступ к модулям памяти (EEPROM);
- настройка ЦАП/АЦП;
- считывание данных с датчиков (температуры, влажности, давления);
- управление системными компонентами (вентиляторы, источники питания);
- обмен между микроконтроллерами.

Преимущества:

- требуется всего два проводника для подключения множества устройств;
- возможна одновременная работа нескольких ведущих устройств;
- встроенная адресация и подтверждение приёма.

Недостатки:

- относительно невысокая скорость (до 5 Мбит/с в режиме Fast-Mode Plus);
- ограниченная длина шины (обычно не более нескольких метров: при стандартной нагрузке и скорости 100 кГц – до нескольких метров; при 400 кГц – не более 30–50 см на плате);
- сложность работы с горячей заменой устройств.

Если вам нужно опросить 5 датчиков температуры по двум проводам – I2C идеален. Но для дисплея с частотой обновления 60 Гц он не подойдёт. Как написано выше, у I2C есть недостатки – невысокая скорость и полудуплекс. Если нужна полнодуплексная передача на высокой скорости, используют SPI. Рассмотрим его.

2.3. Интерфейс SPI

SPI – синхронный последовательный интерфейс, разработанный фирмой Motorola. Предназначен для соединения микроконтроллеров с периферийными устройствами (датчиками, памятью, дисплеями) в пределах одной платы.

2.3.1. Физический уровень

SPI использует четыре сигнальные линии (рисунок 20):

- MOSI (Master Output / Slave Input) – передача данных от ведущего к ведомому;
- MISO (Master Input / Slave Output) – передача данных от ведомого к ведущему;
- SCK (Serial Clock) – тактовый сигнал, генерируемый ведущим;
- SS (Slave Select) – выбор ведомого (активный низкий уровень).

Каждое устройство может работать в режиме ведущего (Master) или ведомого (Slave). На шине может быть только один ведущий в каждый момент времени.

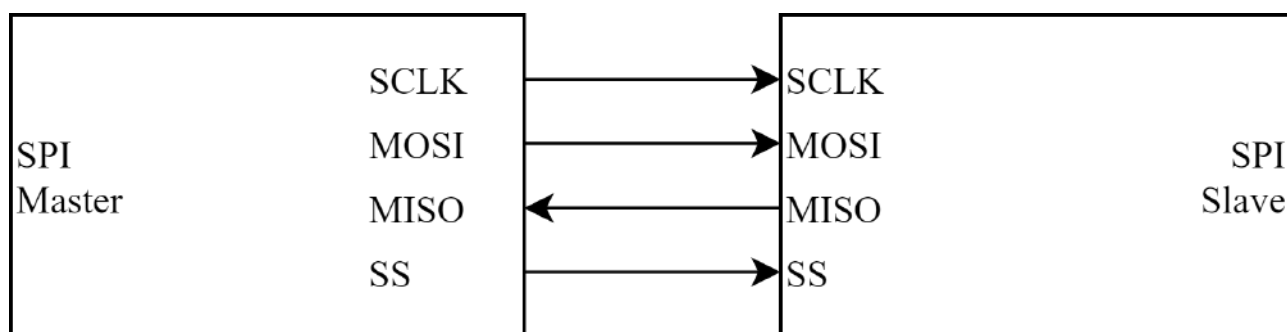


Рисунок 20 — Интерфейс SPI

2.3.2. Протокол передачи данных

Передача инициируется ведущим, который устанавливает линию SS в низкий уровень для выбранного ведомого и начинает выдавать тактовые импульсы на SCK. Данные передаются одновременно в обоих направлениях (полный дуплекс). Длина передаваемого слова не ограничена 8 битами, можно передавать любое количество бит, но обычно кратно 8.

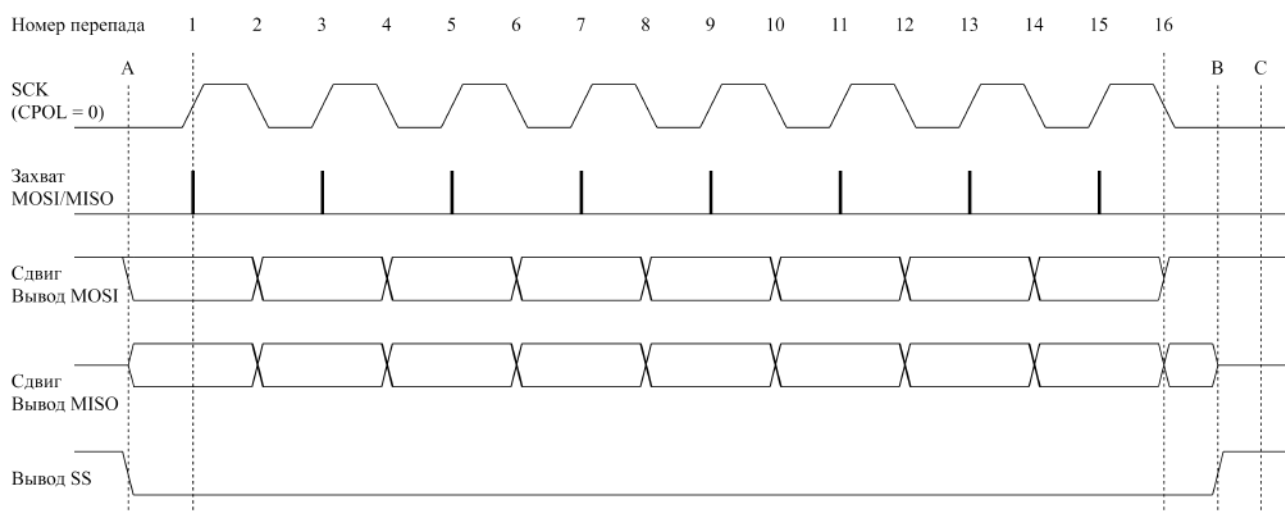


Рисунок 21 — Протокол передачи данных SPI

На временной диаграмме 21 показаны линии SS, SCK, MOSI и MISO. Данные на MOSI изменяются по одному фронту SCK, а фиксируются по другому. MISO синхронизируется аналогично.

2.3.3. Режимы работы (CPOL и CPHA)

SPI имеет четыре режима (таблица 1), определяемых двумя параметрами:

- CPOL (Clock Polarity) – полярность тактового сигнала в состоянии покоя;
- CPHA (Clock Phase) – фаза, указывающая, по какому фронту производится выборка данных.

Таблица 1 — Режимы SPI: Набор временных диаграмм для четырёх режимов с указанием момента выборки данных

Режим	CPOL	CPHA	Описание
0	0	0	SCK в покое низкий, выборка по переднему фронту
1	0	1	SCK в покое низкий, выборка по заднему фронту
2	1	0	SCK в покое высокий, выборка по переднему фронту
3	1	1	SCK в покое высокий, выборка по заднему фронту

2.3.4. Схемы подключения ведомых

Существует два основных способа подключения нескольких ведомых к одному ведущему (рисунок 22-23):

- Радиальная структура – каждое ведомое имеет отдельную линию SS. Ведущий активирует нужное устройство
- Кольцевая структура (каскадная) – все ведомые соединены последовательно: MOSI ведущего → MOSI ведомого 1, MISO ведомого 1 → MOSI ведомого 2 и т.д., последний MISO возвращается на MISO ведущего. При такой топологии данные передаются по цепочке

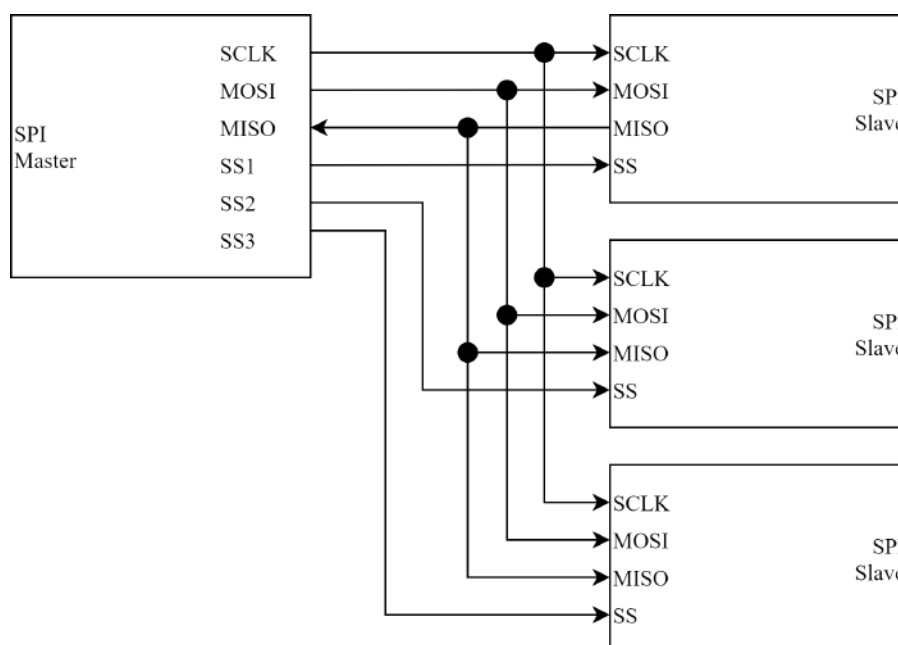


Рисунок 22 — Радиальная структура связи SPI

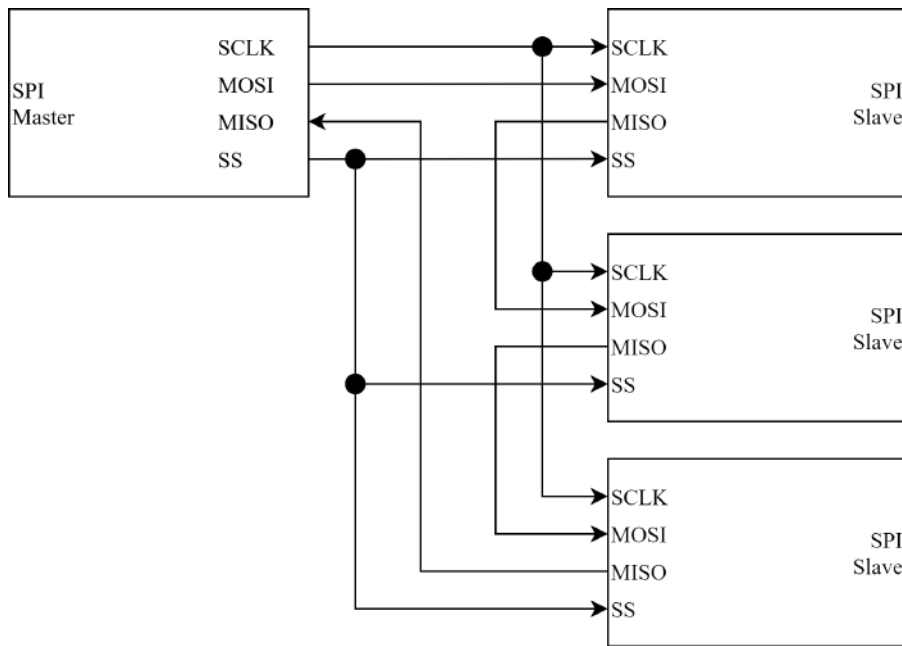


Рисунок 23 — Кольцевая структура связи SPI

2.3.5. Регистры контроллера SPI

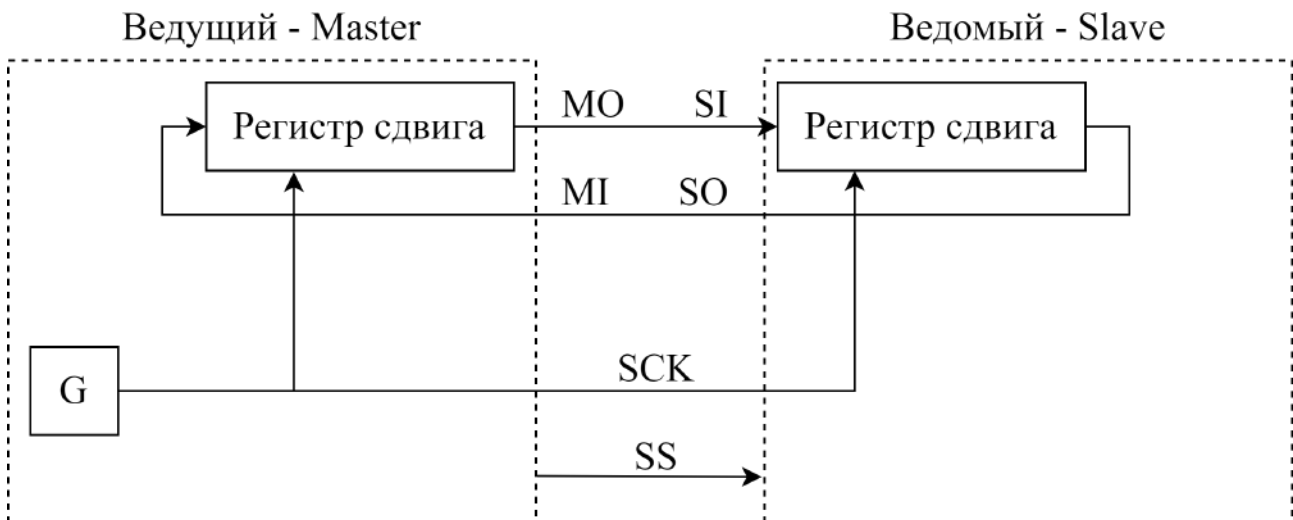


Рисунок 24 — Схема контроллера SPI

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
	SPIE	SPE	DORD	MSTR	CPOL	CPHA	SPR1	SPR0
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W

Рисунок 25 — Регистры контроллера SPI

С программной точки зрения работа с контроллером SPI сводится к управлению несколькими регистрами, отображёнными в адресное пространство (рисунок 24-25):

- регистр управления (SPCR) – задаёт режимы (ведущий/ ведомое, CPOL, CPHA, порядок битов, частоту SCK, разрешение прерываний);
- регистр состояния (SPSR) – содержит флаги завершения передачи, коллизий и т.д.;
- регистр данных (SPDR) – при записи в него данных начинается передача, при чтении – получение принятого байта.

2.3.6. Алгоритм передачи данных

Типовой алгоритм для ведущего:

1. Выбрать ведомое устройство (установить $SS = 0$).
2. Записать байт данных в регистр данных (SPDR) – инициирует передачу.
3. Ожидать установки флага завершения (SPIF) в регистре состояния.
4. При необходимости прочитать принятый байт из SPDR.
5. Повторить шаги 2–4 для всех байтов.
6. Отключить ведомое ($SS = 1$).

2.3.7. Преимущества и недостатки

Преимущества:

- полнодуплексная передача данных;
- гибкость длины пакета (не ограничена 8 битами);
- простота аппаратной реализации;
- высокая скорость (десятки Мбит/с).

Недостатки:

- больше выводов, чем у I²C;
- отсутствие подтверждения приёма (ведущий не знает, приняты ли данные);
- нет встроенного обнаружения ошибок;
- ведомое не может управлять потоком данных (ведомое может принудительно задержать SCK (только если поддерживается clock stretching, но это редкость в SPI).

Ведущий отправил байт, но не знает, дошёл ли он. В I2C есть бит АСК, а в SPI вы должны сами придумать протокол подтверждения, если это важно.

SPI отлично работает внутри платы, но для связи между устройствами на расстоянии до 15 метров чаще применяют асинхронный интерфейс RS-232.

2.4. Интерфейс RS-232

RS-232 (Recommended Standard 232) – стандарт последовательного асинхронного интерфейса для соединения оконечного оборудования (DTE) с аппаратурой передачи данных (DCE). Несмотря на свой «возраст», широко применяется для отладки, управления и связи с промышленными устройствами.

2.4.1. Физический уровень

В классической реализации RS-232 использует 9- или 25-контактный разъём (DB-9, DB-25) с уровнями сигналов $\pm 3... \pm 15$ В (логический «0» – положительное напряжение, «1» – отрицательное). Для современных применений часто используют логические уровни 3,3 В (CMOS) с сохранением протокола.

Основные сигналы:

- TXD – передаваемые данные (от DTE к DCE);
- RXD – принимаемые данные (от DCE к DTE);
- RTS – запрос передачи (DTE → DCE);
- CTS – готовность к приёму (DCE → DTE);
- DTR, DSR – управление готовностью;
- GND – общий провод.

2.4.2. Протокол передачи данных

Протокол проиллюстрирован на рисунках 26, 27. RS-232 является асинхронным: каждый байт данных обрамляется стартовым и стоповым битами. В классическом RS-232 передача осуществляется младшим битом вперёд (LSB first). Между байтами может быть произвольная пауза.

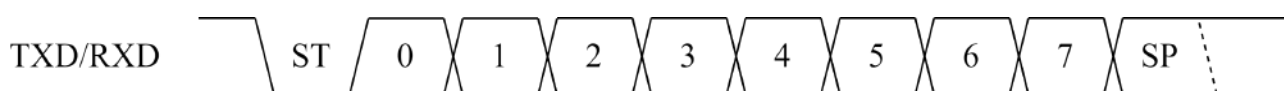


Рисунок 26 — Общий вид протокола передачи байта данных

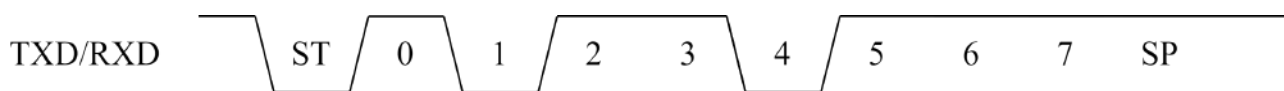


Рисунок 27 — Пример передачи байта 10110111

2.4.3. Настраиваемые параметры

Для корректной связи приёмник и передатчик должны быть согласованы по следующим параметрам:

- скорость обмена (бод): 300, 1200, 2400, 4800, 9600, 19200, 38400, 57600, 115200, 230400 и выше;
- длина данных: 4–8 бит;
- контроль чётности: чёт, нечёт, отсутствует;
- длина стоп-бита: 1, 1.5, 2 бита;
- аппаратный контроль потока (RTS/CTS): включён/выключен.

2.4.4. Применение

В настоящее время RS-232 часто используется для:

- связи с GSM/GPS-модулями;
- отладки встроенных систем (консоль отладки);
- подключения промышленных датчиков и модемов;
- управления Wi-Fi/ZigBee-модулями на низком уровне.

Несмотря на появление более скоростных интерфейсов, RS-232 остаётся востребованным благодаря простоте, надёжности и возможности работы на значительных расстояниях (до 15 м без повторителей).

2.5. Универсальная последовательная шина USB (Universal Serial Bus)

Интерфейс USB был разработан в середине 1990-х годов лидерами компьютерной индустрии для стандартизации подключения периферийных устройств к персональному компьютеру. Его ключевая особенность — поддержка технологии “plug and play” (“включи и играй”) и “hot swap” (“горячая замена”), позволяющая подключать и отключать устройства без выключения компьютера.

2.5.1. Архитектура и топология

Топология USB строго иерархическая и представляет собой “звезду” или “дерево” с одним корнем. В основе архитектуры лежит хост (host) — контроллер USB, встроенный в компьютерное устройство. Хост управляет всей шиной, инициирует все транзакции и является единственным ведущим

(Master) устройством. Хост имеет встроенный корневой концентратор (Root Hub), который предоставляет физические порты для подключения. К этим портам можно подключать как конечные устройства (например, мышь, флешку), так и внешние концентраторы (Hubs), которые позволяют увеличить количество доступных портов. Такая архитектура позволяет подключать до 127 физических устройств к одному контроллеру .

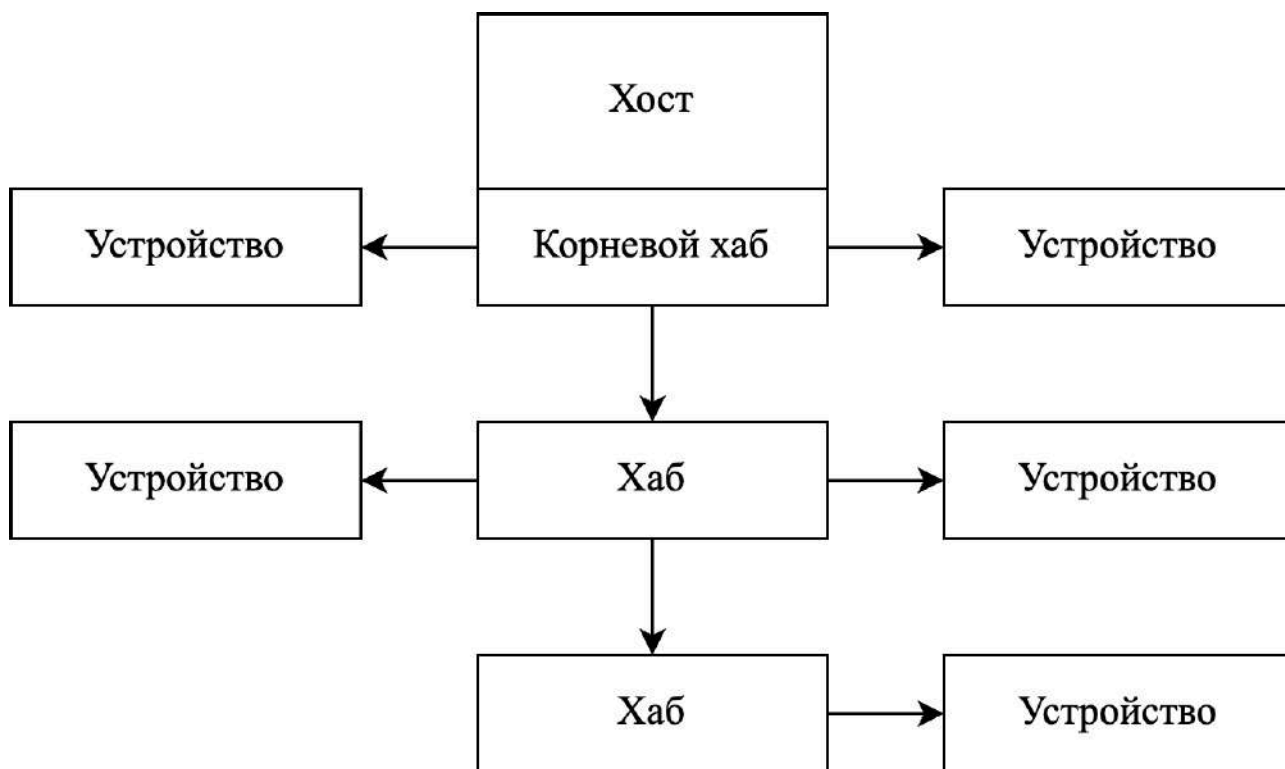


Рисунок 28 — Топология подключения устройств USB

На схеме 28 изображен хост с корневым концентратором, к которому последовательно подключены несколько внешних концентраторов и конечных устройств, иллюстрируя древовидную структуру.

2.5.2. Физический уровень и кабели

Для передачи сигналов и питания используется четырехпроводной кабель:

- VBUS (+5V) — питание периферийных устройств;
- GND — общий провод;
- D+ и D- — дифференциальная пара для передачи данных.

Использование дифференциальной пары обеспечивает высокую помехоустойчивость, а шина питания позволяет питать маломощные устройства (клавиатуры, мыши, флешки) без дополнительного адаптера питания. Максимальная длина кабеля ограничена (до 5 метров), что обусловлено временем распространения сигнала и затуханием.

2.5.3. Эволюция стандартов и скорости

За время своего существования стандарт USB прошел несколько этапов развития, значительно увеличив пропускную способность:

- USB 1.1 — определял два режима работы: Low-speed (1.5 Мбит/с) для клавиатур и мышей и Full-speed (12 Мбит/с) для более сложных устройств;
- USB 2.0 (Hi-Speed) — повысил скорость до 480 Мбит/с, что позволило подключать внешние жесткие диски и видеозахват;
- USB 3.x (SuperSpeed) — скорость до 5 Гбит/с и выше. Для достижения такой скорости используются дополнительные линии данных, а сами разъемы стали синими для маркировки.

