

Разработка USB устройства ввода в Linux

Михаил Белкин

25 августа 2021 г.

Содержание

1. Введение	2
2. Схемотехника.	2
2.1. Выбор редактора схем.	2
2.2. Установка редактора и библиотек.	3
2.3. Выбор элементной базы.	3
2.3.1. Микроконтроллер	3
2.3.2. Стабилизатор	5
2.3.3. Мелочь	6
2.4. Особенность схемотехники USB.	6
2.5. Схема устройства.	6
3. Программное обеспечение.	8
3.1. Тулчейн.	8
3.2. Что нового в CMSIS5.	9
3.2.1. Скачивание CMSIS5	10
3.3. Компоновщик.	10
3.3.1. разметка памяти	11
3.3.2. точка входа	11
3.3.3. определения секций	11
3.4. startup файл	13
3.5. Структура проекта.	13
3.6. Опрос кнопок.	13
4. USB (универсальная последовательная шина)	14
4.1. Периферия USB.	14
4.1.1. Включение	14
4.2. Дескрипторы USB.	15
4.3. Стандартный протокол USB.	15
4.4. USB HID	15
5. Отладка.	15

1. Введение

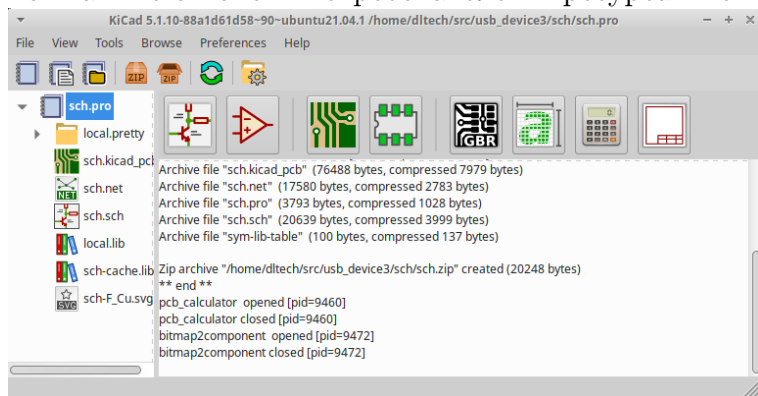
USB достаточно свежая технология (USB 1.1 - 1998г., USB 2.0 - 2000). Задумывалась как универсальная шина для компьютерной периферии. И в реальности так оно и оказалось, почти все устройства, даже те что раньше были исключительно встроенными теперь можно купить и в USB варианте, например, сетевую карту или звуковую карту. Да и вообще на сегодняшний день сложнее найти клавиатуру без USB разъема, чем с ним, хотя для клавиатур и мышек когда то задумывался отдельный стандартный разъем. Я же остановлюсь на чем попроще и соберу геймпад. В общем USB вытеснил практически все, его разъем даже больше запомнился как стандартный разъем питания на 5В, чем коаксиальный разъем.

А данная статья, в отличии от остальных рассматривает процесс разработки всесторонне. Также нужно сказать что я не ставил цели написания подробной документации на все те программы, которые я использовал. Их вы можете найти по ссылкам в списке литературы, в данной статье только комментарии к коду.

2. Схемотехника.

2.1. Выбор редактора схем.

Разработка схемы производится в KiCAD, это очень легковесный и компактный opensource редактор. Но при этом, несмотря на его внешнюю простоту, редактор как будто бы кричит нам "Я ничем не хуже чем этот ваш Altium и уж тем более Eagle". Поддерживается редактирование многослойных плат, так же используется профессиональный подход, при котором схема устройства и печатная плата редактируются отдельно. Так же он очень нетребователен к ресурсам компьютера.



К редактору имеется собственная библиотека компонентов, которая включает в себя компоненты всех популярных производителей. Но если вы принесли с китайского базара какую то экзотику, компонент придется разработать самостоятельно.

Вывод шаблона печатной платы возможен во всех удобных форматах, включая pdf. Так же и Gerber и векторный svg, последнее очень удобно для печати шаблона на принтере. Единственное неудобство это не возможность сразу выводить схему в растровом формате, приходится самостоятельно конвертировать из svg.

