

Государственное бюджетное общеобразовательное учреждение школа №219
Красносельского района Санкт-Петербурга

Проектная работа
Разработка электронных ударных

Выполнил: Бартоломей Георгий Константинович,
учащийся 10 «Б» класса ГБОУ школы №219
Красносельского района Санкт-Петербурга
Руководитель: Богатырёв Станислав Владимирович,
YADRO

Работа допущена к защите «_____» _____ 2024 г.

Подпись руководителя проекта _____

Санкт-Петербург

2024

1. Аннотация

В данной проектной работе был разработан программно-аппаратный комплекс, позволяющий музыканту играть на электронных ударных во время игры на гитаре, а также встроить данное устройство внутрь гитары для улучшения игры стилем «fingerstyle».

Устройство разработано с использованием промышленных стандартов разработки. Большое внимание было уделено оптимизации программного обеспечения и схемотехники. Самостоятельно были разработаны драйверы для периферии микроконтроллера с учетом требуемых задержек и надёжности работы. Программное обеспечение было разработано таким образом, чтобы использовать ресурс микроконтроллера максимально, например, используются возможности операционной системы реального времени (ОСРВ) и контроллера прямого доступа к памяти (DMA).

Аппаратное обеспечение устройства включает в себя следующие интегральные схемы: микроконтроллер STM32F4, аудио ЦАП PCM5102A и flash память W25Q64. Программное обеспечение разработано на языке программирования C и языке ассемблера ARM. Для устройства разработана подробная документация пользователя и в дальнейшем будет разработана инструкция по самостоятельному изготовлению устройства.

Исходный код встроенного программного обеспечения, чертежи и электрические схемы доступны общественности по свободной лицензии, так как используются подходы Free Software и Open Hardware. Это позволит любому пользователю изучать и совершенствовать устройство, а также применять в образовательном процессе.

Также устройство, кроме своей схемотехники, имеет чертёж печатной платы. Одной из целей является получение компактного устройства, которое без труда помещается в корпус гитары, не мешая остальной электронике.

В данной работе автор ставит цель разработать устройство для сопровождения себя на ударных во время игры на гитаре из доступных и недорогих электронных компонентов. Тема данного проекта является актуальной и позволяет решить проблему узкого, но заметного сегмента рынка.

Оглавление

1. Аннотация	1
1. Актуальность проекта	3
2. Цели и задачи	4
3. Анализ существующих решений	6
4. Описание разработки	7
4.1. Процесс разработки	7
4.2. Используемое аппаратное обеспечение	7
4.3. Используемое программное обеспечение	11
5. Паспорт изделия	14
6. Заключение	16
ПРИЛОЖЕНИЯ	17
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Электрическая схема	17
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Печатная плата	20
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Ссылки на исходный код и видео	21
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Экономические расчёты	22
Г.1. Стоимость прототипа	22
Г.2. Стоимость конечного устройства	22
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Программный ЦАП	24
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	26

1. Актуальность проекта

В настоящее время у музыкантов существует потребность в наличии электронных ударных для аккомпанирования собственной игре на гитаре. Не существует гитар с встроенными электронными ударными. Крупные производители музыкального оборудования не предлагают готовых решений, однако общение с музыкантами показало, что многие заинтересованы в таком устройстве. Ставится гипотеза, что потенциальный сегмент данного рынка слишком мал, чтобы привлечь внимание крупных игроков индустрии, а сами музыканты редко обладают необходимыми знаниями и навыками для подобной самостоятельной модификации музыкального инструмента. В данной работе автор ставит цель разработать устройство для аккомпанирования себе на ударных во время игры на гитаре из доступных и недорогих электронных компонентов. Тема данного проекта является актуальной и позволяет решить проблему узкого, но заметного сегмента рынка. Это сегмент профессионалов и исполнителей относительно высокого уровня и меньше сегмента любителей и начинающих.

2. Цели и задачи

Цель: Разработать электронные ударные, которые будут соответствовать потребностям виртуозных музыкантов и выполнять определённые требования, изложенные ниже.

Задачи:

1. Изучить рынок
2. Найти подходящие аппаратные решения
3. Разработать первый минимальный прототип на макетной плате
4. Найти и исправить недостатки и добавить необходимый функционал
5. Разработать и произвести прототип, готовый к использованию на практике
6. На практике найти возможные ошибки и получить отзывы от музыкантов
7. Разработать окончательную электрическую схему для производства
8. Произвести трассировку печатной платы
9. Проверить чертёж печатной платы и возможность производства на мануфактуре
10. Произвести некоторое количество устройств и встроить в гитары
11. Протестировать устройство на конечных потребителях
12. Следить за рынком и готовиться к продаже устройств
13. Создать инструкцию по самостоятельному изготовлению из компонентов

Требования:

1. Надежность
2. Малые габариты
3. Высокая автономность
4. Простота использования
5. Возможность пользователю самостоятельно установить устройство в музыкальный инструмент

6. Низкая стоимость производства

7. Естественные тактильные ощущения от игры

3. Анализ существующих решений

На данный момент не существует аналогичных решений на рынке, однако существуют простые электронные ударные в корпусе.

Все они имеют следующие недостатки: высокая цена, крупные габариты, низкая автономность, сложность использования.

Для примера возьмем одну из самых популярных среди музыкантов drum pad машину AKAI PRO MPC Studio 2. В магазине «Музторг» её стоимость на январь 2024 года составила 33 000 рублей. Автору приходилось иметь дело с данной системой, а точнее, именно с этого решения и зародилась идея данной проектной работы.