2.5.4. Протокол передачи и типы транзакций

Поскольку все транзакции на шине USB иницируются хостом, все устройства являются ведомыми (Slaves). Хост опрашивает устройства, отправляя специальные пакеты-маркеры. Данные передаются в виде пакетов, а временной интервал разбит на кадры (frames). Для разных типов задач стандарт определяет четыре типа транзакций:

1. Управляющие передачи (Control Transfers) — используются для конфигурации устройств при подключении, отправки команд и получения статуса.
2. Массовые передачи (Bulk Transfers) — предназначены для устройств, которым важна достоверность данных, а не скорость доставки (принтеры, сканеры). Протокол гарантирует доставку с помощью механизма повторной передачи.
3. Передачи прерываний (Interrupt Transfers) — несмотря на название, это не аппаратные прерывания, а регулярные опросы хоста для устройств, которым нужна быстрая реакция (клавиатура, мышь).
4. Изохронные передачи (Isochronous Transfers) — используются для потоковой передачи аудио и видео. Важна скорость, а не точность (потеря одного пакета не страшна). Контроль ошибок и повторная передача отсутствуют.

3. Проводные линии связи

3.1. Общие сведения о проводных линиях связи

Проводные линии связи используются в системах ввода/вывода для передачи данных между устройствами вычислительной системы, контроллерами, датчиками и исполнительными механизмами. Передача данных осуществляется по физическим линиям связи с использованием электрических или оптических сигналов.

Передача данных между устройствами может осуществляться с помощью различных интерфейсов, которые определяют физические линии связи, параметры сигналов, протокол передачи данных и правила взаимодействия устройств. На физическом уровне интерфейса определяются набор сигнальных линий, тип соединительных элементов, характеристики сигналов, максимальная длина линий связи и требования к помехоустойчивости.

В проводных линиях связи могут передаваться **аналоговые** и **цифровые сигналы**. Аналоговый сигнал представляет собой непрерывное изменение во времени физической величины (например, напряжения или тока). Цифровой сигнал представляет собой дискретные уровни напряжения, соответствующие логическим значениям. Передача сигналов может осуществляться по одиночным проводникам, дифференциальным линиям или оптоволоконным кабелям.

При проектировании проводных линий связи необходимо учитывать основные характеристики линий передачи данных:

- помехоустойчивость;
- скорость передачи данных;
- допустимую длину линии связи;
- энергопотребление;
- стоимость реализации линии связи.

Эти параметры определяют выбор типа кабеля, способа передачи сигнала и используемого интерфейса в системе ввода/вывода.

3.2. Передача аналоговых сигналов

Аналоговый сигнал (рисунок 29) представляет собой непрерывное изменение во времени физической величины, например напряжения, тока, температуры или амплитуды звука. В системах ввода/вывода аналоговые сигналы используются при работе с датчиками, аудио- и видеосигналами и другими устройствами, формирующими непрерывные сигналы.

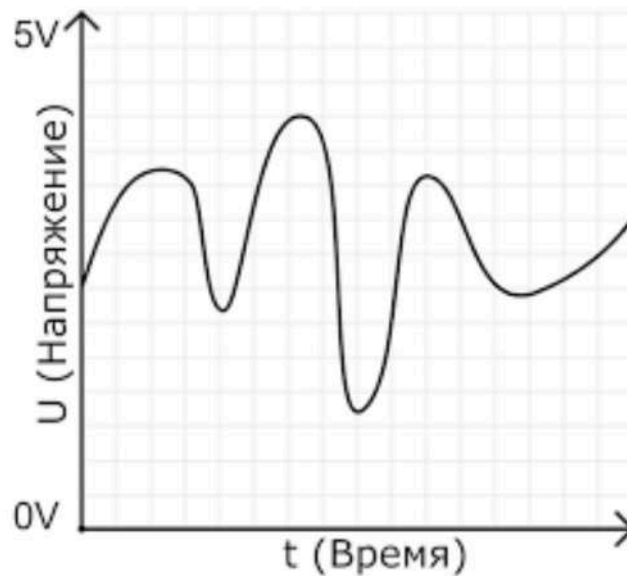


Рисунок 29 — Аналоговый сигнал

Передача аналоговых сигналов по проводным линиям связи осуществляется с использованием различных типов кабелей. Основные типы кабелей, применяемых для передачи аналоговых сигналов:

- одиночный проводник;
- дифференциальная пара;
- оптоволокно.

При передаче аналогового сигнала часто используется **модуляция** (рисунок 30, 31). В этом случае информационный сигнал накладывается на несущий сигнал, в результате чего формируется модулированный сигнал, передаваемый по линии связи.

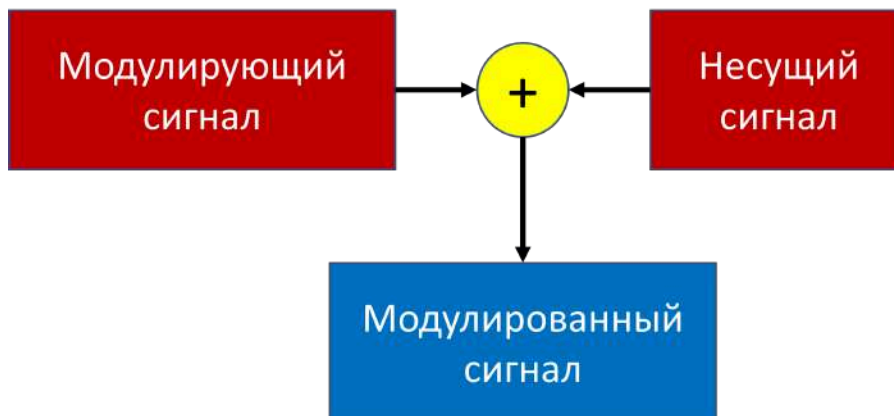


Рисунок 30 — Формирование модулированного сигнала при передаче аналогового сигнала

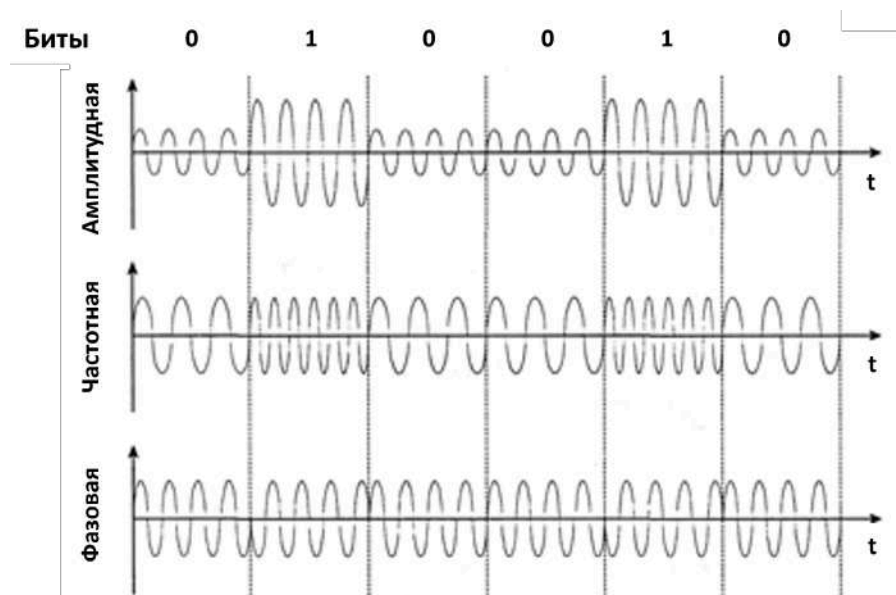


Рисунок 31 — Примеры модуляций аналогового сигнала

Примером передачи аналоговых сигналов является передача видеосигнала в интерфейсе VGA. В VGA-кабеле аналоговые сигналы передаются по отдельным проводникам, каждый из которых передаёт свою составляющую видеосигнала.

В интерфейсе VGA изображение формируется тремя аналоговыми сигналами:

- красный (Red);
- зелёный (Green);
- синий (Blue).

Передача аналоговых видеосигналов предъявляет повышенные требования к качеству кабеля, экранированию и защите от помех, поскольку искажения сигнала напрямую влияют на качество изображения. Поэтому внутри VGA-кабеля используются миниатюрные коаксиальные кабели для передачи цветových компонентов сигнала, а также дополнительные проводники для синхронизации и служебных сигналов.

На рисунке 32 показана распиновка VGA-кабеля [5].

Позиции проводов соответствуют следующим сигнальным линиям:

- 1 — красный видео (75 Ом, 0.7 В);
- 2 — зелёный видео (75 Ом, 0.7 В);
- 3 — синий видео (75 Ом, 0.7 В);
- 4 — не используется;
- 5 — земля;
- 6 — земля красного;

- 7 — земля зелёного;
- 8 — земля синего;
- 9 — дополнительный +5 В от видеокарты;
- 10 — синхронизация земли;
- 11 — ID0 монитора (опционально);
- 12 — SDA, двунаправленная линия данных I2C;
- 13 — HSYNC или CSYNC, горизонтальная синхронизация;
- 14 — VSYNC, вертикальная синхронизация;
- 15 — SCL, тактовая частота I2C.



Рисунок 32 — Распиновка VGA-кабеля для передачи аналоговых видеосигналов

На рисунке 33 показан внешний вид разъёма VGA, используемого для подключения мониторов к компьютеру. Разъём имеет 15 контактов, расположенных в три ряда.



Рисунок 33 — Разъём VGA для передачи аналоговых видеосигналов

На рисунках 34, 35 показаны поперечные сечения VGA-кабеля. Внутри кабеля находятся несколько коаксиальных линий, предназначенных для передачи аналоговых сигналов цветowych компонент изображения — красного, зелёного и синего. Коаксиальная конструкция используется для уменьшения влияния помех и сохранения качества видеосигнала. Помимо коаксиальных линий, внутри кабеля присутствуют дополнительные проводники без экранирования, которые используются для передачи сигналов синхронизации, служебных сигналов и интерфейса обмена данными между монитором и видеокартой. Внешний экран кабеля выполняется из алюминиевой фольги и медной оплётки и служит для защиты сигналов от внешних электромагнитных помех.



Рисунок 34 — Поперечное сечение VGA-кабеля (пример с фольгированным экраном линий передачи цветowych сигналов)



Рисунок 35 — Поперечное сечение VGA-кабеля (пример с проводником оплеточного типа для цветowych сигналов)

3.3. Типы кабелей

3.3.1. Одиночный проводник

Одиночный проводник используется для передачи сигналов, когда сигнал передается по одному проводнику относительно общего провода

(земли). Такой способ передачи применяется как для аналоговых, так и для цифровых сигналов.

При передаче по одиночному проводнику уровень сигнала определяется относительно общего провода, поэтому качество передачи зависит от уровня помех и разности потенциалов между устройствами. В таких линиях связи чаще используются однополярные стандарты сигналов, например TTL, CMOS и LVCMOS.

К преимуществам передачи по одиночному проводнику относится простота реализации и небольшое количество проводников. Недостатком является низкая помехоустойчивость по сравнению с дифференциальными линиями передачи.

Передача сигналов по одиночным проводникам применяется в интерфейсах и линиях связи небольшой длины, а также внутри устройств и вычислительных модулей.

3.3.2. Коаксиальный кабель

Коаксиальный кабель применяется для передачи аналоговых и цифровых сигналов по проводным линиям связи. Конструкция коаксиального кабеля включает центральный проводник, изоляцию, экранирующую оплетку и внешнюю изоляцию. Экранирующий слой защищает передаваемый сигнал от внешних электромагнитных помех и уменьшает излучение сигнала наружу.

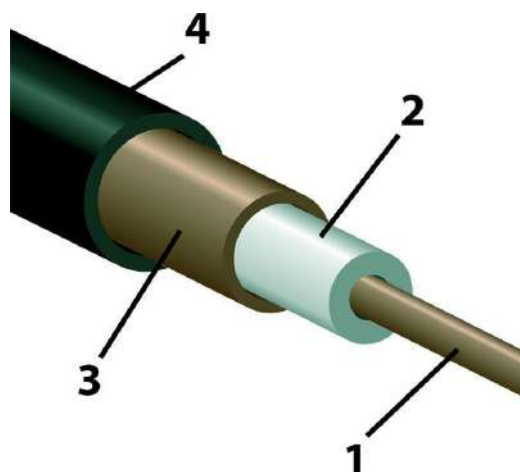


Рисунок 36 — Внутреннее устройство коаксиального кабеля

На рисунке 36 показаны цифровые обозначения основных элементов коаксиального кабеля:

- 1 — центральный проводник;
- 2 — диэлектрическая изоляция вокруг центрального проводника;

- 3 — экранирующая оплетка;
- 4 — внешняя изоляция (оболочка).

Наличие экрана позволяет обеспечить более стабильную передачу сигналов по сравнению с одиночным проводником. За счет экранирования коаксиальный кабель используется в линиях передачи сигналов, где требуется защита от помех и сохранение формы сигнала. Коаксиальные кабели являются линиями передачи с определённым волновым сопротивлением (50 Ом или 75 Ом), что важно для передачи высокочастотных и радиочастотных сигналов. Коаксиальные кабели с волновым сопротивлением 50 Ом чаще используются в радиотехнике, антеннах и радиочастотных системах, а кабели с волновым сопротивлением 75 Ом — в телевизионных, спутниковых и видеосистемах.

Существует большое количество типов коаксиальных кабелей, отличающихся диаметром, волновым сопротивлением, уровнем экранирования и областью применения. Одним из характерных примеров являются кабели серий RG, которые имеют следующие типы:

- RG-58 — коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 50 Ом, применяется в радиосвязи, измерительной технике, антеннах, Wi-Fi антеннах;
- RG-59 — коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 75 Ом, используется для видеонаблюдения и передачи видеосигналов;
- RG-6 — коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 75 Ом, применяется в кабельном телевидении, спутниковом телевидении и кабельном интернете;
- RG-174 — тонкий коаксиальный кабель для внутреннего монтажа в электронных устройствах;
- LMR-195, LMR-400 — низкопотерные коаксиальные кабели для радиочастотных систем и антенн.

Кабели RG-59 и RG-6 применяются в телевизионных системах и системах видеонаблюдения. Кабель RG-6 имеет более качественное экранирование и меньшие потери сигнала по сравнению с RG-59, поэтому он используется для передачи сигналов на большие расстояния и на более высоких частотах.

На рисунках ниже показаны примеры коаксиальных кабелей, их поперечное сечение и структура. На рисунке 37 показано поперечное сечение коаксиального кабеля RG-6, где видны центральный проводник, диэлектрическая изоляция и экранирующий слой [5].

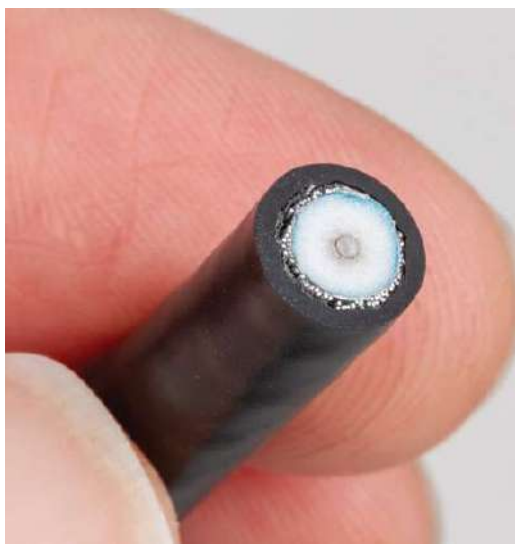


Рисунок 37 — Поперечное сечение коаксиального кабеля
На рисунке 38 показан внешний вид коаксиального кабеля [5].

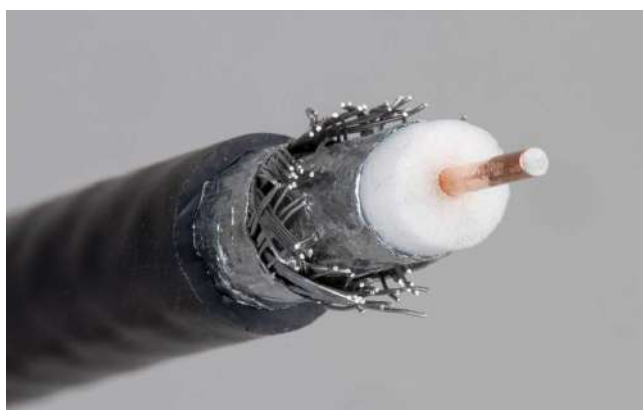


Рисунок 38 — Коаксиальный кабель (внешний вид)

На рисунке 39-40 показан коаксиальный кабель без дополнительного фольгированного экранирующего слоя (телевизионный кабель RG-59), в котором используется только оплетка [5].



Рисунок 39 — Поперечное сечение коаксиального кабеля RG-59

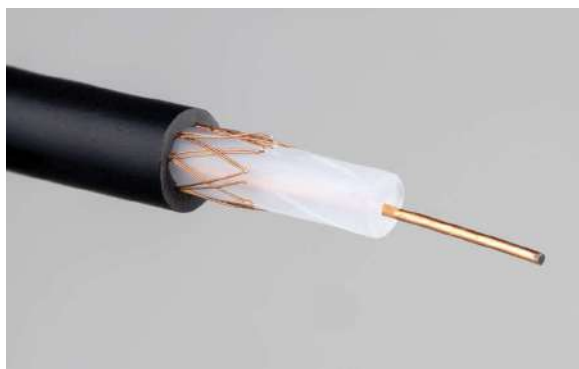


Рисунок 40 — Структура коаксиального кабеля RG-59

Существуют различные типы разъёмов для коаксиальных кабелей, которые используются для подключения кабелей к оборудованию, антеннам и печатным платам. Характерными радиочастотными разъёмами являются разъёмы типа SMA и RP-SMA. Разъёмы RP-SMA отличаются обратной полярностью центрального контакта и часто применяются в оборудовании Wi-Fi и радиомодулях.

Для подключения антенн непосредственно к печатным платам применяются специализированные малогабаритные RF-разъёмы, предназначенные для поверхностного монтажа (SMD). Наиболее распространёнными являются:

- U.FL (IPEX, MHF) — сверхкомпактный разъём, широко используемый в Wi-Fi и Bluetooth модулях (например, ESP32, LTE-модемы); требует аккуратного подключения, рассчитан на небольшое число циклов подключения;
- MMCX — более надёжный и прочный разъём с защёлкой, используется в радиомодулях и антеннах;
- MCX — увеличенный вариант MMCX, применяется реже;
- SMA edge / SMA PCB — устанавливается непосредственно на край печатной платы и позволяет подключать внешнюю антенну через стандартный SMA-кабель.

Такие разъёмы обеспечивают согласованное соединение (обычно 50 Ом) и минимальные потери сигнала на высоких частотах.

На рисунке 41 показаны четыре распространённых варианта SMA-соединителей.

Разъёмы для коаксиальных кабелей могут устанавливаться на печатные платы, панели корпусов устройств или непосредственно на кабель.



Рисунок 41 — Типы SMA и RP-SMA разъёмов

Изображение установленного разъёма на печатной плате приведено на рисунке. На нём показан пример монтажа радиочастотного разъёма, обеспечивающего подключение антенны к RF-тракту устройства. Такие разъёмы, как правило, устанавливаются на краю платы или вблизи антенного тракта и согласуются по волновому сопротивлению (обычно 50 Ом), что позволяет минимизировать потери сигнала и отражения. В зависимости от конструкции устройства могут использоваться как полноразмерные SMA-разъёмы, так и компактные решения (например, U.FL, рисунок 42) с последующим выводом на внешнюю антенну через коаксиальный кабель.



Рисунок 42 — U.FL разъём

На рисунке 43 показан коаксиальный кабель с установленным разъёмом в корпус [5].

При подключении коаксиального кабеля к разъёму центральный проводник кабеля используется как центральный контакт разъёма, а экранирующая оплетка соединяется с корпусом разъёма. Между центральным проводником и корпусом разъёма располагается диэлектрический изолятор, обеспечивающий электрическую изоляцию и сохранение волнового сопротивления линии передачи.



Рисунок 43 — Коаксиальный кабель с разъёмом в корпусе

На рисунке 44 показано соединение коаксиального кабеля с разъёмом в разрезе [5].

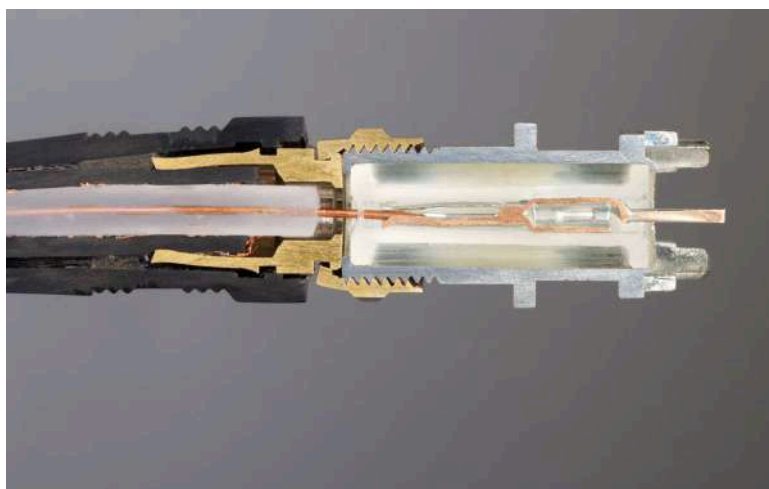


Рисунок 44 — Соединение коаксиального кабеля с разъёмом (в разрезе)

Такая конструкция позволяет сохранить коаксиальную структуру линии передачи внутри разъёма, что необходимо для передачи высокочастотных сигналов без отражений и потерь. Неправильное подключение или нарушение геометрии кабеля и разъёма приводит к несогласованию линии передачи, появлению отражённых сигналов и увеличению потерь в линии передачи.

3.3.3. RF-тракт и подключение антенны

Коаксиальный кабель является частным случаем линии передачи с заданным волновым сопротивлением (обычно 50 Ом). Аналогичный

принцип используется и внутри устройств: на печатной плате роль коаксиального кабеля выполняют микрополосковые или копланарные линии передачи, которые также должны иметь согласованное волновое сопротивление.

Таким образом, RF-тракт представляет собой непрерывную линию передачи, включающую источник сигнала, фидер (коаксиальный кабель или линия на печатной плате), согласующую цепь и антенну. Нарушение согласования на любом участке этой цепи приводит к отражениям сигнала и потерям мощности.

В качестве линии передачи на печатной плате используются:

- микрополосковые линии (microstrip);
- копланарные линии (CPW — coplanar waveguide).

Они являются функциональным аналогом коаксиального кабеля и обеспечивают распространение сигнала с заданным волновым сопротивлением. Для этого требуется точный расчёт геометрии (ширина дорожки, зазор до земли, параметры диэлектрика).

Антенна в реальных условиях, как правило, не имеет точно 50 Ом, поэтому между фидером и антенной устанавливается согласующая цепь. Чаще всего используются LC-сети в виде:

- T-образной (T-network);
- π -образной (pi-network).

Данные варианты показаны на рисунке 45.

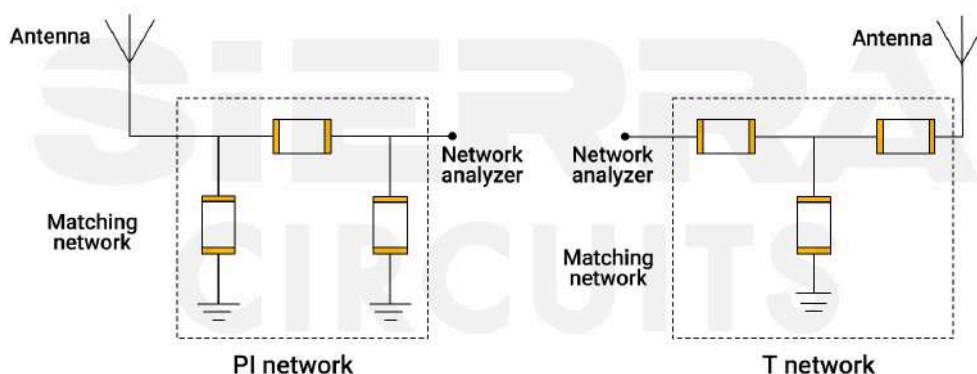


Рисунок 45 — π -образная и T-образная цепи для согласования антенны

Эти цепи позволяют компенсировать реактивную составляющую импеданса антенны и привести входное сопротивление к стандартному значению (50 Ом).

