

Как начать писать код для микроконтроллера?

Цель занятия

- Узнать какой код вы запустили, что он значит и как конкретно он исполнялся внутри микроконтроллера.

ВПО как исходный код

Структура кода ВПО

Подключение
внешнего кода

Объявление
типов и
констант

Список
инициализаций

Суперцикл

```
// подключаем библиотеки из pico SDK
#include "pico/stdlib.h"
#include "hardware/gpio.h"

// задаем константу с номером ножки, к которой подключен светодиод
// номер можно узнать и проверить в документации к плате
const uint LED_PIN = 25;

int main()
{
    // Инициализация STDIO
    stdio_init_all();
    // Инициализация GPIO вывода
    gpio_init(LED_PIN);
    gpio_set_dir(LED_PIN, GPIO_OUT);

    // Бесконечный цикл, чтобы светодиод мига все время
    while (1)
    {
        gpio_put(LED_PIN, 0);
        sleep_ms(250);
        gpio_put(LED_PIN, 1);
        sleep_ms(1000);
    }
}
```

Подключение внешнего кода

Вставками кода занимается препроцессор. И после окончания его работы файл содержит в себе **3622 строки!**

```
main.c (27 строк)
├─ pico/stdlib.h
│   └─ pico.h
│       └─ pico/types.h
│           └─ pico/assert.h
│               ├── stdbool.h (компилятор)
│               └─ assert.h (newlib)
│                   └─ _ansi.h
│                       ├── newlib.h
│                       └─ sys/config.h
│                           └─ stdint.h (компилятор)
│                               └─ stdint.h (newlib)
│                                   └─ machine/_default_types.h ← Здесь определяются базовые
типы!
│                                       └─ sys/_stdint.h ← Здесь typedef uint8_t,
uint32_t
│       └─ pico/version.h
│       └─ pico/config.h
├─ hardware/gpio.h
│   ├── hardware/structs/sio.h ← Структура для работы с GPIO
│   └─ hardware/structs/iobank0.h
├─ hardware/uart.h
└─ pico/time.h
```

Список инициализаций

- По мере усложнения проекта список инициализаций будет расти: настройка тактирования, таймеров, интерфейсов связи (UART, SPI, I2C), прерываний и других модулей.
- Нужно иметь в виду, что некоторые аппаратные модули опираются на другие и важно соблюдать порядок. Первым обычно настраивается тактирование, так как оно требуется всем модулям. Если вы хотите использовать «**printf**» для вывода, то сначала нужно инициализировать подсистему вывода.

Суперцикл

- Поскольку, если модуль дойдёт до конца функции `main`, то исполнение программы завершится, в ВПО существует концепция **суперцикла**.
- **Суперцикл** (англ. `super loop`, `main loop`, `infinite loop`) — архитектурный паттерн встроенного программного обеспечения, при котором основная логика приложения выполняется внутри бесконечного цикла, обеспечивающего непрерывную работу программы до отключения питания или перезагрузки системы.
- Внутри суперцикла выполняются регулярные задачи опроса модулей, отслеживания их состояний и передачи информации.

Цепочка загрузки RP-2040

- Мы узнали, что main это примерно 0.1% нашего кода. Сейчас мы узнаем, что на самом деле это далеко не первые инструкции исполняемые кодом.

Цепочка загрузки RP2040

Загрузчик первой стадии

Загрузчик первой стадии (Boot ROM)

Адрес: 0x00000000

Размер: ~16 КБ

~несколько тысяч инструкций

- Инициализация минимальной периферии
- Проверка кнопки BOOTSEL:
 - Нажата -> USB режим, ждем .uf2 файл
 - Не нажата -> проверка FLASH по SPI
- Копирование boot2 из FLASH в SRAM
- Передача управления загрузчику второй стадии

Загрузчик второй стадии

Загрузчик второй стадии (Boot2)

Адрес: 0x10000000

Размер: 256 байт

~64 инструкции

- Выполняется из SRAM (скопирован загрузчиком первой стадии)
- Знает параметры конкретной микросхемы Flash
- Настраивает режим XIP (eXecute In Place)
- Передача управления стартап-коду
- Проверка кнопки BOOTSEL

