Комфортное программирование на C++ в условиях FreeRTOS на STM32

Алексей Булатов, IntelliVision

О чём будет лекция

- В чём специфика микроконтроллеров
- Операционные системы реального времени (RTOS)
- Многозадачность на МК на бытовом примере
- Стандартная библиотека C/C++, её связь с системой
- Что нужно FreeRTOS, чтобы работать на МК

Поговорим про микроконтроллеры

Что такое микроконтроллеры?

Микроконтро́ллер (англ. *Micro Controller Unit, MCU*) — микросхема, предназначенная для управления электронными устройствами.

— маломощный компьютер в одном чипе

— машина времени в прошлое вычислительной техники

— ад для классических разработчиков

Их очень много разных. Мне нравится STM32, поговорим про него

STM32 глазами разработчика

- 32-битный ARM Cortex-M3, -M4, -M7F. Серия F3 ~ до 180 MHz, до 2056 kB flash, до 384 kB RAM
- Компилируется при помощи gcc-arm-none-eabi
- Есть Common Microcontroller Software Interface Standard (CMSIS) — сверхлёгкий API с регистрами и номерами битов
- Есть STM HAL — мощный универсальный C-API, код полностью открыт
- Есть CubeMX — утилита для генерации кода с STM HAL

Особенности разработки под МК

- Ограниченные ресурсы
- Зависимость от состояния внешнего мира
- Трудно отлаживать
- Трудно диагностировать
- Нет ОС с API, разделением памяти и привилегий
- Большинство ошибок ломают всё

Особенности разработки под МК

Нет ОС с API, разделением памяти и привилегий

- Нужно писать обработчики прерываний самому
- Единое адресное пространство, можно писать и читать по любому валидному адресу. Никакой виртуальной памяти, MMU, защиты
- Некуда докладывать о проблемах, никто не соберёт coredump
- В лучшем случае watchdog timer перезапустит код
- Отладчик хорошо отлаживает только простой код

Как выживать под МК?

- Печатать лог в последовательный порт
- Мигать светодиодом
- Писать хороший код
  - Велосипедам — нет, библиотекам — да
  - C++ безопаснее, чем C
  - ООП поможет укротить сложность

Особенности разработки под МК

Нет ОС с API, разделением памяти и привилегий

Ну а как же операционные системы реального времени?

Немного про операционные системы реального времени

Что такое RTOS?

— Real Time Operating System

1) Real Time — да
2) Operating System — с натяжкой

Главная задача RTOS — выполнять несколько задач одновременно

Что такое RTOS?

Обычная ОС умеет:

- Многозадачность
- Много пользователей
- Абстракция над устройствами, драйверы
- API прикладных программ
- Изоляция выполнения программ
- Инфраструктура ввода-вывода
- ...

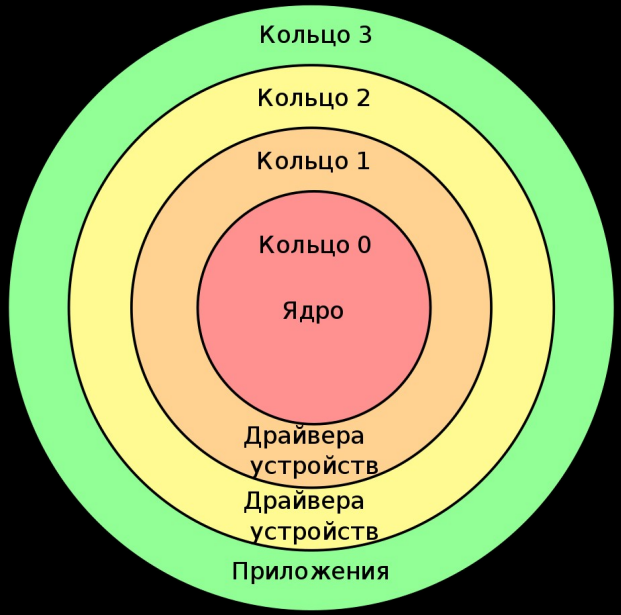
FreeRTOS умеет:

