

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения
(наименование института полностью)

Кафедра «Промышленная электроника»
(наименование)

11.03.04 Электроника и микроэлектроника
(код и наименование направления подготовки / специальности)

Электроника и робототехника
(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Преобразователь напряжения USB PD

Обучающийся	Д.А. Липовенко (Инициалы Фамилия)	(личная подпись)
Руководитель	к.т.н., доцент А.А. Шевцов (ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)	
Консультант	О.А. Головач (ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)	

Тольятти 2024

Аннотация

Данная выпускная квалификационная работа посвящена разработке преобразователя напряжения, работающего от зарядного устройства стандарта USB Power Delivery через интерфейс USB Type-C и обеспечивающего выходное напряжение 9В, 12В, 15В или 20В в соответствии с установленными значениями.

В работе рассматриваются методы получения указанных напряжений от сетевых источников питания, доступных на рынке. Определены ключевые критерии для разработки устройства, созданы структурная и принципиальная схемы, выбран набор компонентов, произведены необходимые расчеты их параметров, разработан алгоритм работы управляющего микроконтроллера, а также спроектирована печатная плата.

Первый раздел включает анализ технических характеристик аналогичных устройств и выявление их основных аналогов. Определены ключевые критерии для проектирования. В этом разделе также представлены разработка структурной схемы устройства и блок-схема алгоритма работы управляющего микроконтроллера.

Второй раздел посвящен разработке принципиальной электронной схемы, где проводятся расчеты параметров и выбор компонентов устройства.

Третий раздел рассматривает технологию разработки печатной платы, включая процесс проектирования самой платы.

Выполнено 6 чертежей на формате А1. Объем работы 48 листов.

ABSTRACT

The title of the graduation project is "Development of a Voltage Converter Compliant with the USB Power Delivery (PD) Standard." The author focuses on creating a voltage converter with input according to the USB PD standard, providing outputs of 5V, 9V, 12V, and 15V, with a maximum current of 3A.

This project includes an explanatory note on 50 pages, an introduction with 10 figures, 5 tables, 30 references (5 in foreign languages), 2 appendices, and 3 A1 sheets.

The key issue of the project is to develop an efficient voltage converter. The work touches upon the following aspects: examining the USB PD standard revisions, focusing on key aspects for hardware and software, and establishing criteria for developing the voltage converter.

The schematic circuit includes the STUSB4500 PD controller, ATtiny87 microcontroller, and LM7805 voltage regulator. We calculated parameters and selected components from online stores, including a rotary switch, USB Type-C input, and output terminals.

Using Altium Designer 2021, we designed a double-sided PCB with single-sided component placement. The project details the PCB manufacturing process, including drilling, etching, and silk-screen printing. We start with the statement of the problem and then logically pass over to its possible solutions.

Much attention is given to ensuring proper interaction between the PD controller and the microcontroller, designing the power supply and interface circuits, and selecting suitable components to meet the voltage and current requirements.

We outline the criteria for developing the voltage converter and describe the structural and schematic designs in detail. Next, we elucidate the PCB layout process and the techniques used for manufacturing the board.

In conclusion, we'd like to stress that all tasks for this qualification work have been resolved, covering all stages of developing and designing a voltage converter per the USB PD standard.

Содержание

Введение.....	5
1 Постановка задачи.....	7
1.1 Обзор стандарта питания USB Power Delivery	7
1.2 Физический уровень реализации стандарта USB Power Delivery	10
1.3 Логический и уровень протокола в реализации стандарта USBPower Delivery.....	14
1.4 Взаимодействие с USB	24
2 Конструкторское проектирование устройства	27
2.1 Разработка структурной схемы устройства	27
2.2 Разработка принципиальной схемы устройства	29
2.3 Расчет и выбор элементов устройства	40
3 Разработка конструкции печатной платы	42
4 Экономическая часть	46
Заключение	48
Список используемой литературы	49

Введение

Для работы различных бытовых устройств часто требуются низкие значения напряжения, такие как 5, 9, 12 В. Обеспечить такие уровни напряжения можно несколькими способами: специализированными блоками питания с фиксированным стабильным напряжением, универсальными источниками питания, позволяющими регулировать напряжение, или лабораторными блоками питания.

Основная задача таких источников заключается в преобразовании сетевого переменного напряжения 220В 50Гц в необходимое постоянное напряжение и его поддержании. Конструкции этих источников могут быть разнообразны: понижение переменного напряжения 50Гц с помощью трансформатора, последующее выпрямление и стабилизация; выпрямление, инвертирование в высокочастотное напряжение, последующее преобразование с использованием высокочастотного трансформатора, выпрямление и стабилизация.