Стартап-код

СТАРТАП-КОД
Адрес: 0x10000100
~110 инструкций

- Таблица векторов (адреса обработчиков прерываний)
- Reset Handler (точка входа после сброса)
- Инициализация ядра, памяти и периферии
- Копирование .data из Flash в RAM
- Обнуление .bss
- Передача управления в main()

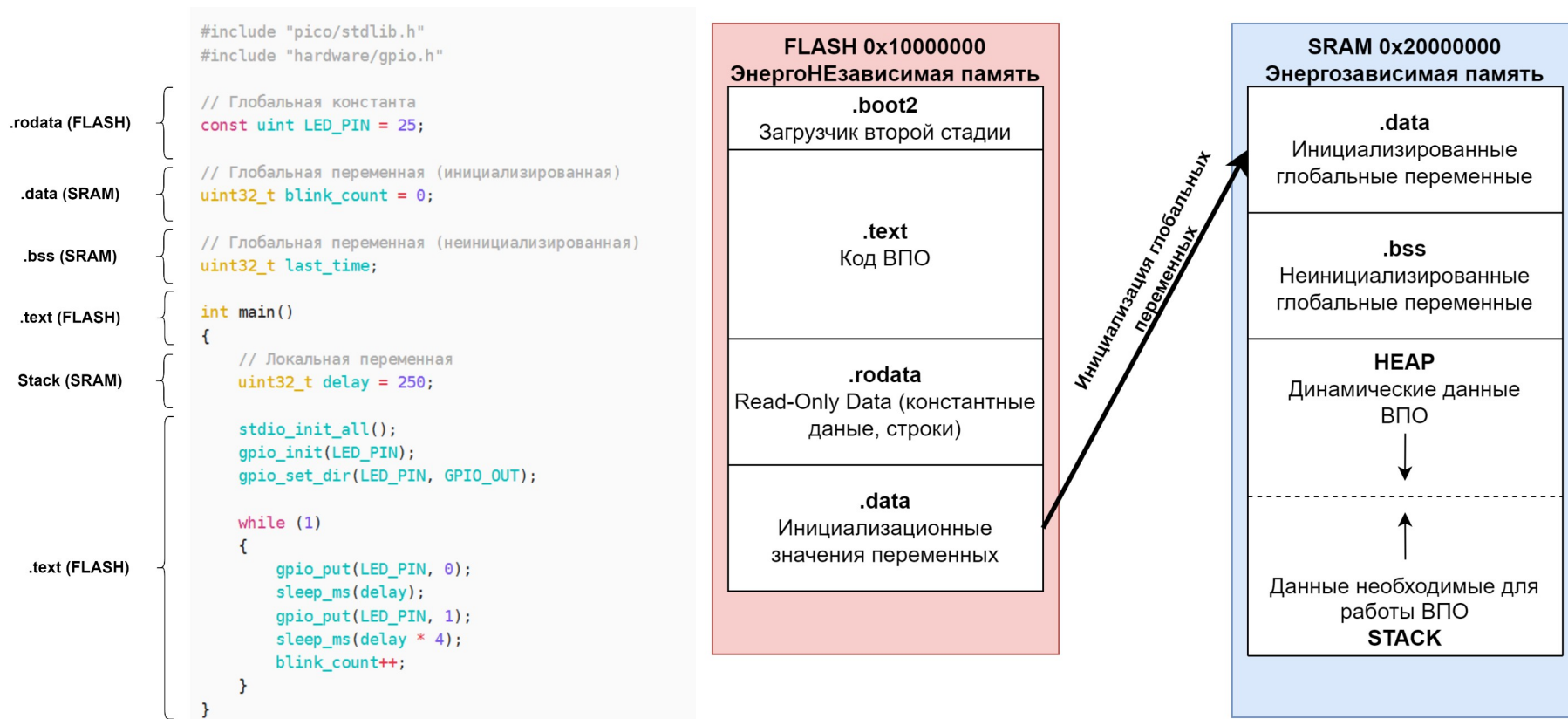
Функция main

Функция main
Адрес: 0x100002D0

- Инициализация модулей (stdio, GPIO, ...)
- Суперцикл — бесконечный цикл работы приложения