2.2. Установка редактора и библиотек.

Установка редактора в Ubuntu Linux производится очень просто, имеется отдельный ppa репозиторий с последней стабильной версией. В то время как наиболее полный набор библиотек компонентов можно скачать с гитлаба.

Набор команд для установки KiCAD:

```
sudo add-apt-repository --yes ppa:kicad/kicad-5.1-releases
sudo apt update
sudo apt install --install-recommends kicad
```

Надеюсь устанавливать git вы умеете и про команду git clone вы тоже знаете. Вот ссылки на репозитории с библиотеками компонентов KiCAD:

<https://gitlab.com/kicad/libraries/kicad-symbols>

<https://gitlab.com/kicad/libraries/kicad-footprints>

<https://gitlab.com/kicad/libraries/kicad-packages3D>

Скопируйте их все куда нибудь что бы не мешались, например:

Теперь их еще нужно добавить в редактор. Для добавления новых репозиторияев добавим новые глобальные пути. Вкладка Preferences->Configure Paths... Добавить KICAD Установив редактор и добавив библиотеки вы сможете открыть проект со схемой устройства по адресу.

2.3. Выбор элементной базы.

2.3.1. Микроконтроллер

Для наиболее аккуратной реализации нужен современный микроконтроллер (МК) с полноценным аппаратным USB. Совершенно понятно, что таким микроконтроллером окажется STM32F103C8T6. Мощное ядро ARM Cortex-M3 с их фирменным вложенным векторным контроллером прерываний (NVIC) позволит с легкостью справиться с любой задачей.

А с такой простотой как USB геймпад уж тем более. На борту имеется 64 килобайта FLASH и 20 килобайт SRAM. И этого настолько много, что можно вовсе не думать об оптимизации. Теперь о стоимости, когда то я покупал такой за 60 рублей, сейчас цена приблизилась к 200, что по прежнему сравнимо по стоимости с остальными морально устаревшими микроконтроллерами. Так же в пользу данного микроконтроллера говорит наличие подробной документации. О том, почему именно F103, тут все просто, это самый дешевый МК с USB из тех что может предложить компания ST microelectronics. Продолжу перечислять его преимущества:

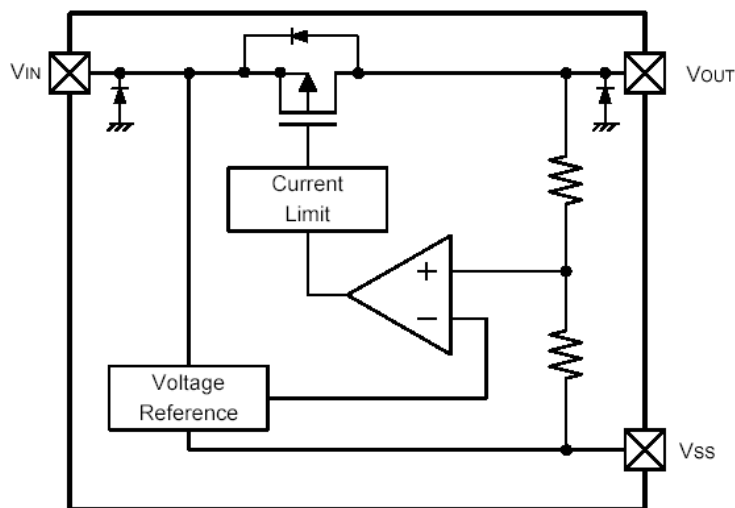
- Очевидно, 72 мегагерца на 32 разряда.
- Гибкая система тактирования, позволяющая отключать всю периферию для экономии батарейки.
- Поддержка интерфейса SWD и JTAG (прошивка по трем проводам).
- А также возможность установки бутлоадеров, один из которых позволяет обновлять прошивку по USB (поддержка протокола DFU).
- Прерывание, АЦП, выход таймера чуть ли не на каждом порте ввода вывода, что упрощает разводку ПП.
- DMA (direct memory access), по задумке должен упрощать работу с периферией, но на практике редко пригождается.
- Три 16 битных навороченных таймера счетчика.
- Возможность настройки таймеров как для аппаратной поддержки энкодеров, так и для различных шим режимов для шаговых двигателей.
- Часы реального времени, которые считают даже год.
- 2 АЦП со встроенным калиброванным источником опорного напряжения, и минимальным временем измерения в 1 мкс.
- А также встроенный датчик температуры.
- Много прочей стандартной периферии МК (SPI, I²C, CAN, UART)

