

Аппаратное обеспечение IoT/CPS

Лекция 2

А. А. Подшивалов

apodshivalov@miem.hse.ru

Комментарии к опросу

volatile

Что означает ключевое слово `volatile` в языке Си?

- ▶ ничего, компилятор может проигнорировать это ключевое слово
- ▶ переменная, объявленная с модификатором `volatile`, может быть изменена не предусмотренным в программе способом
- ▶ эту переменную можно безопасно использовать из разных потоков/процессов в многозадачной системе
- ▶ запрещает некоторые оптимизации компилятора при обращении к этой переменной

static

- ▶ Модификатор `static` для функций и внешних переменных (определенных снаружи функции) ограничивает область видимости текущим файлом

```
#define PRIVATE static
```

- ▶ Модификатор `static` для внутренних переменных функции определяет время их существования — оно не прекращается при выходе из функции (т. е. память выделяется не на стеке, а в сегменте `.bss`)

auto

```
auto a = 1.0 / 2.0;  
if (a > 0){  
    puts("Compiled as C++ code!");  
} else {  
    puts("Compiled as C code!");  
}
```

Арифметика

- ▶ 16-битный `int` (и `INT_MAX`, равный 32767) — не редкость
- ▶ `char` может быть как знаковым, так и беззнаковым; используйте этот тип только для работы с «буковками», для вычислений есть `int8_t` и `uint8_t`
- ▶ По возможности пользуйтесь типами из `stdint.h`

Определения

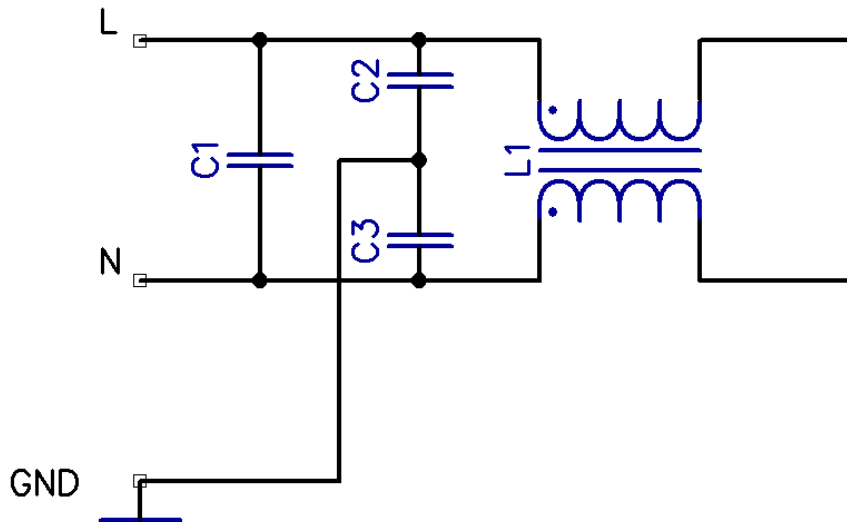
```
int a; // Целое число
int *a; // Указатель на целое число
int a[10]; // Массив из 10 целых чисел
int *a[10]; // Массив из 10 указателей на целое число
int (*a)[10]; // Указатель на массив из 10 целых чисел
int (*a)(int); // Указатель на функцию
int (*a[10])(int); // Массив из 10 указателей на функцию
```

malloc

```
char *ptr;  
if ((ptr = (char*) malloc(0)) == NULL) {  
    puts("Got a null pointer");  
} else {  
    puts("Got a valid pointer");  
}
```

