

Основы микропроцессорной техники

Введение в микроконтроллеры Espressif

Хохлов С.А.

МГТУ им. Н.Э. Баумана

1 декабря 2025 г.

Общие сведения

Espressif Systems — китайская компания, специализирующаяся на микроконтроллерах с интегрированным Wi-Fi и Bluetooth.

Основные серии МК Espressif Systems

- ESP8266 — первая популярная платформа (2014 г.), одноядерный MCU с Wi-Fi.
- ESP32 (Xtensa) — двухъядерные и одноядерные контроллеры Tensilica Xtensa, Wi-Fi + Bluetooth.
- ESP32-C / ESP32-H / ESP32-S (RISC-V) — новые поколения на ядрах RISC-V, с улучшенной периферией и поддержкой BLE 5, Wi-Fi 6, Zigbee, Thread.

Сравнение с AVR (ATmega328P)

| Характеристика | ATmega328P | ESP8266 | ESP32 (Xtensa) | ESP32-C3 (RISC-V) |
|------------------|-------------------|---------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| Архитектура | 8-бит RISC | 32-бит Xtensa LX106 | 32-бит Xtensa LX6/LX7 (2 × 240 МГц) | 32-бит RISC-V (1 × 160 МГц) |
| Память Flash | до 32 КБ | до 4 МБ (внешняя) | 4–16 МБ (внешняя) | 4 МБ (внешняя) |
| RAM | 2 КБ | 160 КБ | 320 КБ + (внешняя PSRAM до 8 МБ) | 400 КБ |
| Wi-Fi | — | 2.4 ГГц | 2.4 ГГц + BT | 2.4 ГГц + BT LE |
| GPIO | 23 | 17 | до 34 | до 22 |
| ADC | 10-бит | 10-бит | 12-бит | 12-бит |
| DAC | — | — | 2 × 8-бит | — |
| UART/SPI/I2C | + | + | + (до 3 интерфейсов) | + |
| Таймеры/ШИМ | простые 8-/16-бит | + | мощные LEDC (PWM) | + |
| Тактовая частота | 16 МГц | 80 МГц | до 240 МГц | до 160 МГц |

Ключевая идея

переход с 8-битного AVR к 32-битным ESP — скачок в производительности и интеграции (Wi-Fi, BT, периферия, RTOS).

Архитектура ESP32 (Xtensa)

- 2 ядра LX6 (или LX7):
 - Core 0 — система и FreeRTOS.
 - Core 1 — пользовательские задачи (можно переназначить).
- Кэш, DMA, RTC-домен, ULP-сопроцессор (низкопотребляющий).
- Раздельные шины данных и инструкций (Harvard).
- Периферийная шина (APB) — к GPIO, UART, SPI, I2C и др.
- Wi-Fi + Bluetooth реализованы на выделенном MAC/PHY-блоке.

Новые ядра на RISC-V

- Серии ESP32-C3 / C6 / H2 используют открытую архитектуру RISC-V.
- Простая структура ядра, улучшенная поддержка компиляторов (gcc, llvm).
- Более низкое энергопотребление и улучшенная безопасность.
- Совместимость на уровне API: проекты для ESP-IDF обычно переносятся без изменений.

Периферия

ESP8266

Архитектура: одноядерный Tensilica LX106 (80–160 МГц)
Периферийные возможности относительно простые, но
достаточные для IoT-устройств.

Основные блоки ESP8266 I

- GPIO: до 17 линий (часть используется Wi-Fi, UART, Flash).
- ADC: 1 канал, 10-битный, диапазон 0–1 В (в новых модулях до 3.3 В).
- UART: 2 (один основной, один вспомогательный для логов).
- SPI: до 2 интерфейсов, можно использовать как мастер/слейв.
- I²C: реализуется программно (bit-bang).
- PWM: до 8 каналов, 10-бит, частота до 1 кГц.
- Timer: системный таймер + программные таймеры SDK.
- Wi-Fi 2.4 ГГц: 802.11b/g/n, режимы STA/AP/STA+AP.

Основные блоки ESP8266 II

- RTC: программный (через SDK), есть “deep sleep” с пробуждением по таймеру или GPIO16.

Особенности:

- Все функции Wi-Fi и TCP/IP реализованы на том же ядре — при интенсивной работе сети выполнение пользовательского кода может прерываться.
- Низкое энергопотребление в режиме сна (<1 мА в deep sleep).
- Нет аппаратного Bluetooth.

ESP32 (ядра Xtensa LX6 / LX7)

Архитектура: 32-бит, 1–2 ядра, 160–240 МГц
Периферия гораздо богаче, чем у ESP8266.