2.3.2. Стабилизатор

В шине USB, как известно, 5В, а номинальное напряжение питания МК 3.3В. Поэтому необходим понижающий стабилизатор напряжения. Я рассматривал три марки стабилизаторов. Они приведены в таблице ниже:

стаб	U_{inmax}	корпус	производитель	особенности
L78L33	30	SOT-89	ST microelectronics	
AMS1117-3.3	15	SOT-223	AMS semitech	термозащита
XC6206-33	7	SOT-23	TOREX	CMOS

И если первый давно знаком многим радиолюбителям. То последние два это стабилизаторы от китайских производителей, которые появились недавно. В целом гораздо больше доверия к старому 78l, как минимум из за его большого входного напряжения. К тому же AMS1117 мне попадались нерабочими, и очень легко пробивались от скачков напряжения, не спасая нагрузку. Но хотелось бы компактней и подешевле, к тому же компьютер сам по себе стабильный источник питания. Поэтому я выбрал XC6206. Довольно необычный новодел на полевых транзисторах, в то время как другие два на биполярных. Его КМОП структура улучшила такой параметр, как минимальное падение напряжения, которое всего 0,3В против 1,2В у транзисторных. Также в нем имеется встроенная защита по току, чип отключает нагрузку, когда ток превышает 200 мА. Ниже приведена его структурная схема, на которой видны еще и защитные антистатические стабилитроны. А вот защиты от перегрева у него не обнаружено, хотя 1117 что то подобное обещали.



Такие стабилизаторы не редкость и часто встречаются на дешевых модулях для ардуино.

2.3.3. Мелочь

На форумах можно услышать совет не ставить кварц в целях экономии. Но в случае с асинхронной шиной кварц нужен для стабильной работы устройства. Микроконтроллер можно настроить на работу от самого распространенного кварца на 8МГц. Не удивительно, что на алиэкспресс сразу же нашелся не только планарный, но и очень компактный вариант. Размером как 1206 чип резистор.

Резисторы размером 0402 я успел заказать заранее. А вот шунтирующие конденсаторы пришлось выпаивать с донорских плат, потому они не такие компактные, как хотелось бы (0805).

Расчетный ток потребления десятки миллиампер, потому для стабилизации питания хватит и чип керамики, благо такая есть даже на 10 мкФ. На всякий случай установлю токоограничивающий резистор по питанию. Основная его цель обезопасить компьютер от случайного короткого замыкания. Хотя в дорогих флешках на его месте можно встретить чип предохранитель. Продолжу экономить и на разъемах, попросту ограничусь площадками под проводки.

2.4. Особенность схемотехники USB.