Правильный ответ — ~~«не знаю»~~ implementation defined

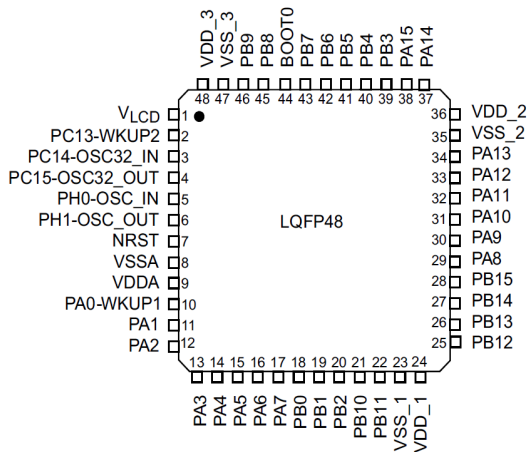
Электробезопасность



GPIO

GPIO — самый «микроконтроллерный» интерфейс

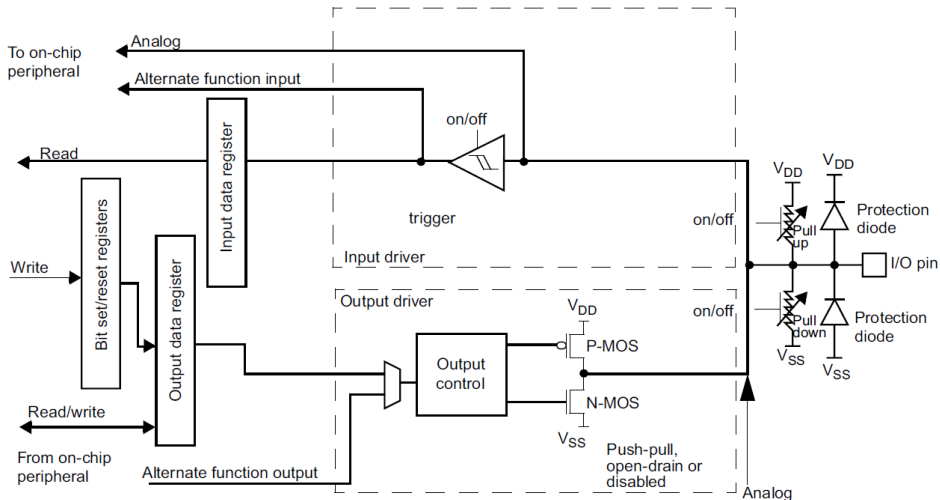
- ▶ General purpose input/output, ввод-вывод общего назначения
- ▶ Из 48 выводов STM32L151CC — 37 могут работать, как GPIO
- ▶ 8/**16**/32 вывода объединяются в порт
- ▶ Обозначение PA5 — 5 вывод порта A



Основные и дополнительные функции

- ▶ Режимы работы GPIO (в STM32L1 — регистр MODER; далее рассматриваем эту серию)
 - ▶ Цифровой вход
 - ▶ Цифровой выход
 - ▶ Аналоговый вход/выход (реализован не у всех выводов)
 - ▶ Альтернативные функции
- ▶ Альтернативные функции подключаются при помощи регистров AFRL и AFRH
- ▶ Иногда выводы совмещаются со специальными функциями микроконтроллера (выбор источника загрузки, сброс, тактирование)

Структура вывода GPIO



Альтернативные функции

Port name	Digital alternate function number														
	AFIO0	AFIO1	AFIO2	AFIO3	AFIO4	AFIO5	AFIO6	AFIO7	AFIO8	AFIO9	AFIO11	AFIO12	AFIO13	AFIO14	AFIO15
	Alternate function														
	SYSTEM	TIM2	TIM3/4	TIM9/10/11	I2C1/2	SPI1/2	N/A	USART1/2/3	N/A	N/A	LCD	N/A	N/A	RI	SYSTEM
BOOT0	BOOT0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NRST	NRST	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PA0-WKUP1	-	TIM2_CH1_ETR	-	-	-	-	-	USART2_CTS	-	-	-	-	-	TIMx_IC1	EVENTOUT
PA1	-	TIM2_CH2	-	-	-	-	-	USART2_RTS	-	-	[SEG0]	-	-	TIMx_IC2	EVENTOUT
PA2	-	TIM2_CH3	-	TIM9_CH1	-	-	-	USART2_TX	-	-	[SEG1]	-	-	TIMx_IC3	EVENTOUT
PA3	-	TIM2_CH4	-	TIM9_CH2	-	-	-	USART2_RX	-	-	[SEG2]	-	-	TIMx_IC4	EVENTOUT
PA4	-	-	-	-	-	SPI1_NSS	-	USART2_CK	-	-	-	-	-	TIMx_IC1	EVENTOUT
PA5	-	TIM2_CH1_ETR	-	-	-	SPI1_SCK	-	-	-	-	-	-	-	TIMx_IC2	EVENTOUT
PA6	-	-	TIM3_CH1	TIM10_CH1	-	SPI1_MISO	-	-	-	-	[SEG3]	-	-	TIMx_IC3	EVENTOUT
PA7	-	-	TIM3_CH2	TIM11_CH1	-	SPI1_MOSI	-	-	-	-	[SEG4]	-	-	TIMx_IC4	EVENTOUT
PA8	MCO	-	-	-	-	-	-	USART1_CK	-	-	[COM0]	-	-	TIMx_IC1	EVENTOUT
PA9	-	-	-	-	-	-	-	USART1_TX	-	-	[COM1]	-	-	TIMx_IC2	EVENTOUT
PA10	-	-	-	-	-	-	-	USART1_RX	-	-	[COM2]	-	-	TIMx_IC3	EVENTOUT
PA11	-	-	-	-	-	SPI1_MISO	-	USART1_CTS	-	-	-	-	-	TIMx_IC4	EVENTOUT
PA12	-	-	-	-	-	SPI1_MOSI	-	USART1_RTS	-	-	-	-	-	TIMx_IC1	EVENTOUT
PA13	JTMS-SWDIO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	TIMx_IC2	EVENTOUT
PA14	JTCK-SWCLK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	TIMx_IC3	EVENTOUT
PA15	JTDI	TIM2_CH1_ETR	-	-	-	SPI1_NSS	-	-	-	-	SEG17	-	-	TIMx_IC4	EVENTOUT
PB0	-	-	TIM3_CH3	-	-	-	-	-	-	-	[SEG5]	-	-	-	EVENTOUT

Альтернативные функции

Как мы можем подключать различные встроенные периферийные устройства к выводам микроконтроллера?