Память в ВПО

Код в памяти



Разделы памяти

- Секция **.boot2** определяет расположение загрузчика второй стадии во **FLASH**.
- Секция **.text**, в ней хранится код `main` и код SDK, эта секция также располагается во **FLASH**.
- Секция **.rodata**, в ней хранятся константы. Созданная нами переменная **LED_PIN** может храниться именно там, поскольку не будет изменяться в ходе программы, она размечена в **FLASH**.
- Секция **.data**, в ней описано, где будут храниться глобальные переменные. Обычно размечена в **SRAM**, поскольку значение глобальных может меняться в процессе работы. У этих переменных будет постоянный адрес во время всей работы программы.
- Секция **.bss**, в ней хранятся неинициализированные глобальные переменные. Она нужна для того, чтобы перед стартом программы стартап-код записал туда нулевые значения.

Стек

- Стек (англ. Stack) — область памяти для хранения локальных переменных, адресов возврата из функций и сохранённых регистров. Работает по принципу LIFO (Last In, First Out).
- Начало стека и его границы определяются в линкер-скрипте.
- Стек растёт с максимального адреса до минимального.

Куча

- Куча (англ. Heap) — область памяти для динамического выделения во время выполнения программы. Управляется программистом через `malloc()/free()`.
- Кучу контролирует аллокатор памяти, который находит свободные места в куче и удаляет ненужные данные.

Память как инструмент

Указатели на переменные и константы

Операция взятия адреса	{	<code>&LED_PIN</code>
Сохранение указателя на константу	{	<code>const uint32_t* ptr = &LED_PIN;</code>
Запись значения лежащего по адресу в переменную	{	<code>uint32_t value = *ptr;</code>
Запись в переменную значения, лежащего по явно указанному адресу	{	<code>uint32_t value = *(uint32_t*)0x10001E28;</code>

Квалификатор `volatile`

- `volatile`— это квалификатор типа (type qualifier) в языках C и C++, который говорит компилятору: «Не оптимизируй доступ к этой переменной. Её значение может измениться в любой момент без ведома компилятора».
- Компиляторы оптимизируют код: если переменная читается несколько раз подряд, компилятор может сохранить её значение в регистр процессора и не читать из памяти повторно. Обычно это ускоряет работу. Но иногда такое поведение ломает логику программы.
- Такое может происходить в регистрах периферии

```
uint32_t reg_value = *(volatile uint32_t*)0x40014000;
```

Указатели на структуру.

Пример с выравниванием

- Компилятор автоматически добавляет между полями **выравнивание (padding)** — пустые байты, чтобы каждое поле начиналось с подходящего адреса. В результате размер структуры может оказаться больше суммы размеров полей
- Функция **sizeof(pins_t)** возвращает итоговый размер с учётом паддинга
- Макрос **offsetof(pins_t, LED_PIN)** — смещение поля относительно начала структуры

```
typedef struct {  
    uint32_t LED_PIN;  
    uint32_t BUTTON_PIN;  
} pins_t;  
  
pins_t my_pins = { .LED_PIN = 25, .BUTTON_PIN = 12 };
```

Указатели на структуру.

Пример с оператором ->

```
pins_t* p = &my_pins;  
gpio_put(p->LED_PIN, 1);  
gpio_init(p->BUTTON_PIN);
```

Указатели на структуру.