- Переключать треды
- Синхронизовать треды
- И всё. Это просто функции, которые вы линкуете со своим проектом

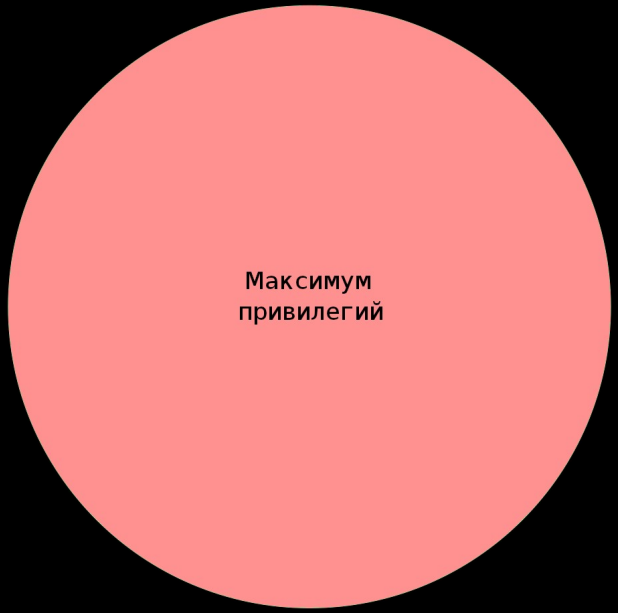
```
BaseType_t xTaskCreate(     TaskFunction_t pvTaskCode,
                            const char * const pcName,
                            const configSTACK_DEPTH_TYPE uxStackDepth,
                            void *pvParameters,
                            UBaseType_t uxPriority,
                            TaskHandle_t *pxCreatedTask
                       );
```

Безопасный режим

Ваш PC



Ваш MK



Пример устройства с многозадачностью

Пример: блок управления воротами

Что будет делать МК:

- Управлять приводом раздвижных ворот
- Следить за ИК-сенсором наличия препятствия
- Общаться с радиомодулем (например, LoRa)
- Считывать NFC-карточки доступа
- Слушать ИК-пульт
- Проигрывать звуковые оповещения

Как организовать многозадачность?

Main loop

```
while(true)
{
  serve_gate_drive();
  serve_sensor();
  serve_NFC();
  serve_radio();
  serve_IR_RC();
  load_next_sound_fragment();
}
```