- ▶ Полная матрица переключений
 - ▶ Любой периферийный блок может быть подключен к любому выводу микроконтроллера (за исключением «аналоговых» устройств)
 - ▶ TI CC13xx/CC26xx, Nordic Semiconductor nRF51/nRF52
- ▶ Ограниченная матрица переключений
 - ▶ Каждый периферийный блок может подключаться к 2-4 выводам GPIO
 - ▶ STM32 и большинство других микроконтроллеров
- ▶ Фиксированная матрица переключений
 - ▶ Каждый периферийный блок привязан к конкретному GPIO
 - ▶ PIC, AVR, большинство 8-битных микроконтроллеров

Альтернативные функции

The screenshot displays the TI PinMux Tool interface for a CC3200 microcontroller. The interface is divided into three main sections: Peripherals, Requirements, and Output.

Peripherals: A list of peripherals is shown with a filter text field. The peripherals are:

- (/1) ADC
- (/1) Camera
- (/1) GPIO
- (/1) I2C
- (/1) McASP
- (/1) SDHost** (checked)
- (/1) SPI
- (/8) TimerCP
- (/6) TimerPWM
- (/2) UART** (checked)
- (/1) WATCHDOG

Requirements: The SDHost requirement is selected (1 of 1 Added). The configuration for SDHost is as follows:

SDHost Signals	SDHost Pins
<input checked="" type="checkbox"/> CLK(SDCARD_CLK)	Any(1)
<input checked="" type="checkbox"/> CMD(SDCARD_CMD)	Any(1)
<input checked="" type="checkbox"/> DATA(SDCARD_DATA)	1
<input checked="" type="checkbox"/> IRQ(SDCARD_IRQ)	7

Output: The Design Summary section shows the generated files:

File Name	Category	Action
pin_mux_config.c	driverlib	Download
pin_mux_config.h	driverlib	Download
rom_pin_mux_config.c	driverlib	Download
summary.csv	csv	Download

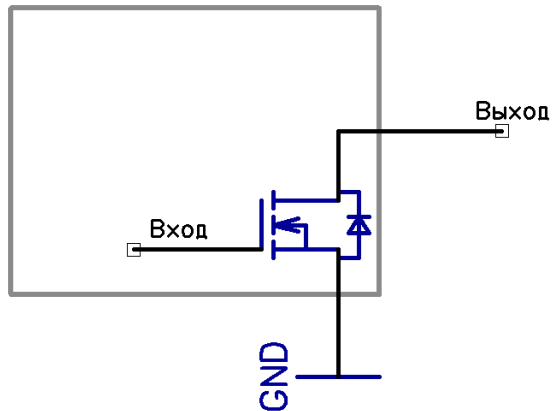
The Pin Layout section shows a diagram of the microcontroller pins. The pins are numbered 1 to 64. The legend indicates:

- Pin Available (Black)
- Pin Assigned (Green)
- Fixed (N/A) (Grey)

The diagram shows that 8 pins are assigned (green) and 19 pins are available (black). The status is summarized as:

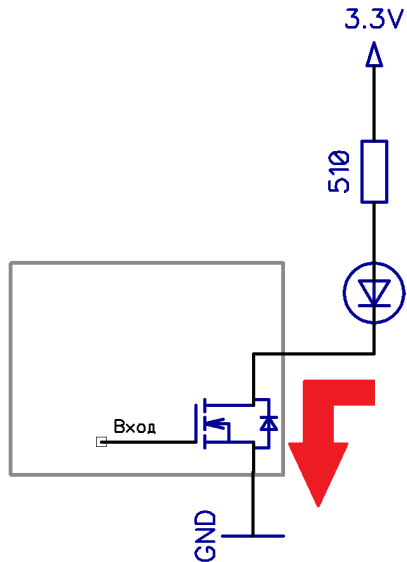
- GPIO Used: 8
- GPIO Available: 19

Выход с открытым стоком

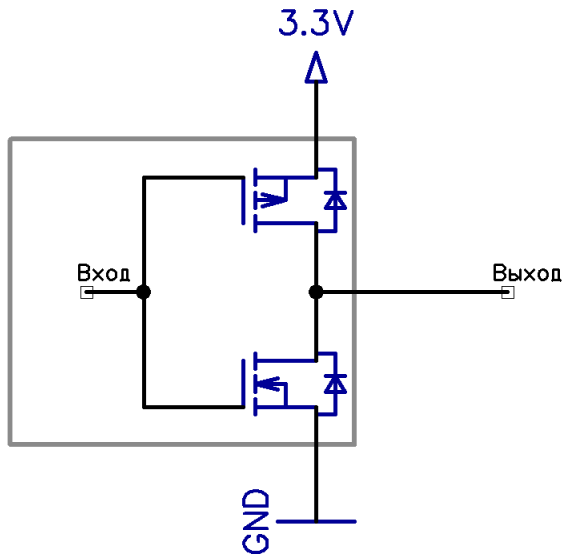


- Он же «открытый коллектор», он же «open drain»