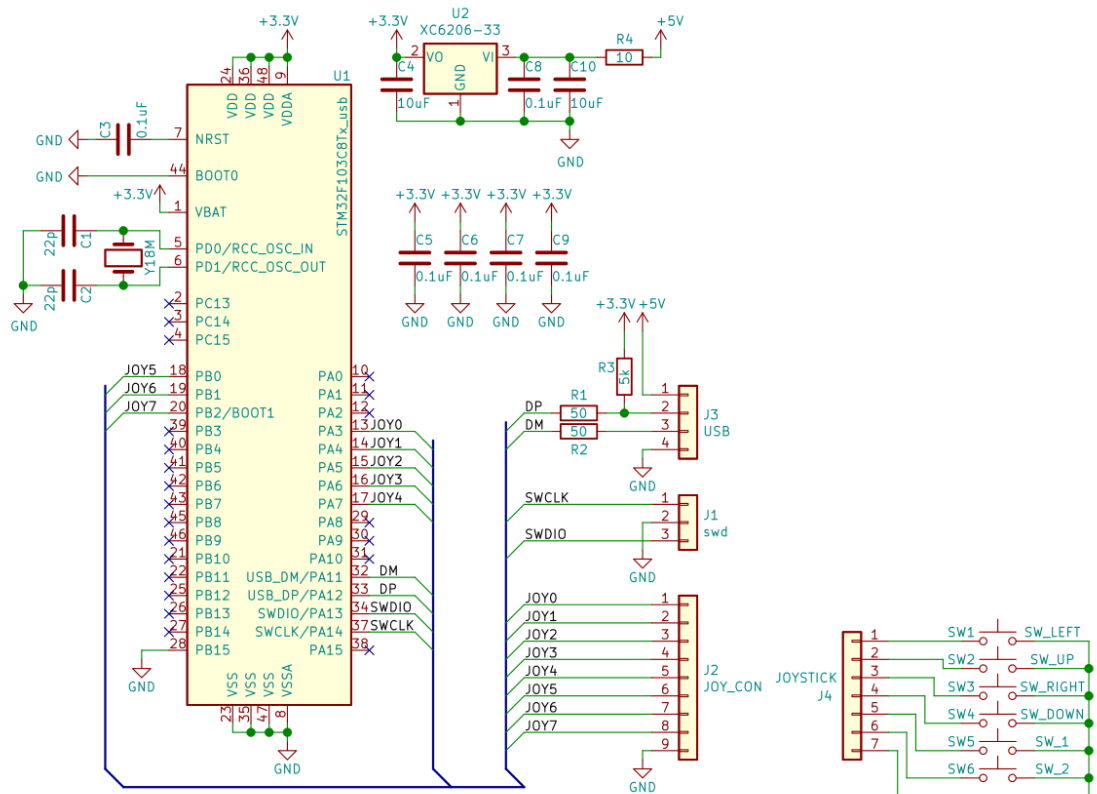
На сайте можно скачать целый документ, посвященный вопросу распайки USB разъема. Основной вопрос заключается в возможности программного отключения устройства от ПК. По стандарту наличие USB устройства на шине определяется подтянутым к 3.3В портом DP. В контроллерах с USB OTG этот резистор встроенный, можно включать и отключать программно. У тех что просто USB Device встроенного резистора нету. Поэтому на отладочных платах ST устанавливают управление внешним подтягивающим резистором через транзистор, подключенный к порту ввода вывода. Моё же устройство будет всегда включено, поэтому подтяжка линии DP к питанию будет осуществляться резистором. Также важно не забыть про защитные токоограничивающие резисторы. Провод у меня используется готовый от клавиатуры, потому разъем на плате не нужен. Также в дорогих устройствах часто можно встретить защитные антистатические стабилитроны на шине USB. В моем случае экономим и на них.

2.5. Схема устройства.

А вот и схема целиком, как видите, все шины питания подключены и заземлены фильтрующими конденсаторами. Кварц с нагрузочными кон-

денсаторами в наличии, так же подтянут к земле и порт сброса. Все как советует официальная документация. Кнопки джойстика, как видно, подключены к портам напрямую, т.к. внутри МК уже имеются резисторы подтяжки к 3.3В. Так же не обошлось и без так называемого "грязного хака", для упрощения трассировки платы один из портов ввода-вывода (28 вывод) использован как вывод земли. Но в этом нет ничего плохого, ведь порты после сброса находятся в состоянии с высоким входным сопротивлением.

Так же на схеме вы можете увидеть и стандартный разъем SWD для прошивки и отладки ПО. Ровно как и подключенный на землю вывод BOOT0 означает запуск прошивки из основной flash памяти.



3. Программное обеспечение.

Если по началу, когда эти чипы только появились. Выбора способов написания ПО для них было немного. Как правило это были коммерческие среды среды программирования под Windows, которые студенты и любители скачивали в месте с так называемой таблеткой от жадности. Теперь же выбор бесплатных инструментов очень большой. Начиная с официальной среды от компании ST, STM32Cube. Которая может не только скачать сама все их библиотеки и примеры, но и имеет автоматический конфигуратор периферии (это такая штука, которая предлагает настраивать регистры тыкая мышкой). И заканчивая сторонними продуктами, таким как AC6 system workbench. И эти новые инструменты, в отличии от старых уже кроссплатформенные. Так же на гитхабе полно примеров сборки через Makefile. А ещё сообщество создало полноценную библиотеку libopenm3 с кучей примеров.

