

Основы микропроцессорной техники

Цифровые интерфейсы МК.

Классификация.

Введение в SPI и I2C

Хохлов С.А.

МГТУ им. Н.Э. Баумана

13 октября 2025 г.

Классификация интерфейсов МК

По способу передачи данных I

Параллельные интерфейсы

- Определение: Передача данных осуществляется по нескольким линиям одновременно.
- Особенности:
 - Высокая скорость передачи (за счет параллелизма).
 - Большое количество проводов (N бит → N линий).
 - Чувствительность к синхронизации и помехам.
- Примеры:
 - ISA (Industry Standard Architecture) — устаревшая шина для ПК.
 - GPIB (General Purpose Interface Bus) — для лабораторного оборудования.

По способу передачи данных II

Последовательные интерфейсы

- Определение: Данные передаются по одной линии (или паре) бит за битом.
- Особенности:
 - Меньшее количество проводов.
 - Подходят для длинных расстояний.
 - Ниже скорость по сравнению с параллельными.
- Примеры:
 - UART (асинхронный, например, RS-232).
 - SPI, I²C (синхронные).
 - USB, Ethernet (высокоскоростные).

По наличию тактового сигнала I

Синхронные интерфейсы

- Определение:
 - Передача данных синхронизируется общим тактовым сигналом.
- Особенности:
 - Высокая надежность (нет дрейфа частоты).
 - Требуется отдельной линии для такта (SCK, CLK).
- Примеры:
 - SPI (Serial Peripheral Interface).
 - I²C (Inter-Integrated Circuit).
 - DDR (Double Data Rate)

По наличию тактового сигнала II

Асинхронные интерфейсы (без CDR)

- Определение:
 - Тактовый сигнал отсутствует; синхронизация через старт/стоп-биты.
- Особенности:
 - Простота реализации.
 - Риск ошибок из-за расхождения частот.
- Примеры:
 - UART (RS-232, RS-485).
 - 1-Wire (с фиксированными таймингами).

По наличию тактового сигнала III

Интерфейсы с CDR (Clock Data Recovery)

- Нет выделенной линии тактирования → формально асинхронные, но применяют CDR (clock data recovery) + специальные коды (8b/10b, 128b/130b) → по сути, сильно синхронизированные
- Клок восстанавливается из потока, есть синхронизация по коду и comma symbols
- Примеры:
 - PCIe, SATA, HDMI, USB 3, MIPI, HDMI, SerDes

По типу сигнала I

Управление напряжением

- Определение: Информация кодируется уровнем напряжения.
- Особенности:
 - Простота, низкая стоимость.
 - Чувствительность к помехам на больших расстояниях.
- Примеры:
 - TTL/CMOS (0–5 В).
 - RS-232
 - CAN

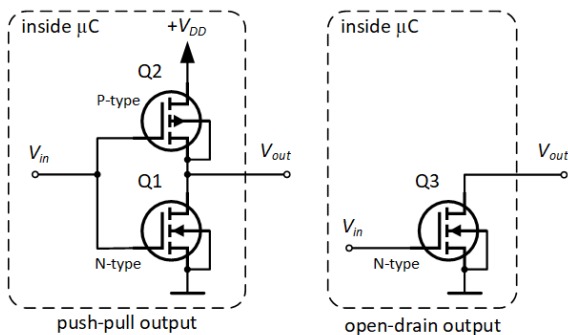
По типу сигнала II

Управление током

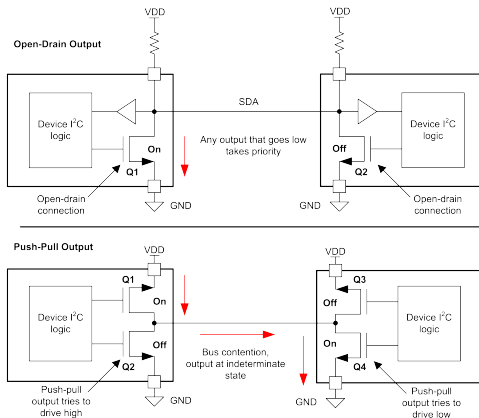
- Определение:
 - Информация кодируется силой тока.
- Особенности:
 - Устойчивость к помехам (ток меньше зависит от длины линии).
 - Сложность реализации.
- Примеры:
 - Токовая петля 4–20 мА (промышленные датчики).
 - LVDS (Low Voltage Differential Signaling, ± 350 мВ).