Краткая история от лица автора: «Летом 2023 года знаменитый в Коми республике виртуоз-балалаечник Василий Хорошилов обратился к моему дедушке, музыкальному мастеру. Василию потребовалось оборудование для того, чтобы аккомпанировать себе на барабанах при игре на балалайке. У него была drum pad машина, отмеченная выше. Мы с дедушкой выяснили, что такого ещё никто не делал. Позже мы с моим дядей Яковом Бартоломеем разработали устройство на Arduino Nano и пьезодатчиках, которое при ударах отправляет MIDI сигнал в AKAI PRO. Василий высоко оценил нашу разработку и сразу применил данное оборудование на своём концерте в Сыктывкаре. Появилась идея: что если разработать самостоятельное устройство, для которого не потребуются внешний MIDI семплер?». Таким образом, настоящий проект является продолжением этой идеи.

4. Описание разработки

4.1. Процесс разработки

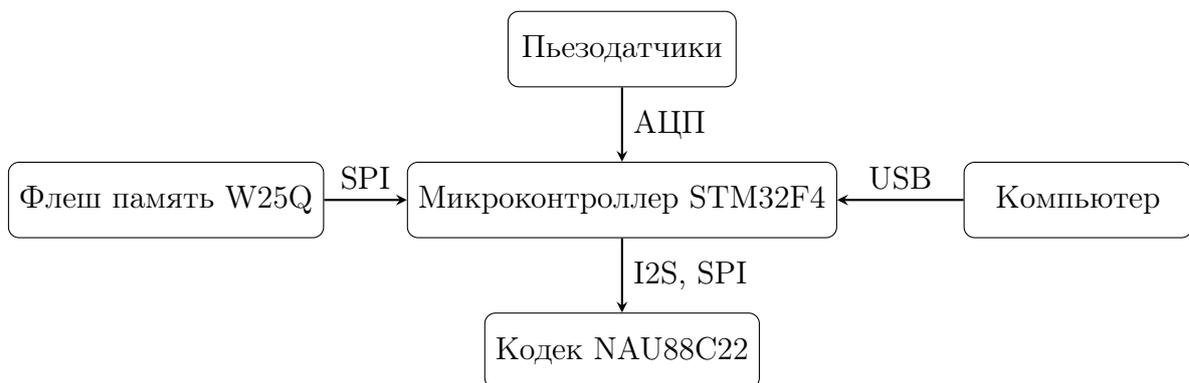
Для разработки был выбран итеративный подход. Он включает в себя цикл Деминга или PCDA (англ. «plan-do-check-act» – планирование-действие-проверка-корректировка).

При данном подходе снижаются риски на ранней стадии проекта, акцентируются усилия на действительно важные задачи и эффективно используется наработанный опыт. Также благодаря этому подходу производится итеративное тестирование, что сказывается на успехе практического применения продукта [8, Влияние итеративных подходов на предварительные условия]. Таким образом, требование 2 становится выполнить проще.

4.2. Используемое аппаратное обеспечение

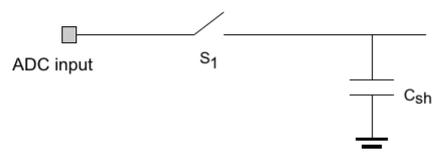
4.2.1. Схемотехника

Рис. 4.1



На рисунке 4.1 изображена схема информационных потоков. Данные из памяти и датчиков поступают в микроконтроллер для обработки, а на выходе получается цифровой звук. Далее приведены решения, принятые при разработке схемы.

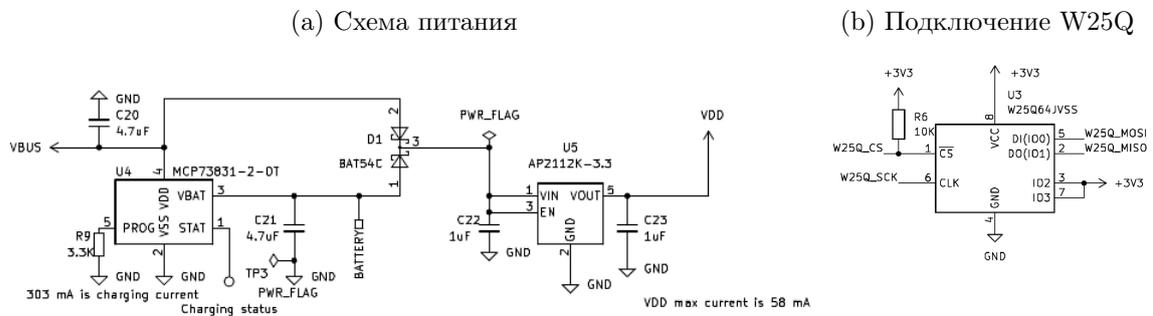
Рис. 4.2: Упрощенная схема входа АЦП [2, fig. 38]



Вход АЦП [2] должен быть связан с землей по постоянному току для разрядки выборочного конденсатора (см. рис. 4.2). Данная связь по постоянному току обеспечивается резистором на 1 МОм. Также нагрузка уменьшает напряжение сигнала пьезоэлемента, так как он имеет крайне высокое внутреннее сопротивление.

Для питания используется литий-полимерный аккумулятор или USB. Аккумулятор заряжается при помощи ИС контроллера заряда MCP73831-1-2-OT, где зарядный ток запрограммирован на 330 мА. Чтобы было возможно одновременное питание устройства от USB и зарядка аккумулятора, установлен сдвоенный диод с общим катодом. Для стабилизации напряжения используется LDO (Low DropOut) регулятор AP2112K (см. рис. 4.3а).

Рис. 4.3



При работе с чипом памяти W25Q возникла проблема, которую было трудно отладить: чип нельзя было перевести в режим записи. Напряжение на chip select должно следовать за напряжением питания, иначе включается защита от записи. Было решено подключить подтягивающий резистор (см. рис. 4.3б) [6, раздел 4.1].