Но исходя из того, что пример данного устройства довольно простой. Напишем весь код полностью самостоятельно. То есть просто представим, что сейчас 2007 год и мы только что обнаружили новый чип, на который нету ни сред ни примеров.

Можно сказать, что программа для ПК и для микроконтроллера ничем не отличается. Но на самом деле программы, которые возможно вы писали в школе на информатике ориентированы под запуск в операционной системе. И ОС значительно упрощает и саму программу и её запуск. В то время МК это просто процессор, у которого ничего такого нет. Поэтому вы должны самостоятельно описать для него все. Процесс запуска программы, разметку памяти, даже компилятор и тот придется запустить самостоятельно, попросить у него сохранить прошивку в правильном формате и самостоятельно доставить её в микроконтроллер. А также возможно вам придется самостоятельно взаимодействовать с ядром.

3.1. Тулчейн.

GCC, нисмотря на колисество букв Си в этом названии, это не компилятор языка Си, а коллекция компиляторов гну. То есть в этой коллекции есть много разных компиляторов, в том числе и компилятор языка фортран например. Когда то просто скачивание и установка gcc была поводом для отдельной статьи. Я же отмечу только то, что gcc признает контроллеры на ядре Cortex M3. И для этих МК в ubuntu устанавливается вот такой вот командой:

```
apt install gcc-arm-none-eabi libnewlib-arm-none-eabi
```

```
apt install gdb-multiarch
apt install build-essential
```

А наши makefile и скрипты прошивки будут их искать потом как arm-none-eabi-gcc, arm-none-eabi-objcopy и gdb-multiarch. В остальном даже флаги компиляции в случае с данными микроконтроллерами ничем особенно не отличаются. Слово arm в названии пакета, говорит о том что компилятор версии для процессоров arm, а none-eabi означает, что компилятор для прошивок, а не для операционных систем.

3.2. Что нового в CMSIS5.

CMSIS это слой абстракции, независимый от производителя. Это не просто библиотека, а стандарт взаимодействия с ядром ARM. В библиотеке определены главные интерфейсы для инструментов, а также она обеспечивает согласованную поддержку устройств.

CMSIS обеспечивает интерфейсы для процессоров и периферии, операционных систем реального времени, и компонентов промежуточного программного обеспечения. CMSIS включает в себя механизм доставки для устройств, плат, и программ, и позволяет комбинировать программные компоненты от разных поставщиков.

Важно заметить, что с появлением последней пятой версии она отличается от предыдущих, была дополнена и исправлена. Структура проекта CMSIS 5:

- Core(M) - стандартизированный API для процессоров Cortex-M и периферии. Включает в себя внутренние функции для Cortex-M4/M7/M33/M35P SIMD инструкций.
- Core(A) - стандартизированный API и базовая система выполнения для Cortex-A5/A7/A9 процессоров и периферии
- Driver - основные интерфейсы периферийных драйверов для промежуточного слоя. Соединяет периферию микроконтроллера со средним слоем что реализует, например, стеки связи, файловые системы или графические интерфейсы пользователя.
- DSP - коллекция библиотек цифровой обработки сигналов с более чем 60 функциями для различных типов данных: целочисленных (дробные форматы q7, q15 и q31) и для чисел с плавающей точкой одинарной точности (32 бита). Реализации оптимизированы для SIMD наборов инструкций для Cortex-M4/M7/M33/M35P

- NN - коллекция ядер эффективной нейронной сети разработанные для максимизации производительности и минимизации потребления памяти в процессорах Cortex-M
- RTOSv1 - основной API для операционных систем реального времени вместе с примером реализации основанной на RTX. Это включает компоненты программ, которые могут работать в нескольких системах RTOS.
- RTOSv2 - расширяет CMSIS-RTOSv1 поддержкой Armv8-M, динамическим созданием объектов, поддержку мультитядерных систем, бинарного совместимого интерфейса.
- SVD - периферийное объявление устройства, которое может быть использовано для создания периферийной осведомленности в отладчиках заголовочных файлах CMSIS-Core.
- DAP - прошивка для блока отладчика которая обеспечивает интерфейс к порту системы отладки CoreSight DebugAccess
- Zone - определяет методы для описания ресурсов системы и для разбиения на разделы этих ресурсов в нескольких проектах и областях выполнения.