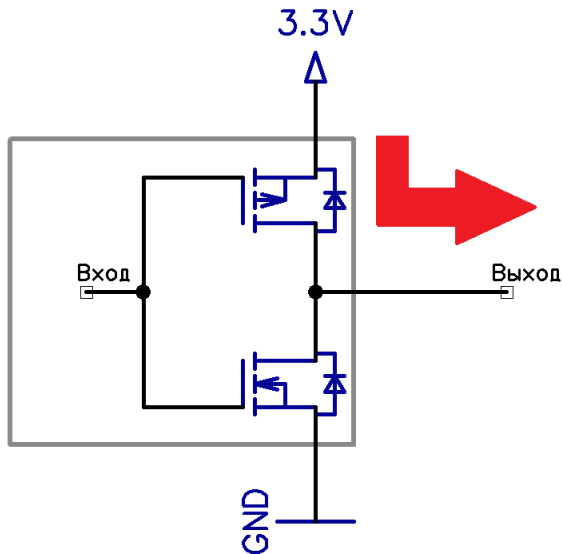
Выход с открытым стоком



Push-pull

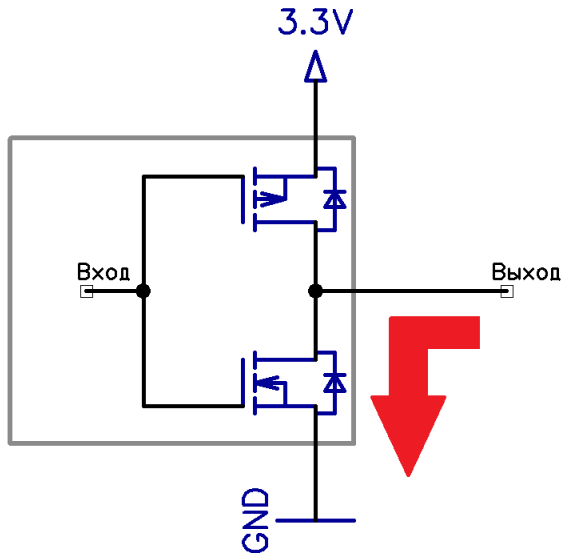


Push-pull



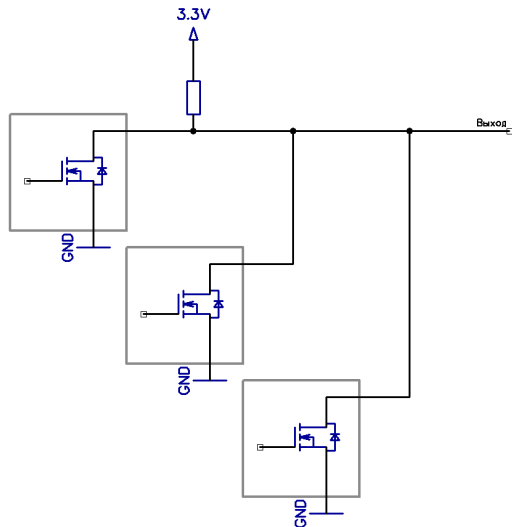
- ▶ На входе низкий уровень, верхний транзистор открыт, нижний закрыт
- ▶ Вытекающий ток (source current)

Push-pull



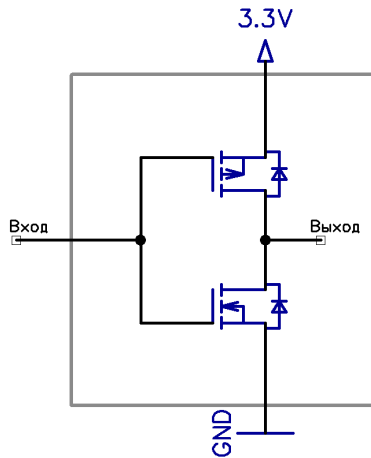
- ▶ На входе высокий уровень, верхний транзистор закрыт, нижний открыт
- ▶ Втекающий ток (sink current)
- ▶ Иногда втекающий ток существенно больше вытекающего — смотрите даташит!

Открытый сток еще раз

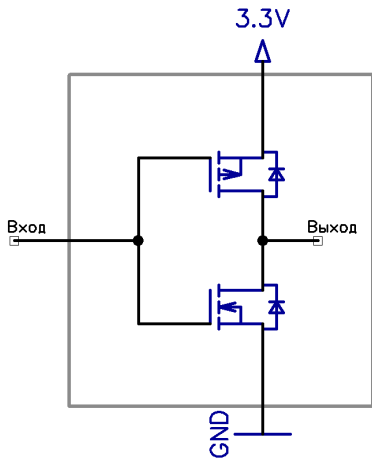


- ▶ Такое подключение применяется в шинах I²C и 1-Wire
- ▶ Одновременное включение «0» любым количеством устройств не приводит к выходу из строя других устройств на шине