Отключение padding

- Если структура должна точно соответствовать размерам полей (например, при обмене по протоколу или при работе с регистрами периферии), используют директиву `#pragma pack`

```
#pragma pack(push, 1)
typedef struct {
    uint8_t  cmd;
    uint16_t value;
    uint32_t timestamp;
} packet_t;
#pragma pack(pop)
```


Указатели на функции

Объявления типа `add_ptr_t` - указателя на функцию, принимающую два `int` и возвращающую `int`

Явное приведение типа

```
int add(int a, int b)
{
    return a + b;
}

typedef int (*add_ptr_t)(int, int);

int main()
{
    add_ptr_t add_func = (add_ptr_t)0x10001A00;
    int result = add_func(2, 2);
}
```

Передача функции как параметра (callback)

Объявление указателя на функцию
типа callback_t

Сигнатура функции с
параметром в виде
указателя на функцию

Защита от перехода
по нулевому адресу

Передача функции в
качестве аргумента

```
typedef void (*callback_t)(void);

void run_after_delay(uint32_t ms, callback_t callback)
{
    sleep_ms(ms);
    if (callback != NULL) {
        callback();
    }
}

void on_timeout(void)
{
    gpio_put(LED_PIN, 1);
}

int main()
{
    run_after_delay(1000, on_timeout);
}
```

Массив указателей на функции

Объявление указателя на
функцию
типа handler_t

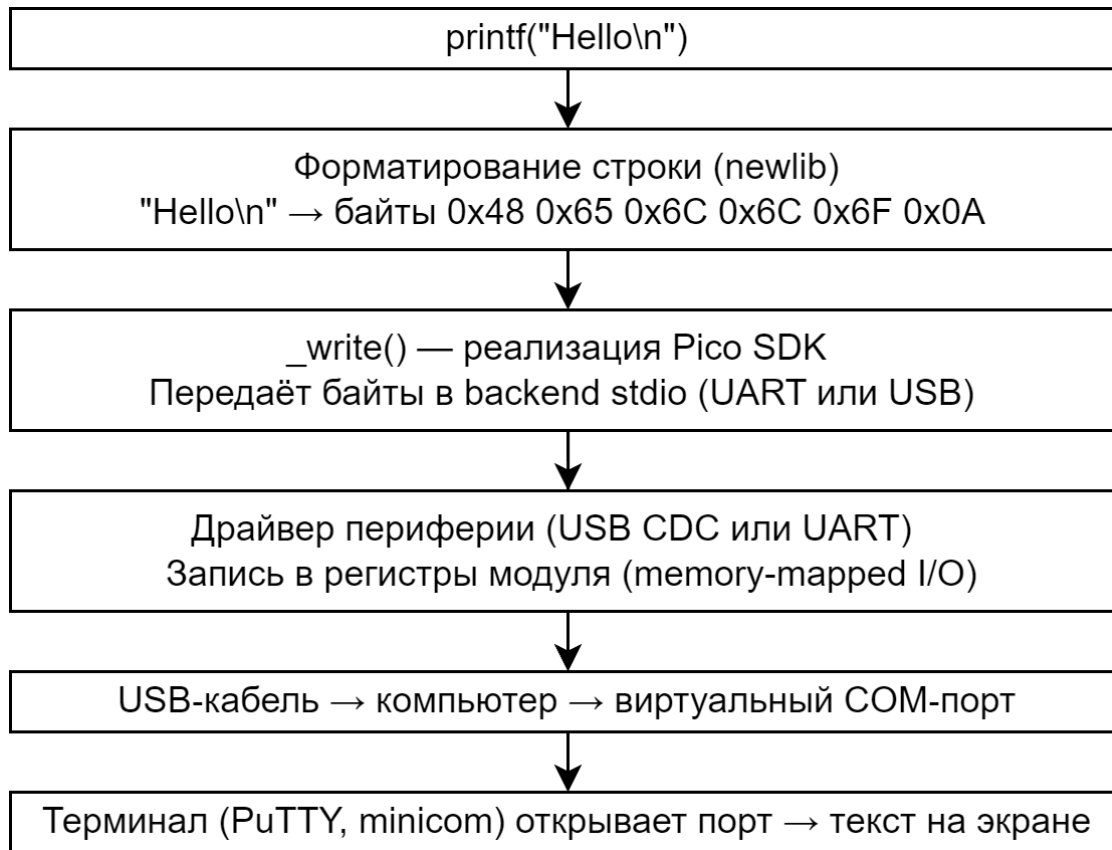
Объявление массива функций

Защита от выхода
за границы массива

```
typedef void (*handler_t)(void);  
handler_t handlers[] = { handle_idle, handle_run, handle_error };  
  
void dispatch(uint8_t state)  
{  
    if (state < sizeof(handlers) / sizeof(handlers[0])) {  
        handlers[state]();  
    }  
}
```