На этапе проектирования согласование выполняется с помощью электромагнитного моделирования. Однако из-за влияния печатной платы, корпуса и окружающей среды требуется практическая настройка.

Для этого используется векторный анализатор цепей (VNA), который измеряет коэффициент отражения (S11) и импеданс. Результаты отображаются на диаграмме Смита, что позволяет подобрать элементы согласующей цепи.

Критерием хорошего согласования является малый уровень отражения (например, $S_{11} < -10$ дБ), что соответствует эффективной передаче мощности в антенну. Правильное согласование напрямую влияет на дальность связи, стабильность работы и энергетическую эффективность устройства.

3.3.4. Дифференциальная пара

Дифференциальная пара (рисунок 46) представляет собой линию передачи, состоящую из двух проводников, по которым передаются сигналы одинаковой амплитуды и противоположной фазы (сдвиг 180°). Приёмник определяет значение сигнала как разность напряжений между этими проводниками.

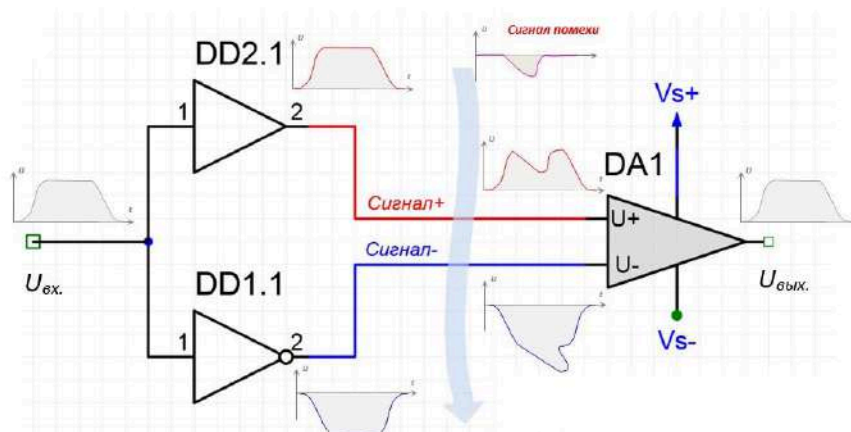


Рисунок 46 — Организация дифференциальной пары

Основным преимуществом дифференциальной передачи является высокая помехоустойчивость. Внешние электромагнитные помехи воздействуют на оба проводника практически одинаково (common-mode), поэтому при вычитании сигналов их влияние существенно уменьшается. Кроме того, противоположные токи в проводниках приводят к частичной компенсации электромагнитного излучения, что снижает уровень помех, создаваемых самой линией.

Дифференциальная пара является линией передачи с заданным дифференциальным волновым сопротивлением (как правило, 90 Ом или 100 Ом), которое определяется геометрией проводников и свойствами среды. Для корректной передачи сигналов требуется согласование линии

с источником и приёмником, иначе возникают отражения и искажения сигнала.

Дифференциальные линии могут быть реализованы:

- в виде кабелей (витая пара, Twinaх);
- на печатных платах (микрополосковые или копланарные дифференциальные линии).

В кабелях (например, витая пара) скручивание проводников позволяет выровнять влияние внешних помех и уменьшить перекрёстные наводки. В печатных платах дифференциальные линии формируются двумя параллельными проводниками над опорной землёй и требуют точного контроля геометрии.

Дифференциальные линии передачи используются в современных высокоскоростных интерфейсах, где требуется передача сигналов с большой скоростью и высокой помехоустойчивостью. В таких интерфейсах задаётся фиксированное дифференциальное волновое сопротивление линии (например, 100 Ом для USB, Ethernet и PCI Express, 90 Ом для HDMI, 100 Ом для LVDS), а передача осуществляется с использованием специализированных физических уровней (PHY), таких как LVDS, CML или TMDS. Скорости передачи данных могут достигать единиц и десятков гигабит в секунду (например, PCIe Gen4 — до 16 ГТ/с, HDMI — до десятков Гбит/с), что требует строгого контроля геометрии линии, согласования импеданса и минимизации рассогласования проводников. В таких условиях дифференциальная передача позволяет снизить излучение, уменьшить влияние помех и обеспечить стабильную передачу данных на высоких частотах.

3.3.5. Витая пара

Витая пара (рисунок 47) представляет собой кабель, состоящий из двух изолированных проводников, скрученных между собой. Скручивание проводников используется для уменьшения влияния электромагнитных помех и перекрестных наводок между линиями.



Рисунок 47 — Организация витой пары

Передача сигналов по витой паре осуществляется, как правило, по дифференциальному принципу. Это повышает помехоустойчивость линии связи и позволяет передавать данные на достаточно большие расстояния.

Кабели витой пары используются в сетевых интерфейсах, например в Ethernet. Для кабелей витой пары используются различные категории кабелей, которые отличаются допустимой частотой сигнала и скоростью передачи данных.

Витая пара широко применяется в компьютерных сетях и системах передачи данных благодаря хорошему соотношению стоимости, помехоустойчивости и скорости передачи данных.

3.3.6. Оптоволоконные линии

В оптоволоконных линиях (рисунок 48) связи передача данных осуществляется с помощью светового сигнала, распространяющегося по оптическому волокну. В отличие от электрических линий связи, сигнал передается не электрическим током, а световым излучением.

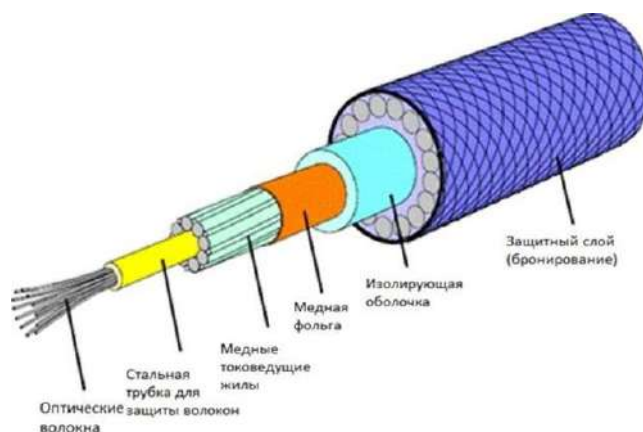


Рисунок 48 — Структура оптоволоконного кабеля

Разъемы оптоволоконных кабелей обеспечивают надежное соединение и минимальные потери сигнала. На рисунке 49 показан пример разъема, который применяется в оптоволоконных линиях связи.



Рисунок 49 — Разъем оптоволоконного кабеля

Оптоволоконные линии связи обладают высокой помехоустойчивостью, так как нечувствительны к электромагнитным помехам. Они позволяют передавать данные на большие расстояния и обеспечивают высокую скорость передачи данных.

Оптоволоконные линии применяются в сетях передачи данных, телекоммуникационных системах и линиях связи, где требуется высокая скорость передачи и большая длина линии связи.

3.4. Передача цифровых сигналов

При передаче цифровых сигналов по проводным линиям связи информация передается в виде логических уровней напряжения, соответствующих логическому нулю и логической единице. Однако физически по линии передается не абстрактная «единица» или «ноль», а электрический сигнал, представляющий собой напряжение или ток, изменяющийся во времени.

Цифровой сигнал формируется как последовательность импульсов напряжения. Каждый импульс имеет конечную длительность, амплитуду и время нарастания и спада фронтов. Реальные цифровые сигналы не являются идеальными прямоугольными импульсами — их форма искажается из-за сопротивления, ёмкости и индуктивности линии передачи, а также из-за ограниченной полосы пропускания канала связи.

На рисунке 50 показан принцип представления непрерывного (аналогового) сигнала в цифровой форме — синяя линия показывает исходный аналоговый сигнал, красные точки обозначают дискретные отсчёты, а ступенчатая линия иллюстрирует восстановление сигнала из этих отсчётов.

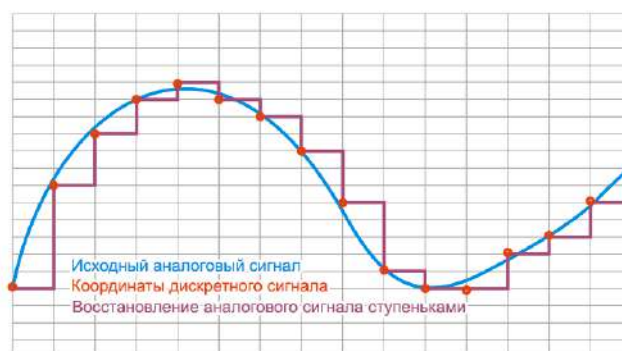


Рисунок 50 — Дискретизация и ступенчатое восстановление цифрового сигнала

При передаче цифровых сигналов по линии связи важны не только уровни напряжения, но и форма фронтов сигнала. Чем выше скорость передачи данных, тем меньше длительность импульсов и тем больше

влияние параметров линии передачи. При высоких скоростях линия передачи начинает вести себя как распределённая система с волновым сопротивлением, отражениями сигнала и затуханием.

Передача цифровых сигналов может осуществляться различными способами:

- по одиночным проводникам (однополярные сигналы);
- по дифференциальным линиям;
- по коаксиальным кабелям;
- по витой паре;
- по оптоволоконным линиям связи.

В однопроводных линиях сигнал передается относительно общего провода (земли), что делает такую передачу более чувствительной к помехам и наводкам. В дифференциальных линиях сигнал передается по разности напряжений между двумя проводниками, что значительно повышает помехоустойчивость и позволяет передавать данные на более высоких скоростях.

При очень высоких скоростях передачи данных (сотни мегабит и гигабит в секунду) линии передачи необходимо рассматривать как линии с распределёнными параметрами, имеющие волновое сопротивление. В таких линиях необходимо согласование сопротивлений передатчика, линии и приемника, чтобы избежать отражений сигнала и искажения формы импульсов. Поэтому для высокоскоростной передачи данных используются специальные стандарты сигналов и кабелей, обеспечивающие оптимальные условия для передачи цифровых сигналов с минимальными потерями и искажениями.

Скорость передачи цифровых данных ограничивается не только частотой переключения логических элементов, но и полосой пропускания линии передачи. Чем быстрее фронты сигнала, тем более высокочастотные компоненты присутствуют в спектре сигнала. Если линия передачи не пропускает эти частоты, фронты сигнала сглаживаются, что может привести к ошибкам при приёме данных.

Для анализа качества передачи высокоскоростных цифровых сигналов используется глазковая диаграмма (eye diagram). Она получается наложением большого количества периодов цифрового сигнала друг на друга на осциллографе с синхронизацией по тактовому сигналу. В результате получается изображение, напоминающее глаз, по которому можно оценить качество передачи сигнала и искажения, возникающие в линии передачи.

Принцип формирования глазковой диаграммы показан на рисунке. Осциллограф многократно накладывает друг на друга фрагменты цифрового сигнала длиной в один тактовый интервал, в результате чего формируется характерная «глазковая» структура.

По глазковой диаграмме можно оценить основные параметры качества сигнала:

- уровень шума;
- джиттер (разброс по времени фронтов сигнала);
- амплитуду сигнала;
- запас по уровню логических состояний;
- межсимвольные искажения (ISI — intersymbol interference);
- момент оптимальной выборки сигнала приемником.

На глазковой диаграмме (рисунок 51) вертикальное раскрытие глаза характеризует запас по уровню напряжения (помехоустойчивость по амплитуде), а горизонтальное раскрытие — запас по времени выборки сигнала. Джиттер приводит к размытию диаграммы по горизонтали, а шум и затухание — к уменьшению вертикального раскрытия глаза.

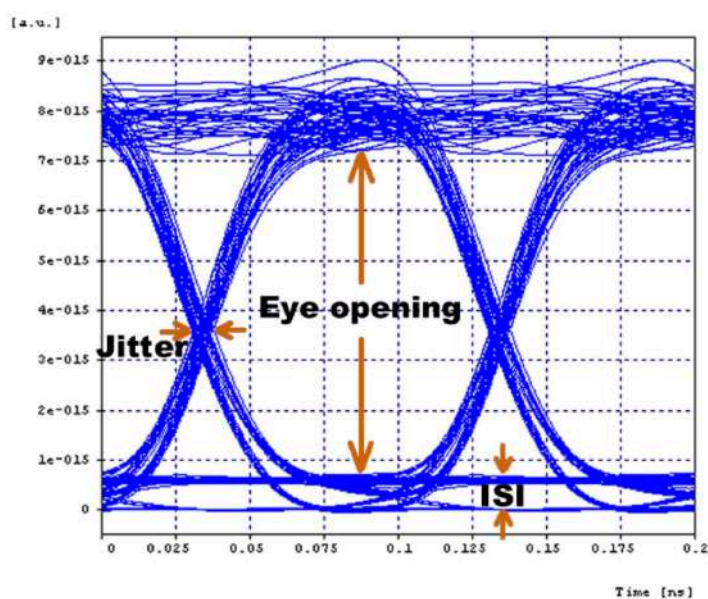


Рисунок 51 — Параметры глазковой диаграммы: раскрытие глаза, джиттер, межсимвольные искажения

Чем более «открыт глаз» на диаграмме, тем лучше качество сигнала и тем меньше вероятность ошибок передачи данных. Если глаз «закрывается» (уменьшается вертикальное или горизонтальное раскрытие), это означает, что в линии передачи присутствуют шум,

затухание, межсимвольные искажения, отражения сигнала или слишком большая длина линии передачи.

На рисунке 52 показаны примеры глазковых диаграмм для сигналов различного качества: при хорошем качестве передачи глаз открыт, при ухудшении качества линии передачи глаз постепенно закрывается.

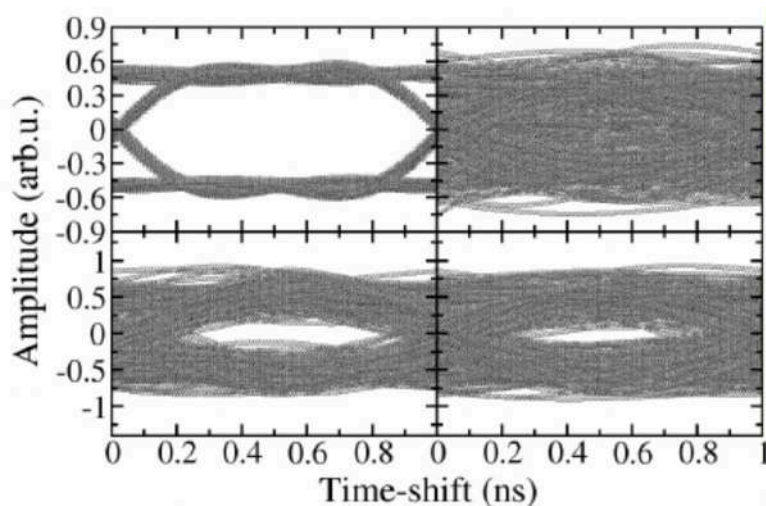


Рисунок 52 — Примеры глазковых диаграмм для сигналов различного качества

Глазковая диаграмма широко используется при отладке и разработке высокоскоростных цифровых интерфейсов. С её помощью можно обнаружить проблемы согласования линии передачи, плохое экранирование, слишком длинные проводники на печатной плате, неправильное согласование волновых сопротивлений, а также влияние шума и межсимвольных искажений.

При проектировании высокоскоростных цифровых систем необходимо учитывать не только логические уровни сигналов, но и форму сигнала, полосу пропускания линии передачи, согласование импедансов и качество глазковой диаграммы, которое напрямую связано с вероятностью ошибок передачи данных.

3.5. Стандарты электрических сигналов

3.5.1. Однополярные стандарты сигналов

При передаче цифровых сигналов по одиночному проводнику используются **однополярные стандарты электрических сигналов**. В таких стандартах логические уровни определяются относительно общего провода (земли). К основным однополярным стандартам относятся **TTL**, **CMOS** и **LVC MOS**.

Стандарт **TTL** реализуется на биполярных транзисторах (рисунок 53). Логические уровни формируются выходным каскадом на

биполярных транзисторах, что определяет электрические характеристики сигнала и нагрузочную способность выхода.

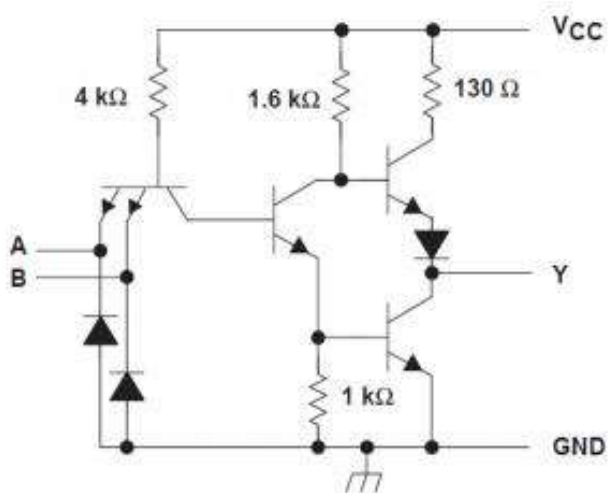


Рисунок 53 — TTL-выход (на биполярных транзисторах)

Стандарт CMOS реализуется на полевых транзисторах (рисунок 54). Такие выходные каскады потребляют меньше энергии по сравнению с TTL и широко используются в цифровых микросхемах и микроконтроллерах.

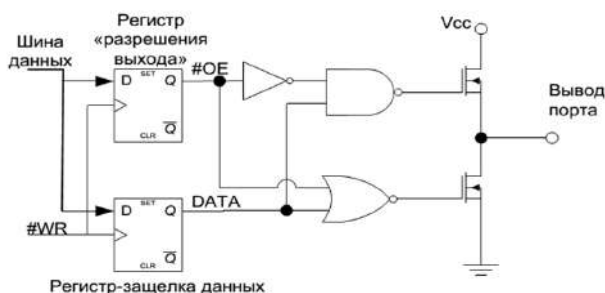


Рисунок 54 — CMOS – выход (на полевых транзисторах)

Стандарт LVCMOS является разновидностью CMOS-логики, рассчитанной на пониженные напряжения питания. Он используется в современных цифровых устройствах и интерфейсах, где требуется снижение энергопотребления и работа при низких напряжениях питания.

3.5.2. Дифференциальные стандарты

Для передачи цифровых сигналов по дифференциальным линиям используются **дифференциальные стандарты электрических сигналов**. В таких стандартах информация передается по двум проводникам, а приемник определяет сигнал по разности напряжений между ними.

Стандарт LVDS (рисунок 55) использует дифференциальную пару и сбалансированный источник тока. Положительный и отрицательный

сигналы сдвинуты по фазе на 180° и формируют дифференциальное напряжение на входе приемника.

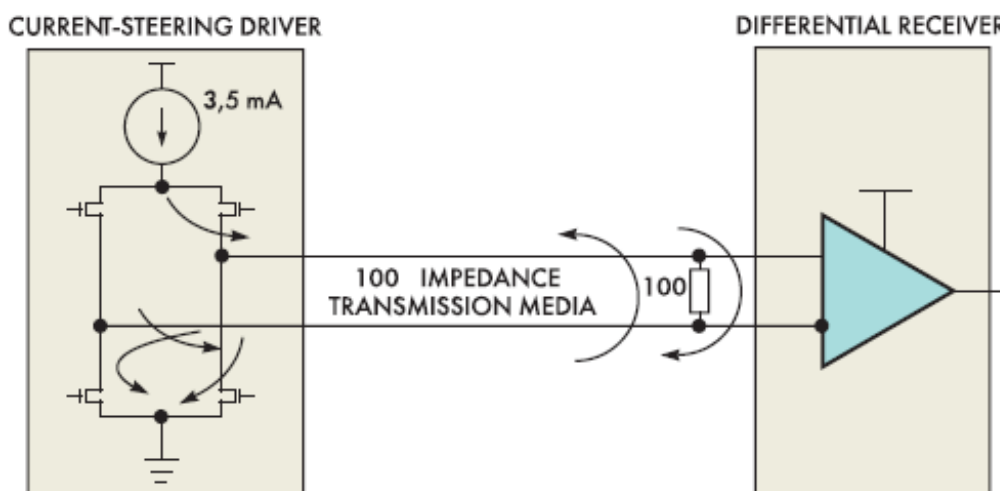


Рисунок 55 — Стандарт LVDS

Стандарт PECL и его вариант LVPECL используют дифференциальную пару, которая управляет эмиттерными повторителями (рисунок 56). Выходной каскад работает в активном режиме с постоянным током. Интерфейс PECL подходит как для напряжений питания $+5,0$ В, так и для $+3,3$ В. Когда напряжение питания $+3,3$ В, такой интерфейс обычно называют LVPECL.

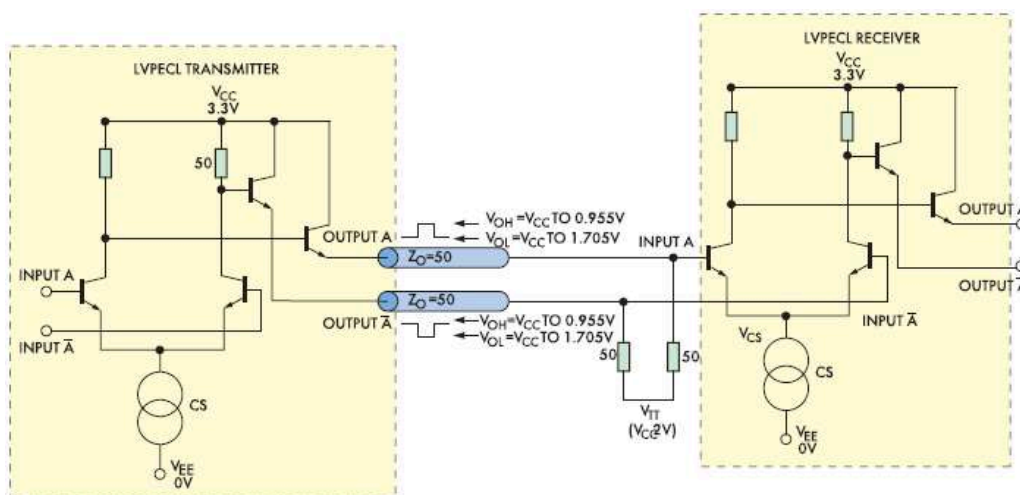


Рисунок 56 — Стандарты PECL/LVPECL

Стандарт CML (рисунок 57) реализует логические схемы на переключателях тока. Выходные каскады нагружены на резисторы и подтянуты к напряжению питания.

Стандарт VML (рисунок 58) реализует логические схемы на переключателях напряжения.