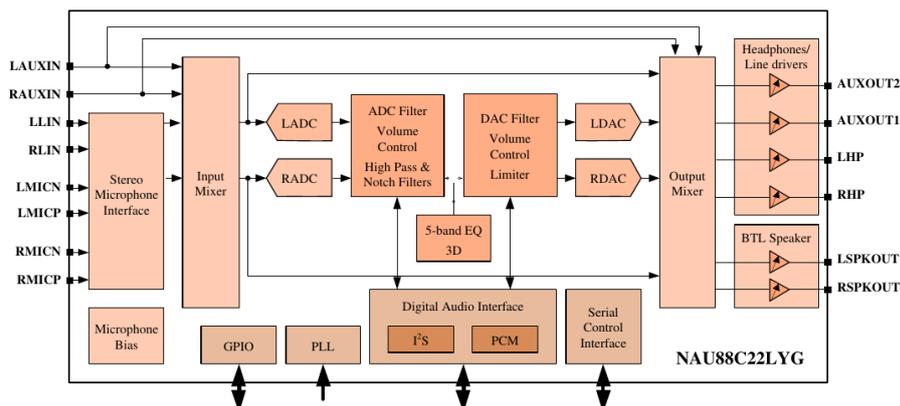
Схема включения STM32F401RCT6 разрабатывалась согласно [4]. NRST представляет собой времязадающую цепь системы RCC, а также позволяет сбросить микроконтроллер. BOOT0 и PB2 используются для выбора адреса программы в ПЗУ. Катушка индуктивности L1 фильтрует высокочастотные цифровые помехи для более точной работы АЦП и PLL. Выводы PH0 и PH1 используются для осцилляции тактовой частоты 25 МГц.

Схема включения кодека NAU88C22 разрабатывалась согласно [5, Typical application]. Управление кодеком осуществляется через SPI. Данный кодек используется в качестве ЦАП и гитарного предусилителя. Кодек имеет множество функциональных частей внутри (см. рис. 4.4). Для вывода звука ударных используется LDAC (left DAC), его сигнал поступает в Output Mixer. Для предусиления сигнала звукоснимателя используется Stereo

Таблица 4.1: Характеристики STM32F401RCT6

Оперативная память	64 Кбайт
ПЗУ	256 Кбайт
Тактовая частота	84 МГц
Процессор	ARM 32-bit Cortex-M4 CPU

Рис. 4.4: Схема ИС NAU88C22YG



Microphone Interface и Input Mixer. Но в отличие от предложенной производителем схемы в данном устройстве сигнал из Input Mixer поступает напрямую в Output Mixer, минуя цифровую обработку. Возможно будет использование цифрового блока для изменения тембра гитары. Звук выводится через AUXOUT1 и AUXOUT2. Драйвер для данного кодека ещё находится в разработке.

Для экономии энергии предусмотрено управление питанием в зависимости от подключения USB и Jack. Подключение USB определяется напряжением на VBUS, что также используется для исключения одновременного доступа к флеш памяти драйвера FatFS и USB, а также для автоматического обновления конфигурации.

Подробнее со схемой можно ознакомиться в приложении А.

4.2.2. Печатная плата

Большое внимание уделено разработке печатной платы. Расположение дорожек, компонентов и слоёв в высокочастотных цепях играет важную роль, поскольку их свойства сильно отличаются от свойств низкочастотных цепей.

Для печатной платы выбрана структура слоёв S-G-P-S (Signal-Ground-Power-Signal).

Дифференциальная пара USB проведена согласно правилам: дорожки на всей длине

Таблица 4.2: Структура печатной платы

Слой (передний выше)	Толщина, мкм
Шелкография	
Паяльная маска	1
Медь (сигнал)	35
Ядро	480
Медь (земля)	35
Препрег	480
Медь (питание)	35
Ядро	480
Медь (сигнал)	35
Паяльная маска	1

расположены близко друг к другу и имеют одинаковое полное электрическое сопротивление.

Высокочувствительный аналоговый сигнал гитарного входа дополнительно экранирован зоной земли на переднем слое.

Для лучшей электромагнитной совместимости под высокочастотными цифровыми линиями передач не разрываются опорные слои (земля и питание) переходными отверстиями. Также для уменьшения перекрестных помех и экономии раствора для травления передний и задний слои залиты зоной земли.

Для обеспечения возвратных путей высокочастотных токов рядом с каждой интегральной схемой расположены керамические обходные (bypass) конденсаторы, имеющие низкую паразитную индуктивность и сопротивление. Они размещаются близко настолько, насколько это возможно.

В качестве пассивных элементов используются SMD резисторы и конденсаторы размера 0603 (1,55x0,85мм). Этот размер позволяет монтировать компоненты вручную, а также экономить пространство и цену, так как данный размер самый популярный на рынке.

Для отладки предусмотрены Test Point. Это специальные площадки оголённой меди на плате, которые позволяют подключать щупы или замкнуть некоторую цепь отвёрткой. По углам печатной платы размещены монтажные отверстия размера M2.

Первая партия печатных плат уже произведена в Китае и отправлена в Россию. С

чертежом печатной платы можно ознакомиться в приложении Б.

4.3. Используемое программное обеспечение

Для программного обеспечения было необходимо применить ряд оптимизаций, потому что микроконтроллер имеет скромные характеристики (см. табл. 4.1) из-за потребности в удовлетворении требования 6. Программное обеспечение было упрощено и оптимизировано под конкретные задачи.

Первое, что делает программа, — инициализация периферии STM32. Большая часть кода инициализации создана при помощи генератора кода инициализации STM32CubeMX.

Для максимальной утилизации процессора микроконтроллера используется FreeRTOS. Вся полезная работа программы поделена на задачи FreeRTOS. Это позволяет вместо ожидания ввода/вывода переключить контекст на другую задачу. Возможность переключения контекста используется для того, чтобы переложить задачи ввода/вывода на контроллер прямого доступа памяти (DMA).