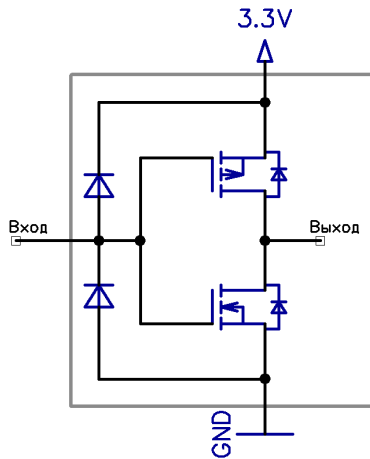
Цифровой вход



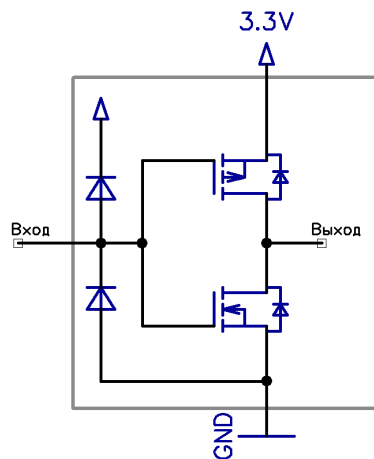
Цифровой вход с защитой



Без защиты

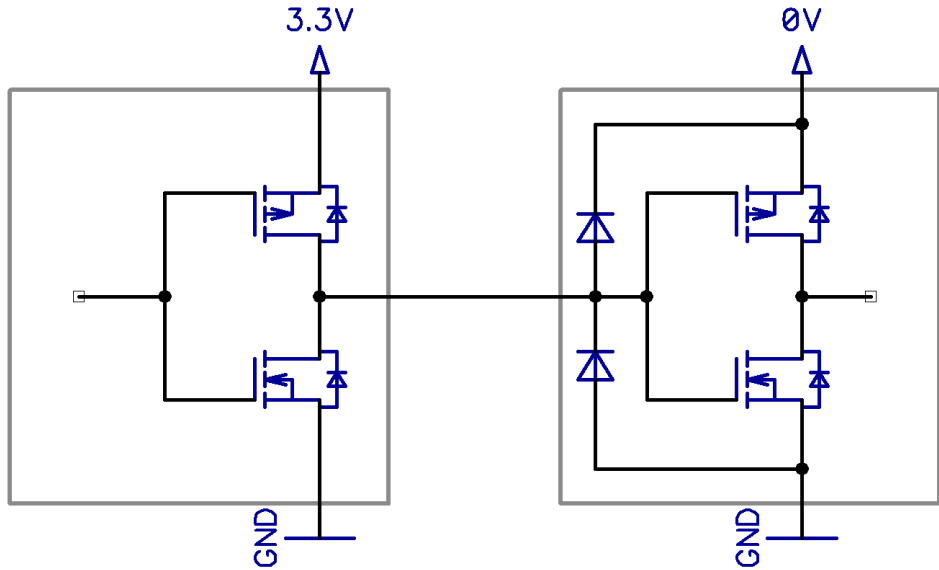


Защита от статики

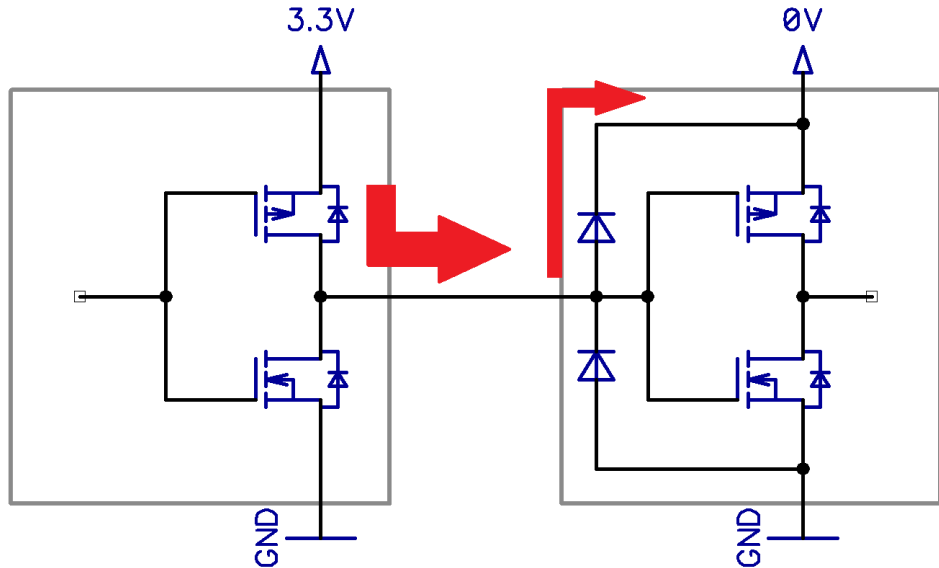


5V-tolerant

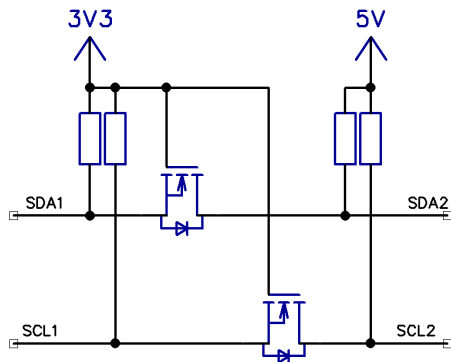
???