Ввод и вывод в микроконтроллере

Путь от printf до терминала



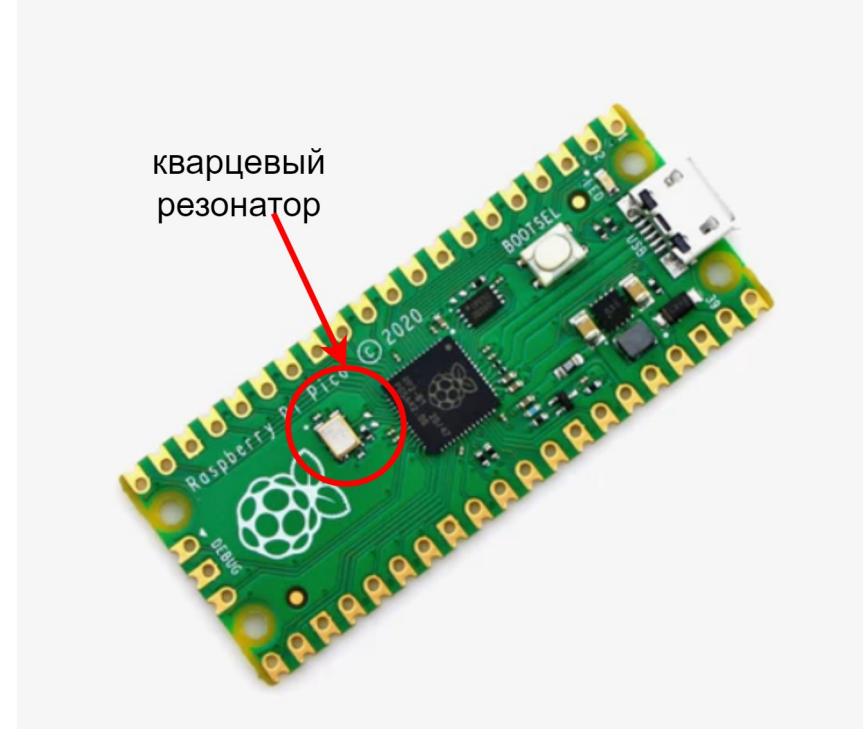
Время внутри микроконтроллера

Тактовый сигнал

- Тактовый сигнал (англ. clock) — периодическая последовательность электрических импульсов, которая синхронизирует все операции в микроконтроллере. Один такт — одна атомарная операция: одна инструкция процессора, один шаг счётчика таймера.

Осциллятор

- Кварцевый генератор — источник стабильных колебаний, который генерируется с помощью кварцевого резонатора
- Уже установлен на Pico, частота 12МГц
- Для изменения частоты колебаний используются PLL (Phase-Locked-Loop)
- Монотонное время — счётчик, который не уменьшается и не откатывается назад. Идеально подходит для измерения интервалов и проверки «прошло ли уже N единиц времени».