3.2.1. Скачивание CMSIS5

Как ни странно, доступны на гитхабе, как обычно, не будем рисковать собой, а получим стабильную версию.

```
cd project_dir
git clone https://github.com/ARM-software/CMSIS_5
```

3.3. Компоновщик.

Компоновщик это что входит в состав тулчейна gcc, и занимается эта утилита сборкой исполняемого модуля из объектных модулей, полученных в результате компиляции.

Устройство довольно простое, почему бы по новой не написать целиком все. Итак, не совсем целиком. Если игнорирование официальной библиотеки от производителя это уже немного глупо, то игнорировать библиотеки создателей процессора просто нельзя. Итак, выбран процессор с ядром ARM Cortex M3, значит и будем опираться на файл CMSIS/Device/ARM/ARMCM3/Source/GCC/gcc_arm.ld.

Итак, скрипт компоновщика состоит из:

- 1) разметка памяти
- 2) определение входной точки
- 3) определения секций

3.3.1. разметка памяти

Компоновщик по умолчанию разрешает разметить всю доступную память, включая FLASH и SRAM. Для того, чтобы определить область памяти, которая будет использована компоновщиком, и избежать использования каких либо других областей памяти, существует команда MEMORY. Она обозначает расположение и размер блоков памяти. В шаблоне она уже написана, от нас требуется занести адреса в переменные. Итак, микроконтроллер STM32F103C8T6 имеет 64кБ FLASH, которые начинаются с адреса 0x08000000. Значит `__ROM_BASE = 0x08000000`, `__ROM_SIZE = 0x00010000`. Оперативная память начинается с адреса `__RAM_BASE = 0x20000000`, размер 20кБ `__RAM_SIZE = 0x00005000`. Размеры стека и кучи оставим без изменений, доверимся примеру.

3.3.2. точка входа

Команда ENTRY используется для определения первой исполняемой инструкции. Синтаксис команды: ENTRY(symbol), где symbol это переменная, которая обычно позже переопределяется в коде. В нашем файле программа стартует с адреса сброса - Reset_Handler.

3.3.3. определения секций

В скриптах компоновщика переменная точка (.) хранит текущий адрес в памяти, в то время как память разделена на секции. Команда SECTIONS контролирует то как размечаются input секции в output, а также порядок output секций в памяти. Итак, команда SECTION как правило используется для определения секции (section definition), которая определяет свойства output секций, такие как: ее расположения в памяти, выравнивание, содержание, шаблон заполнения, и целевую область памяти. Синтаксис команды следующий:

```
SECTIONS {  
    ...  
    secname start BLOCK(aligned) (NOLOAD) : AT (ldaddr)  
        { contents } >region :phdr = fill  
    ...
```

```
}
```

сесname имя секции,

start определяет начальный адрес, с которого будет загружаться секция
BLOCK(aligned) выравнивание

(NOLOAD) обозначает невозможность загрузки секции во время выполнения программы

AT (ldaddr) определяет адрес загрузки секции как ldaddr

>region объявляет секцию как определенную область памяти

Служебные слова сесname и contents требуются для определения секции, остальные опциональны.

Давайте рассмотрим секцию .text для примера.

```
.text :
{
    KEEP(*( .vectors ))
    *( .text *)

    KEEP(*( .init ))
    KEEP(*( .init ))

    /* .ctors */
    *crtbegin.o( .ctors )
    *crtbegin?.o( .ctors )
    *(EXCLUDE_FILE(*crtend?.o *crtend.o) .ctors)
    *(SORT( .ctors.* ))
    *( .ctors )

    /* .dtors */
    *crtbegin.o( .dtors )
    *crtbegin?.o( .dtors )
    *(EXCLUDE_FILE(*crtend?.o *crtend.o) .dtors)
    *(SORT( .dtors.* ))
    *( .dtors )

    *( .rodata *)

    KEEP(*( .eh_frame* ))
} > FLASH
```

.text это имя секции, в секции расположен код. KEEP(*(.vectors)) используется для того, чтобы секция векторов прерываний не была оп-

тимизирована (удалена), похожий метод применен для секций `init`, `fini`, `eh_frame`. Напомним, что переменная `'.'` хранит текущий адрес. Таким образом скрипт извлекает из переменной `vectors` конечный адрес векторов, используя переменную `точки`, и располагает секцию `vectors` в текущей области памяти. Так же располагаются секции `dtors` и `ctors` по адресам, полученным из `crtbegin.o` и `crtbegin?.o`.