Паразитное питание

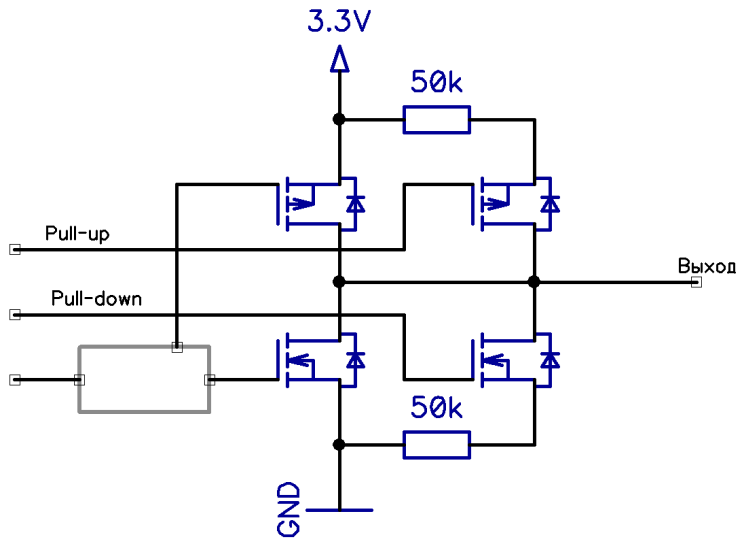


Согласование уровней



- ▶ Philips Semiconductor AN97055
- ▶ Согласование уровней и изоляция шин I²C с разным напряжением
- ▶ Может быть использовано и как однонаправленный преобразователь уровней в случае push-pull, тогда можно обойтись без подтягивающих резисторов на стороне выхода
- ▶ А вообще используйте готовые преобразователи уровней (например, SN74LVC2T45, TXB0108), особенно в случае двунаправленных шин

Встроенная подтяжка



API GPIO в Riot

- ▶ Инициализация

```
gpio_init(GPIO_PIN(PORT_A, 5), GPIO_OUT);
```

- ▶ Варианты:

```
GPIO_IN, GPIO_IN_PD, GPIO_IN_PU, GPIO_OUT, GPIO_OD, GPIO_OD_PU
```

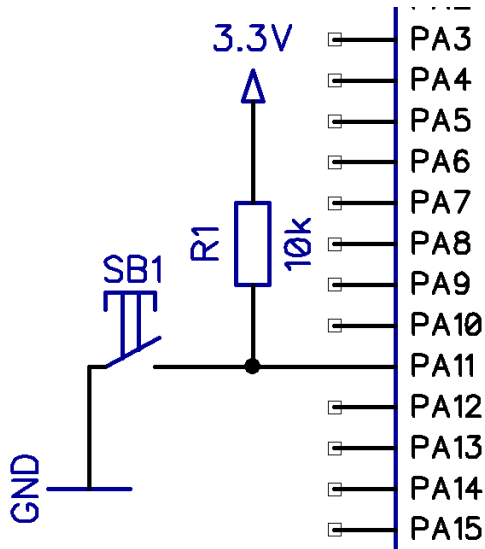
- ▶ Чтение

```
gpio_read(GPIO_PIN(PORT_A, 5));
```

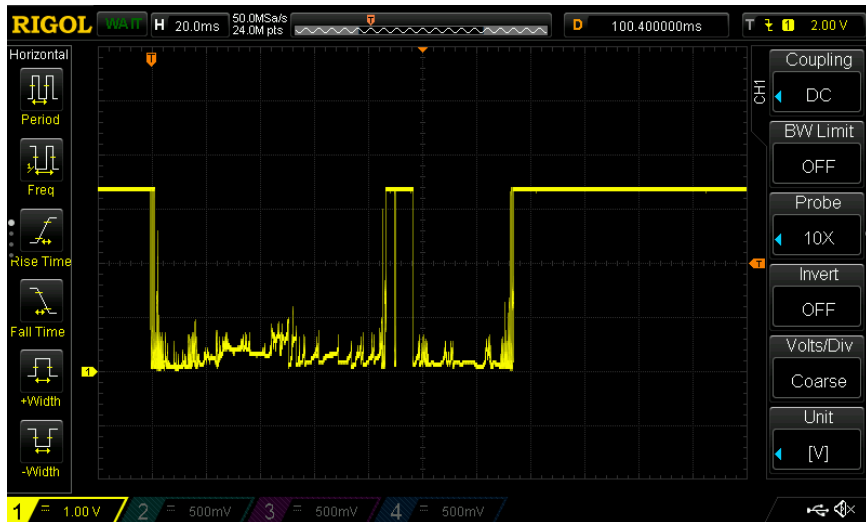
- ▶ Запись

```
gpio_set, gpio_clear, gpio_toggle, gpio_write
```