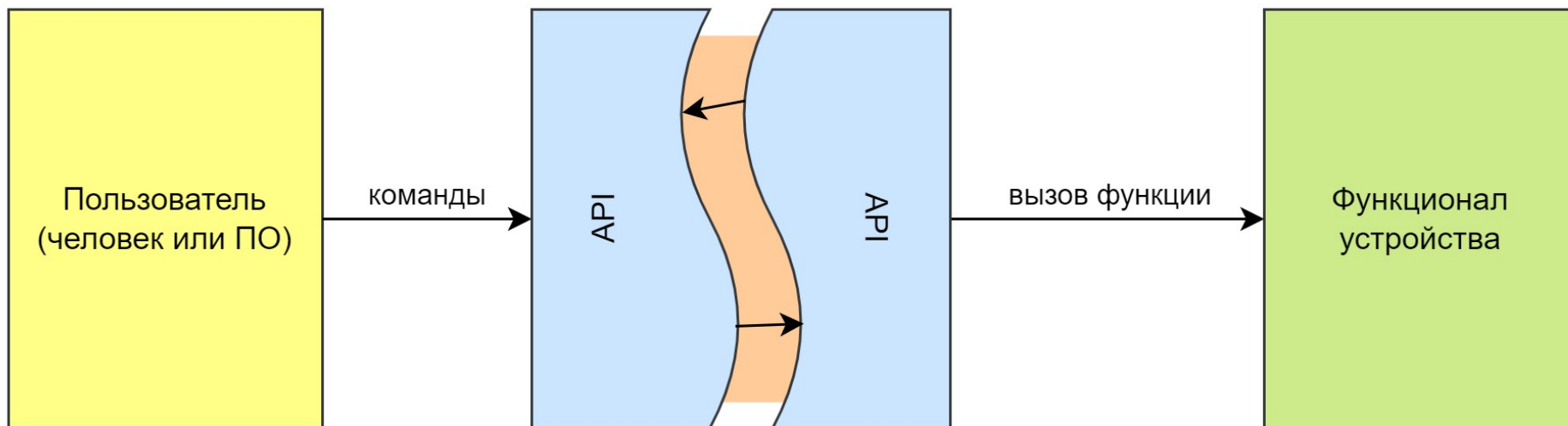
Работа со временем

Задача	Инструмент
Простая задержка (мигание, пауза)	<code>sleep_ms()</code> / <code>sleep_us()</code>
Измерение интервалов, проверка «прошло ли»	<code>time_us_64()</code> или <code>get_absolute_time() + absolute_time_diff_us()</code>
Ожидание без блокировки (можно делать что-то ещё)	Alarm'ы (<code>add_alarm_in_us</code> , <code>add_alarm_in_ms</code>)
Дата и время «как на часах»	RTC (<code>hardware/rtc.h</code>)