Основные блоки ESP32 (ядра Xtensa) I

- GPIO: до 34 универсальных линий, с системой GPIO Matrix — любое периферийное устройство можно привязать к любому выводу.
- ADC: * до 18 каналов, 12-бит, до 6.6 МСемп/с; * доступен режим DMA-передачи.
- DAC: 2×8 -бит (каналы DAC1/DAC2).
- Touch-сенсоры: до 10 каналов ёмкостного измерения.
- UART: до 3 (поддержка RS485, аппаратный буфер).
- SPI: до 4, включая высокоскоростной HSPI/VSPI (до 80 МГц).
- I²C: до 2, аппаратная поддержка.
- PWM (LEDC): * 16 каналов, разрешение до 20 бит; * частота до 40 МГц.

Основные блоки ESP32 (ядра Xtensa) II

- RMT (Remote Control): универсальный генератор/приёмник последовательных импульсов (удобен для IR, WS2812, DSHOT).
- Timer: 4×64 -битные таймеры общего назначения + таймеры RTC.
- RTC и ULP-ядро:
 - отдельный домен с собственным питанием,
 - микропроцессор ULP для фоновых задач при сне (например, периодическое измерение датчиков).
- Коммуникации:
 - Wi-Fi 802.11b/g/n;
 - Bluetooth Classic и BLE 4.2;
 - Ethernet (через внешние PHY).

Основные блоки ESP32 (ядра Xtensa) III

- SD/MMC, SPI Flash, PSRAM, I²S, CAN, MCPWM (для управления моторами).

Особенности:

- Все периферийные блоки доступны из FreeRTOS-задач через API ESP-IDF.
- Возможность многозадачности с разделением ядер: одно ядро для системы, второе — для пользовательских задач.
- Большинство выводов поддерживает прерывания и DMA.

ESP32 (ядра RISC-V)

Типичные представители: ESP32-C2, C3, C6, H2
Архитектура: 32-бит RISC-V, 160–240 МГц
Фокус: низкое энергопотребление, безопасность, BLE и современные IoT-протоколы.

Основные блоки ESP32 (ядра RISC-V) I

- GPIO: до 22–26 линий, с GPIO Matrix (аналогично Xtensa).
- ADC: до 6–12 каналов, 12-бит, поддержка DMA.
- UART: до 2–3 портов, RS485, авто-baud.
- SPI: до 2–3 интерфейсов, до 80 МГц.
- I²C: до 2 контроллеров.
- PWM (LEDC): до 8–16 каналов.
- RMT: доступен (в упрощённой версии).
- Timer Group: 2 группы по 2 × 64-битных таймера.
- RTC: отдельный домен с режимами light/deep sleep.
- Wi-Fi 2.4 ГГц: 802.11b/g/n (C3, C6).
- Bluetooth LE 5.0/5.2 (C3, C6, H2).
- Zigbee / Thread / Matter: поддерживаются на C6/H2.

Основные блоки ESP32 (ядра RISC-V) II

- Security-модули:
 - аппаратное шифрование AES/SHA,
 - eFuse для ключей,
 - Secure Boot, Flash Encryption.

Особенности:

- Единое программное ядро, без разделения на системное/пользовательское — проще для начинающих.
- Архитектура RISC-V обеспечивает лучшую совместимость со стандартным GCC.
- Низкое энергопотребление (режим light sleep <0.1 мА).
- Чаще используется встроенный USB-UART (не требуется внешний CH340/CP2102).

Краткое сравнение периферии

| Возможности | ESP8266 | ESP32 Xtensa | ESP32 RISC-V |
|---------------------|-------------|--------------|--------------|
| GPIO | 17 | 34 | 22–26 |
| ADC | 1×10-бит | 18×12-бит | 6–12×12-бит |
| DAC | — | 2×8-бит | — |
| UART | 2 | 3 | 2–3 |
| SPI | 2 | 4 | 2–3 |
| I ² C | программный | 2 | 2 |
| PWM | 8×10-бит | 16×до 20-бит | 8–16 |
| Touch | — | 10 | — |
| Wi-Fi | 2.4 ГГц | 2.4 ГГц | 2.4 ГГц |
| Bluetooth | — | BT + BLE 4.2 | BLE 5.x |
| Zigbee/Thread | — | — | C6/H2 |
| RTC / ULP | базовый | продвинутый | продвинутый |
| USB-UART встроенный | нет | нет | да (часто) |

Программирование

1. ESP-IDF (официальный SDK)

- Полноценная среда с FreeRTOS, драйверами, Wi-Fi/BLE-стеком, OTA.
- Программы — это проекты на C/C++ с задачами FreeRTOS.
- Поддерживается:
 - idf.py — сборка (CMake)
 - menuconfig — настройка
 - esptool.py — загрузка в Flash
- IDE: VS Code + ESP-IDF Extension, Eclipse, CLion.