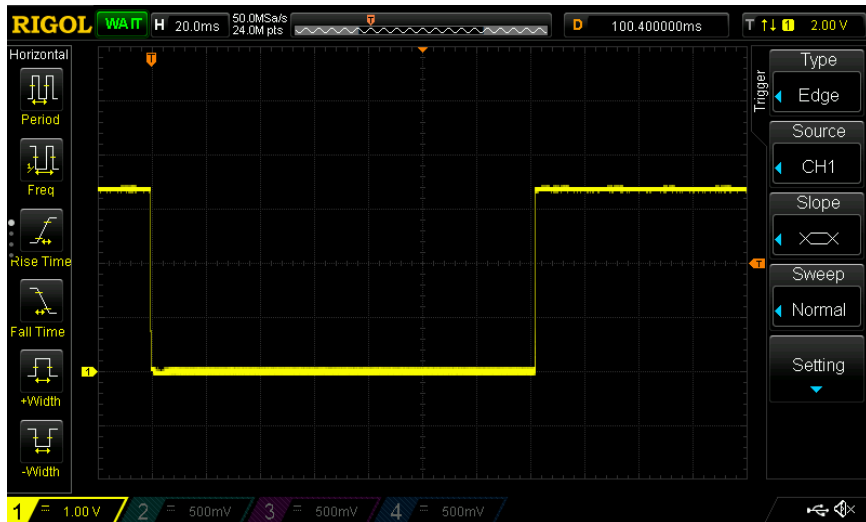
Давайте подключим кнопку



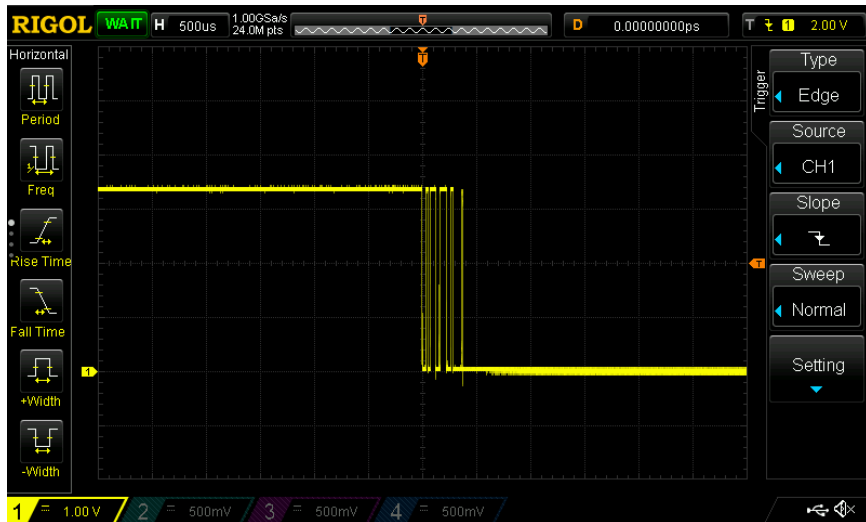
Давайте подключим кнопку



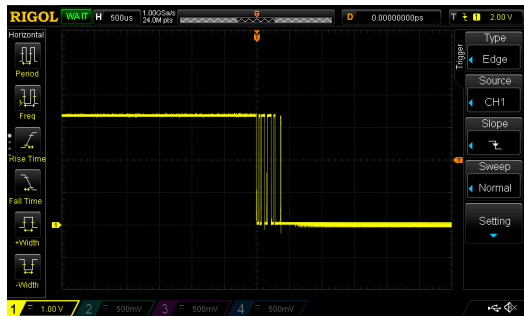
Давайте подключим кнопку



Давайте подключим кнопку



Дребезг контактов



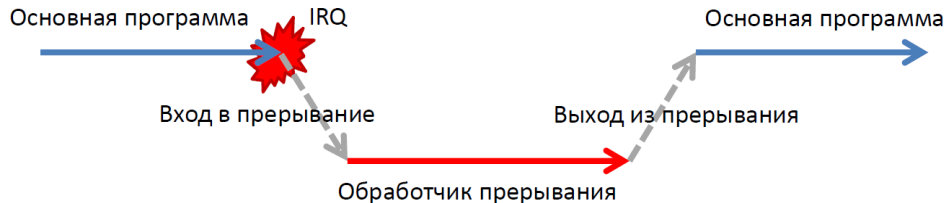
Два метода борьбы:

- ▶ Периодический опрос
- ▶ Отключение прерываний

Прерывания

События и прерывания

- ▶ Прерывание — событие, на которое процессор обязан немедленно отреагировать
 - ▶ Программные — вызываются выполнением специальной инструкции
 - ▶ Синхронные — вызывается процессором при сбое в выполнении инструкций
 - ▶ Асинхронные — от внешних источников
- ▶ Прерывание может быть отключено (замаскировано), за исключением NMI — Non-maskable Interrupt