RTOS

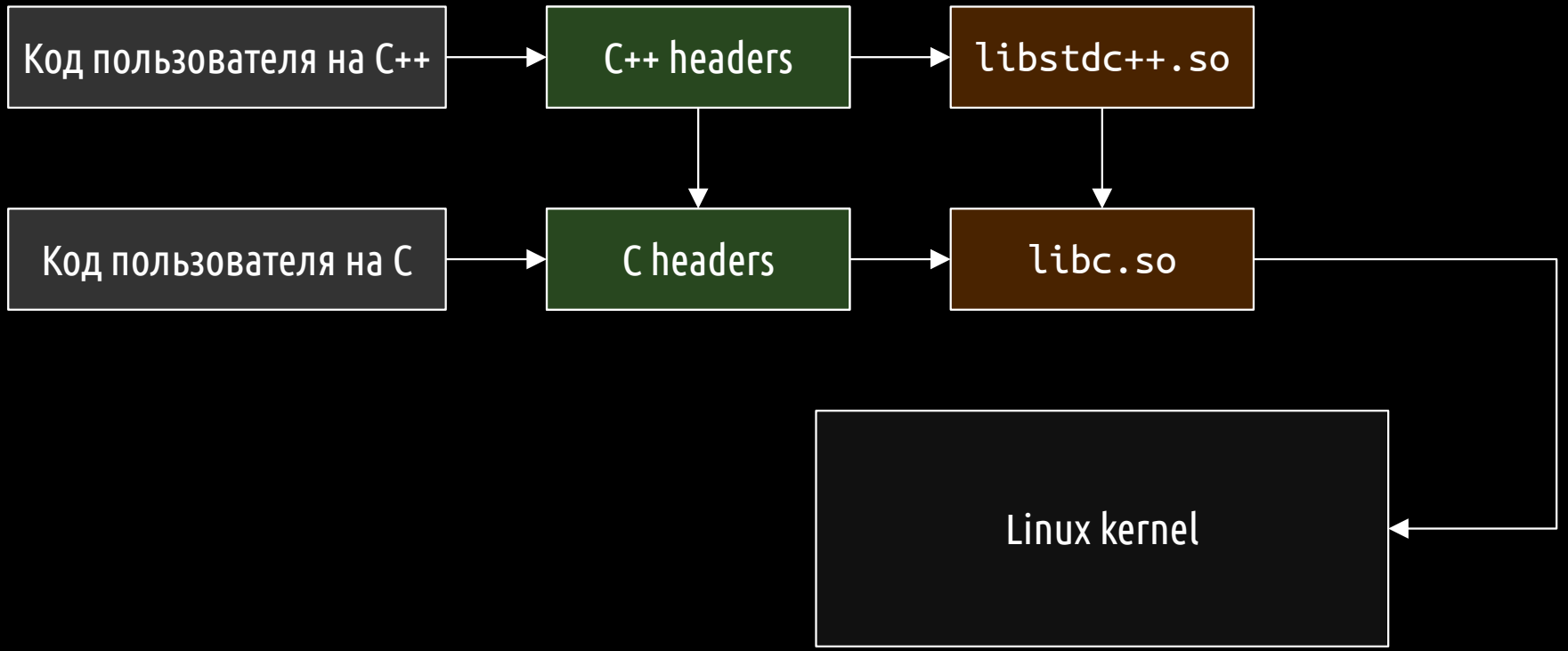
```
xTaskCreate(cycle_gate_drive, "gate", 128);
xTaskCreate(cycle_sensor, "sensor", 128);
xTaskCreate(cycle_NFC, "NFC", 1024);
xTaskCreate(cycle_radio, "Radio", 1024);
xTaskCreate(cycle_IR_RC, "IR_RC", 512);