DMA самостоятельно работает с периферией и процессору не нужно тратить такты на копирование и опрос данных. DMA обращается к оперативной памяти и при завершении работы вызывает прерывание [3]. Обработчики прерывания (ISR) в программе переключают контекст на необходимые задачи. DMA в данной программе используется при работе с USB, W25Q, I2S и при считывании данных из АЦП.

Автор самостоятельно разработал драйверы для памяти W25Q и ЦАП. Драйвер W25Q в отличие от существующих решений имеет более простую кодовую базу и поддерживает работу в среде FreeRTOS с DMA, что обеспечивает потенциально более эффективную работу программы.

Также в проекте велась работа по портированию и интеграции драйверов USB «tinyUSB» и файловой системы FAT32 «FatFS». Для драйвера «FatFS» задействован механизм кеширования таблицы цепочек кластеров, что обеспечивает быстрое позиционирование и чтение файлов. Также был написан патч, ускоряющий чтение звуковых файлов примерно в 32 раза. Оригинальный драйвер работает только с блочными устройствами, то есть, чтобы считать участок, меньше блока, он считывает блок полностью. Это хорошо работает, когда каждый файл имеет буфер блока, но в данной ситуации оперативной памяти не хватает для хранения для каждого файла буфера. Флеш память W25Q способна считывать участки меньше блока. В слое абстракции от оборудования драйвера FatFS был добавлен вызов `disk_read_lts`, который принимает вместо LBA смещение в байтах. В вызове

`f_read` изменена логика чтения невыровненных (`unaligned`) данных. Подробнее с патчем можно ознакомиться в коммите `2b91a23a53`.

Драйвер USB используется для предоставления доступа компьютера к flash памяти устройства посредством Mass Storage Class (MSC) и виртуальному терминалу для получения отладочной информации с помощью Communication Device Class (CDC), что помогает выполнить требование 4.

Для непрерывной передачи сигнала по I2S используется двойная буферизация. Задача проигрывателя ожидает, когда закончится буфер I2S, выполняет смену буфера и начинает считывать звуковые файлы. После считывания производится цифровое смешение звуков при помощи операций сложения с насыщением. Ядро ARM Cortex M4, используемое в микроконтроллере, содержит специальные инструкции для цифровой обработки сигналов. К сожалению, трудно заставить компилятор использовать данные инструкции. Для того, чтобы увеличить скорость смешения, было принято решение использовать интринстики. Интринстики — это специальная прослойка между языком ассемблера и языком программирования C, они позволяют вызвать определенную инструкцию процессора, как функцию в языке программирования. Ниже приведён листинг из исходного кода программы, где используется интринстика «`__QADD16`», позволяющая вызвать инструкцию «`qadd16`» ассемблера ARM. Эта инструкция выполняет знаковое сложение 16-битных чисел с насыщением. Сигнал из файла ослабляется операцией деления на максимальное число воспроизводимых звуков для избежания перегруза. Таким образом, можно без ручной регулировки получить чистый звук на выходе.

Листинг 4.1: Смешение цифрового сигнала

```
for (size_t s = 0; s < samples; s++)
{
    /* audio_buffer[s * 2] += input_from_file[s] (saturated) */
    audio_buffer[s * 2] = __QADD16(audio_buffer[s * 2],
    input_from_file[s] / PAD_NUMBER);
}
```

Для распознавания ударов программа считывает сигнал с АЦП при помощи DMA в режиме двойной буферизации. При ударе сигнал быстро меняется, то есть происходит так называемый «дребезг». Программа обнаруживает удар путём сравнения амплитуды сигнала с пороговым значением. Очищение от «дребезга» решается путём добавления

временной задержки: программа, обнаружив удар, игнорирует последующие удары на время, большее длительности «дребезга», при этом нет дополнительной задержки между ударом и воспроизведением звука.

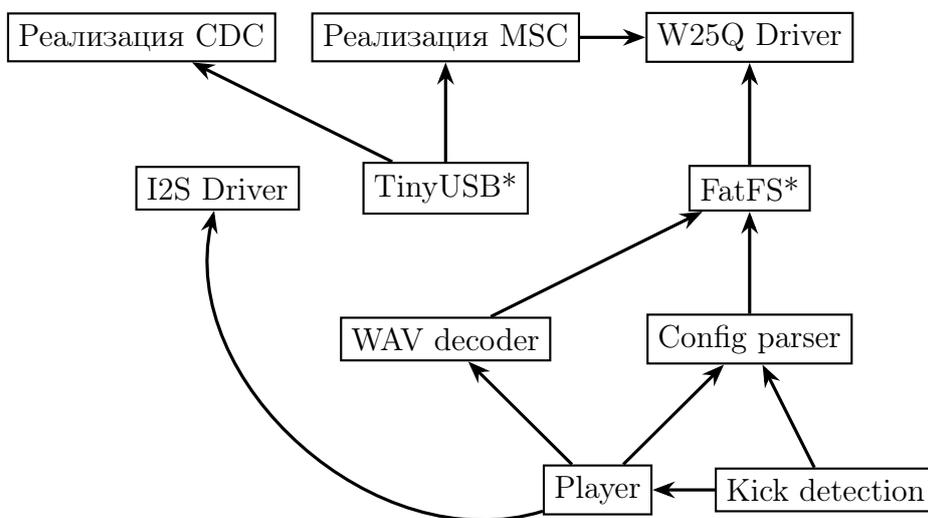
В зависимости от силы удара выбирается определённый звук, что позволяет придать динамику игре. Связи между силами ударов и звуками определяются в конфигурационном файле (см. листинг 5.1).

В таблице 4.3 и на рисунке 4.5 отображены главные компоненты программы. Компоненты, обозначенные «*», являются внешними зависимостями ПО. «Player» — компонент, отвечающий за воспроизведение и смешение звуков. «Kick detection» — компонент, отвечающий за распознавание ударов. Реализация CDC используется для ввода/вывода текстовой информации посредством виртуального терминала. Остальные обозначения пояснений не требуют, так как были описаны выше.