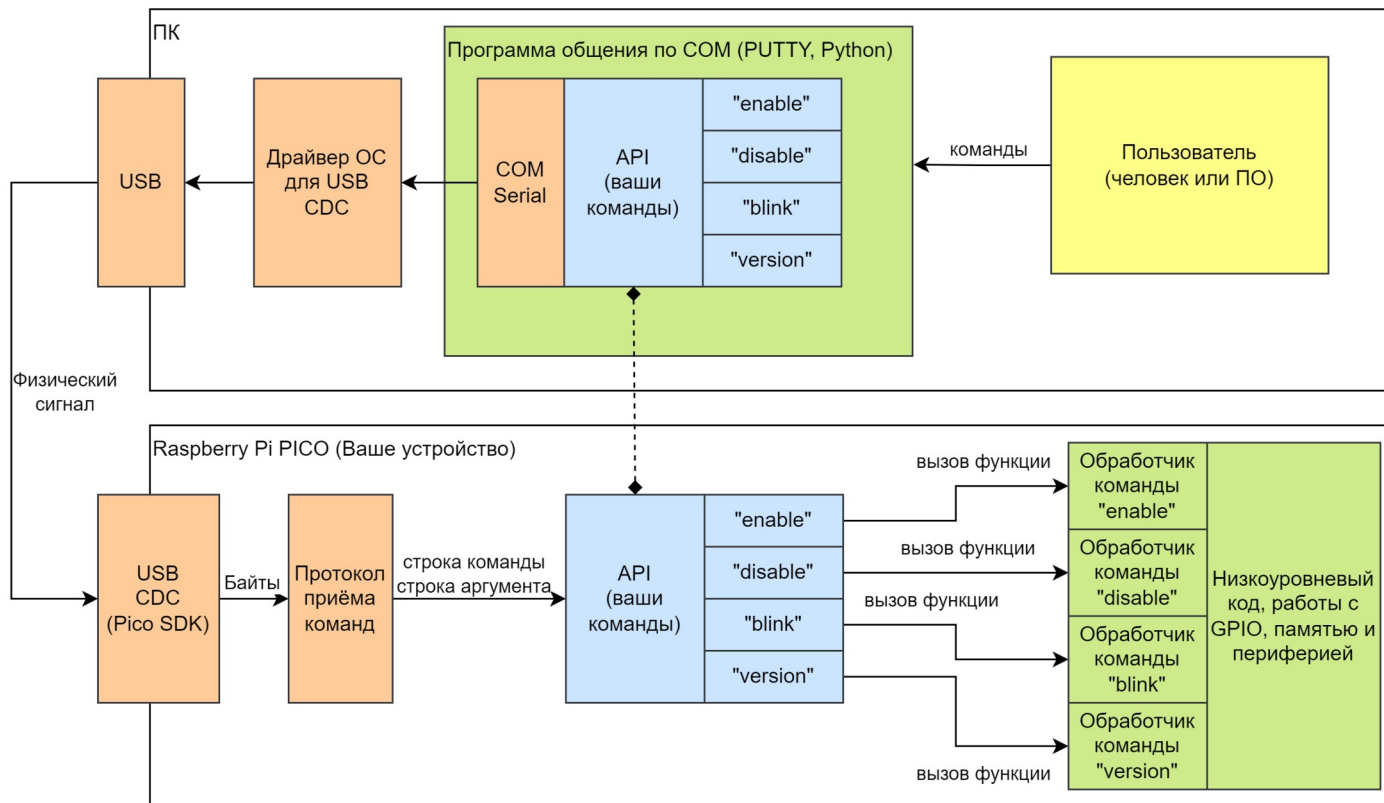
От ВПО к устройству

От ВПО к устройству

- **API (Application Programming Interface)** — набор функций, скрывающих детали реализации и предоставляющих удобный интерфейс для программиста



От ВПО к устройству



Архитектура ВПО

Задачи (Tasks)

- Задача (англ. task) — независимая программная единица, которая выполняет одну конкретную функцию в системе. Задачи работают псевдопараллельно: на одном ядре процессора они выполняются по очереди, но достаточно быстро, чтобы казалось, что всё происходит одновременно.

Свойства задачи:

- Самостоятельность — у задачи своя логика работы
- Одна ответственность — каждая задача отвечает за одну функцию системы
- Минимальная связность — задачи как можно меньше зависят друг от друга

Термостат (пример):

- читать температуру с датчика,
- обновлять дисплей,
- реагировать на нажатия кнопок,
- управлять нагревателем,
- отправлять данные по сети.

Суперцикл

Вызов нескольких задач по очереди в бесконечном цикле

Достоинства:

- Простота
- Нет накладных расходов на переключение между задачами
- Предсказуемость порядка выполнения

Недостаток:

- Зависание одной задачи блокирует выполнение остальных

```
int main() {  
    init_system();  
  
    while (1) {  
        task_button_check();    // Задача: опрос кнопок  
        task_led_control();     // Задача: управление светодиодом  
        task_sensor_read();     // Задача: чтение датчика  
        task_uart_process();    // Задача: обработка UART  
    }  
}
```

Неблокирующий подход

- Вместо использования блокирующей функции `sleep_ms`, проверять прошло ли нужное время и если нет, идти дальше
- Паттерн «проверь время → если пора, выполни → обнови метку» — основа неблокирующего программирования на микроконтроллерах. Вы будете встречать его повсюду: в библиотеках, в примерах SDK, в промышленном коде.

```
uint64_t last_blink_time = 0;
|
void task_blink(void) {
    uint64_t now = time_us_64();
    if (now - last_blink_time >= 250000) { // 250 мс = 250000 мкс
        gpio_put(LED_PIN, !gpio_get(LED_PIN));
        last_blink_time = now;
    }
    // Если 250 мс ещё не прошли – сразу выходим, не блокируя
}
```


Машина состояний

- **Машина состояний** (англ. Finite State Machine, FSM) — модель поведения, в которой система может находиться в одном из конечного числа **состояний**. Переход между состояниями происходит при наступлении определённых **событий**. В каждом состоянии система ведёт себя по-разному.