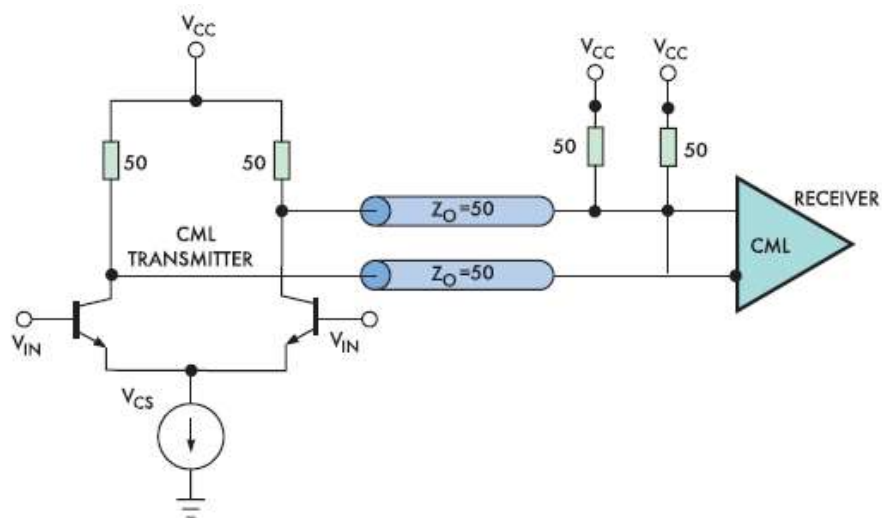


Рисунок 57 — Стандарт CML

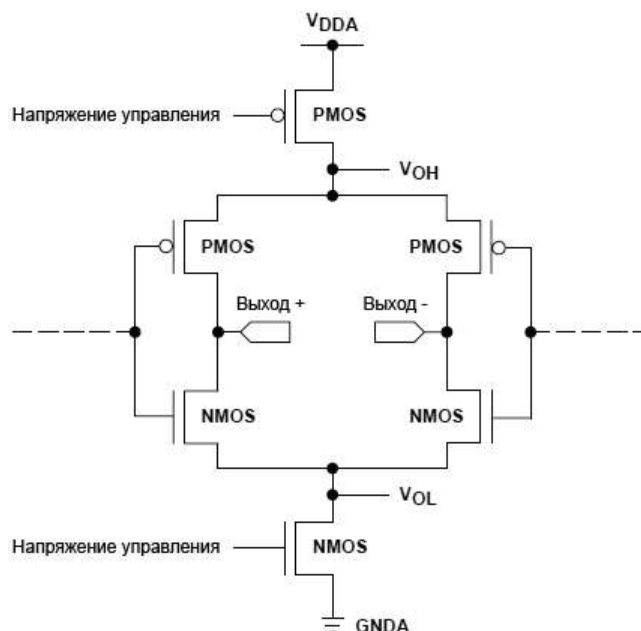


Рисунок 58 — Стандарт VML

Дифференциальные стандарты используются в высокоскоростных интерфейсах передачи данных и линиях связи, где требуется высокая скорость передачи и помехоустойчивость. На рисунке 59 сравниваются разные дифференциальные стандарты по диапазону рабочей средней точки и амплитуде: LVDS, PECL, CML и VML.

Для организации связи между схемами различных типов дифференциальной логики (LVDS, LVPECL и CML) может использоваться два метода сопряжения (рисунок 60, 61):

- метод с передачей постоянной составляющей;
- метод сопряжения по переменному току — интерфейс TMDS (передача дифференциалов сигналов с минимальной амплитудой).

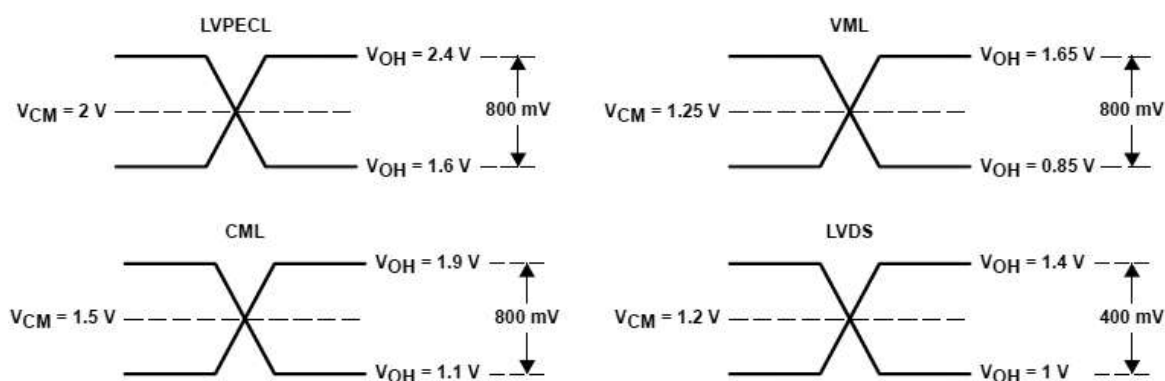


Рисунок 59 — Стандарты LVDS, PECL, CML, VML

Метод с передачей постоянной составляющей основан на включении в линию передачи резисторов, сдвигающих напряжение в ту или иную сторону в зависимости от соотношений напряжений сдвига между передатчиком и приемником. При разработке схем согласования с передачей постоянной составляющей обычно используется схема Тевенина (Thevenin).

Рассмотрим пример организации связи между LVPECL-передатчиком и LVDS-приемником. Поскольку уровень постоянной составляющей на выходе LVPECL-логики имеет более высокое значение, чем у LVDS, необходимо использовать резистивные цепочки, снижающие напряжение V_{CC} с 2 В до 1,2 В. Следует помнить, что LVDS-приемники некоторых изготовителей имеют внутренние оконечные резисторы, а у других таких резисторов нет.

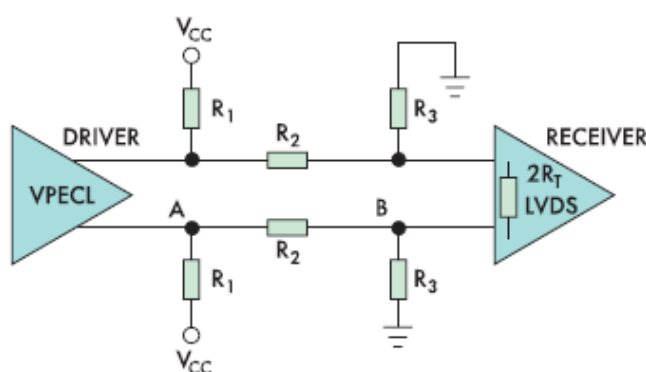


Рисунок 60 — Сопряжение с постоянной составляющей

Для передачи дифференциальных сигналов на большие расстояния широко используются кабели витой пары, например кабели Ethernet категорий Cat5e, Cat6 и выше. Такие кабели содержат несколько пар проводников, скрученных между собой.

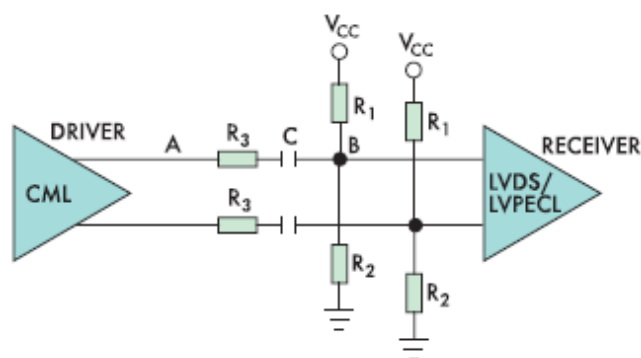


Рисунок 61 — Сопряжение с переменной составляющей

Скручивание проводников в пару уменьшает влияние внешних электромагнитных помех и снижает взаимные наводки между соседними парами. Передача сигнала осуществляется дифференциально — по разности напряжений между двумя проводниками пары, что повышает помехоустойчивость линии связи. На рисунке 62 показана распиновка разъёма RJ-45 и соответствие контактов проводникам витой пары [5].

Кабель категории 6 содержит четыре витые пары проводников. Внутри кабеля может располагаться пластиковый крестовой разделитель, который разделяет пары проводников и уменьшает взаимные помехи между ними. Кабель также может иметь общий экран из фольги или оплётки для защиты от внешних электромагнитных помех.



Рисунок 62 — Распиновка кабеля витой пары для Ethernet

На рисунках 63, 64 показан разъём RJ-45, используемый для подключения кабеля витой пары, а также поперечное сечение кабеля, на котором видны четыре витые пары проводников и разделитель [5].

Передача данных в сетях Ethernet осуществляется по дифференциальным парам проводников, что позволяет передавать данные на большие расстояния (до 100 м) с высокой скоростью и высокой помехоустойчивостью. Таким образом, витая пара является одной из наиболее распространённых линий передачи дифференциальных цифровых сигналов.



Рисунок 63 — Разъем RJ-45 для кабеля витой пары



Рисунок 64 — Поперечный разрез кабеля витой пары для Ethernet

Для передачи дифференциальных сигналов используются различные типы линий передачи: витая пара, коаксиальные кабели и дифференциальные линии на печатных платах (микрострипные и стриплайновые линии). Все эти линии должны иметь согласованное волновое сопротивление, чтобы избежать отражений сигнала.

3.6. Разводка дифференциальных пар на печатных платах

При реализации дифференциальных пар на печатной плате необходимо учитывать ряд требований, связанных с сохранением целостности сигнала и параметров линии передачи (рисунок 65).

Дифференциальные линии должны прокладываться совместно и иметь одинаковые электрические параметры. Одним из ключевых требований является согласование длины проводников (*length matching*). Разность длин приводит к временному рассогласованию сигналов (*skew*), что вызывает искажение дифференциального сигнала на входе приёмника.

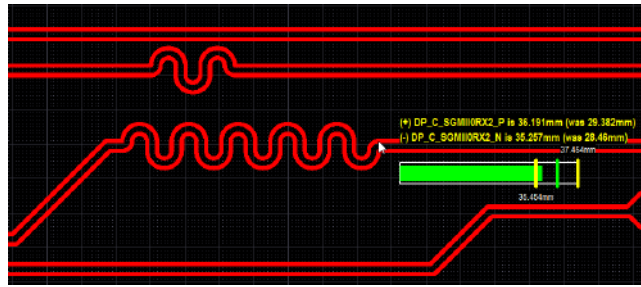


Рисунок 65 — Топологический рисунок дифференциальной пары с согласованием длины

Также необходимо обеспечивать постоянство расстояния между проводниками, так как это напрямую влияет на дифференциальный импеданс линии (обычно 90 или 100 Ом). Несогласование импеданса приводит к отражениям сигнала и ухудшению качества передачи данных.

Важным условием является наличие непрерывного опорного слоя (reference plane), который обеспечивает корректный путь возвратного тока. Разрывы опорного слоя или переходы между слоями без соответствующего проектирования приводят к ухудшению характеристик линии.

Дифференциальные пары обладают высокой устойчивостью к внешним электромагнитным помехам, так как помехи воздействуют на оба проводника одинаково. Однако для сохранения этого преимущества необходимо:

- прокладывать линии параллельно и на постоянном расстоянии;
- избегать асимметрии и несогласованности трассировки;
- при необходимости использовать экранирование и корректную привязку к земле.

Нарушение симметрии линии приводит к преобразованию дифференциального сигнала в общий режим (common-mode), что ухудшает помехоустойчивость, увеличивает излучение и может вызывать проблемы электромагнитной совместимости (EMC).

3.7. Разъемы проводных интерфейсов

Для подключения проводных линий связи используются различные типы разъемов. Разъемы обеспечивают механическое и электрическое соединение кабелей и устройств, а также удобство подключения и обслуживания оборудования.

В промышленной электронике используются **индустриальные разъемы**, рассчитанные на работу в условиях вибраций, пыли, влаги и электромагнитных помех (рисунки 66, 67). Такие разъемы обеспечивают надежное соединение и защиту контактов.



Рисунок 66 — Пример промышленного разъема с защитной крышкой



Рисунок 67 — Пример промышленного разъема

Обычные USB-кабели (например USB Type-A — USB Micro-B или USB Type-A — USB Type-B) используются для подключения периферийных устройств, передачи данных и питания устройств. Такие кабели имеют относительно простую конструкцию и содержат всего несколько проводников.

В базовом USB-кабеле обычно используются четыре проводника:

- красный провод — питание +5 В;
- чёрный провод — земля;
- зелёный провод — линия данных D+;
- белый провод — линия данных D–.

Линии данных D+ и D– образуют дифференциальную пару, по которой передаются цифровые данные. Внутри кабеля проводники обычно экранируются фольгой и медной оплёткой для защиты сигналов от электромагнитных помех. Снаружи кабель покрыт защитной пластиковой оболочкой.

На рисунке 68-69 показан разъём USB Type-A и внутреннее устройство кабеля [5]. Видно, что внутри кабеля расположены четыре изолированных проводника и общий экран.



Рисунок 68 — Разъём USB Type-A (в разрезе)



Рисунок 69 — Поперечное сечение USB-кабеля

Разъём USB состоит из металлического корпуса и контактной группы. Металлический корпус выполняет функции экранирования и направляющей при подключении разъёма. Внутри корпуса расположены контактные площадки, которые соединяются с проводниками кабеля.

На рисунке 70-71 показан USB-разъём на печатной плате и его внутреннее устройство [5]. Контакты разъёма выполнены в виде пружинящих пластин, которые при подключении прижимаются к контактам штекера и обеспечивают надёжное электрическое соединение.



Рисунок 70 — USB-разъёмы на печатной плате



Рисунок 71 — Конструкция USB-разъёма

При подключении кабеля пружинящие контакты разъёма прижимаются к контактными площадкам штекера, обеспечивая электрический контакт, а металлический корпус штекера соединяется с корпусом разъёма и экраном кабеля (рисунок 72) [5]. Это обеспечивает экранирование соединения и механическую фиксацию кабеля в разъёме.

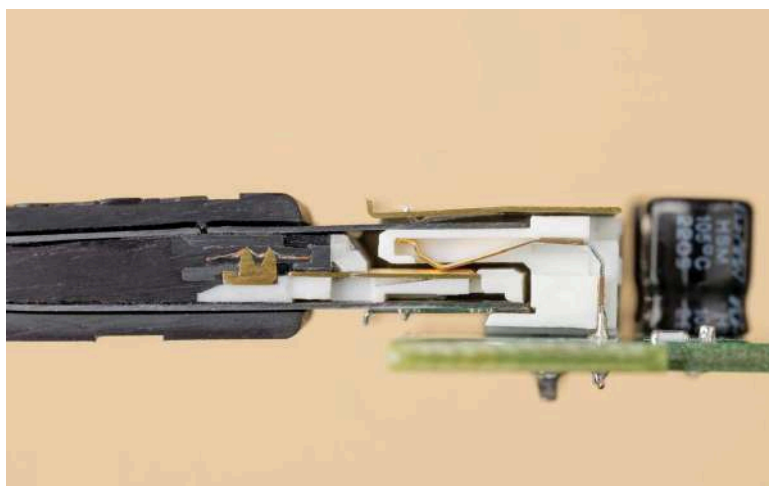


Рисунок 72 — Соединение USB-штекера и разъёма (в разрезе)

Таким образом, даже обычный USB-кабель представляет собой экранированную линию передачи с дифференциальной парой проводников, а разъём обеспечивает механическую фиксацию, электрический контакт и экранирование соединения.



Рисунок 73 — Разъём USB Type-C

В вычислительной технике и системах ввода/вывода широко используются стандартные интерфейсные разъемы, например **USB Type-C** (рисунок 73) [5]. Этот разъем используется для передачи данных, питания устройств и подключения периферийных устройств.

В высокоскоростных интерфейсах передачи данных, таких как USB Type-C (USB 3.0 и USB 3.1 – SuperSpeed USB), используются сложные многожильные кабели, содержащие несколько линий передачи данных, линии питания и экранирование. Конструкция таких кабелей обеспечивает передачу данных на высоких скоростях и защиту сигналов от электромагнитных помех.

В кабеле SuperSpeed USB используются дифференциальные пары проводников для передачи высокоскоростных данных. Каждая пара имеет собственное экранирование, что уменьшает взаимные помехи между линиями и позволяет передавать данные со скоростью до нескольких гигабит в секунду. Кроме того, внутри кабеля находятся отдельные проводники для питания устройства и линии для передачи служебных сигналов.

На рисунках 74, 75 показано поперечное сечение кабеля SuperSpeed USB [5]. Видно, что кабель содержит несколько экранированных линий передачи данных, силовые проводники питания, а также дополнительные служебные проводники. Внешний экран кабеля выполнен из медной оплётки и фольги, что обеспечивает защиту сигналов от внешних электромагнитных помех.



Рисунок 74 — Поперечное сечение кабеля SuperSpeed USB

Внутри кабеля также может располагаться прочный армирующий элемент (например, кевларовая нить), который повышает механическую прочность кабеля и защищает проводники от растяжения и повреждений при эксплуатации [5].



Рисунок 75 — Поперечное сечение кабеля SuperSpeed USB (крупный план)

Современные кабели интерфейсов передачи данных представляют собой сложные многожильные конструкции, содержащие дифференциальные линии передачи данных, линии питания, экранирование и механические усилители, что позволяет обеспечить высокую скорость передачи данных и надежность соединения.

К разъемам проводных интерфейсов предъявляются требования по надежности соединения, износостойкости контактов, защите от помех, удобству подключения и отключения, а также соответствию электрическим параметрам линии связи.

3.8. Защита проводных линий связи

3.8.1. Защита от статического электричества

При эксплуатации проводных линий связи необходимо учитывать воздействие электростатических разрядов (**ESD** — ElectroStatic Discharge).

Электростатический разряд может возникать при подключении кабелей, прикосновении человека к разъему или при работе оборудования в условиях накопления статического заряда. Напряжение электростатического разряда может достигать нескольких киловольт, хотя энергия разряда обычно невелика. Тем не менее, даже кратковременный импульс высокого напряжения может повредить входные цепи микросхем и интерфейсных контроллеров.

Электростатический разряд обычно попадает в устройство через разъёмы и сигнальные линии, после чего распространяется по печатной плате и может вызвать пробой входных транзисторов или деградацию полупроводниковых структур (рисунок 76).

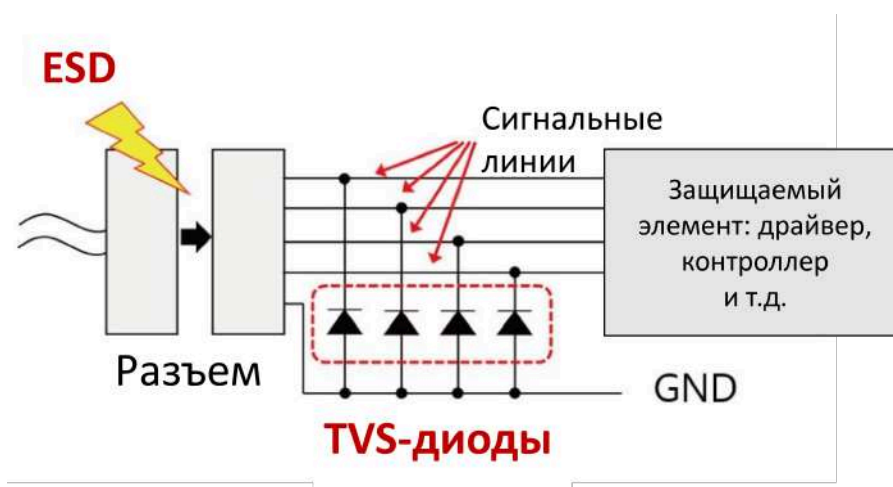


Рисунок 76 — Схема воздействия электростатического разряда на устройство

TVS-диод работает как быстродействующий ограничитель напряжения: при нормальной работе он практически не влияет на сигнал, но при превышении порогового напряжения резко открывается и отводит импульсный ток в землю (GND), ограничивая напряжение на защищаемой линии (рисунок 77).

Основные параметры TVS-диодов:

- напряжение пробоя;
- напряжение ограничения (clamping voltage);
- максимальный импульсный ток;
- паразитная ёмкость;
- время срабатывания.

При защите высокоскоростных интерфейсов важно использовать TVS-диоды с малой паразитной ёмкостью, чтобы не ухудшать форму сигнала и не уменьшать полосу пропускания линии передачи.

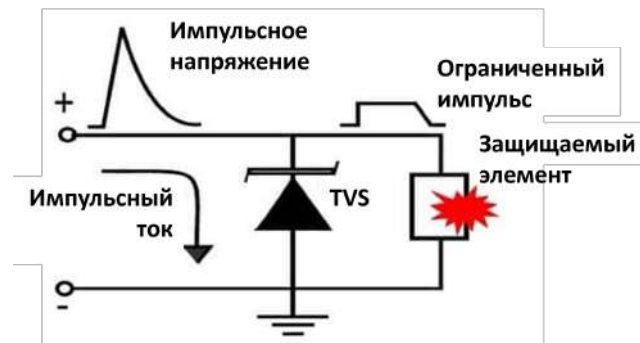


Рисунок 77 — Схема подключения TVS-диода для защиты от ESD

TVS-диоды должны располагаться как можно ближе к разъёму, чтобы импульс электростатического разряда не распространялся по печатной плате.

3.8.2. Гальваническая развязка

Гальваническая развязка — это метод передачи электрического сигнала между частями системы без электрического контакта между ними. Передача сигнала осуществляется через изоляционный барьер, что позволяет исключить протекание постоянных и низкочастотных токов между частями системы, повысить помехоустойчивость и обеспечить электрическую безопасность.

Гальваническая развязка применяется для:

- защиты оборудования;
- защиты пользователя от поражения электрическим током;
- устранения петель заземления (ground loop);
- уменьшения влияния помех;
- соединения устройств с разными уровнями потенциала земли;
- подключения длинных линий связи.

Существуют следующие виды гальванической развязки:

- оптическая;
- индуктивная;
- емкостная.

Оптическая развязка (оптрон) использует свет для передачи сигнала через изоляционный барьер. Внутри оптрона находится светодиод и фотоприемник (фототранзистор, фотодиод или фототиристор). При прохождении тока через светодиод он излучает свет, который принимается фотоприемником и преобразуется обратно в электрический сигнал.

Оптическая развязка обеспечивает высокое напряжение изоляции и полную электрическую развязку цепей, поскольку между входной и выходной частью отсутствует электрическое соединение — сигнал передается только с помощью светового излучения (рисунок 78).

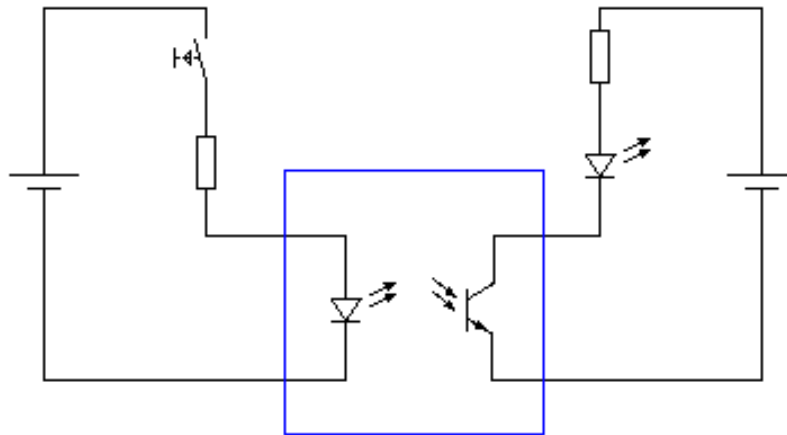


Рисунок 78 — Принцип оптической гальванической развязки

В реальных устройствах оптроны используются как отдельные электронные компоненты, устанавливаемые на печатную плату (рисунок 79) [5]. Внутри корпуса оптрона размещены светодиод и фотоприемник, расположенные друг напротив друга и разделённые прозрачным изоляционным материалом.



Рисунок 79 — Оптона на печатной плате

На рисунок 80 показано внутреннее устройство оптрона. В верхней части расположен кристалл светодиода, а в нижней — фототранзистор

[5]. Пространство между ними заполнено прозрачным изоляционным материалом, через который проходит свет от светодиода к фотоприемнику.



Рисунок 80 — Внутреннее устройство оптрона (светодиод и фототранзистор)

Оптроны обеспечивают гальваническую развязку до нескольких киловольт и используются для передачи управляющих сигналов, в интерфейсах связи, источниках питания и системах промышленной автоматизации. Однако оптроны имеют ограниченную скорость передачи данных из-за инерционности фототранзистора, поэтому они чаще применяются в низко- и среднескоростных интерфейсах передачи данных.

Емкостная развязка использует передачу сигнала через электрическое поле между обкладками конденсаторов, расположенных по разные стороны изоляционного барьера (рисунок 81). Такая развязка применяется в высокоскоростных цифровых изоляторах и позволяет передавать сигналы с высокой скоростью.

Емкостная развязка часто используется внутри микросхем цифровых изоляторов и интерфейсных драйверов.