2. Arduino-совместимый режим I

- Для быстрого прототипирования.
- Использует ядро ESP32 для Arduino, совместимое с библиотеками AVR.
- Можно вызывать функции ESP-IDF (через esp_...).
- Поддержка в Arduino IDE, PlatformIO, Wokwi.
- Пример:

2. Arduino-совместимый режим II

```
#include <WiFi.h>
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  WiFi.begin("SSID", "PASS");
}
void loop() {
  Serial.println(WiFi.localIP());
  delay(1000);
}
```

FreeRTOS в ESP-IDF I

- Каждое приложение — набор задач (xTaskCreate), работающих параллельно.
- Возможны мьютексы, очереди, семафоры, таймеры.

FreeRTOS в ESP-IDF II

■ Пример:

```
void blink_task(void *pv) {  
    gpio_set_direction(GPIO_NUM_2, GPIO_MODE_OUTPUT);  
    while (1) {  
        gpio_set_level(GPIO_NUM_2, 1);  
        vTaskDelay(500 / portTICK_PERIOD_MS);  
        gpio_set_level(GPIO_NUM_2, 0);  
        vTaskDelay(500 / portTICK_PERIOD_MS);  
    }  
}  
  
void app_main(void) {  
    xTaskCreate(blink_task, "blink", 2048, NULL, 1, NULL);  
}
```

Производительность и особенности

- До 600 DMIPS и >200 MHz.
- Аппаратное ускорение для криптографии, CRC, MAC.
- Поддержка PSRAM, DMA, SPI Flash до 120 МБ/с.
- Высокая скорость Wi-Fi (до 150 Мбит/с).
- Реализация многозадачности и событийной обработки.

Отладочные платы и экосистема

| Плата | MCU | Особенности | Цена |
|----------------------------|-----------------|---------------------------|------------|
| ESP8266 NodeMCU | ESP8266 | UART, Wi-Fi, USB | \$3– 4 |
| ESP32 DevKitC / WROOM | ESP32 Xtensa | 30 GPIO, BT, Wi-Fi | \$5– 8 |
| ESP32-C3 DevKitM / Node | RISC-V | BLE 5, Wi-Fi, USB | \$4– 6 |
| ESP32-S3 DevKit | Xtensa LX7 | AI-инструкции, USB OTG | \$7– 10 |
| ESP32-H2 | RISC-V | Zigbee / Thread, BLE | \$6– 8 |

Эмуляция и симуляция

Wokwi — онлайн-эмулятор Arduino и ESP:

- Поддерживает ESP32, ESP32-S2, ESP32-C3.
- Позволяет:
 - Проверять код Arduino и ESP-IDF.
 - Использовать виртуальные датчики и периферию.
 - Интегрировать в VS Code и GitHub Codespaces.

Преимущества платформы Espressif

- Высокая производительность при низкой цене.
- Встроенные Wi-Fi/Bluetooth.
- Бесплатный SDK с открытым исходным кодом.
- Кросс-платформенная разработка (Windows, Linux, macOS).
- Большое сообщество, документация и примеры.
- Поддержка в Arduino, PlatformIO, ESP-IDF и Wokwi.

Заключение

ESP32 — логичный следующий шаг после AVR:

- знакомый подход (C/C++, Arduino),
- значительно больше ресурсов,
- встроенная связь и RTOS,
- современные ядра (Xtensa и RISC-V).

Модули и отладочные платы

ESP32-WROOM-32

ESP32-WROOM-32 — это законченный модуль на керамической подложке, включающий:

- сам микроконтроллер ESP32-D0WDQ6 (2 ядра Xtensa LX6),
- SPI Flash (обычно 4 МБ, иногда 8/16 МБ),
- кварцевый резонатор,
- антенну или разъём под неё,
- экранирующий кожух.

Платы на основе модуля I

- ESP32-DevKitC — официальная отладочная плата от Espressif;
- NodeMCU-32S, DOIT ESP32 DEVKIT V1 — популярные китайские варианты.

Обычно содержат:

- стабилизатор 3.3 В;
- USB-UART (CP2102 или CH340);
- авто-загрузку через GPIO0 и EN;
- светодиод на GPIO2;
- разъём под внешнее питание 5 В.

Платы на основе модуля II

WROOM — это промышленный модуль, а DevKitC —
отладочная плата на его основе.