xTaskCreate(cycle_load_next_sound_fragment,
"Sound", 512);

vTaskStartScheduler();
```

Что поможет открывать ворота?

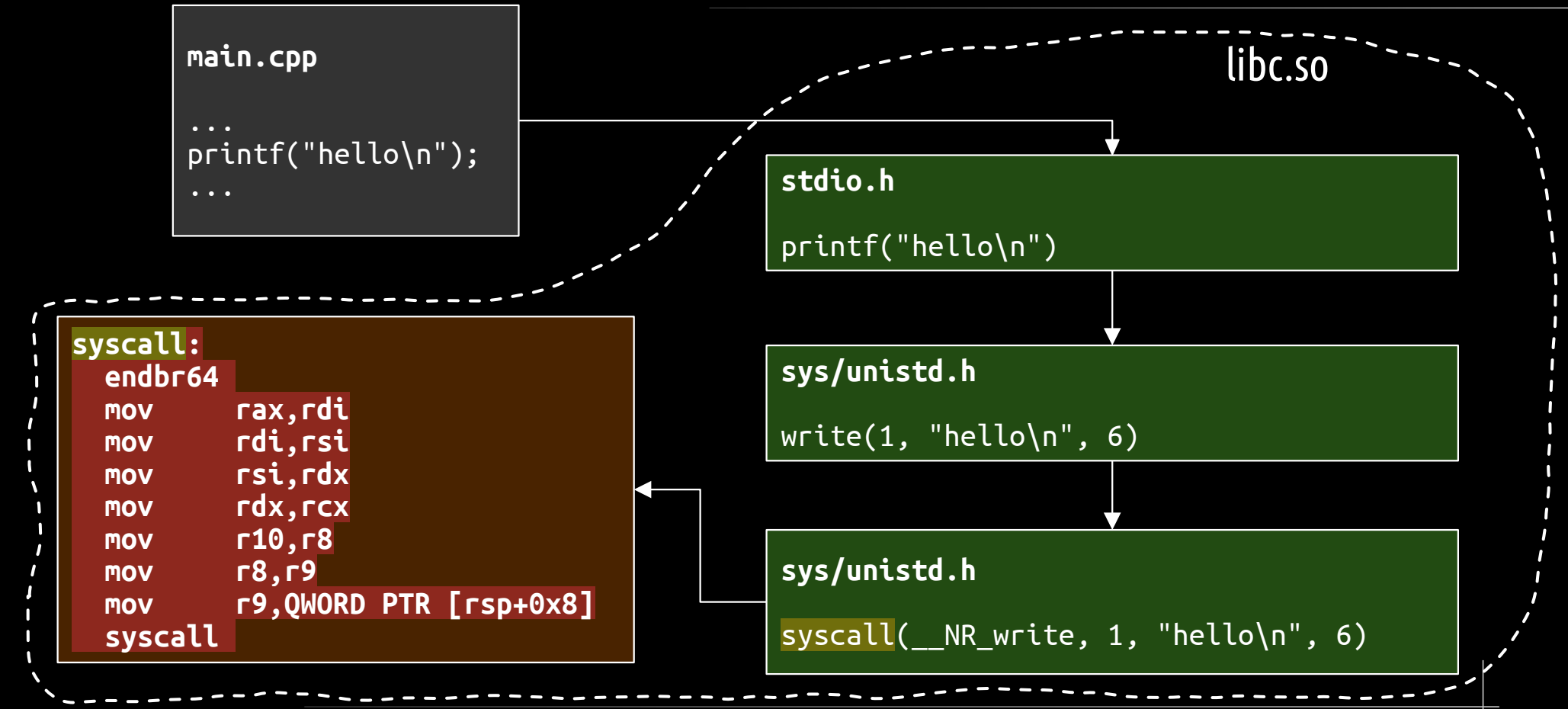
- Стандартная библиотека C и C++
- FreeRTOS
- Чтобы они работали вместе