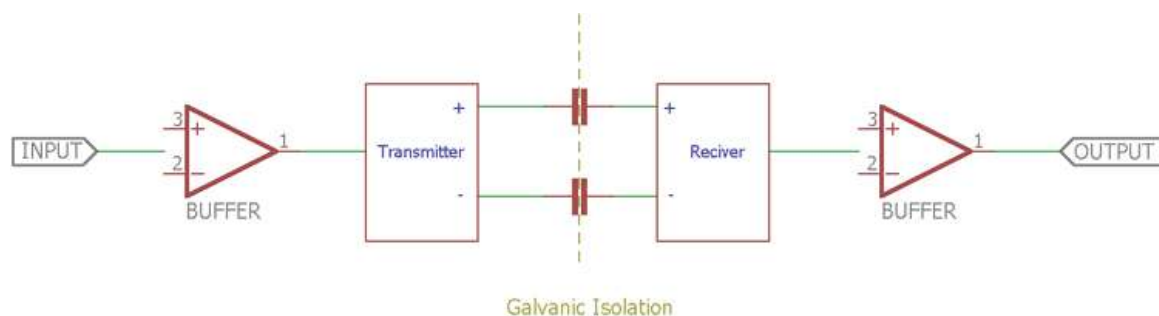


Рисунок 81 — Емкостная развязка

Индуктивная развязка основана на передаче сигнала через трансформатор или индуктивную связь (рисунок 82). Сигнал преобразуется в переменное магнитное поле, которое передается через изоляционный барьер и снова преобразуется в электрический сигнал на приемной стороне. Индуктивная развязка широко используется в сетевых

интерфейсах Ethernet, импульсных источниках питания и цифровых изоляторах. Она позволяет передавать как сигналы, так и энергию, но работает только для переменных сигналов (постоянный ток через трансформатор передать нельзя).

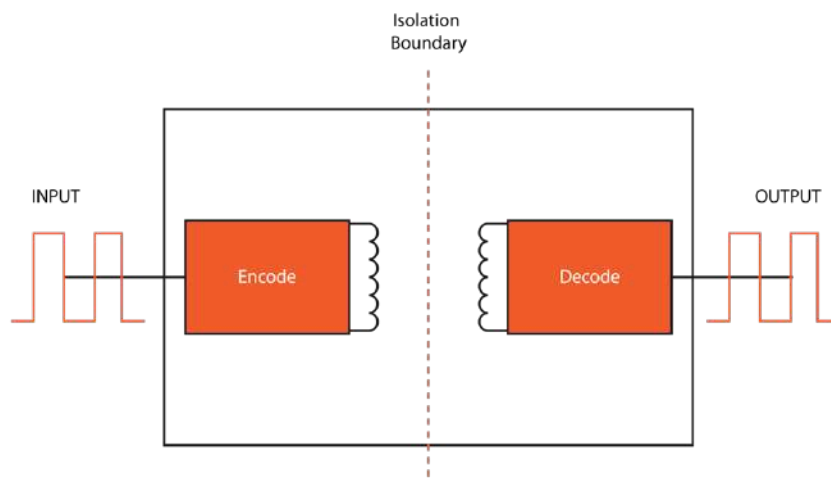


Рисунок 82 — Индуктивная развязка

Использование гальванической развязки позволяет подключать и отключать линии связи без отключения питания системы, уменьшает влияние помех, предотвращает появление токов через сигнальные линии и обеспечивает возможность подключения устройств в режиме **Plug & Play**. Кроме того, гальваническая развязка повышает надежность работы системы и защищает оборудование от повреждений, связанных с разностью потенциалов между устройствами.

В интерфейсах передачи данных гальваническая развязка часто используется совместно с дифференциальной передачей сигналов. Дифференциальные линии уменьшают влияние электромагнитных помех, а гальваническая развязка устраняет токи через землю между устройствами. Такая комбинация используется, например, в интерфейсах Ethernet, RS-485, CAN и промышленных интерфейсах связи.

В интерфейсе Ethernet гальваническая развязка реализуется с помощью высокочастотных трансформаторов, которые устанавливаются между кабелем витой пары и микросхемой сетевого контроллера (PHY). Эти трансформаторы обеспечивают передачу дифференциального сигнала и одновременно создают электрическую изоляцию между устройствами (рисунок 83-84) [5].

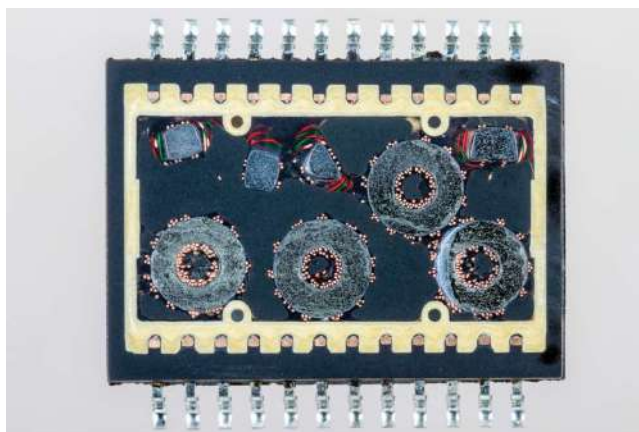


Рисунок 83 — Внутреннее устройство трансформаторов гальванической развязки Ethernet

Такие трансформаторы часто объединяются в одном корпусе вместе с разъёмом RJ-45 и называются Ethernet-магнетиками (Ethernet magnetics) [5]. Они обеспечивают гальваническую развязку, согласование импеданса линии и подавление помех.



Рисунок 84 — Микросхема Ethernet PHY и трансформаторы гальванической развязки на плате

Гальваническая развязка в Ethernet обычно рассчитана на напряжение изоляции порядка 1–2 кВ, что позволяет безопасно соединять устройства с различными потенциалами земли и предотвращает протекание выравнивающих токов по кабелю.

Таким образом, в современных интерфейсах передачи данных часто используется комбинация:

- дифференциальной передачи сигналов;
- согласованных линий передачи;
- гальванической развязки;

- защиты от ESD и перенапряжений.

Эта комбинация обеспечивает высокую помехоустойчивость, надежность и безопасность работы линий передачи данных.

3.9. Ключевые принципы организации проводных интерфейсов

В современных интерфейсах передачи данных используется комплекс решений на физическом уровне, включающий:

- дифференциальную передачу сигналов;
- линии передачи с согласованным волновым сопротивлением (50 Ом, 75 Ом, 90–100 Ом);
- гальваническую развязку;
- защиту от ESD и импульсных перенапряжений.

Дифференциальная передача основана на передаче сигналов противоположной фазы и их вычитании на приёмнике, за счёт чего подавляются синфазные помехи (common-mode) и снижается уровень излучения. При этом важно контролировать геометрию линии - одинаковую длину проводников (минимизация skew), постоянное расстояние между ними и симметрию трассировки. Типовые значения дифференциального импеданса составляют 90 Ом (HDMI) и 100 Ом (USB, Ethernet, PCIe).

При скоростях от сотен Мбит/с линия уже рассматривается как линия передачи с распределёнными параметрами. В этом режиме критична импедансная согласованность «передатчик — линия — приёмник». Несогласование приводит к отражениям, деградации фронтов и межсимвольным искажениям (ISI). Ограничение полосы пропускания линии сглаживает фронты сигнала. Качество передачи обычно оценивается по глазковой диаграмме (джиттер, шум, вертикальное и горизонтальное раскрытие).

Гальваническая развязка разрывает цепи заземления и устраняет выравнивающие токи между устройствами. Она может быть реализована оптическими, индуктивными или ёмкостными методами. В интерфейсах Ethernet применяются трансформаторы (magnetics), которые одновременно обеспечивают передачу дифференциального сигнала, согласование и электрическую изоляцию порядка 1–2 кВ.

Защита от ESD выполняется с помощью TVS-диодов, размещаемых непосредственно у разъёмов. Они ограничивают перенапряжение (clamping) и отводят импульс в землю. Для высокоскоростных линий используются компоненты с малой паразитной ёмкостью, чтобы не ухудшать полосу пропускания.

Физическая реализация линий передачи включает коаксиальные кабели (50/75 Ом), витые пары (Cat5e/Cat6, до 100 м), а также микрополосковые и копланарные линии на печатных платах. При этом критично обеспечить непрерывный опорный слой, контролируруемую геометрию и корректный возвратный путь тока.

Разъёмы (USB, RJ-45, SMA и др.) должны сохранять импеданс и экранирование линии. Переход «кабель — разъём — плата» выполняется согласованным, иначе возникают отражения и дополнительные потери сигнала.

Совместное применение указанных решений позволяет обеспечить:

- высокую помехоустойчивость и устойчивость к внешним электромагнитным воздействиям;
- стабильную передачу данных на высоких скоростях;
- снижение уровня излучаемых помех и улучшение электромагнитной совместимости (EMC);
- защиту оборудования и интерфейсных цепей от повреждений;
- корректную работу системы при различии потенциалов земли и в условиях промышленных помех.

Нарушение согласования импеданса, симметрии или экранирования приводит к росту отражений, увеличению джиттера и «закрытию» глазковой диаграммы, что напрямую повышает вероятность ошибок передачи данных.

4. Беспроводные линии связи

4.1. Общие сведения о беспроводных линиях связи

В **беспроводных линиях связи** передача данных осуществляется без использования проводников. Передача информации выполняется с помощью электромагнитных волн, распространяющихся в пространстве между передатчиком и приемником. Для передачи данных используются **радиоканалы** различных диапазонов частот.

Передача данных по беспроводным каналам осуществляется через канал передачи данных, который включает передатчик, среду распространения сигнала и приемник. В качестве среды передачи может использоваться различная среда, например воздушная среда, вакуум (космос) или жидкость (мировой океан).

Беспроводные линии связи имеют ряд особенностей по сравнению с проводными линиями передачи данных. На передачу данных оказывают влияние электромагнитные помехи и затухание сигнала в среде распространения. Важными характеристиками беспроводных линий связи являются дальность передачи данных, скорость передачи, энергопотребление передающих устройств и устойчивость к помехам.

Выбор технологии беспроводной передачи данных определяется требуемой дальностью связи, скоростью передачи данных и энергопотреблением устройств.

4.2. Типы беспроводных каналов передачи

4.2.1. Инфракрасный канал

Инфракрасный канал связи используется для передачи данных с помощью инфракрасного излучения. Передача данных осуществляется между передатчиком и приемником, расположенными в зоне прямой видимости. Инфракрасное излучение распространяется в пространстве и принимается фотоприемником, который преобразует световой сигнал в электрический.

В инфракрасных системах передачи данных в качестве передатчика обычно используется инфракрасный светодиод (IR LED), излучающий свет в диапазоне длин волн примерно 850–950 нм. В качестве приемника используется фотодиод или фототранзистор, чувствительный к инфракрасному излучению.

Передача информации осуществляется не изменением яркости излучения напрямую, а с помощью модуляции излучения. Чаще всего используется импульсная модуляция или амплитудная модуляция несущей

частоты (например, 36–40 кГц в пультах дистанционного управления). Это позволяет повысить помехоустойчивость и отделить полезный сигнал от фонового освещения.

Для инфракрасной передачи данных используются стандарты **IrDA** (Infrared Data Association), которые определяют параметры передачи данных, скорость передачи, формат кадров и протоколы обмена данными. Стандарты IrDA включают в себя спецификации, представленные в таблице 2.

Таблица 2 — Стандарты IrDA

Спецификация	Скорость передачи
SIR	9,6–115,2 Кбит/с
HDLC	0,576 и 1,152 Мбит/с
FIR	4 Мбит/с
VFIR	16 Мбит/с
UFIR	96 Мбит/с
Giga-IR	1 Гбит/с

В стандартах IrDA используется импульсная передача данных, при которой логическая единица передается коротким импульсом инфракрасного излучения, а логический ноль — отсутствием импульса. Такой способ передачи уменьшает среднюю мощность излучения и снижает влияние фоновой засветки.

Особенностью инфракрасного канала является необходимость прямой видимости между передатчиком и приемником, а также небольшая дальность передачи данных. Инфракрасное излучение плохо проходит через непрозрачные препятствия и сильно рассеивается, поэтому дальность связи обычно ограничена несколькими метрами.

Инфракрасный канал слабо подвержен радиочастотным помехам, но чувствителен к внешним источникам света, таким как солнечный свет и лампы накаливания. Для повышения помехоустойчивости используются оптические фильтры, модуляция сигнала и узконаправленные приемники.

Инфракрасные каналы связи применяются:

- в пультах дистанционного управления;
- в системах передачи данных на небольшие расстояния;
- в датчиках и системах автоматизации;

- в устройствах, где требуется простая беспроводная связь на малом расстоянии;
- в конструкциях со сборкой механических подвижных частей, где использование проводов затруднительно (например, лидары);
- в оптических линиях связи на короткие расстояния.

4.2.2. Узкополосные каналы

Узкополосные каналы связи используют передачу сигнала в узком диапазоне частот. Передача информации осуществляется с использованием несущей частоты, параметры которой изменяются в соответствии с передаваемой информацией. Такой процесс называется модуляцией.

В узкополосных каналах обычно используются методы модуляции, при которых изменяется один из параметров несущего сигнала:

- амплитуда — амплитудная модуляция (АМ);
- частота — частотная модуляция (FM);
- фаза — фазовая модуляция (PM).

Для передачи цифровых данных используются цифровые варианты этих методов:

- ASK — амплитудная манипуляция;
- FSK — частотная манипуляция;
- PSK — фазовая манипуляция;
- QAM — квадратурная амплитудная модуляция.

При модуляции цифровой сигнал переносится в область высоких частот, что позволяет передавать его по радиоканалам, телефонным линиям и другим аналоговым каналам связи.

Одной из основных характеристик канала связи является полоса пропускания. Скорость передачи данных напрямую связана с полосой пропускания канала и отношением сигнал/шум. Теоретическое максимальное значение скорости передачи данных определяется формулой Шеннона:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right),$$

где

- C — пропускная способность канала,
- B — полоса пропускания канала,
- $\frac{S}{N}$ — отношение сигнал/шум.

Таким образом, чем шире полоса канала и выше отношение сигнал/шум, тем выше возможная скорость передачи данных.

Особенностью узкополосных каналов является:

- небольшая полоса частот;
- относительно низкая скорость передачи данных;
- высокая дальность связи;
- высокая энергетическая эффективность;
- хорошая помехоустойчивость.

Узкополосные сигналы занимают небольшой спектр частот, поэтому могут передаваться на большие расстояния при небольшой мощности передатчика. Однако узкая полоса канала ограничивает скорость передачи данных.

Узкополосные каналы связи применяются:

- в радиосвязи;
- в системах телеметрии;
- в системах управления и мониторинга;
- в спутниковой связи;
- в системах IoT и LPWAN (LoRa, Sigfox, NB-IoT);
- в авиационной и морской радиосвязи.

Недостатком узкополосных систем является низкая скорость передачи данных и необходимость точной настройки частоты передатчика и приемника. Кроме того, при использовании амплитудной модуляции такие системы чувствительны к шумам и помехам, а для передачи на большие расстояния могут требоваться передатчики повышенной мощности.

4.2.3. Широкополосные каналы

Широкополосные каналы связи используют передачу сигнала в широком диапазоне частот. При этом полоса сигнала значительно превышает минимально необходимую полосу для передачи информации. Такой метод передачи называется расширением спектра (spread spectrum).

Расширение спектра позволяет:

- повысить помехоустойчивость;
- уменьшить влияние узкополосных помех;
- повысить скрытность передачи;

- обеспечить одновременную работу нескольких передатчиков в одном диапазоне частот;
- уменьшить влияние многолучевого распространения сигнала.

Основной идеей расширения спектра является преобразование узкополосного информационного сигнала в широкополосный сигнал с помощью псевдослучайной последовательности. На приемной стороне выполняется обратное преобразование (корреляционная обработка), в результате чего полезный сигнал восстанавливается, а помехи ослабляются.

Для расширения спектра используются различные методы. Одним из методов является **DSSS** (Direct Sequence Spread Spectrum), при котором информационный сигнал умножается на псевдослучайную последовательность, в результате чего спектр сигнала расширяется.

Другим методом является **FHSS** (Frequency Hopping Spread Spectrum), при котором передача сигнала осуществляется на различных частотах, которые изменяются по определенным правилам.

В современных системах связи широко используются и другие методы широкополосной передачи, например:

- OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) — передача данных одновременно на большом количестве ортогональных поднесущих;
- CDMA — множественный доступ с кодовым разделением каналов;
- UWB (Ultra Wideband) — сверхширокополосная передача короткими импульсами.

Метод OFDM используется в:

- Wi-Fi;
- LTE;
- 5G;
- DVB;
- ADSL;
- цифровом телевидении.

Такой подход позволяет снизить влияние помех и повысить безопасность передачи данных, так как сигнал становится менее заметным для посторонних наблюдателей. Но методы расширения спектра требуют более сложного оборудования и алгоритмов обработки сигнала, что может увеличить стоимость и сложность системы связи.

Методы расширения спектра используются в беспроводных системах передачи данных:

- ZigBee;
- Bluetooth;
- Wi-Fi;
- GPS;
- системах мобильной связи;
- спутниковой связи;
- системах радионавигации.

Широкополосные системы обеспечивают:

- высокую скорость передачи данных;
- высокую помехоустойчивость;
- возможность работы многих устройств в одном диапазоне частот;
- устойчивость к многолучевому распространению сигнала.

Недостатками широкополосных систем являются:

- сложность аппаратуры;
- сложные алгоритмы цифровой обработки сигналов;
- необходимость синхронизации псевдослучайных последовательностей.

4.3. Методы расширения спектра

4.3.1. DSSS

Метод **DSSS** (Direct Sequence Spread Spectrum) — это метод расширения спектра методом прямой последовательности, при котором информационный сигнал умножается на псевдослучайную последовательность с высокой скоростью, называемую чиповой последовательностью (chip sequence).

В DSSS каждый информационный бит заменяется последовательностью из нескольких более коротких импульсов — чипов. Скорость передачи чипов значительно выше скорости передачи исходных битов, поэтому спектр сигнала расширяется.

Если один бит заменяется последовательностью из N чипов, то полоса сигнала увеличивается примерно в N раз.

Основные свойства DSSS:

- каждый бит преобразуется в последовательность чипов;
- скорость передачи чипов выше скорости передачи данных;
- спектр сигнала расширяется;
- спектральная плотность мощности уменьшается;
- сигнал становится похожим на шум;
- повышается помехоустойчивость;
- несколько передатчиков могут работать в одном диапазоне частот, используя разные кодовые последовательности (CDMA).

На приемной стороне выполняется корреляционная обработка — принятый сигнал умножается на ту же псевдослучайную последовательность. В результате полезный сигнал складывается, а шум и помехи ослабляются.

Важной характеристикой DSSS является коэффициент расширения спектра (processing gain):

$$G_p = \frac{R_{\text{chip}}}{R_{\text{data}}} = \frac{B_{\text{spread}}}{B_{\text{data}}},$$

где:

- R_{chip} — скорость передачи чипов;
- R_{data} — скорость передачи данных;
- B_{spread} — полоса расширенного сигнала;
- B_{data} — полоса исходного сигнала.

Чем больше коэффициент расширения спектра, тем выше помехоустойчивость системы и тем сложнее обнаружить сигнал.

Метод DSSS используется, например:

- в Wi-Fi стандарта IEEE 802.11b;
- в GPS;
- в системах CDMA.

4.3.2. FHSS

Метод **FHSS** (Frequency Hopping Spread Spectrum) основан на передаче сигнала с периодическим изменением несущей частоты и относится к методам расширения спектра методом частотных скачков.

Вся выделенная для передачи полоса частот делится на большое количество узких частотных каналов. Передатчик в каждый момент времени использует только один из этих каналов, после чего быстро перестраивается на другой канал. Переходы между частотами происходят

по псевдослучайной последовательности, известной передатчику и приемнику.

Передатчик и приемник синхронно переключаются между частотными каналами, поэтому приемник может принимать сигнал только на той частоте, на которой в данный момент работает передатчик.

Основные свойства FHSS:

- передача осуществляется на одной частоте в каждый момент времени;
- частота передачи периодически изменяется;
- используется псевдослучайная последовательность перестройки частоты;
- сигнал занимает широкую полосу частот во времени;
- высокая устойчивость к узкополосным помехам;
- высокая скрытность передачи;
- возможность работы нескольких устройств в одном диапазоне частот.

FHSS может работать в двух режимах:

- Slow hopping — частота меняется медленнее, чем передаются биты (несколько бит передаются на одной частоте);
- Fast hopping — частота меняется быстрее, чем передаются биты (один бит передается на нескольких частотах).

Метод FHSS применяется, например:

- в Bluetooth;
- в военных системах связи;
- в промышленных беспроводных системах;
- в системах телеметрии и управления.

4.4. Стандарты беспроводной передачи данных

4.4.1. ZigBee

ZigBee — это стандарт беспроводной передачи данных, основанный на стандарте IEEE 802.15.4. Технология предназначена для построения беспроводных сетей с низким энергопотреблением и небольшой скоростью передачи данных. У истоков протокола стоит организация ZigBee Alliance, отвечающая за его развитие и продвижение, а также за сертификацию оборудования.

Сети ZigBee могут использовать различные топологии, включая звездную и mesh-топологию. Mesh-топология позволяет передавать данные через промежуточные узлы, что увеличивает дальность сети и повышает надежность передачи данных (рисунок 85).

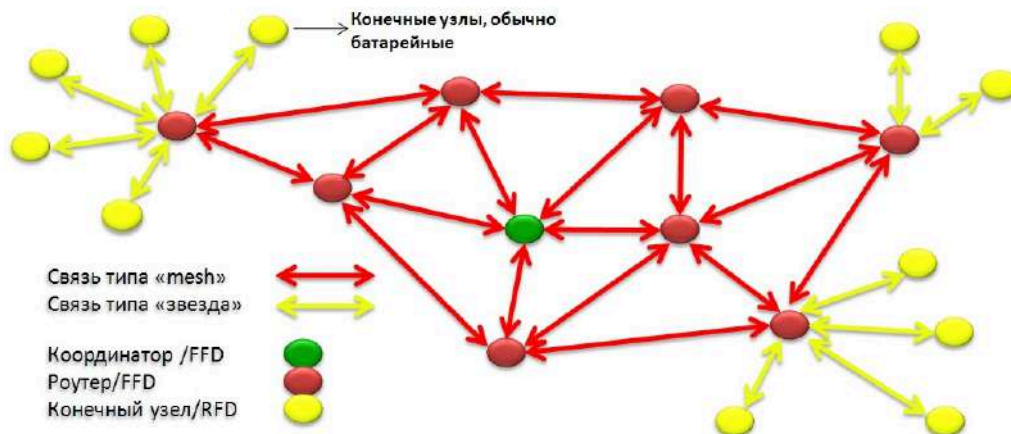


Рисунок 85 — Mesh-топология в сети ZigBee

В сети ZigBee используются различные типы узлов:

- координатор;
- маршрутизаторы;
- конечные устройства.

Координатор запускает и управляет сетью. Маршрутизаторы транслируют пакеты, осуществляют динамическую маршрутизацию, восстанавливают маршруты при перегрузках в сети или отказе какого-либо устройства. Конечное устройство может принимать и отправлять пакеты, но не занимается их трансляцией и маршрутизацией.

Расстояние между рабочими станциями сети составляет десятки метров внутри помещений и сотни метров на открытом воздухе. «Брутто» скорость (включая служебную информацию) составляет 250 кбит/с. Средняя скорость передачи полезных данных, в зависимости от загрузки сети и числа ретрансляций, составляет от 5 до 40 кбит/с. Устройства ZigBee отличаются низким электропотреблением, в особенности конечные устройства, для которых предусмотрен режим «сна», что позволяет этим устройствам работать до трех лет от одной обычной батарейки AA или AAA.

ZigBee применяется:

- в системах автоматизации и системах «умный дом»;
- беспроводных сенсорных сетях и устройствах Интернета вещей;

требуется беспроводная передача данных между микроконтроллерами и устройствами управления.

4.4.2. Bluetooth

Bluetooth — это технология беспроводной передачи данных малого радиуса действия в диапазоне 2,4 ГГц, предназначенная для обмена информацией между различными электронными устройствами и построения персональных сетей (PAN).

Bluetooth работает на основе **FHSS** (Frequency Hopping Spread Spectrum) и использует **AFH** (Adaptive Frequency Hopping) для уменьшения помех от других устройств диапазона 2,4 ГГц.

Существует несколько стандартов Bluetooth (таблица 3), которые можно разделить на Bluetooth Classic (BR/EDR), Bluetooth Low Energy (BLE) и устройства Dual Mode, поддерживающие оба режима. Bluetooth Classic используется для передачи аудио и данных на относительно высокой скорости, Bluetooth Low Energy предназначен для устройств с низким энергопотреблением и передачи небольших объемов данных, а устройства Dual Mode могут работать с обоими типами устройств.