По типу выхода

- с открытым стоком (с открытым коллектором)
- двухтактный выход push-pull (totem pole)



Объединение устройств на общую шину



По назначению I

Внутримодульные интерфейсы

- Определение: Связь внутри одного устройства/модуля.
- Особенности:
 - Короткие расстояния (сантиметры).
 - Высокая скорость.
- Примеры:
 - QPI (Quad Peripheral Interface) — для памяти NOR Flash.
 - JTAG — для внутрисхемной отладки.

По назначению II

Межмодульные интерфейсы

- Определение: Связь между отдельными устройствами.
- Особенности:
 - Длинные расстояния (метры).
 - Помехозащищенность.
- Примеры:
 - RS-485 (промышленные сети).
 - Ethernet (LAN).
 - Bluetooth (беспроводной).

По типу дуплекса I

Симплексные

- Определение:
 - Передача данных только в одном направлении.
- Примеры:
 - UART в симплексном режиме
 - RS-422
 - SPI в симплексном режиме
 - Протоколы ИК-пультов (RC-5, RC-6, NEC, JVC, Nokia NRC17, RCA, Panasonic (REC80, JAP))

По типу дуплекса II

Полудуплексные

- Определение:
 - Передача в обе стороны, но не одновременно.
- Примеры:
 - I²C.
 - IrDA
 - Half-duplex UART
 - RS-485, два провода
 - 1-Wire

По типу дуплекса III

Полнодуплексные

- Определение: Одновременная передача в обе стороны.
- Примеры:
 - UART (с двумя линиями: TX и RX).
 - RS485, 4 провода
 - SPI
 - USB 3.0.

По скорости передачи

- Низкоскоростные:
 - 1–100 кбит/с (например, 1-Wire).
- Среднескоростные:
 - 1–10 Мбит/с (SPI, I²C).
- Высокоскоростные:
 - 100 Мбит/с (USB 3.2, PCIe 4.0).

По топологии

- Точка-точка:
 - Одно ведущее и одно ведомое устройство (UART).
- Шина: Несколько устройств на одной линии
 - I²C
 - CAN
- Звезда:
 - Центральный хаб (USB, Ethernet).

Примеры для закрепления

Интерфейс	Тип	Скорость	Применение
SPI	Синхронный, полнодуплекс	До 60 Мбит/с	Датчики, дисплеи
I ² C	Синхронный, полудуплекс	До 3.4 Мбит/с	EEPROM, температурные сенсоры
RS-485	Асинхронный, полнодуплекс	До 10 Мбит/с	Промышленные сети
USB 3.2	Синхронный, полнодуплекс	До 20 Гбит/с	Периферийные устройства

Сравнение параллельных и последовательных интерфейсов

Параметр	Параллельные интерфейсы	Последовательные интерфейсы
Скорость	Ограничена синхронизацией	Высокая (до десятков Гбит/с)
Количество линий	Много (8, 16, 32 и более)	Мало (1–4 пары)
Дальность передачи	Короткая (сантиметры)	Длинная (метры или километры)
Помехоустойчивость	Низкая	Высокая (дифференциальная передача)
Сложность разводки	Высокая	Низкая

Примеры современных последовательных интерфейсов

- 1 PCIe 4.0:
 - Скорость: 16 ГТ/с на линию.
 - Использует дифференциальную передачу и многоканальность (x1, x4, x16).
- 2 USB 3.2:
 - Скорость: 20 Гбит/с.
 - Использует кодирование 128b/132b.
- 3 Ethernet 10GbE:
 - Скорость: 10 Гбит/с.
 - Работает на расстояниях до 100 м.
- 4 Thunderbolt 4:
 - Скорость: 40 Гбит/с.
 - Совместим с USB-C и PCIe.

Почему параллельные интерфейсы все еще используются?

- Для коротких расстояний:
 - Например, внутри чипов (например, шина AXI в ARM).
- Для простых задач:
 - Например, GPIO для управления светодиодами.
- В устаревших системах:
 - Например, ISA, LPT (параллельный порт).