Стандартная библиотека C/C++ на низком уровне

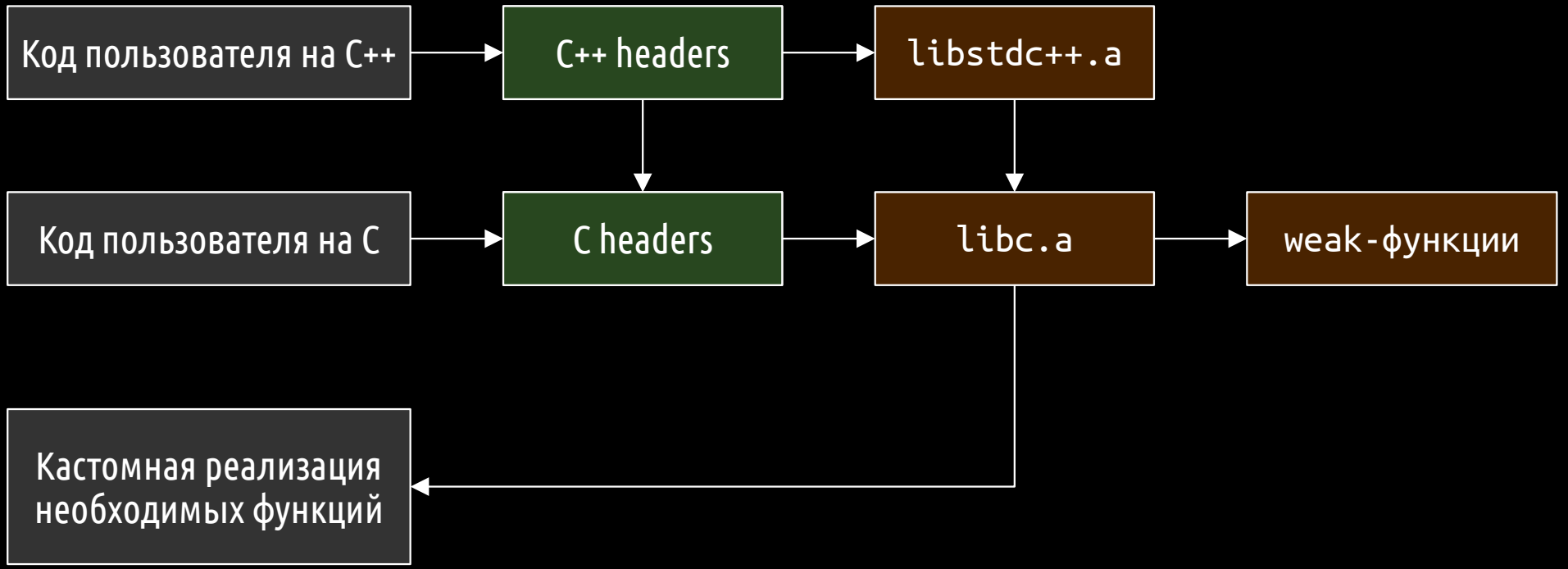
Стандартная библиотека: Linux PC



Стандартная библиотека: Linux PC



Стандартная библиотека: bare metal



Стандартная библиотека: bare metal

main.cpp

```
...
printf("hello\n");
...
```

Lite libc implementation, i.e. Newlib

stdio.h

```
printf("hello\n")
```

sys/unistd.h

```
write(1, "hello\n", 6)
```

sys/unistd.h

```
_write(1, "hello\n", 6)
```

```
int _write(int file, char *ptr, int len)
{
    switch (file)
    {
    case STDOUT_FILENO: /* stdout */
    case STDERR_FILENO: /* stderr */
        HAL_UART_Transmit(&huart2, (uint8_t*) ptr,
        len, HAL_MAX_DELAY);
        break;
    default:
        errno = EBADF;
        return -1;
    }
    return len;
}
```

Какие функции нам определить?

- `void* _sbrk(int incr)` — увеличивает размер сегмента данных. Вызывается при `malloc()`
- `int _write(int file, char *ptr, int len)` — запись в файл или в поток вывода
- `int _read(int file, char *ptr, int len)`
  `int _stat(const char *filepath, struct stat *st)`
  `int _lseek(int file, int ptr, int dir)`
  `int _close(int file)` — если у вас есть файловая система
- `int _gettimeofday(struct timeval *tv, struct timezone *tz)` — получение времени

Запускаем FreeRTOS

Настройка параметров системы

FreeRTOSConfig.h — compile-time configuration

```
 96  #define configENABLE_FPU                         0
 97  #define configENABLE_MPU                         0
 98
 99  #define configUSE_PREEMPTION                     1
100  #define configSUPPORT_STATIC_ALLOCATION          1
101  #define configSUPPORT_DYNAMIC_ALLOCATION         1
102  #define configUSE_IDLE_HOOK                      0
103  #define configUSE_TICK_HOOK                      0
104  #define configCPU_CLOCK_HZ                       ( SystemCoreClock )
105  #define configTICK_RATE_HZ                       ((TickType_t)1000)
106  #define configMAX_PRIORITIES                     ( 7 )
107  #define configMINIMAL_STACK_SIZE                 ((uint16_t)128)
108  #define configTOTAL_HEAP_SIZE                    ((size_t)15360)
109  #define configMAX_TASK_NAME_LEN                  ( 16 )
110  #define configUSE_16_BIT_TICKS                   0
111  #define configUSE_MUTEXES                        1
112  #define configQUEUE_REGISTRY_SIZE                8
113  #define configUSE_PORT_OPTIMISED_TASK_SELECTION  1
114  /* USER CODE BEGIN MESSAGE_BUFFER_LENGTH_TYPE */
```

Прерывания Cortex-M

Прерывание — это когда что-то случилось. Бывают аппаратные (возникают сами) и программные (можно инициировать из кода).