Основным направлением использования Bluetooth является создание персональных сетей (PAN), объединяющих мобильные устройства, ноутбуки, планшеты, беспроводные наушники, включая полностью беспроводные наушники типа TWS (True Wireless Stereo), носимую электронику (смарт-часы, фитнес-браслеты), периферийные устройства (клавиатуры, мыши), датчики, устройства умного дома и системы автоматизации. Технология Bluetooth Low Energy широко применяется в устройствах Интернета вещей (IoT), системах мониторинга, медицинских датчиках и промышленной автоматике. Возможность передачи голоса позволяет использовать Bluetooth в беспроводных гарнитурах, системах hands-free, слуховых аппаратах и аудиоустройствах. Узлами персональной сети могут быть любые устройства, способные передавать, принимать или обрабатывать данные в рамках беспроводного соединения малого радиуса действия.

4.4.3. Bluetooth Classic (BR/EDR)

В сетях Bluetooth используется структура piconet, в которой одно устройство является ведущим (master), а остальные — ведомыми (slave). Ведущее устройство управляет синхронизацией и распределением временных интервалов передачи. Несколько пикосетей могут объединяться в scatternet (рисунок 87).

Таблица 3 — Стандарты Bluetooth

Характеристика	Bluetooth Classic (BR/EDR)	Bluetooth Low Energy (BLE)	Bluetooth Dual Mode
Назначение	Аудио, передача данных, периферия	Датчики, IoT, носимая электроника	Универсальные устройства
Скорость передачи	до 3 Мбит/с	125 кбит/с – 2 Мбит/с	зависит от режима
Дальность	10 м (обычно)	10–50 м (до 100+ м BLE Long Range)	зависит от режима
Энергопотребление	Среднее / высокое	Очень низкое	Среднее
Тип соединения	Постоянное соединение	Периодическая передача пакетов	Оба варианта
Передача аудио	Да	Да (BLE Audio, новые версии)	Да
Топология	Piconet (Master–Slave)	Star, Mesh	Обе
Примеры модулей	HC-05, HC-06	HM-10, nRF52	ESP32
Примеры устройств	Наушники, гарнитуры, клавиатуры	Датчики, фитнес-браслеты, маячки	Смартфоны, ноутбуки
Основные преимущества	Высокая скорость, аудио	Низкое энергопотребление	Универсальность
Недостатки	Большое энергопотребление	Низкая скорость	Сложнее и дороже

Bluetooth использует многоуровневый стек протоколов (рисунок 88):

- physical — физический уровень, определяющий частоты и мощности радиосигналов, используемых для передачи информации;
- baseband — уровень базового диапазона частот, выполняющий выбор последовательности псевдослучайной перестройки частоты, синхронизацию устройств в пикосети, формирование и передачу кадров по установленным каналам. Кадр Bluetooth

имеет переменную длину, поле данных может содержать от 0 до 2744 бит (343 байт). Для передачи голоса используются кадры фиксированного размера с полем данных 240 бит (30 байт);

- LMP (Link Manager Protocol) — протокол управления соединением, выполняющий аутентификацию устройств, шифрование трафика, управление состояниями устройств и смену ролей master/slave;
- L2CAP (Logical Link Control and Adaptation Protocol) — обеспечивает передачу данных верхних уровней, сегментацию и сборку пакетов. Уровень L2CAP принимает от протоколов верхнего уровня сегменты данных размером до 64 Кбайт и делит их на небольшие кадры для передачи через Baseband.

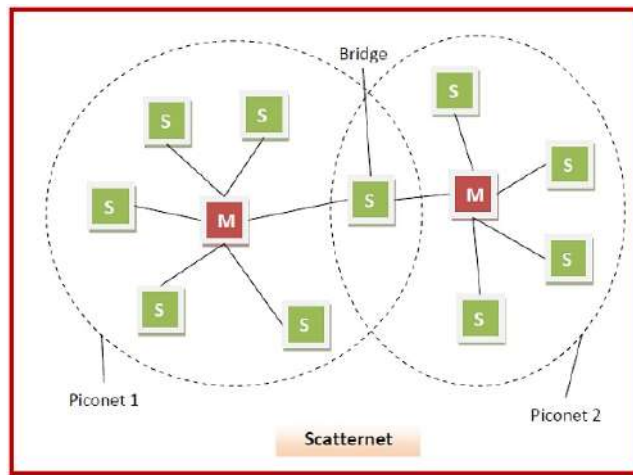


Рисунок 87 — Структура scatternet в Bluetooth

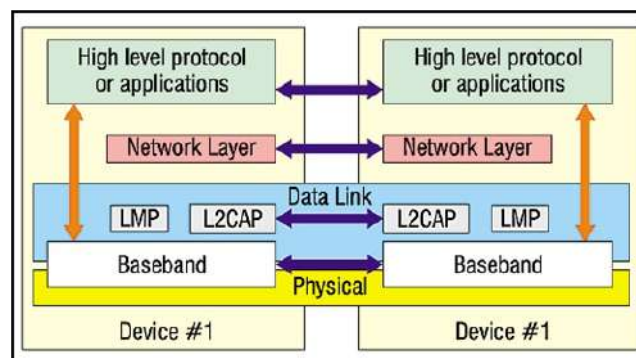


Рисунок 88 — Стек протоколов Bluetooth

Протоколы Physical, Baseband, LMP и L2CAP образуют ядро стека Bluetooth Classic. Они обеспечивают радиопередачу, установление соединения, управление соединением и передачу пакетов данных между устройствами. На основе ядра стека Bluetooth Classic (Physical, Baseband, LMP, L2CAP) работают протоколы и профили верхнего уровня, обеспечивающие передачу различных типов данных и реализацию

пользовательских приложений. Эти протоколы работают поверх уровня L2CAP и используют его для передачи данных.

К основным протоколам и профилям верхнего уровня относятся:

- RFCOMM — протокол эмуляции последовательного порта. Используется для передачи данных так, как будто устройства соединены через интерфейс UART. Этот протокол применяется, например, в модулях HC-05 и HC-06;
- SDP (Service Discovery Protocol) — протокол обнаружения сервисов, позволяющий устройствам определять, какие службы и профили поддерживаются другим устройством;
- OBEX (Object Exchange Protocol) — протокол обмена объектами, используемый для передачи файлов, контактов, изображений и других данных;
- FTP (File Transfer Profile) — профиль передачи файлов по Bluetooth;
- HID (Human Interface Device Profile) — профиль для устройств ввода, таких как клавиатуры, мыши, игровые контроллеры;
- A2DP (Advanced Audio Distribution Profile) — профиль для передачи аудиопотока, например в беспроводные наушники и колонки.

Передача голосовых данных осуществляется через каналы SCO/eSCO (Synchronous Connection Oriented), которые работают напрямую через уровень Baseband, минуя уровень L2CAP. Эти каналы предназначены для передачи голосовых данных с гарантированной задержкой и постоянной скоростью передачи. В отличие от передачи данных по L2CAP, где возможна повторная передача пакетов, в каналах SCO используется потоковая передача без повторной передачи потерянных пакетов, что уменьшает задержку передачи голоса. Для передачи голосовой информации используется импульсно-кодовая модуляция (PCM), скорость голосового канала обычно составляет 64 Кбит/с. Каналы SCO/eSCO используются в Bluetooth-гарнитурах, системах hands-free и других устройствах передачи голосовой информации.

Дальность связи Bluetooth определяется мощностью передатчика, то есть классом устройства, а также версией стандарта Bluetooth и условиями распространения радиосигнала.

Классы мощности Bluetooth:

- Класс 3 — дальность до 1 м;

- Класс 2 — дальность до 10 м (наиболее распространён в мобильных устройствах);
- Класс 1 — дальность до 100 м (преимущественно промышленное применение).

Новые версии стандарта Bluetooth (например Bluetooth 5) позволяют увеличивать дальность связи за счёт новых режимов передачи и снижения скорости передачи данных, однако реальная дальность определяется классом мощности устройства и условиями среды.

В качестве примера аппаратной реализации Bluetooth-интерфейса можно привести модуль HC-05 (рисунок 89), широко используемый в микроконтроллерных системах и учебных лабораторных стендах. Модуль HC-05 реализует интерфейс Bluetooth версии 2.0 + EDR и предназначен для организации беспроводного последовательного соединения по интерфейсу UART. Модуль может работать в режиме ведущего (Master) и ведомого (Slave), что позволяет организовывать соединение между микроконтроллерами, компьютерами, мобильными устройствами и различными встроенными системами. Обмен данными осуществляется как через обычный последовательный порт, поэтому для микроконтроллера модуль выглядит как стандартный UART-интерфейс. Дальность связи обычно составляет около 10 метров (класс мощности 2). Модуль HC-05 часто применяется в робототехнике, системах телеметрии, системах удалённого управления, учебных проектах и прототипировании электронных устройств.



Рисунок 89 — Модуль HC-05 для беспроводной передачи данных по Bluetooth

4.4.4. Bluetooth Low Energy (BLE)

Bluetooth Low Energy (BLE) — это версия стандарта Bluetooth, предназначенная для устройств с низким энергопотреблением и передачи небольших объемов данных. Основной областью применения BLE являются

устройства Интернета вещей (IoT), носимая электроника, датчики и системы автоматизации.

В отличие от Bluetooth Classic, Bluetooth Low Energy не поддерживает постоянную высокоскоростную передачу данных, а работает в режиме периодической передачи небольших пакетов данных. Устройство BLE может большую часть времени находиться в режиме сна и просыпаться только для передачи или приема данных, что обеспечивает очень низкое энергопотребление.

В Bluetooth Low Energy используются следующие роли устройств:

- Central — устройство, которое инициирует соединение (например смартфон или компьютер);
- Peripheral — устройство, которое передает advertising-пакеты и ожидает подключения (датчики, браслеты, маячки);
- Observer — устройство, которое только сканирует advertising-пакеты;
- Broadcaster — устройство, которое только передает advertising без установления соединения.

На практике чаще всего используется схема Central–Peripheral, где центральное устройство подключается к нескольким периферийным устройствам и получает от них данные.

В Bluetooth Low Energy используются два основных режима работы:

- advertising — устройство периодически передает короткие пакеты с информацией о себе;
- connection — устанавливается соединение между устройствами и происходит обмен данными.

Сеть Bluetooth Low Energy обычно имеет топологию «звезда», где центральное устройство (например смартфон) взаимодействует с несколькими периферийными устройствами (датчиками, браслетами, маячками). В новых версиях стандарта также поддерживается mesh-топология для построения сетей из большого количества устройств.

Bluetooth Low Energy широко применяется в датчиках температуры, влажности, давления, в фитнес-браслетах, смарт-часах, маячках (beacon), медицинских датчиках, системах умного дома и промышленной автоматике. Благодаря низкому энергопотреблению такие устройства могут работать от батареи несколько месяцев или лет.

В качестве примеров аппаратной реализации Bluetooth Low Energy можно привести модули HM-10, а также микроконтроллеры семейства

Nordic nRF52 и микроконтроллер ESP32, которые поддерживают BLE и могут использоваться для построения беспроводных сенсорных сетей и IoT-устройств.

Bluetooth Low Energy использует многоуровневый стек протоколов (рисунок 90), обеспечивающий передачу данных, управление соединением и взаимодействие приложений.

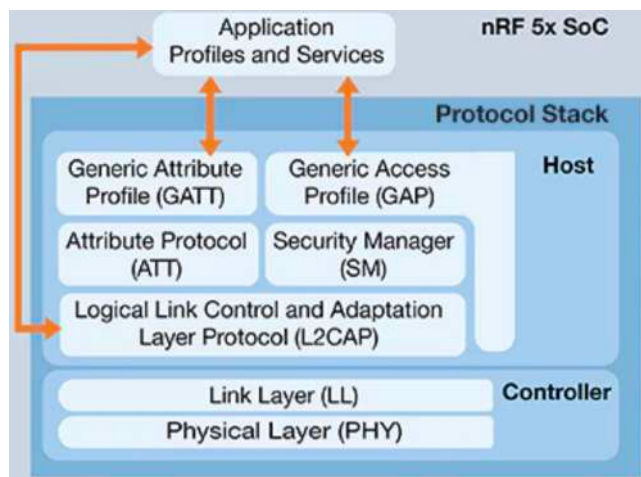


Рисунок 90 — Стек протоколов Bluetooth Low Energy

Стек протоколов BLE включает следующие основные уровни:

- Physical Layer — физический уровень, определяющий радиочастоты, модуляцию и параметры радиосигнала. BLE работает в диапазоне 2,4 ГГц и использует 40 радиоканалов;
- Link Layer — канальный уровень, отвечающий за установление соединения, управление соединением, advertising, сканирование устройств, подтверждение получения пакетов и управление энергопотреблением;
- L2CAP (Logical Link Control and Adaptation Protocol) — обеспечивает передачу данных между верхними уровнями и канальным уровнем, сегментацию и сборку пакетов данных;
- ATT (Attribute Protocol) — протокол атрибутов, используемый для обмена небольшими блоками данных между устройствами. Все данные в BLE представлены в виде атрибутов;
- GATT (Generic Attribute Profile) — профиль, определяющий структуру данных и способ взаимодействия устройств. В GATT используются сервисы и характеристики, через которые происходит обмен данными между устройствами;

- GAP (Generic Access Profile) — определяет режимы работы устройств, процедуры обнаружения устройств, установления соединения и роли устройств (Central и Peripheral).

В Bluetooth Low Energy обмен данными осуществляется через сервисы и характеристики, определенные профилем GATT, а управление соединением и обнаружение устройств осуществляется с помощью GAP. В модели GATT данные организованы в виде иерархической структуры: сервисы (services) содержат характеристики (characteristics), а характеристики, в свою очередь, могут содержать дескрипторы (descriptors). Сервис представляет собой логическую группу данных, например «температура» или «уровень заряда батареи», а характеристика — конкретное значение или параметр внутри сервиса.

Каждая характеристика имеет уникальный идентификатор (UUID), значение (value) и набор свойств (properties), определяющих способы взаимодействия с ней. Основные свойства характеристик включают:

- read — чтение значения характеристик центральным устройством;
- write — запись значения в характеристику;
- notify — асинхронная отправка обновлений значения без подтверждения;
- indicate — отправка данных с подтверждением получения;
- broadcast — передача значения в advertising-пакетах.

Характеристики могут дополняться дескрипторами, например Client Characteristic Configuration Descriptor (CCCD), который используется для включения уведомлений (notify) или индикаций (indicate) со стороны периферийного устройства.

Обмен данными в BLE обычно строится вокруг операций чтения, записи и подписки на уведомления характеристик. Например, периферийное устройство может периодически обновлять значение характеристики температуры, а центральное устройство — подписываться на уведомления и получать обновления без постоянного опроса. Такой подход снижает энергопотребление и уменьшает нагрузку на канал связи.

Примеры стандартных сервисов и характеристик Bluetooth Low Energy продемонстрированы в таблице 4.

Таблица 4 — Характеристики Bluetooth Low Energy

Service (UUID)	Characteristic (UUID)	Description
Battery Service (0x180F)	Battery Level (0x2A19)	Уровень заряда батареи, %
Device Information (0x180A)	Manufacturer Name (0x2A29)	Производитель устройства
	Model Number (0x2A24)	Модель устройства
	Firmware Revision (0x2A26)	Версия прошивки
Health Thermometer (0x1809)	Temperature Measurement (0x2A1C)	Измеренная температура
Environmental Sensing (0x181A)	Temperature (0x2A6E)	Температура окружающей среды
	Humidity (0x2A6F)	Влажность
	Pressure (0x2A6D)	Атмосферное давление
Heart Rate (0x180D)	Heart Rate Measurement (0x2A37)	Частота сердечных сокращений
Generic Access (0x1800)	Device Name (0x2A00)	Имя устройства (advertising)
	Appearance (0x2A01)	Тип устройства
Generic Attribute (0x1801)	Service Changed (0x2A05)	Изменение структуры сервисов
Cycling Speed and Cadence (0x1816)	CSC Measurement (0x2A5B)	Скорость и каденс (велосенсоры)
Glucose (0x1808)	Glucose Measurement (0x2A18)	Уровень глюкозы в крови
Custom Service (128-bit UUID)	Custom Characteristic	Пользовательские данные (IoT, управление, телеметрия)

В пользовательских устройствах могут использоваться как стандартные сервисы (SIG-defined), так и пользовательские (custom services) с собственными UUID. Это позволяет описывать произвольные данные и реализовывать специфичную логику взаимодействия, например управление исполнительными устройствами, передача телеметрии или конфигурация параметров системы.

В качестве аппаратной платформы для разработки устройств Bluetooth Low Energy широко используются микроконтроллеры со встроенным радиомодулем BLE. Одним из наиболее распространенных семейств являются микроконтроллеры Nordic Semiconductor nRF52 (например, nRF52832, nRF52840), которые содержат ядро ARM Cortex-M и встроенный BLE-трансивер (рисунок 91). Для разработки программного обеспечения для этих микроконтроллеров используется SDK nRF5 SDK или nRF Connect SDK, которые содержат стек протоколов BLE, примеры приложений, драйверы и библиотеки для работы с сервисами GATT, advertising и управлением соединением.

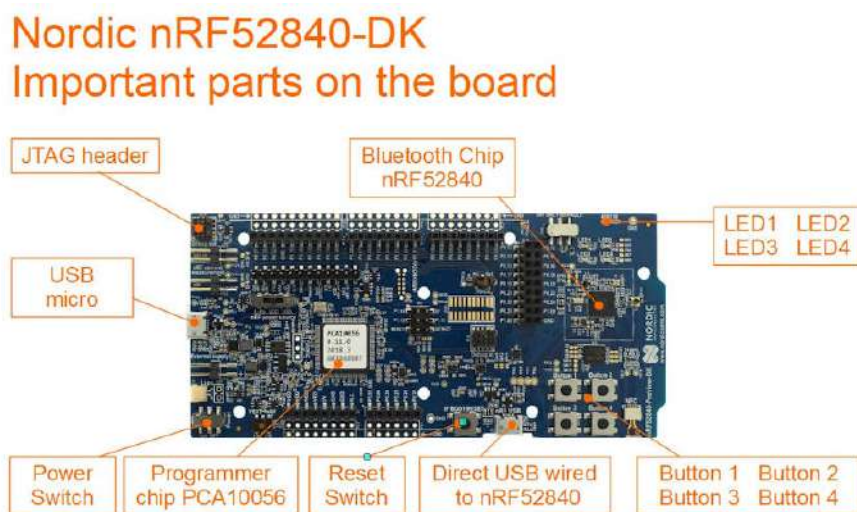


Рисунок 91 — Плата Nordic Semiconductor nRF52 для разработки устройств Bluetooth Low Energy

Другим распространенным решением являются микроконтроллеры ESP32, которые поддерживают Wi-Fi и Bluetooth Low Energy. Для разработки программ используется ESP-IDF (Espressif IoT Development Framework) или среда Arduino, которые предоставляют библиотеки для работы с BLE, создания GATT-сервисов, advertising и обмена данными между устройствами.

Использование микроконтроллеров со встроенным BLE и готовых SDK позволяет разрабатывать беспроводные устройства без реализации низкоуровневого радиопотокола, так как стек Bluetooth Low Energy уже реализован в программной библиотеке производителя.

4.4.5. Wi-Fi

Wi-Fi — это технология беспроводной передачи данных, основанная на стандартах IEEE 802.11. Технология используется для организации беспроводных локальных сетей и подключения устройств к вычислительным сетям.

Современные стандарты Wi-Fi включают несколько поколений технологий IEEE 802.11, которые отличаются диапазонами частот, скоростью передачи данных и используемыми методами модуляции. Основными современными стандартами являются:

- 802.11n (Wi-Fi 4) — работает в диапазонах 2,4 и 5 ГГц, обеспечивает скорость передачи данных до 600 Мбит/с;
- 802.11ac (Wi-Fi 5) — работает в диапазоне 5 ГГц, обеспечивает скорость передачи данных до нескольких Гбит/с;
- 802.11ax (Wi-Fi 6 / Wi-Fi 6E) — работает в диапазонах 2,4, 5 и 6 ГГц, обеспечивает более высокую скорость передачи данных, повышенную эффективность работы сети при большом количестве устройств и сниженное энергопотребление;
- 802.11be (Wi-Fi 7) — новый стандарт, обеспечивающий очень высокие скорости передачи данных, низкие задержки и работу в диапазонах 2,4, 5 и 6 ГГц.

Обозначения Wi-Fi 4, Wi-Fi 5, Wi-Fi 6 и Wi-Fi 7 используются для упрощения обозначения поколений Wi-Fi и соответствуют стандартам IEEE 802.11n, 802.11ac, 802.11ax и 802.11be соответственно.

В технологии Wi-Fi используется стек протоколов, включающий физический и канальный уровни (рисунок 92). На канальном уровне используется MAC-уровень, который определяет правила доступа устройств к среде передачи данных и формат передаваемых кадров. Несмотря на появление новых стандартов Wi-Fi (802.11n, 802.11ac, 802.11ax, 802.11be), общая структура стека IEEE 802.11 остается неизменной и включает физический уровень (PHY) и канальный уровень (MAC). В новых стандартах изменяются методы модуляции, ширина каналов, методы множественного доступа и технологии повышения пропускной способности, такие как OFDM, OFDMA, MU-MIMO и Beamforming. Эти технологии позволяют увеличить скорость передачи данных, уменьшить задержки и повысить эффективность работы сети при большом количестве устройств.

Физический уровень IEEE 802.11 — радиоканал. Этот уровень характеризует параметры физической среды передачи данных, такие как частота, ширина канала, модуляция и мощность сигнала. Канальный уровень осуществляет управление доступом к передающей среде и обеспечивает пересылку кадров между любыми двумя устройствами беспроводной сети. После того, как доступ к среде получен, ею может воспользоваться подуровень LLC. Подуровень LLC, организующий

передачу кадров информации, одинаков как в беспроводных сетях Wi-Fi, так и в кабельных сетях с архитектурой Ethernet.

В сетях IEEE 802.11 уровень MAC обеспечивает два режима доступа к разделяемой среде:

- распределённый режим DCF (Distributed Coordination Function);
- централизованный режим PCF (Point Coordination Function).

Скорость передачи данных для оборудования, поддерживающего стандарт 802.11b, не превышает 11 Мбит/с, а для оборудования, поддерживающего стандарт 802.11g, — до 54 Мбит/с. Стандарт 802.11n способен обеспечить скорость передачи данных до 600 Мбит/с. Для 802.11a скорость передачи данных составляет 54 Мбит/с. Диапазон частот — 2,4 или 5 ГГц. Радиус действия — до 100 метров.

При передаче данных по стандарту 802.11ac используются более широкие каналы и более высокая частота, что увеличивает теоретическую скорость до 1,3 Гбит/с. На практике пропускная способность обычно составляет до 600 Мбит/с. Кроме того, устройство на базе 802.11ac передаёт больше данных за один такт.

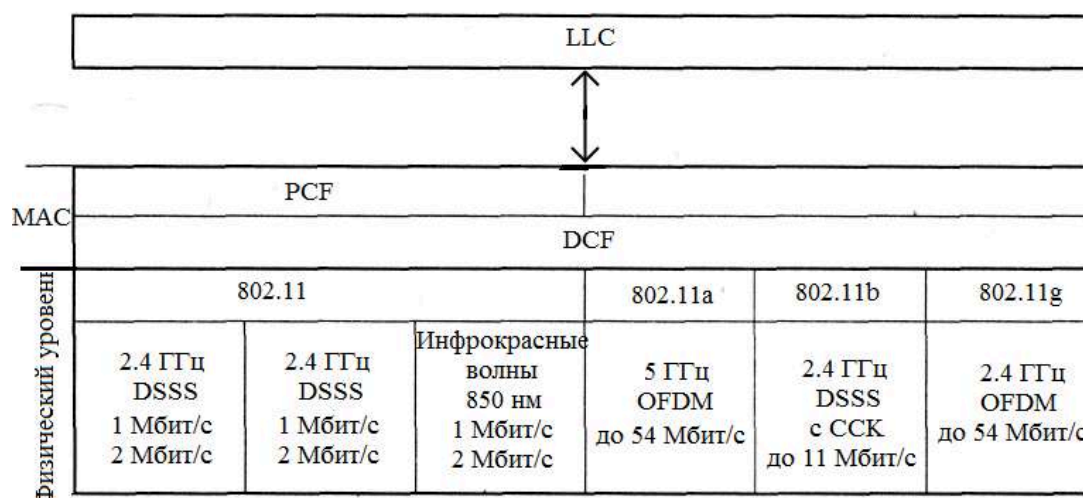


Рисунок 92 — Стек протоколов Wi-Fi

Технология Wi-Fi обеспечивает более высокую скорость передачи данных по сравнению с другими беспроводными технологиями, а также большую дальность передачи данных. При этом энергопотребление устройств Wi-Fi выше по сравнению с технологиями, предназначенными для сенсорных сетей и устройств с автономным питанием.