Итог

- Параллельные интерфейсы быстрее на низких частотах и коротких расстояниях, но их скорость ограничена синхронизацией и помехами.
- Последовательные интерфейсы стали быстрее благодаря дифференциальной передаче, кодированию данных и многоканальности.

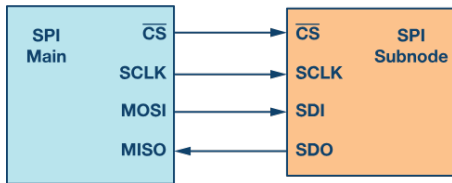
SPI (Serial Peripheral Interface)

SPI (Serial Peripheral Interface) – это синхронный последовательный интерфейс, используемый для высокоскоростного обмена данными между микроконтроллером и периферийными устройствами (датчиками, дисплеями, памятью и т. д.).

Основные характеристики SPI

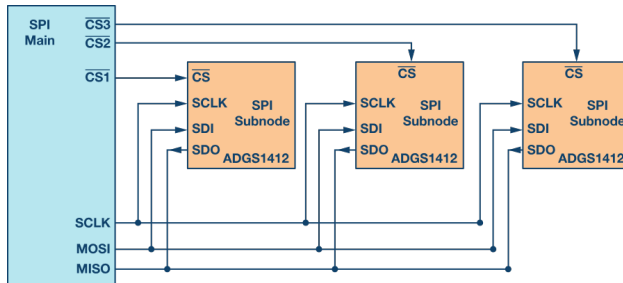
- Синхронный интерфейс – использует тактовый сигнал (SCK).
- Полный дуплекс – передача и прием данных происходят одновременно.
- Топология “ведущий-ведомый” (Master-Slave) – один ведущий (MCU) управляет одним или несколькими ведомыми устройствами.

Физический интерфейс SPI



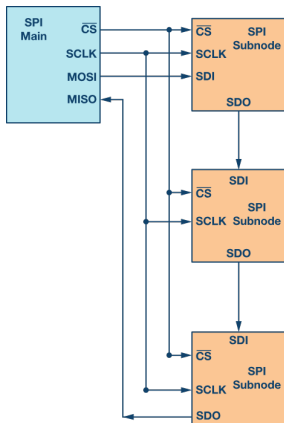
- Четыре основных сигнальных линии:
 - SCK (Serial Clock) – тактовый сигнал (от ведущего к ведомым).
 - MOSI (Master Out, Slave In) – данные от ведущего к ведомому.
 - MISO (Master In, Slave Out) – данные от ведомого к ведущему.
 - SS (Slave Select) / CS (Chip Select) – выбор ведомого (активный LOW).

Подключение нескольких ведомых с индивидуальными SS (обычный метод)



- Ведущий включает ведомое устройство, подавая 0 на соответствующую линию SS.
- Остальные ведомые устройства игнорируют передачу.

Daisy Chain (цепочечное подключение) I



- Данные передаются из одного ведомого в другой через MISO → MOSI.
- Работает только если устройства поддерживают цепочку передачи.

Применение SPI и его расширений I

SPI

- Сенсоры (гироскопы, акселерометры, термометры), DAC/ADC, аудио-кодеки, EEPROM, дисплеи, микроконтроллеры, ethernet-контроллеры
 - MPU-9250 (IMU)
 - SSD1306 (OLED)
 - AT25xxx (EEPROM)
 - MCP3208 (ADC)
 - ST7735 (TFT LCD)
 - Ethernet-контроллеры (W5500, ENC28J60)

Применение SPI и его расширений II

Dual SPI

- Внешняя Flash, когда нужно быстрее, чем стандартный SPI
 - Winbond W25Q64 (Flash)
 - Macronix MX25Lxxxx
 - STM32 с внешней Flash

Применение SPI и его расширений III

Quad SPI

- Быстрая загрузка прошивки, XIP (eXecute In Place), внешняя память
 - ESP32 (работает с внешней Flash по Quad SPI)
 - STM32 (QSPI boot из внешней памяти)
 - PSRAM чипы (ESP32-S3 + PSRAM)

Применение SPI и его расширений IV

QPI (Quad Peripheral Interface)

- Высокоскоростной доступ к Flash без возврата в SPI-режим, непрерывный Quad-режим
 - W25Q128FV, W25Q64JV (QPI-режим)
 - GD25Q серия (NOR Flash)
 - NOR Flash с XIP
 - OctaFlash с SDRAM-подобным доступом

Преимущества и недостатки SPI

Плюсы:

- Высокая скорость передачи (десятки МГц).
- Полный дуплекс – передача и прием одновременно.
- Гибкость – можно подключать много устройств.
- Простота реализации – не требует сложных алгоритмов синхронизации.