Секция `ctors` это список конструкторов (инициализационных функций), который подключает функции, инициализирующие данные в момент запуска программы (до запуска функции `main`). `dtors` устанавливает список деструкторов, которые могут быть вызваны при завершении программы. > FLASH обозначает то, что секция `text` расположена в области FLASH памяти.

Пролистав и эту унылую теоретическую справку, вы можете догадаться, что и здесь со стандартным скриптом компоновщика все в порядке, ничего трогать не нужно.

3.4. startup файл

Если коротко, то это такой исходник, который не виден обычным пользователям, но именно он вызывает функцию `main`. Вообще возможен и Си вариант, но как правило пишется на ассемблере. Также есть стандартный в библиотеке по пути `CMSIS_5/Device/ARM/ARMCM3/Source/GCC/startup_ARMCM3.S`.

Все что нам нужно в нем поменять, так это добавить местных векторов прерываний. То есть нужно, что бы компилятор знал, с какого адреса запускать то или иное прерывание, если оно произойдет.

3.5. Структура проекта.

3.6. Опрос кнопок.

По стандарту геймпады и клавиатуры должны отправлять информацию о состоянии кнопок в хост. Либо с запрошенной периодичностью в диапазоне от 4 до 1020 миллисекунд. Либо, если запрошен период равный нулю, информация отправляется только тогда, когда состояние кнопок менялось.

Итак, для того, что бы получить полную поддержку стандарта, кнопки нужно опрашивать постоянно, при этом нужно не забыть про дребезг контактов. В моей реализации для опроса состояния кнопок выделен отдельный таймер счетчик МК. Счетчик запускает прерывание с периодом в одну миллисекунду. В этом прерывании происходит опрос кнопок, ес-

ли кнопка зафиксирована нажатой больше семи раз подряд, программа принимает решение зафиксировать это нажатие. Нажатия длительностью менее 7 миллисекунд считаются дребезгом контактов и игнорируются.

Это же прерывание задает периодичность отправки данных в хост. То есть если cnt больше запрошенного периода (в стандарте обозначен как report duration) данные о нажатых кнопках (в стандарте report) отправляются в хост. Где cnt счетчик прерываний, срабатывающих каждую миллисекунду. Исключение с c отправкой по изменению так же учтено. Вот листинг прерывания:

```
static int cnt=0;
portPoll();
reportUpdate();
++cnt;
sendReport(gamepadPar.report, &cnt);
```

Сперва опрос портов (portPoll()), потом проверка времени нажатия и запись состояния кнопок в переменную report (reportUpdate()), функция отправки report. В функцию отправки так же передается внутренний счетчик количества вызовов прерываний cnt.

4. USB (универсальная последовательная шина)

Интересно заметить, что данный стандарт разработан не IEEE и не ISO, и даже не какой нибудь отдельно взятой компанией. Его разработал форум компаний, таким образом крупные фирмы решили не городить каждый по своему, как это обычно бывает. А просто вместе создали стандарт, который бы всех устраивал.

Несмотря на внешнюю простоту (штыревой разъем на четыре провода, куда уж проще), у этой технологии есть протокол и четыре уровня абстракции.

4.1. Периферия USB.

4.1.1. Включение

Как известно, выбранный МК имеет аппаратный USB. Данная реализация аппаратно обеспечивает работу двух нижних уровней. Теперь давайте посмотрим, что нужно сделать, что бы его хотя бы включить. То есть что бы по шине пошли какие нибудь данные.

4.2. Дескрипторы USB.

4.3. Стандартный протокол USB.

4.4. USB HID

5. Отладка.