Wi-Fi применяется для построения беспроводных локальных сетей, подключения компьютеров, мобильных устройств, встроенных систем и устройств Интернета вещей.

4.4.6. LoRaWAN

LoRaWAN — это технология беспроводной передачи данных, предназначенная для сетей Интернета вещей (IoT) и построенная на основе радиотехнологии LoRa (Long Range). Технология используется для передачи небольших объемов данных на большие расстояния при низком энергопотреблении устройств.

Сеть LoRaWAN имеет иерархическую структуру, в которой конечные устройства (end devices) передают данные по беспроводному каналу на шлюзы (gateways), а шлюзы пересылают полученные пакеты на сетевой сервер через IP-сети (Ethernet, мобильная связь, спутниковая связь) (рисунок 93). Сетевой сервер выполняет обработку пакетов, фильтрацию дубликатов, управление устройствами и передачу данных на прикладные серверы.

LoRaWAN строится на топологии «звезда», точнее «звезда-звезда», при которой конечные устройства не взаимодействуют напрямую друг с другом, а передают данные на один или несколько шлюзов. Один шлюз может обслуживать большое количество устройств (тысячи и десятки тысяч), так как устройства передают данные короткими пакетами и большую часть времени находятся в режиме сна.

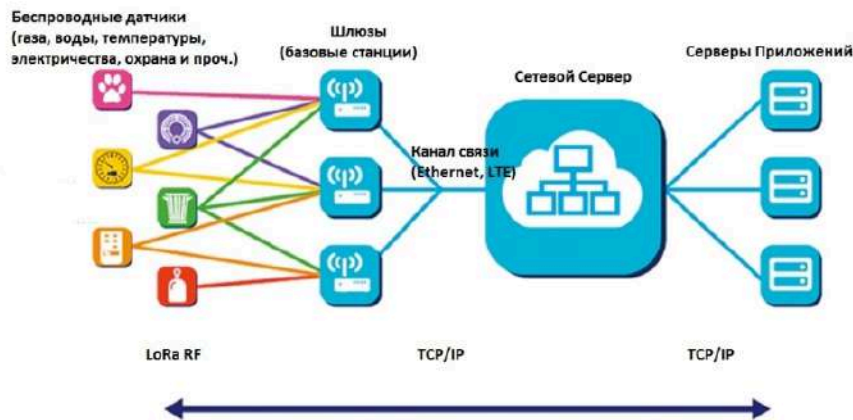


Рисунок 93 — Стек протоколов LoRaWAN

Технология LoRaWAN обеспечивает большую дальность передачи данных по сравнению с другими беспроводными технологиями, но имеет небольшую скорость передачи данных. Основной областью применения являются беспроводные сенсорные сети, системы мониторинга, системы учета ресурсов и устройства Интернета вещей.

4.5. Спутниковая связь

Спутниковая связь используется для передачи данных на большие расстояния с использованием искусственных спутников Земли. Передача

данных осуществляется между наземной станцией и спутником по радиоканалу, после чего спутник ретранслирует сигнал на другую наземную станцию или на пользовательские терминалы. Спутник в большинстве систем выполняет функцию ретранслятора (transponder), принимая сигнал на одной частоте и передавая его на другой частоте (рисунок 94).

В спутниковой связи используются различные типы орбит, которые определяют задержку сигнала, зону покрытия и количество необходимых спутников. Геостационарные спутники (GEO) находятся на высоте около 35786 км и вращаются синхронно с Землей, поэтому остаются неподвижными относительно поверхности. Такие спутники используются для телевидения, спутникового интернета и магистральных каналов связи, однако имеют большую задержку сигнала (около 500–600 мс).

Низкоорбитальные спутники (LEO) располагаются на высоте примерно 300–1500 км и движутся относительно поверхности Земли, поэтому для обеспечения непрерывной связи используется группировка из большого числа спутников. Такие системы обеспечивают меньшую задержку сигнала (20–50 мс) и используются в современных системах спутникового интернета, например Starlink, OneWeb, Iridium, Бюро 1440.

Также используются среднеорбитальные спутники (MEO), расположенные на высоте примерно 5000–20000 км. Такие орбиты применяются, например, в навигационных системах GPS, ГЛОНАСС, Galileo и BeiDou.



Рисунок 94 — Схема спутниковой связи

Спутниковая связь применяется в системах связи на больших расстояниях, спутниковом телевидении, глобальных сетях передачи данных, навигационных системах, системах мониторинга, морской и авиационной связи, а также в системах доступа в Интернет в труднодоступных регионах.

4.6. Сотовая связь

Сотовая связь представляет собой систему беспроводной передачи данных, в которой территория обслуживания разделяется на отдельные зоны — соты (cells). В каждой соте располагается базовая станция, обеспечивающая радиосвязь с мобильными устройствами (рисунок 95). При перемещении абонентского устройства между сотами выполняется процедура передачи соединения (handover) от одной базовой станции к другой без разрыва соединения.

Разделение территории на соты позволяет многократно использовать одни и те же радиочастоты в различных сотах, что значительно увеличивает емкость сети и позволяет обслуживать большое количество пользователей. Сотовая сеть включает абонентские устройства (User Equipment), базовые станции (Base Station), транспортную сеть (backhaul), соединяющую базовые станции с ядром сети, и ядро сети (Core Network), выполняющее маршрутизацию трафика, управление соединениями, аутентификацию абонентов, управление мобильностью и подключение к внешним сетям, включая Интернет.

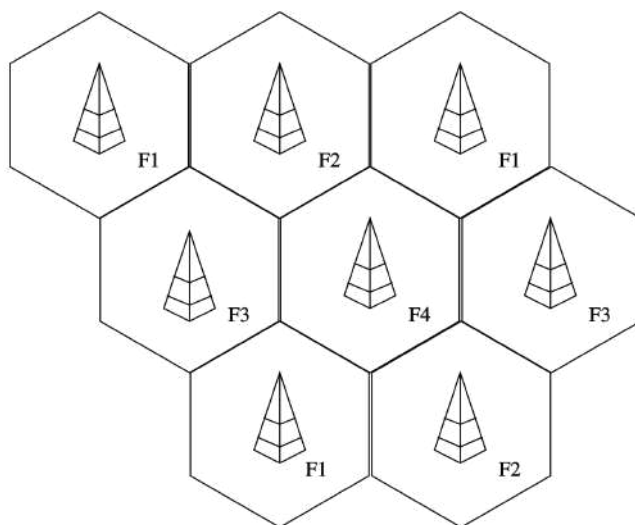


Рисунок 95 — Схема сотовой связи

В различных поколениях сотовой связи используются разные типы базовых станций (NodeB, eNodeB, gNodeB), которые обеспечивают радиосвязь с абонентскими устройствами и выполняют функции управления ресурсами радиосети.

Сотовая связь развивается по поколениям связи, каждое из которых обеспечивает увеличение скорости передачи данных, уменьшение задержек и расширение функциональных возможностей сети:

- 1G — аналоговая голосовая связь;

- 2G — цифровая голосовая связь и SMS, низкоскоростной интернет (GPRS, EDGE);
- 3G — мобильный Интернет и передача данных;
- 4G LTE — высокоскоростная пакетная передача данных и IP-телефония;
- 5G — сверхвысокие скорости передачи данных, малые задержки и поддержка Интернета вещей.

Современные сети пятого поколения (5G) обеспечивают теоретическую скорость передачи данных до 10–20 Гбит/с, задержки порядка 1–10 мс и возможность подключения большого количества устройств, включая устройства Интернета вещей, системы автоматизации, беспилотный транспорт и системы промышленной связи. Сети 5G используют различные диапазоны частот:

- низкие частоты (sub-1 GHz) — для большой зоны покрытия;
- диапазон 3–4 ГГц — основной диапазон городских сетей;
- миллиметровые волны (mmWave, например 24–28 ГГц) — для очень высоких скоростей передачи данных на небольших расстояниях.

В разных странах используются различные диапазоны частот для сетей 5G. Например, в России ограничено использование диапазона 3,4–3,8 ГГц, поэтому развитие сетей 5G связано с использованием других диапазонов, включая (ограниченно) миллиметровые диапазоны около 24–25 ГГц.

Архитектура сетей 5G предусматривает поддержку трех основных типов сервисов:

- eMBB (enhanced Mobile Broadband) — высокоскоростная передача данных;
- URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communication) — связь с малой задержкой и высокой надежностью;
- mMTC (massive Machine Type Communications) — подключение большого количества устройств Интернета вещей.

В настоящее время ведутся исследования по разработке сетей шестого поколения (6G), которые рассматриваются в рамках концепции IMT-2030 Международного союза электросвязи (ITU). Предполагается, что сети 6G будут использовать терагерцовые диапазоны частот, интеллектуальные отражающие поверхности, интеграцию систем связи и сенсорных систем, применение искусственного интеллекта для управления сетью, а также

объединение наземных, воздушных и спутниковых сетей связи в единую телекоммуникационную инфраструктуру. Ожидается, что сети 6G смогут обеспечивать скорости передачи данных до сотен гигабит в секунду, задержки менее миллисекунды и поддержку новых приложений, таких как дополненная и виртуальная реальность, цифровые двойники и автономные транспортные системы.

4.7. Беспроводные сенсорные сети и IoT

Беспроводные сенсорные сети (Wireless Sensor Networks, WSN) используются для сбора данных с датчиков и передачи информации в систему управления или обработки данных. Такие сети применяются в системах автоматизации, системах мониторинга, системах управления технологическими процессами и системах Интернета вещей (рисунок 96).



Рисунок 96 — Технологии Интернета вещей и умного дома

Типичная беспроводная сенсорная сеть включает сенсорные узлы (датчики), маршрутизаторы, шлюз (gateway) и сервер обработки данных. Сенсорные узлы собирают данные с датчиков и передают их по беспроводному каналу маршрутизаторам или непосредственно на шлюз. Шлюз передает данные в локальную сеть или Интернет, где данные обрабатываются на сервере или облачной платформе.

В беспроводных сенсорных сетях используются различные технологии беспроводной передачи данных, например ZigBee, Bluetooth Low Energy, Wi-Fi, LoRaWAN, NB-IoT и LTE-M. Выбор технологии зависит от требуемой дальности передачи данных, скорости передачи, энергопотребления устройств и количества узлов сети.

Технологии беспроводной связи в IoT можно условно разделить по дальности и энергопотреблению:

- сети малого радиуса действия (WPAN) — Bluetooth, ZigBee;
- беспроводные локальные сети (WLAN) — Wi-Fi;
- сети большой дальности с низким энергопотреблением (LPWAN) — LoRaWAN, NB-IoT;
- сотовые сети — LTE-M, 4G, 5G;
- спутниковые сети — используются для связи в удаленных регионах.

В системах Интернета вещей поверх сетевых технологий используются протоколы передачи данных, такие как MQTT, CoAP и HTTP, которые обеспечивают передачу данных между устройствами, шлюзами и серверами обработки данных.

Беспроводные сенсорные сети и технологии Интернета вещей применяются в системах «умный дом», системах промышленной автоматизации, системах мониторинга окружающей среды, системах учета ресурсов, сельском хозяйстве, транспорте, энергетике и других распределенных системах сбора данных и управления.

Беспроводные сенсорные сети являются основой Интернета вещей (IoT), который представляет собой концепцию объединения большого количества устройств, датчиков и исполнительных механизмов в единую сеть для сбора данных, мониторинга и автоматического управления различными системами. IoT объединяет технологии беспроводной связи, встроенные системы, облачные вычисления и системы анализа данных, что позволяет создавать распределенные интеллектуальные системы мониторинга и управления.

Одной из основных особенностей беспроводных сенсорных сетей является необходимость низкого энергопотребления узлов сети, так как многие датчики работают от автономных источников питания. Для уменьшения энергопотребления используются режимы сна микроконтроллеров и радиомодулей, передача данных короткими пакетами, а также протоколы с редкой передачей данных. В некоторых системах применяются технологии энергосбора (energy harvesting), например солнечные панели, термоэлектрические генераторы или вибрационные генераторы, что позволяет значительно увеличить время автономной работы сенсорных узлов.

4.8. Сравнение беспроводных технологий

Технологии беспроводной передачи данных различаются не только по скорости передачи, дальности связи и энергопотреблению, но и по

используемым физическим уровням (PHY), методам модуляции, ширине полосы частот и архитектуре сети. Эти параметры напрямую определяют пропускную способность канала, помехоустойчивость и масштабируемость системы.

Технология **Wi-Fi** (IEEE 802.11) относится к широкополосным системам и использует методы OFDM/OFDMA, MU-MIMO и широкие каналы (20–160 МГц), что обеспечивает высокую пропускную способность (сотни Мбит/с и выше) при относительно высоком энергопотреблении. Работает в диапазонах 2,4, 5 и 6 ГГц и использует механизм доступа к среде CSMA/CA на MAC-уровне. Основная область применения — беспроводные локальные сети (WLAN) и устройства с высоким трафиком данных.

Bluetooth (IEEE 802.15.1) использует метод FHSS (перестройка частоты), что повышает устойчивость к узкополосным помехам. В версии Bluetooth Classic достигается скорость до 3 Мбит/с, а в Bluetooth Low Energy (BLE) — до 2 Мбит/с при существенно меньшем энергопотреблении. BLE оптимизирован для передачи коротких пакетов с редкими сеансами связи и использует модель Central-Peripheral. Диапазон — 2,4 ГГц, типичная дальность — 10–100 м.

ZigBee (IEEE 802.15.4) представляет собой низкоскоростную энергоэффективную технологию (до 250 кбит/с), ориентированную на беспроводные сенсорные сети (WSN). Использует узкополосную передачу и может работать в mesh-топологии, обеспечивая ретрансляцию данных через промежуточные узлы и масштабируемость сети. Основное преимущество — сверхнизкое энергопотребление (работа от батареи годами) и поддержка большого числа устройств.

LoRaWAN относится к классу LPWAN и использует широкополосную модуляцию с расширением спектра (chirp spread spectrum), обеспечивая высокую чувствительность приёмника и дальность связи до десятков километров. Скорость передачи низкая (единицы–десятки кбит/с), но достигается высокая энергетическая эффективность и возможность обслуживания тысяч устройств через архитектуру «звезда-звезда» с использованием шлюзов.

С инженерно-практической точки зрения выбор беспроводной технологии определяется требованиями приложения: объёмом передаваемых данных, энергопотреблением устройства, дальностью связи и масштабом сети. На практике выбирается технология, обеспечивающая достаточную скорость при минимальном энергопотреблении и необходимой зоне покрытия (таблица 5).

Таблица 5 — Выбор беспроводной технологии

Критерий	Wi-Fi	Bluetooth Classic	Bluetooth (BLE)	ZigBee	Lo-RaWAN
Скорость	десятки– сотни Мбит/с	до 3 Мбит/с	до 1–2 Мбит/с	до 250 кбит/с	кбит/с
Энерго- потреб- ление	высокое	среднее / высокое	низкое	очень низкое	минималь- ное
Дальность	50–100 м	10 м (до 100 м, класс 1)	10–100 м (больше при BLE Long Range / mesh)	10–100 м (больше при mesh)	1–15+ км
Задержка	низкая	низкая	низкая	средняя	высокая

Практическое правило: выбирается технология с минимально достаточной скоростью, обеспечивающая требуемую дальность и автономность устройства. Например, для передачи больших объёмов данных в пределах дома подходит Wi-Fi, для связи между устройствами на коротких расстояниях — Bluetooth, для сенсорных сетей с низким трафиком — ZigBee, а для удалённых устройств с редкой передачей данных — LoRaWAN.

5. Контроллерные сети

5.1. Понятие контроллерных сетей

Представьте работа на заводе, который сваривает кузов автомобиля. Датчики положения, моторы, контроллеры должны обмениваться сигналами за доли миллисекунды и при этом выдерживать вибрацию и помехи от сварки. Обычный Wi-Fi или USB тут не справится – нужна специальная контроллерная сеть.

Контроллерная сеть (промышленная сеть, полевая шина) – это сеть передачи данных, объединяющая процессоры, контроллеры ввода/вывода, датчики и исполнительные механизмы для решения задач автоматизации технологических, химических или физических процессов. Такие сети работают в жёстких условиях (вибрация, электромагнитные помехи, широкий диапазон температур) и предъявляют высокие требования к надёжности, детерминированности и времени реакции.

5.1.1. Области применения

Автономные системы управления в автомобилестроении, авиа- и ракетостроении. Автоматизация технологических процессов на производстве (химическая, фармацевтическая, пищевая промышленность). Системы «умный дом». Бортовая электроника морских и речных судов.

5.1.2. Пирамида автоматизации

Для описания иерархии систем управления производством часто используют пирамиду автоматизации (рисунок 97):

- Уровень 0 (полевой) – датчики, исполнительные механизмы, первичные преобразователи;
- Уровень 1 (управляющий) – контроллеры (PLC), которые считывают данные с датчиков и управляют исполнительными устройствами;
- Уровень 2 (диспетчерский) – SCADA-системы, визуализация, архивирование данных;
- Уровень 3 (оперативный) – MES (Manufacturing Execution Systems), управление производственными операциями;
- Уровень 4 (планирование) – ERP (Enterprise Resource Planning), ресурсы предприятия.

Контроллерные сети работают преимущественно на нижних уровнях (0 и 1), обеспечивая связь между датчиками, исполнительными механизмами и контроллерами.

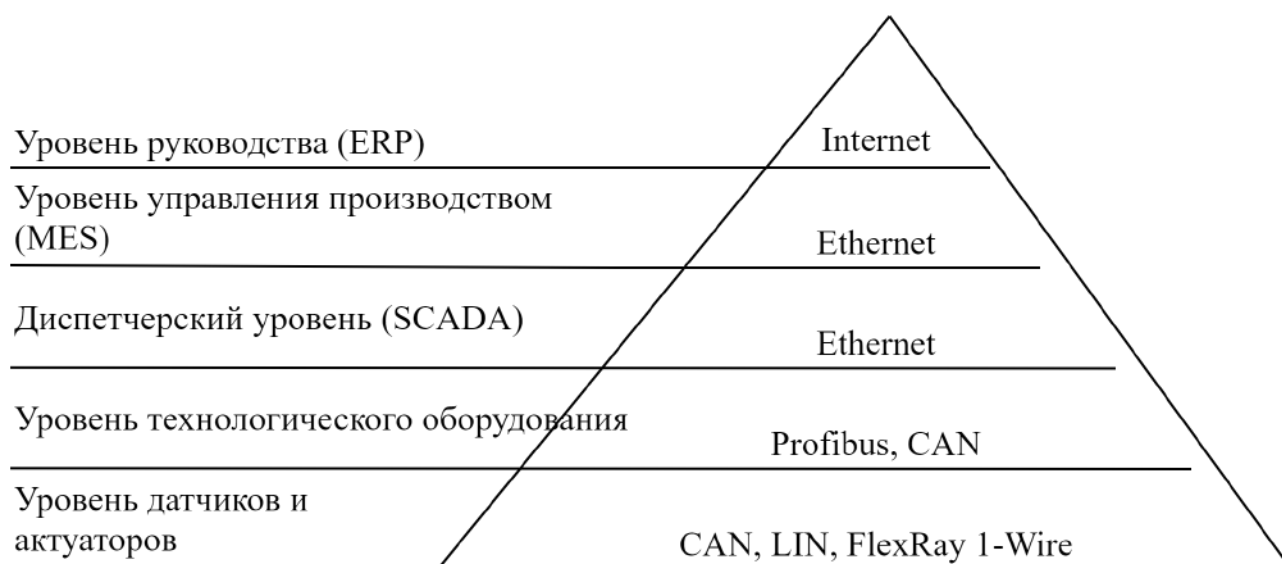


Рисунок 97 — Пирамида автоматизации

5.2. Стандарт CAN (Controller Area Network)

5.2.1. История и назначение

Стандарт CAN был разработан в 1983 г. компанией Bosch для автомобильной промышленности с целью заменить сложные жгуты проводов и повысить надёжность связи между электронными блоками автомобиля. Первые чипы появились в 1987 г., а в 1993 г. CAN был стандартизирован как ISO 11898.

5.2.2. Характеристики интерфейса

Основные характеристики интерфейса:

- Стандарт: ISO 11898;
- Тип передачи: последовательный, асинхронный;
- Режим: полудуплекс;
- Физическая среда: дифференциальная пара (CAN_H, CAN_L);
- Максимальная скорость: до 1 Мбит/с на расстоянии до 40 м; на 1 км – до 50 кбит/с;
- Топология: общая шина;
- Количество узлов: до 127 (практически ограничено нагрузкой – не более 110–120).

5.2.3. Физический уровень

На физическом уровне CAN использует дифференциальную пару проводов. Сигналы CAN_H и CAN_L в состоянии покоя имеют напряжение около 2,5 В. Доминантное состояние (логический 0) соответствует

разности напряжений ($CAN_H > CAN_L$), рецессивное (логическая 1) – $CAN_H = CAN_L$. Такое дифференциальное включение обеспечивает высокую помехоустойчивость.

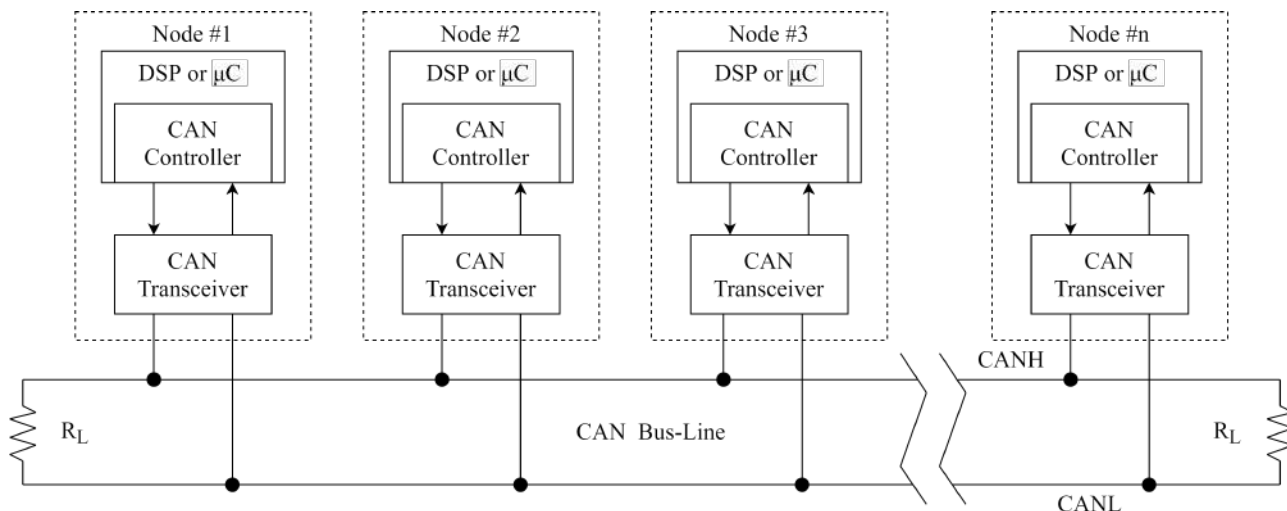


Рисунок 98 — Каноническая схема подключения устройств к шине CAN

5.2.4. Канальный уровень: стек протоколов и форматы кадров

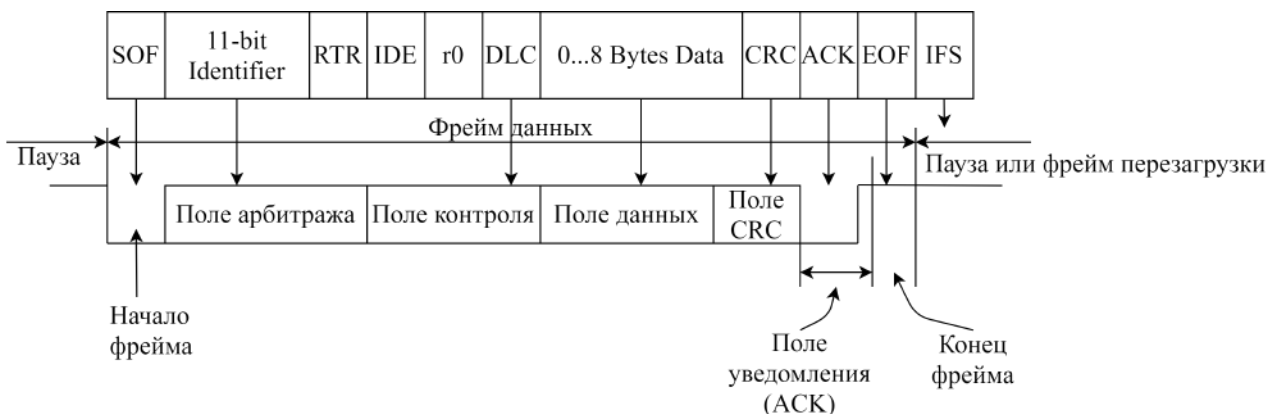


Рисунок 99 — Формат пакета данных CAN

Стек протоколов CAN состоит из двух уровней: физического (рисунок 98) и канального (формирование кадров, обнаружение ошибок, рисунок 99). Прикладной уровень стандартом не определён и может быть реализован через специализированные протоколы (CANopen, DeviceNet и др.).