Таблица 4.3: Программный стек

Player				Kick detect
Config parser	WAV decoder		I2S driver	Config parser
FatFS*		TinyUSB*		
W25Q driver				
FreeRTOS*				
MCU init				

Рис. 4.5: Граф зависимостей ПО



5. Паспорт изделия

Изделие представляет собой систему электронных ударных с возможностью встраивания в другие музыкальные инструменты. Игра выполняется путём ударов по пьезоэлектрическим датчикам с различной силой для достижения динамики звучания.

Изделие поставляется с 4 пьезоэлектрическими датчиками, что достаточно для полноценного воспроизведения ритма.

Устройство имеет габариты 47x33 мм.

Устройство позволяет подключить его к компьютеру по USB для доступа к долговременной памяти с помощью MSC (Mass Storage Class). Это используется для изменения звуковых файлов и конфигурации. Также устройство предоставляет виртуальный терминал для просмотра отладочной информации (CDC, Communication Device Class).

Для работы устройства следует припаять к контакты провода, ведущие к корпусным разъёмам USB и Jack. Корпусной Jack разъём должен иметь нормально замкнутый контакт обнаружения подключения (jack detection). Данный контакт должен быть замкнут с землей при отключенном штекере.

Для питания следует подключить литий-полимерный аккумулятор со встроенной платой защиты к контактам ВАТ- и ВАТ+. Если вместо аккумулятора используются батареи, то следует выпаять микросхему MCP73831-2-OT.

Конфигурация представляет собой простой текст и хранится в файле «config.txt». Конфигурации должны находиться в директориях, имеющих нумерацию (/1/config.txt, /2/config.txt, /3/config.txt и т.д.). Сменить конфигурацию во время игры можно сильным вдавливанием мембраны пьезоэлемента.

Листинг 5.1: Конфигурация по умолчанию

```
# пример комментария
# pad <номер датчика> threshold <пороговый уровень от 1 до 2047>
# release <время, мс>
pad 1 threshold 1024 release 50
# <% нажатия> <звук.wav>
0  snare-soft.wav
33 snare-med.wav
66 snare-hard.wav
```

```
pad 2 threshold 1024 release 50  
0 bass-soft.wav  
33 bass-med.wav  
66 bass-hard.wav
```

```
pad 3 threshold 1024 release 50  
0 hat-soft.wav  
33 hat-med.wav  
66 hat-hard.wav
```

Время «release» используется для подавления «дребезга» пьезоэлементов. Необходимо выставить минимальное значение, при котором «дребезг» не возникает.

В качестве звуковых файлов используется формат WAV. Звуковые файлы строго должны иметь частоту дискретизации 48 КГц, глубину 16 бит и быть монофоническими.