Для FreeRTOS необходимы эти три:

- SysTick — аппаратное прерывание системного таймера
- Supervisor Call (SVC) — программное прерывания, обрабатываемое немедленно
- Pendable Service Call (PendSV) — отложенное программное прерывание

startup_stm32f407xx.s

```
141   g_pfnVectors:
142     .word  _estack
143     .word  Reset_Handler
144     .word  NMI_Handler
145     .word  HardFault_Handler
146     .word  MemManage_Handler
147     .word  BusFault_Handler
148     .word  UsageFault_Handler
149     .word  0
150     .word  0
151     .word  0
152     .word  0
153     .word  SVC_Handler
154     .word  DebugMon_Handler
155     .word  0
156     .word  PendSV_Handler
157     .word  SysTick_Handler
```

Прерывания Cortex-M в работе FreeRTOS

- PendSV_Handler — внутри него, в зависимости от ситуации, проходит переключение контекста
- SysTick_Handler — поднимает флаг PendSV с определенной частотой во времени

Пользователь может вызывать функции ОС, которые внутри тоже поднимают PendSV

Работа с FreeRTOS

```
13  void vGreenBlinkTask( void *pvParametrs ) {
14      for( ;; ) {
15          HAL_GPIO_TogglePin(GPIOA, GPIO_PIN_5);
16          vTaskDelay(700);
17      }
18  }
19
20  void vRedBlinkTask( void *pvParametrs ) {
21      for( ;; ) {
22          HAL_GPIO_TogglePin(GPIOA, GPIO_PIN_6);
23          vTaskDelay(1000);
24      }
25  }
26
27  int main() {
28      InitSystem();
29
30      xTaskCreate(&vGreenBlinkTask, "GreenBlink", 128, nullptr, 1, NULL);
31      xTaskCreate(&vRedBlinkTask, "RedBlink", 128, NULL, 1, NULL);
32
33      vTaskStartScheduler();
34
35      for( ;; ) { }
36  }
```

Работа с FreeRTOS

- Треды будут прерываться, когда решит RTOS
- Для синхронизации доступны
  - Мьютексы
  - Семафоры
  - Очереди
  - Критические секции
- Примитивы можно использовать из прерываний, есть специальные версии функций *_FROM_ISR

Стандартная библиотека в условиях FreeRTOS

Стандартная библиотека в условиях FreeRTOS

А какие могут быть проблемы?

Reentrancy

— по-русски «рѣѣнтрабельностьъ».

В функцию могут входить одновременно несколько потоков исполнения

Reentrancy не гарантирует отсутствие гонки данных!!

Пример: `fwrite()` реентрабельна на PC, но что окажется в файле, зависит только от вас

Reentrancy

На PC:

- Системные вызовы реентрабельны
- Функции стандартной библиотеки C в основном реентрабельны
- Потокобезопасность функций C++ описана в стандарте

Когда у вас RTOS на микроконтроллере:

- Newlib должен как-то узнать о тредах RTOS

Reentrancy

Newlib должен как-то узнать о тредах RTOS

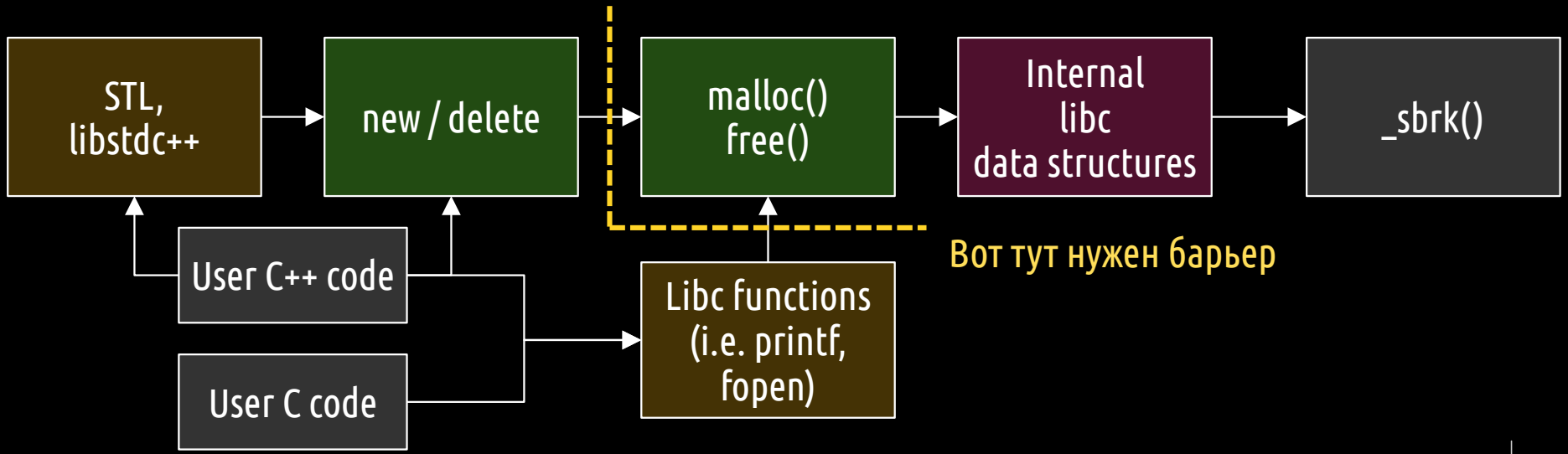
Реализуем функции из `unistd.h` безопасным образом. Просто добавим блокировки