Канальный уровень определяет четыре типа кадров:

- DATA FRAME – кадр данных, содержащий идентификатор (11 или 29 бит), поле данных (0–8 байт) и контрольную сумму;
- REMOTE FRAME – кадр запроса данных с указанным идентификатором;
- ERROR FRAME – кадр ошибки, передаваемый узлом, обнаружившим несоответствие на шине;

- OVERLOAD FRAME – кадр перегрузки, используемый для запроса дополнительной задержки.

5.2.5. Арбитраж шины

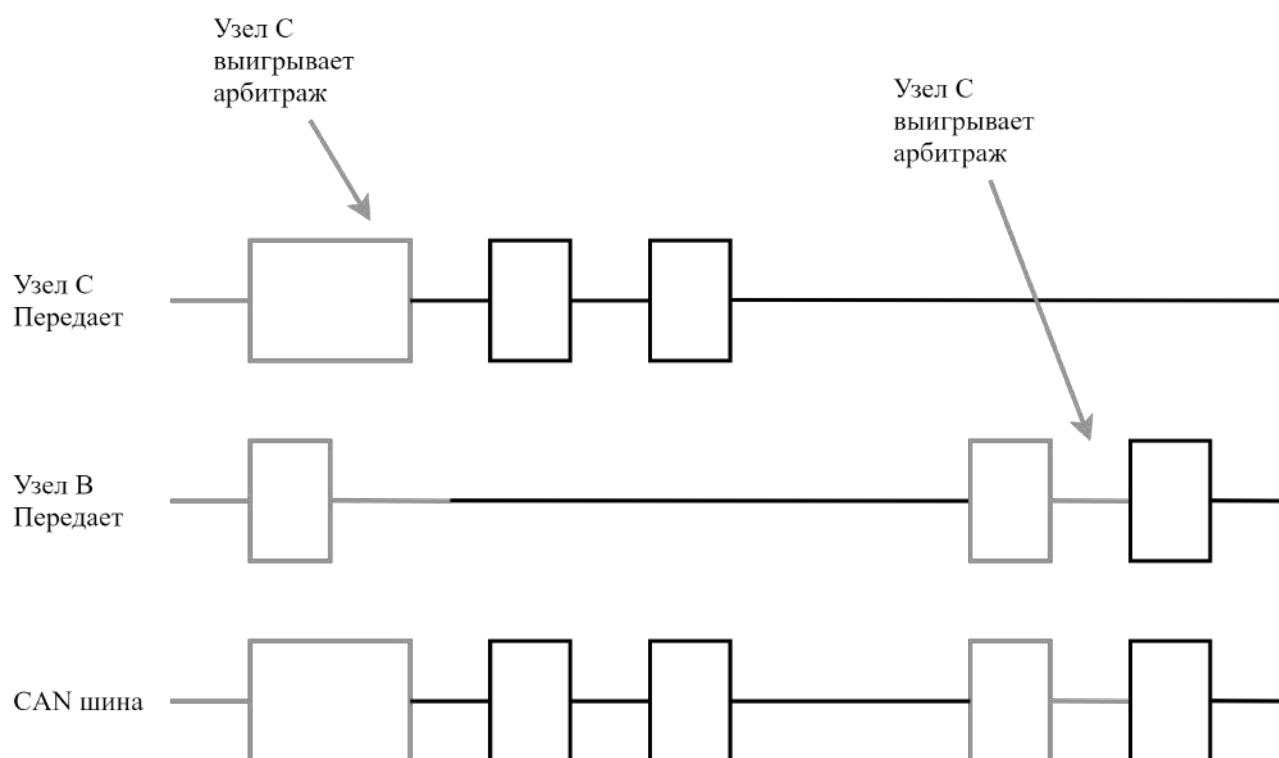


Рисунок 100 — Арбитраж шины CAN

В CAN нет адресации узлов; приоритет сообщения определяется значением идентификатора в поле арбитража (рисунок 100). Передача начинается с передачи идентификатора бит за битом. Если несколько узлов начинают передачу одновременно, они ведут арбитраж на доминантных и рецессивных битах: узел, передавший рецессивный бит, в то время как на шине доминантный, проигрывает и переходит в режим приёма. Таким образом, сообщение с наименьшим числовым значением идентификатора имеет наивысший приоритет и никогда не теряется. Аналогия: несколько человек начинают говорить одновременно, но тот, кто сказал “0” (доминантный бит), перебивает того, кто сказал “1”. В CAN выигрывает сообщение с самым маленьким числом в идентификаторе.

5.2.6. Прикладной уровень

Поскольку стандарт CAN не определяет прикладной уровень, производители разработали собственные протоколы верхнего уровня. Наиболее распространены:

- CANopen – используется в промышленной автоматизации, задаёт объекты, профили устройств и сервисы;

- DeviceNet – протокол от Rockwell Automation, ориентирован на промышленное оборудование.

5.2.7. Примеры использования

Системы на базе CAN широко применяются:

- В автомобилях для связи ABS, подушек безопасности, двигателя, трансмиссии (рисунок 101);
- В промышленности для управления конвейерами, роботами, станками;
- В космической и авиационной технике (например, сеть MIL-STD-1553 имеет схожие принципы);
- В системах «умный дом» для сбора данных с датчиков.

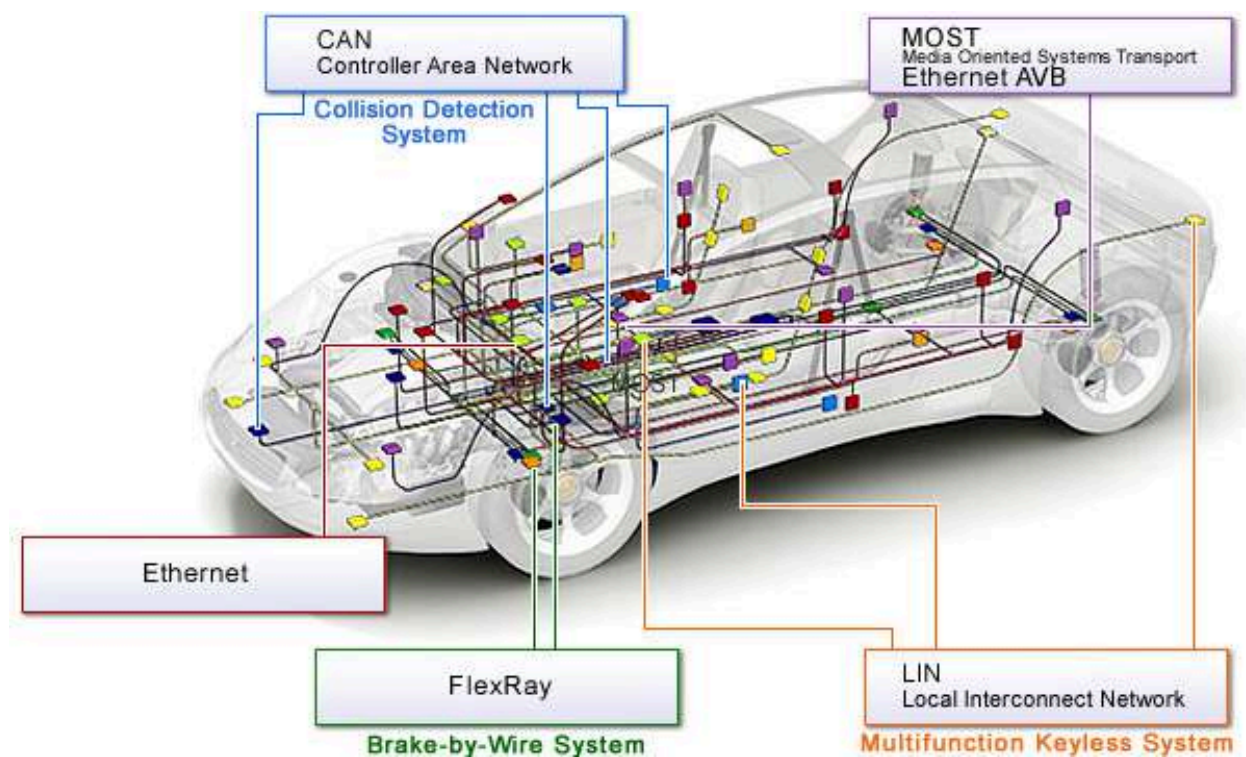


Рисунок 101 — Пример использования сети CAN

5.2.8. Примечание о развитии технологий

Стоит отметить, что технологии не стоят на месте. Например, стандарт CAN, описанный в разделе 5.2, активно развивается. В ответ на потребности автомобильной промышленности появились версии CAN FD (Flexible Data-rate) с увеличенным размером полезной нагрузки до 64 байт, а в последних поколениях автомобилей класса люкс и для задач автономного вождения внедряется стандарт CAN XL, который позволяет передавать до 2048 байт данных на скорости до 20 Мбит/с, оставаясь при этом совместимым с классическими CAN-устройствами.

5.3. Сети LIN (Local Interconnect Network)

LIN – это недорогой последовательный протокол, разработанный как дополнение к CAN для узлов, не требующих высокой скорости и надёжности. Основные характеристики:

- стандарт: ISO 17987;
- скорость: до 20 кбит/с;
- физическая среда: однопроводная двунаправленная линия (подтяжка к питанию через резистор);
- топология: шинная топология (один ведущий, несколько ведомых на одной линии);
- применение: управление зеркалами, стеклоподъёмниками, климат-контролем, датчиками в автомобилях.

LIN обеспечивает синхронизацию от ведущего устройства, а ведомые работают по расписанию. Протокол прост, требует минимум проводников и подходит для систем с низкими требованиями к надёжности.

5.4. Сети FlexRay

FlexRay – высокоскоростной детерминированный протокол, разработанный для критически важных систем автомобиля (электронное управление подвеской, рулевое управление, тормозная система).

- стандарт: ISO 17458;
- скорость: до 10 Мбит/с на каждой из двух линий (каналы могут работать в активном режиме (избыточность) или в пассивном (удвоение скорости));
- топология: звезда, шина или гибридная;
- особенности: разделение времени на статические и динамические сегменты, поддержка избыточных каналов, отказоустойчивость.

FlexRay используется в премиальных автомобилях для систем активной безопасности и управления, где отказ недопустим.

5.5. Промышленные сети на базе Ethernet

Помимо классических шин, таких как CAN, современная автоматизация требует более высокой скорости и стандартизации. В связи с этим на нижних уровнях пирамиды автоматизации все большую роль играют промышленные сети Ethernet (Real-Time Ethernet) и специализированные протоколы (таблица 6).

Таблица 6 — Сравнение популярных промышленных Ethernet протоколов

Характеристика	EtherNet/IP	EtherCAT	Modbus TCP
Основа	Стандартный Ethernet	Модифицированный Ethernet	TCP/IP
Способ обмена	Явные и неявные сообщения (CIP)	“On the fly” обработка кадров	Запрос-ответ
Скорость	100 Мбит/с, 1 Гбит/с	100 Мбит/с, 1 Гбит/с	100 Мбит/с, 1 Гбит/с
Топология	Звезда	Линия, кольцо, дерево	Звезда (через коммутаторы)
Особенность	Единый протокол CIP для разных сетей	Детерминизм, малая задержка	Исключительная простота и открытость

Традиционный Ethernet, используемый в офисах, не гарантирует время доставки пакета (детерминизм), что критично для систем реального времени. Промышленные версии Ethernet решают эту проблему, работая поверх стандартного IEEE 802.3, но с использованием специальных протоколов.

5.5.1. EtherNet/IP

EtherNet/IP (Ethernet Industrial Protocol) — один из самых распространенных промышленных протоколов, управляемый организацией ODVA. Он использует стандартный стек TCP/IP и может сосуществовать в одной сети с обычным IT-трафиком.

Ключевая особенность — в качестве основного протокола прикладного уровня он использует CIP (Common Industrial Protocol), который также лежит в основе шин ControlNet и DeviceNet. Это позволяет легко интегрировать разнородные устройства (ПЛК, приводы, датчики) в единую систему. Для передачи критичных по времени данных ввода-вывода используется протокол UDP (быстрее, но без гарантии доставки), а для конфигурации и диагностики — TCP.

5.5.2. EtherCAT

EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology) — это технология, разработанная компанией Beckhoff, которая кардинально отличается от EtherNet/IP способом обработки кадров. В стандартном Eth-

ernet каждое устройство принимает кадр, копирует данные и отправляет его дальше. В EtherCAT ведущий отправляет один кадр, который проходит через все ведомые устройства. Каждое ведомое устройство “на лету” (on the fly) считывает предназначенные ему данные и вставляет свои ответные данные в тот же кадр, задерживая его всего на несколько микросекунд.

5.5.3. Протокол Modbus

Modbus — это “дедушка” промышленных протоколов, разработанный компанией Modicon в 1979 году. Он невероятно прост, открыт и до сих пор широко распространен. Важно понимать, что Modbus определяет только прикладной уровень и может работать поверх разных физических сред. Modbus жив до сих пор, потому что он настолько прост, что его можно реализовать на любом микроконтроллере за час. Многие современные PLC поддерживают Modbus TCP, и вы можете считывать данные через стандартные сетевые инструменты.

- Modbus RTU/ASCII — классическая версия для последовательных линий связи (RS-232, RS-485). Данные передаются в двоичном (RTU) или текстовом (ASCII) виде. Это полудуплексный протокол с архитектурой “ведущий-ведомый”.
- Modbus TCP/IP — современная версия, инкапсулирующая пакет Modbus в TCP-кадр и использующая стандартные сети Ethernet. Это позволяет использовать веб-технологии для удаленного мониторинга и управления.

Основное достоинство Modbus — простота и прозрачность, что делает его идеальным для интеграции “старых” систем в новые цифровые экосистемы.

6. Лабораторный практикум

6.1. Лабораторная работа №1. Принципы организации ввода/вывода без операционной системы

6.1.1. Основные сведения

Цель работы: познакомиться с принципами организации ввода/вывода без операционной системы на примере компьютерной системы на базе процессора с архитектурой RISC-V и интерфейсом OpenSBI с использованием эмулятора QEMU.

Для выполнения работы понадобится следующее программное обеспечение:

- qemu-system-riscv32;
- RISC-V C/ASM окружение для сборки проектов (на базе LLVM).

Задачи:

1. Реализовать функцию putchar вывода данных в консоль.
2. Реализовать функцию getchar для получения данных из консоли.
3. На базе реализованных функций putchar и getchar написать программу, позволяющую вызывать определенные варианты функции OpenSBI посредством взаимодействия пользователя через меню.
4. Запустить программу и выполнить вызов пунктов меню, получив результаты их работы.
5. Оформить отчет по работе в электронном формате.

Требования к отчету:

1. На титульном листе должны быть приведены следующие данные:
 - a. Название дисциплины;
 - b. Номер и название лабораторной работы;
 - c. ФИО исполнителя и группа.
2. Во введении указываются цели и задачи работы.

3. В основной части приводится описание функций putchar, getchar, а также описывается интерфейс вызова функций OpenSBI, заданных вариантом задания.
4. Приводится скриншот вывода в консоль данных при вызове каждого пункта меню.

6.1.2. Варианты

№ варианта	Пункты меню
1	<ol style="list-style-type: none"> 1. Get SBI specification version 2. Get number of counters 3. Get details of a counter (должно быть возможно задавать номер счетчика) 4. System Shutdown
2	<ol style="list-style-type: none"> 1. Get SBI implementation version 2. Hart get status (должно быть возможно задавать номер ядра) 3. Hart stop 4. System Shutdown

6.2. Лабораторная работа №2. Основы написания драйверов устройств с использованием операционной системы

Цель работы: познакомиться с основами разработки драйверов устройств с использованием операционной системы на примере создания драйверов символьных устройств под операционную систему Linux.

Для выполнения работы понадобится следующее программное обеспечение:

- qemu-system-riscv64;
- ОС Linux;
- RISC-V C/ASM окружение для сборки проектов (на базе LLVM).

Задачи:

1. Написать драйвер символьного устройства, удовлетворяющий требованиям:
 - должен создавать символьное устройство `/dev/varN`, где N – это номер варианта;
 - должен обрабатывать операции записи и чтения в соответствии с вариантом задания.
2. Оформить отчет по работе в электронном формате.

Требования к отчету:

1. На титульном листе должны быть приведены следующие данные:
 - a. Название дисциплины;
 - b. Номер и название лабораторной работы;
 - c. ФИО исполнителя и группа.
2. Во введении указываются цели и задачи работы;
3. В основной части приводится описание функций, являющихся обработчиками системных вызовов ОС Linux на чтение и запись, а также вызываемых в этих обработчиках других функций;
4. Приводятся скриншоты вывода в консоль данных при всех возможных сценариях использования драйвера.

6.2.1. Варианты

№ варианта	Описание
1	При записи текста в файл символьного устройства должен осуществляться подсчет введенных символов. Последовательность полученных результатов (количество символов) с момента загрузки модуля ядра должна выводиться при чтении файла.
2	При записи текста в файл символьного устройства должно запоминаться количество пробелов во введенном тексте. Последовательность полученных результатов с момента загрузки модуля ядра должна выводиться при чтении файла.
3	При записи текста в файл символьного устройства должно запоминаться количество введенных букв (не буквы на считаются). Последовательность полученных результатов с момента загрузки модуля ядра должна выводиться при чтении файла.
4	При записи текста в файл символьного устройства должен осуществляться подсчет введенных цифр. Последовательность полученных результатов (количество цифр) с момента загрузки модуля ядра должна выводиться при чтении файла.

6.3. Лабораторная работа №3. Изучение протоколов передачи данных между устройствами с использованием простейших последовательных интерфейсов

Цель работы: познакомиться с принципами обмена данными между устройствами, алгоритмами обмена и форматами передачи данных на примере интерфейсов I2C, SPI, 1-Wire.

Для выполнения работы понадобится следующее программное обеспечение:

– Logic 2.

Задачи:

1. Подключить комплект с контроллер с датчиком и логическим анализатором к компьютеру.
2. С помощью логического анализатора записать временную диаграмму обмена данными по сигнальным линиям в течении трех транзакций обмена.
3. Расшифровать протокол обмена данными.
4. Перевести значение физической величины, заданной в варианте задания, в человекочитаемый формат.
5. Нарисовать временную диаграмму передачи другого, отличного от полученных, значения физической величины.
6. Определить скорость интерфейса.
7. Оформить отчет по работе в электронном формате.

Требования к отчету:

1. На титульном листе должны быть приведены следующие данные:
 - a. Название дисциплины;
 - b. Номер и название лабораторной работы;
 - c. ФИО исполнителя и группа.
2. Во введении указываются цели и задачи работы.
3. В основной части приводятся временные диаграммы с расшифровкой протоколов обмена данными и переводом физических величин в человекочитаемый формат.

4. Приводятся самостоятельно сформированные временные диаграммы передачи других значений полученных физических величин.

6.3.1. Варианты

№ варианта	Датчик	Интерфейс	Физическая величина
1	DHT-11	Single Wire	Температура и влажность
2	BMP280	I2C	Температура
3	BMP280	SPI	Температура

6.4. Лабораторная работа №4. Изучение работы контроллеров ввода/вывода на примере контроллера UART

Цель работы: познакомиться с принципами работы с контроллерами ввода вывода на примере контроллера UART.

Для выполнения работы понадобится следующее программное обеспечение:

- Arduino IDE;
- Logic 2.

Задачи:

1. Написать программу для микроконтроллера Atmega328, принимающую и отправляющую пакеты по интерфейсу UART в соответствии с обозначенным форматом пакета. Драйвер UART должен быть реализован с использованием операций ввода/вывода в регистры аппаратного контроллера UART.
2. Контроллер должен принимать данные с ПК, проверять их на корректность и отправлять обратно корректные пакеты. Если пакет пришел с ошибкой, то он отбрасывается.
3. Контроллер должен один раз в секунду передавать данные с датчика, указанного в варианте задания.
4. Написать клиентскую программу на ПК для приема и отправки пакетов к микроконтроллеру по интерфейсу UART, моделирующей как корректную отправку пакетов, так и случаи с ошибками: неправильная длина, отсутствие синхробайта, недостаточное количество данных.
5. Подключить микроконтроллер к ПК и протестировать работоспособность написанных программ.
6. Снять осциллограмму передачи любого пакета по интерфейсу UART.
7. Оформить отчет по работе в электронном формате.

Требования к отчету:

1. На титульном листе должны быть приведены следующие данные:
 - а. название дисциплины;

- b. номер и название лабораторной работы;
 - c. ФИО исполнителя и группа.
2. Во введении указываются цели и задачи работы.
 3. В основной части приводится код микроконтроллера и клиентской программы для ПК с комментариями.
 4. Приводится временная диаграмма передачи одного пакета с проверкой контрольной суммы.

6.4.1. Варианты

№ варианта	Датчик	Скорость UART	Четность	Кол-во стоповых бит
1	ВМР280, I2C, температура и давление	19200	even parity	1
2	ВМР280, SPI, температура и давление	38400	odd parity	2
3	ДНТ11, температура и влажность	57600	even parity	1
4	ДНТ11, температура и влажность	115200	odd parity	2

Список рекомендуемой литературы

1. Ключев А.О., Ковязина Д.Р., Петров Е.В., Платунов А.Е. Интерфейсы периферийных устройств: Учебное пособие. - Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2010. - 294 с. - 100 экз.
2. William Stallings. Computer Organization and Architecture. Tenth Edition. – Pearson. 2015. P. 864.
3. Харрис, Д. М. Цифровая схемотехника и архитектура компьютера / Д. М. Харрис, С. Л. Харрис. — 2-е изд. — Москва : ДМК Пресс, 2017. — 792 с. — ISBN 978-5-97060-524-8.
4. Сопряжение схем дифференциальной логики разных типов // КИТ — Компоненты и технологии : сайт. — 2008. — 21 апр. — URL: <https://kit-e.ru/fpga/sopryazhenie-shem-differenczialnoj-logiki-raznyh-tipov/> (дата обращения: 09.04.2026).
5. Schlaepfer, E. Open Circuits : The Inner Beauty of Electronic Components / E. Schlaepfer, W. Oskay. — San Francisco : No Starch Press, 2023. — 301 p. — ISBN 978-1-7185-0234-5.

Сергей Вячеславович Быковский, Сергей Михайлович Табунщик,
Алексей Андреевич Гончаров, Иван Викторович Лукашов,
Алексей Константинович Денисов, Игорь Викторович Климов

СИСТЕМЫ ВВОДА/ВЫВОДА

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, литер А