Обработка прерываний на примере Cortex-M

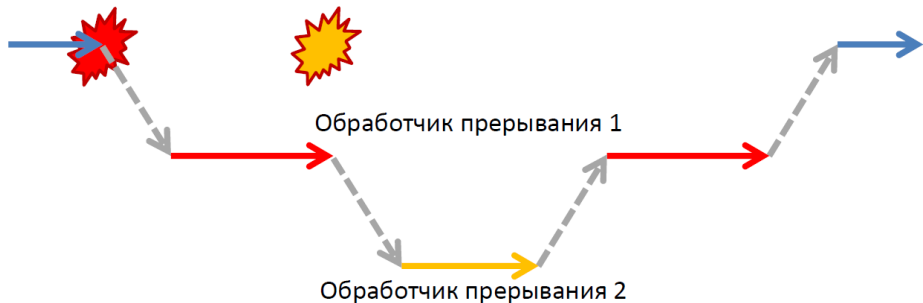
- ▶ NVIC — Nested Vectored Interrupt Controller
- ▶ Поддерживается таблица прерываний — набор указателей на функции-обработчики

```
/**
 * @brief    All ISR functions have this type
 */
typedef void (*isr_t)(void);

/**
 * @brief    Structure of Cortex-M basic vector table
 */
typedef struct {
    void* _estack;                /**< exception stack pointer */
    isr_t vectors[CPU_EXCEPTIONS]; /**< shared Cortex-M vectors */
} cortexm_base_t;
```

Приоритеты и вложенность прерываний

- ▶ Что будет, если в ходе обработки прерывания произойдет еще одно событие?



- ▶ Прерывание 2 имеет больший приоритет, поэтому обработчик прерывания 1 приостанавливает свою работу

Приоритеты и вложенность прерываний

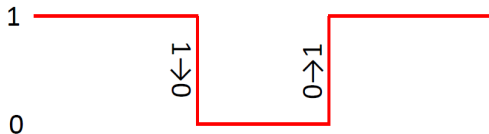
- ▶ Что будет, если в ходе обработки прерывания произойдет еще одно событие?



- ▶ Прерывание 2 имеет меньший либо равный приоритет, поэтому обработчик прерывания 1 продолжает выполняться

Прерывания GPIO

- ▶ Срабатывает по фронту сигнала
 - ▶ Передний фронт ($0 \rightarrow 1$)
 - ▶ Задний фронт ($1 \rightarrow 0$)
 - ▶ Оба фронта



Поддержка прерываний в RIoT на примере Cortex-M

- ▶ Все прерывания имеют одинаковый приоритет
- ▶ Таблица прерываний находится в ROM, обработчики прерываний описаны в драйверах периферии, например:
 - ▶ В файле `cpu/stm32/vectors/STM32L151xC.c` (генерируется автоматически) объявлена и помещена в таблицу прерываний функция

```
WEAK_DEFAULT void isr_exti(void);
```
 - ▶ Реализация этой функции находится в файле `cpu/stm32/periph/gpio_all.c`
- ▶ По завершении обработчика прерывания надо вызвать функцию

```
cortexm_isr_end();
```

Поддержка прерываний в RIoT на примере Cortex-M

```
void isr_exti(void) {  
    /* read all pending interrupts wired to isr_exti */  
    uint32_t pending_isr = (EXTI_REG_PR & EXTI_MASK);  
    /* clear by writing a 1 */  
    EXTI_REG_PR = pending_isr;  
    /* only generate interrupts against lines which have IMR set */  
    pending_isr &= EXTI_REG_IMR;  
    /* iterate over all set bits */  
    uint8_t pin = 0;  
    while (pending_isr) {  
        pending_isr = bitarithmetic_test_and_clear(pending_isr, &pin);  
        isr_ctx[pin].cb(isr_ctx[pin].arg);  
    }  
    cortexm_isr_end();  
}
```

API прерываний GPIO в RIoT

- Определяем функцию для обработки прерывания, например:

```
void btn_handler(void *arg) {  
    do_something_with( (int) arg );  
}
```

- Регистрируем ее как обработчик soft interrupt, можно передать приведенный к типу void* аргумент:

```
gpio_init_int(GPIO_PIN(PORT_A, 11),  
              GPIO_IN_PU,  
              GPIO_FALLING,  
              btn_handler,  
              (void*) 123);
```

- Чтобы включить или выключить конкретное прерывание, используем функции

```
gpio_irq_enable, gpio_irq_disable
```

Таймеры

Аппаратные таймеры

- ▶ Таймер в микроконтроллере — счетчик с возможностью генерации событий
- ▶ Разрядность — 16, 24, 32 бита
- ▶ Настройки:
 - ▶ Источник тактирования (внутренний генератор или один из входов GPIO)
 - ▶ Делитель
 - ▶ Регистр сравнения («будильник»)
 - ▶ Направление счета, синхронизация между таймерами, ...
- ▶ Прерывания по переполнению или совпадению значения с регистром сравнения
- ▶ Иногда могут управлять одним из выводов GPIO (удобно для аппаратной генерации ШИМ) или периферийным устройством (обычно АЦП или ЦАП) без участия процессора

Программные таймеры в Riot

- ▶ Слой абстракции поверх аппаратных таймеров
- ▶ Позволяет завести любое количество программных «будильников», сложность добавления нового таймера — $O(n)$
- ▶ `xtimer` — частота 1 МГц (от одного из таймеров общего назначения), позволяет отмерять интервалы времени с точностью до нескольких микросекунд
- ▶ `lptimer` — частота около 1 кГц, работает от real-time counter, в том числе в «спящем» режиме
- ▶ `ztimer` — совмещает в одном программном модуле функциональность `xtimer` и `lptimer`