Но достаточно ли этого?

Reentrancy

Newlib должен как-то узнать о тредах RTOS

А что с выделением памяти?



Reentrancy: malloc & free

Воспользуемся оборачиванием функций во время лнковки в gcc!

```
LDFLAGS += -Wl,--wrap=malloc -Wl,--wrap=free
```

Reentrancy: malloc & free

GCC позволяет просто переопределить любую функцию

1) При линковке добавим ключи:
```
LDFLAGS += -Wl,--wrap=malloc -Wl,--wrap=free
```
2) Теперь есть 4 функции:

```
void* __real_malloc(size_t);
void __real_free (void *);
```

Оригинальные функции

```
void* __wrap_malloc(size_t size) { … }
void __wrap_free(void *pv) { … }
```

Функции на замену

Reentrancy: malloc & free

```
24  void* __real_malloc(size_t);
25  void __real_free (void *);
26
27  void* __wrap_malloc(size_t size)
28  {
29      void *pvReturn;
30      vTaskSuspendAll();
31      pvReturn = __real_malloc(size);
32      (void)xTaskResumeAll();
33      return pvReturn;
34  }
35
36  void __wrap_free(void *pv)
37  {
38      vTaskSuspendAll();
39      __real_free(pv);
40      (void)xTaskResumeAll();
41  }
```

← Минимальный пример безопасной обёртки для FreeRTOS

Reentrancy*

Вообще говоря,
`::operator new()` != `malloc()` + constructor call

`::operator delete()` != `free()` + constructor call

Поэтому добавим глобальное определение →

```
57  void* operator new(std::size_t n)
58  {
59      return malloc(n);
60  }
61
62  void operator delete(void* p) throw()
63  {
64      free(p);
65  }
66
67  void* operator new[](std::size_t n)
68  {
69      return malloc(n);
70  }
71
72  void operator delete[](void* p) throw()
73  {
74      free(p);
75  }
```

Reentrancy: newlib

Существует более канонический способ защитить newlib:

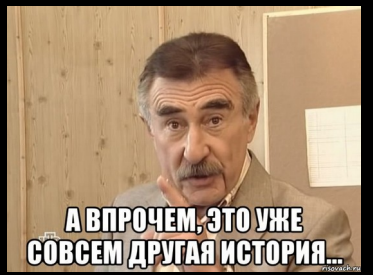
- Для функций из unistd.h есть реентрабельные вариации, например:

  вместо `_sbrk(int incr)`
  → `_sbrk_r(struct _reent *r, int incr)`

  вместо `_write(int file, char *ptr, int len)`
  → `_write_r(struct _reent *r, int file, char *ptr, int len)`

- Есть специальные блокировщики для malloc и free:

```
void __malloc_lock(struct _reent *r)
void __malloc_unlock(struct _reent *r)
```



Заключение

Что можно сказать

- Программирование для MCU менее комфортно, чем программирование для PC
- Чтобы использовать стандартную библиотеку C и C++, необходимо реализовать примитивы из sys/unistd.h
- RTOS решает проблему Real Time, но создаёт много проблем из-за отсутствия Operating System
- При использовании RTOS нужны потокобезопасные реализации функций sys/unistd.h
- malloc() и free() должны быть защищены дополнительно

Задание

https://github.com/DAlexis/neimark-2024-stm