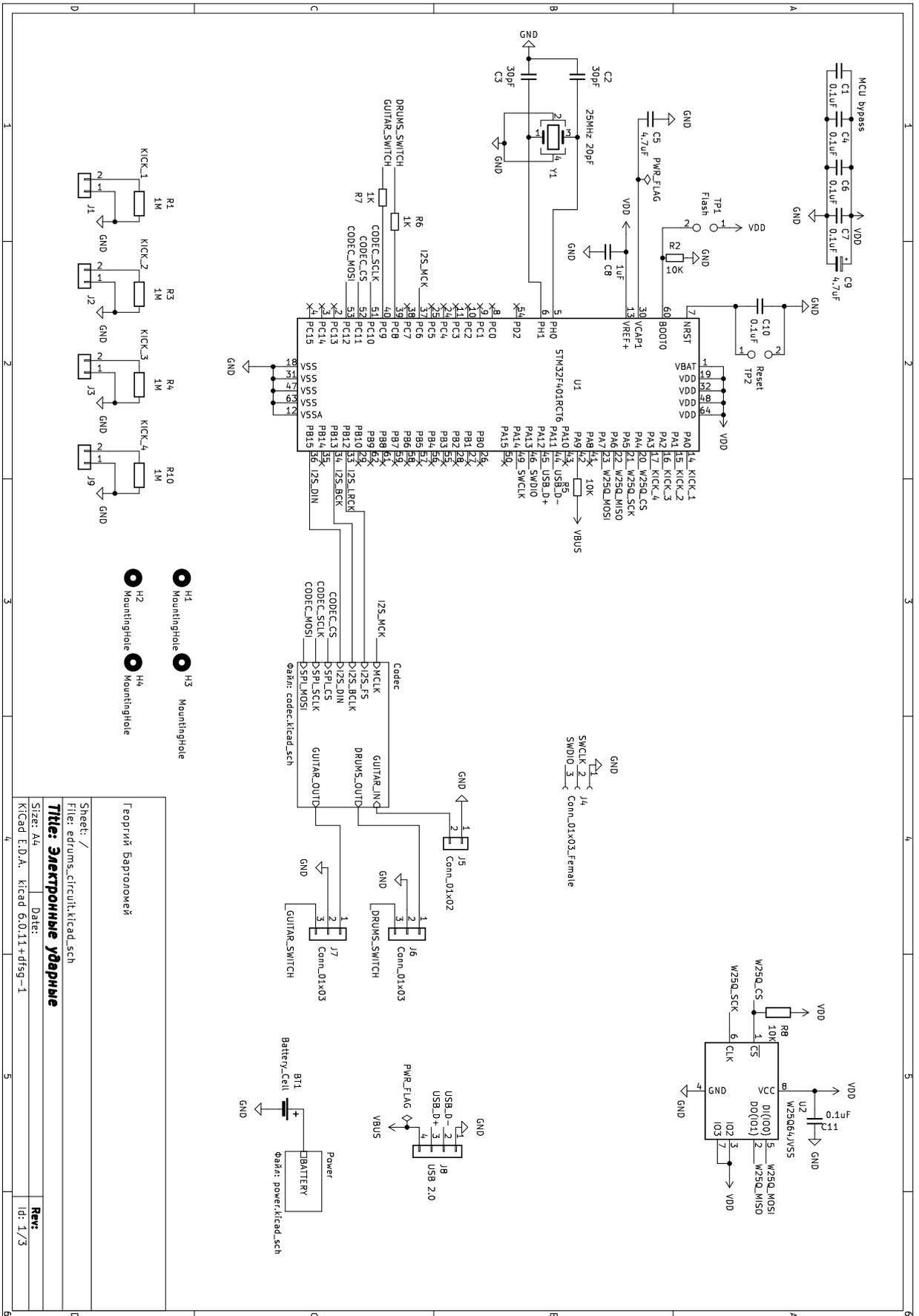
6. Заключение

Проведённая проектная работа показала, что аналогичных изделий ещё не существует на рынке, при этом существует потребность музыкантов в данном виде устройств. На мировом рынке нет электронных ударных установок, способных поместиться внутри корпуса гитары. Устройство является решением для непокрытого сегмента рынка.

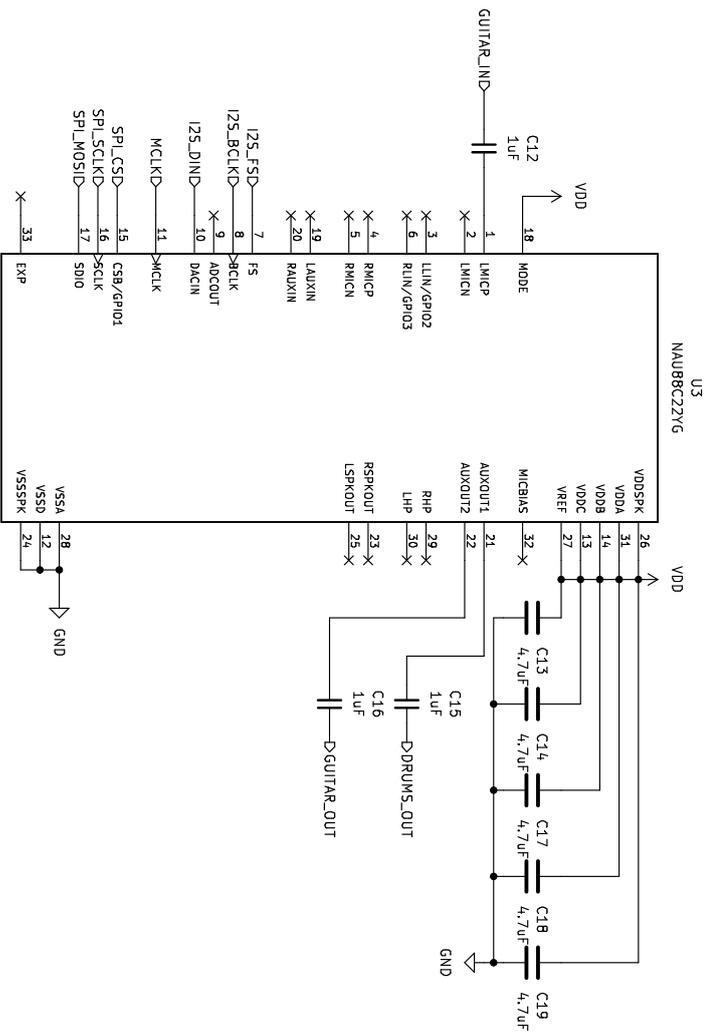
Метод итеративного проектирования значительно помог довести проект до текущего состояния. Были проведены многократные тестирования устройства, в ходе которых были найдены и устранены недостатки аппаратного и программного обеспечения. На данный момент изделие при правильной сборке будет обладать высокой надёжностью.

Разработка собственной печатной платы помогла существенно уменьшить габариты и увеличить функциональность. Первые 5 печатных плат успешно произвели на заводе в Китае, автору остаётся произвести монтаж электронных компонентов и адаптировать встроенное ПО.

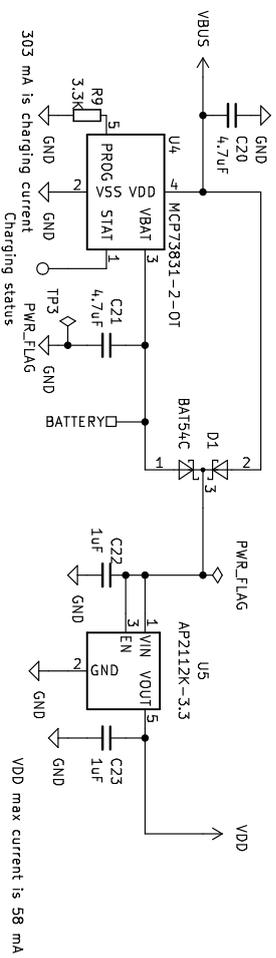
Электрическая схема



Sheet: /	Георгий Вагломей
File: edrumms_circuit.kicad_sch	
Тіпе: Электронные ударные	
Size: A4	Date:
KiCad E.D.A. KiCad 6.0.11+dfsg-1	
Rev:	Id: 1/3



Sheet: /Codec/	
File: codec.kicad_sch	
Title:	
Size: A4	Date:
Kicad E.D.A. kicad 6.0.11+dfsg-1	
	Rev:
	Id: 2/3



Sheet: /Power/
 File: power.kicad_sch

Title:

Size: A4 Date:

KiCad E.D.A. kicad 6.0.11+dfsg-1

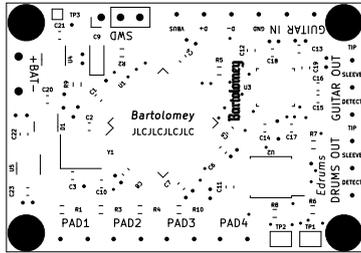
Rev:

Id: 3/3

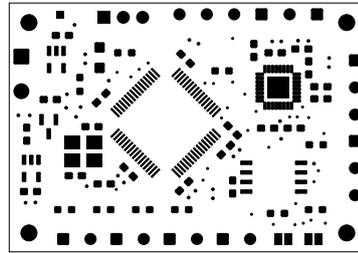
Печатная плата

Ниже представлены чертежи печатной платы в масштабе 1:1.