Минусы:

- Много проводов – 4 линии на устройство, плюс дополнительные SS для каждого ведомого.
- Нет стандартного протокола управления – каждая микросхема может иметь свой формат данных.
- Отсутствие встроенного механизма подтверждения передачи (ACK) – требует программной обработки ошибок.

Источники и дополнительные материалы

- Serial Peripheral Interface (SPI) - SparkFun Learn
- Introduction to SPI Interface
- ATmega328P datasheet, раздел 18

I²C (Inter-Integrated Circuit)

- I²C (Inter-Integrated Circuit) – это синхронный двунаправленный протокол связи, разработанный компанией Philips (ныне NXP) для соединения микросхем внутри устройств.
- I²C широко используется для подключения датчиков, памяти, дисплеев, часов реального времени и других периферийных устройств.

Основные характеристики I²C

- Синхронный интерфейс – использует тактовый сигнал (SCL) для синхронизации данных.
- Полудуплексный – передача данных осуществляется по одной линии в обоих направлениях.
- Шина с несколькими ведомыми – один или несколько ведущих могут работать с несколькими ведомыми устройствами.
- Две линии связи:
 - SDA (Serial Data) – передача данных.
 - SCL (Serial Clock) – тактовый сигнал.
- Поддержка нескольких ведущих – допускает работу нескольких мастеров на одной шине.
- Простая адресация устройств – каждое устройство имеет уникальный 7-битный (или 10-битный) адрес.

Схема подключения I²C I

Обычная схема подключения I²C

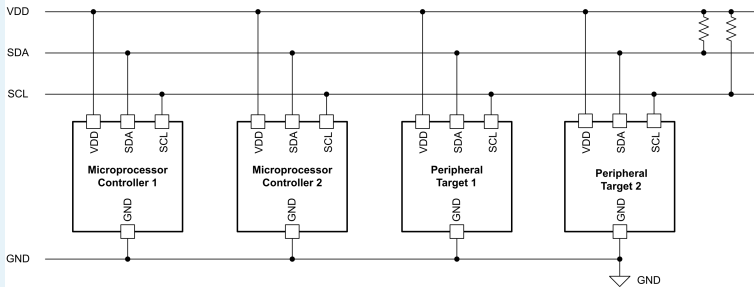


Схема подключения I²C II

- Подтягивающие резисторы (4.7 – 10 кОм) нужны, так как шина открытого коллектора.
- Один ведущий (Master) управляет шиной.
- Несколько ведомых (Slaves) могут быть подключены.

Преимущества и недостатки I²C

Плюсы:

- Простота – только 2 линии.
- Гибкость – поддержка нескольких ведомых.
- Эффективность – подтверждение передачи (ACK).
- Программная реализация – можно эмулировать на любом GPIO.

Минусы:

- Низкая скорость (максимум 3.4 МГц) по сравнению с SPI.
- Требуются подтягивающие резисторы.
- Сложность в Multi-Master режимах.

Применение I²C

I²C используется в различных устройствах:

- Датчики (BMP280, MPU6050, BME680)
- Память (EEPROM AT24C256)
- Дисплеи (OLED SSD1306, LCD 1602)
- Часы реального времени (RTC) (DS3231)
- Микроконтроллеры (Arduino, STM32, ESP8266)

Официальная документация:

- I²C спецификация от NXP
- <https://www.ti.com/lit/pdf/sbaa565>
- ATmega328P datasheet, раздел 21.

Классификация интерфейсов МК
○○○○○○○○○○○○○○○○

SPI (Serial Peripheral Interface)
○○○○○○○○○○

I²C (Inter-Integrated Circuit)
○○○○○○○○●