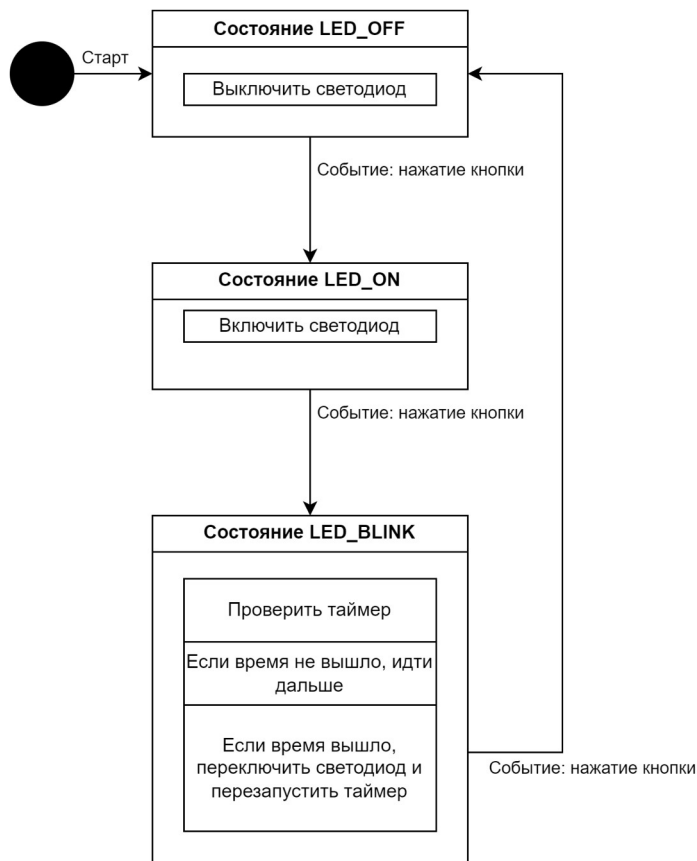
Компоненты машины состояний:

- Состояния (states) — дискретные режимы работы: «выключен», «горит», «мигает»
- События (events) — то, что вызывает переход: нажатие кнопки, истечение таймера, приход данных
- Переходы (transitions) — правила: «из состояния А по событию X перейти в состояние В»
- Действия (actions) — что делать при переходе или в текущем состоянии

Преимущества:

- Чёткая структура — логика программы понятна и предсказуема
- Лёгкость отладки — всегда известно текущее состояние системы
- Масштабируемость — добавить новый режим = добавить `case` и переходы
- Неблокирующая работа — FSM проверяет состояние и мгновенно возвращается, идеально для кооперативной многозадачности

Машина состояний



```

typedef enum
{
    LED_STATE_OFF = 0,
    LED_STATE_ON = 1,
    LED_STATE_BLINK = 2,
} led_state_t;

uint64_t led_ts = 0;
led_state_t led_state = LED_STATE_OFF;

void led_task_handle() {
    switch (led_state) {
        case LED_STATE_OFF:
            gpio_put(LED_PIN, 0);
            break;
        case LED_STATE_ON:
            gpio_put(LED_PIN, 1);
            break;
        case LED_STATE_BLINK:
            if (time_us_64() > led_ts)
            {
                led_ts = time_us_64() + (LED_BLINK_PERIOD_US / 2);
                bool state = gpio_get(LED_PIN);
                gpio_put(LED_PIN, !state);
            }
            break;
        default:
            led_state = LED_STATE_OFF;
    }
}

void on_button_press(void) {
    switch (led_state) {
        case LED_STATE_OFF: led_state = LED_STATE_ON; break;
        case LED_STATE_ON: led_state = LED_STATE_BLINK; break;
        case LED_STATE_BLINK: led_state = LED_STATE_OFF; break;
    }
}
  
```