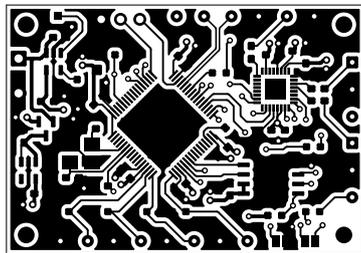
Передняя шелкография



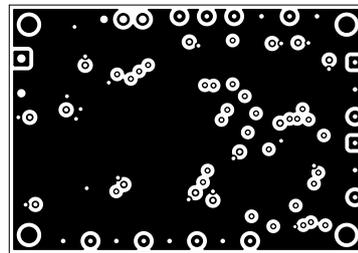
Передняя паяльная маска



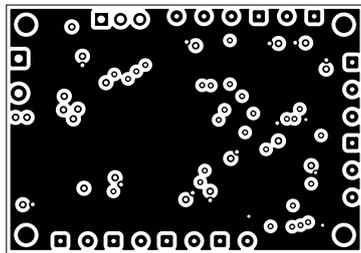
Первый слой меди (сигнал)



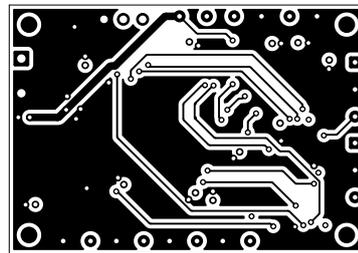
Второй слой меди (земля)



Третий слой меди (питание)



Четвертый слой меди (сигнал)



Ссылки на исходный код и видео

Исходный код доступен по адресу: <https://codeberg.org/george.bartolomey/edrums>

Видео-демонстрация доступна по адресу: <https://bh4.ru/edrums/demo1.mov>

Экономические расчёты

Г.1. Стоимость прототипа

Ниже показан расчёт стоимости прототипа при заказе всех комплектующих в российских магазинах.

Товар	Цена, руб.	Кол-во	Сумма, руб.	Поставщик
BlackPill STM32F401CCU6	645,00	1	645,00	Интернет-магазин Roboparts
W25Q64JVSSIQ	330,00	1	330,00	АО "ЧИП и ДИП"
Пьезоизлучатель ЗП-3	40,00	3	120,00	АО "ЧИП и ДИП"
Резистор	9,00	3	27,00	АО "ЧИП и ДИП"
Стабилитрон 1N4728A	4,00	3	12,00	АО "ЧИП и ДИП"
Плата 60x40	83,00	1	83,00	АО "ЧИП и ДИП"
Итого			1217,00	

Г.2. Стоимость конечного устройства

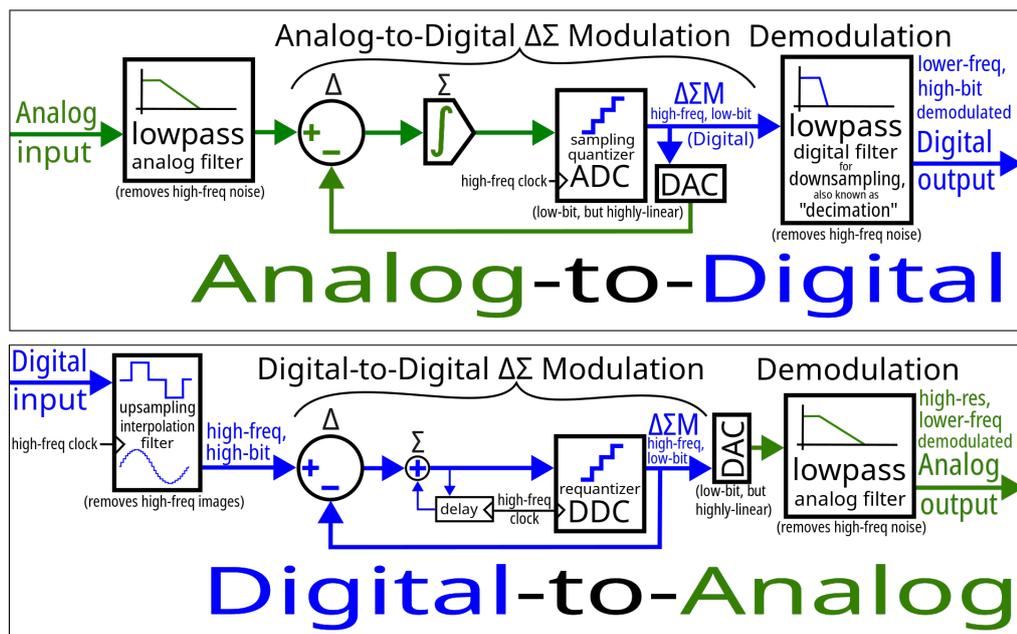
Ниже представлен расчёт стоимости конечного устройства.

Товар/услуга	Цена, руб.	Кол-во	Сумма, руб.	Поставщик
Производство печатной платы	540	1	540	РСВСННА
Керамический Х5R конденсатор 0603	0,96	22	21,12	АО "ЧИП и ДИП"
Танталовый SMD A 4.7мкФ конденсатор	14	1	14	АО "ЧИП и ДИП"
ВАТ54С	0,8	1	0,8	
Резистор 0603	0,34	10	3,4	АО "ЧИП и ДИП"
STM32F401RСТ6	96	1	96	
W25Q64	27	1	27	
NAU88С22УG	142	1	142	
МСР73831-2-ОТ	9,6	1	9,6	
АР2112К-3.3	2,7	1	2,7	
Кристалл 25MHz 20pF	14,2	1	14,2	
Разъём USB type C	47	1	47	
Аккумулятор Li-Po	269	1	269	
Итого			1190,42	

Программный ЦАП

На начальных этапах разработки автор принял решение отказаться от интегральных ЦАП. Автор разработал программный ЦАП на базе высокоскоростного цифрового интерфейса SPI и дельта-сигма модуляции.

Рис. Д.1: Процесс дельта-сигма модуляции [7, рис. 1]



Цифровая схема была заменена на программный код. Данный программный ЦАП преобразовывает 16-битный сигнал с частотой дискретизации 48 000 Гц в 1-битный сигнал с частотой дискретизации 1 312 500 Гц. 1-битный сигнал выводится при помощи интерфейса SPI. На выходе SPI высокочастотный цифровой сигнал преобразуется в аналоговый при помощи RC цепи.

Листинг Д.1: Часть исходного кода программного ЦАП

```
static int32_t integrator1 = 0;
static int32_t integrator2 = 0;
static int16_t quantized_level = 0;
int byte;
int bit;
int32_t delta = 0;
memset(output, 0, OUTPUT_BUFFER_SIZE);
```

```

for (int i = 0; i < INPUT_SAMPLES; i++)
{
    int16_t pcm = input[i];
    for (int j = 0; j < OVERSAMPLING_RATIO; j++)
    {
        delta = __QADD(pcm, -quantized_level);
        integrator1 = __QADD(integrator1, delta);

        delta = __QADD(integrator1, -quantized_level);
        integrator2 = __QADD(integrator2, delta);

        quantized_level = (integrator2 >= 0) ? INT16_MAX : INT16_MIN;

        byte = (i * OVERSAMPLING_RATIO + j) / 8;
        bit = 7 - ((i * OVERSAMPLING_RATIO + j) % 8);
        output[byte] |= (quantized_level >= 0) ? (1 << bit) : 0;
    }
}

```

Программный ЦАП выполняет дифференцирование входа с выходом (Δ). Сигнал из Δ поступает в интегратор (Σ). Выход из Σ поступает в повторный квантователь γ (на рис. Д.1 «requantizer DDC», «quantized_level» на листинге Д.1). В реализации используется дельта-сигма модуляция второго порядка, то есть используется схема $\Delta \rightarrow \Sigma \rightarrow \Delta \rightarrow \Sigma \rightarrow \gamma$ [1]. Для увеличения частоты дискретизации дельта-сигма модуляция применяется 28 раз к каждой выборке исходного сигнала (т.н. oversampling). Выход γ в виде последовательности бит записывается в буфер SPI «output».

Автор принял решение отказаться от данного решения, так как оно требует более высокой производительности процессора. Было подсчитано, что использование отдельного интегрального ЦАП PCM5102 по протоколу I2S дешевле, чем использование более производительного микроконтроллера. Возможно, данное решение будет использоваться автором в будущем.

По ссылке доступно видео с демонстрацией работы данного программного ЦАП:
<https://bh4.ru/edrums/deltasigma.mp4>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Andrew Holme. 15-25 MHz Fractional-N Synthesizer. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.aholme.co.uk/Frac2/Main.htm> (дата обращения: 25.01.2024)
2. STMicroelectronics. Application note AN2834. How to optimize the ADC accuracy in the STM32 MCUs. [Электронный ресурс]. URL: https://www.st.com/resource/en/application_note/an2834-how-to-optimize-the-adc-accuracy-in-the-stm32-mcus-stmicroelectronics.pdf (дата обращения: 25.01.2024).
3. STMicroelectronics. Application note AN4031. Using the STM32F2, STM32F4 and STM32F7 Series DMA controller. [Электронный ресурс]. URL: https://www.st.com/resource/en/application_note/an4031-using-the-stm32f2-stm32f4-and-stm32f7-series-dma-controller-stmicroelectronics.pdf (дата обращения: 25.01.2024).
4. STMicroelectronics. Application note AN4488. Getting started with STM32F4xxxx MCU hardware development. [Электронный ресурс]. URL: https://www.st.com/resource/en/application_note/an4488-getting-started-with-stm32f4xxxx-mcu-hardware-development-stmicroelectronics.pdf (дата обращения 25.01.2024).
5. Nuvoton. NAU88C22 datasheet. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nuvoton.com/resource-files/NAU88C22DataSheet0.6.pdf> (последнее обращение: 29.02.2024)
6. Winbond. W25Q64JV Datasheet. [Электронный ресурс]. URL: https://www.winbond.com/hq/product/code-storage-flash-memory/serial-nor-flash/?__locale=en&partNo=W25Q64JV (дата обращения: 25.01.2024).
7. Википедия. Delta-sigma modulation. [Электронный ресурс]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Delta-sigma_modulation (последнее обращение 25.01.2024)
8. Стив Макконнелл. Совершенный код = Code complete. — М.: Русская Редакция, 2010. — С. 896. — (Мастер-класс). — ISBN 978-5-7502-0064-1.
9. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: В 3-х томах = The Art of Electronics: Second Edition (© Cambridge University Press, 1980, 1989) / Пер. с англ.: Б. Н. Бронина, И. И. Короткевич, А. И. Коротова, М. Н. Микшиса, Л. В. Поспелова, О. А. Соболевой, К. Г. Финогенова, Ю. В. Чечёткина, М. П. Шаропова. — Изд. 4-е, пе-

реработанное и дополненное. — М.: Мир, 1993. — 50 000 экз. — ISBN 5-03-002336-4,
5-03-002337-2, 5-03-002338-0, 5-03-002954-0.