Для выбора нужного напряжения в конкретных условиях обычно применяются подстроечные резисторы или переключатели различной конструкции. Однако, с развитием технологий все большее распространение получают источники питания стандарта Power Delivery (PD), используемые для зарядки мобильных устройств и питания ноутбуков. Этот стандарт позволяет источнику питания устанавливать на выходе то напряжение, которое запрашивает подключенное устройство. Однако, эти источники питания оснащены выходом USB Type-C и могут выдавать нужное напряжение только на устройства, которые способны запросить его.

В случаях, когда нагрузка представлена простым устройством, не имеющим интерфейса USB Type-C и не способным запросить параметры питающего напряжения, требуется специальное устройство. Такое устройство подключается к источнику питания Power Delivery и позволяет пользователю устанавливать необходимый уровень напряжения.

Такой преобразователь напряжения должен включать в себя разъем USB Type-C, микроконтроллер для взаимодействия с источником Power Delivery, переключатель для выбора необходимого уровня напряжения, индикатор для отображения выходного напряжения, а также разъем для подключения нагрузки.

Это устройство позволит использовать имеющиеся источники напряжения Power Delivery для питания различных устройств, обеспечивая экономию для конечного пользователя.

Данная бакалаврская работа посвящена проектированию преобразователя постоянного напряжения стандарта Power Delivery в фиксированные значения 5В, 9В, 12В, 15В с максимальным током нагрузки 5А.

1 Постановка задачи

1.1 Обзор стандарта питания USB Power Delivery

С момента появления стандарта USB в 1996 году одной из его важных задач была организация питания электрическим напряжением для различных подключаемых устройств. Первоначально к шине USB подключались устройства ввода, такие как компьютерные мыши и клавиатуры. Шинная организация подключения периферийных устройств быстро завоевала популярность среди производителей компьютерного оборудования и пользователей.

Вскоре к USB стали подключаться и другие устройства, такие как сканеры и внешние звуковые интерфейсы, которые также получали питание через этот интерфейс. С ростом ассортимента USB-устройств возросли и требования к мощности, передаваемой через USB. Увеличение потребляемой мощности было обусловлено как ростом энергопотребления отдельных устройств, так и возможностью подключения множества устройств к одной шине USB.

Стандарт USB эволюционировал, повышая скорость передачи данных и увеличивая нагрузочную способность шины для питания периферийных устройств. Развитие стандарта USB по поколениям демонстрирует следующие изменения в нагрузочной способности:

- USB 1.0: 5В, 100мА;
- USB 2.0: 5В, 500мА;
- USB 3.0: 5В, 900мА;
- USB-C: 5В, 3А.

С внедрением стандарта Power Delivery (PD) устройства, подключаемые через разъем USB-C, получили возможность получать питание в диапазоне напряжений от 5В до 20В. Потребляемый ток

может достигать 5А, что позволяет устройствам получать до 100Вт мощности. Это значительно расширяет возможности использования USB для питания более энергоемких устройств.

Стандарт Power Delivery предоставляет максимальные возможности по мощности среди всех USB стандартов. Рассмотрим его более детально.

В рамках стандарта USB существуют понятия «хост» и «устройство». «Хостом» является, например, компьютер, а «устройством» — подключаемое внешнее устройство, такое как флэш-накопитель или телефон. В контексте электропитания эти термины в стандарте Power Delivery трансформируются в понятия «источник» и «потребитель».

Для того чтобы устройства, подключенные через кабель USB Type-C, могли определить, кто из них является источником питания, а кто — потребителем, между ними организуется диалог. В процессе этого диалога устройство может запросить увеличение напряжения от источника, который, в свою очередь, может подтвердить или отклонить этот запрос в зависимости от своих возможностей. Повышение напряжения приводит к увеличению передаваемой мощности через кабель USB Type-C, что-либо поддерживает работу устройств с большим энергопотреблением, либо ускоряет зарядку аккумуляторов в потребляющих устройствах.

Стандарт Power Delivery прошел несколько стадий ревизий. Первая версия, USB PD Rev.1, была принята в 2012 году. В этой версии для связи между источником и потребителем использовались кабели стандартов USB 2.0 и USB 3.0. Диалог осуществлялся по выделенному каналу связи через провод Vbus стандартного USB кабеля, с частотной модуляцией на несущей 24 МГц. Согласно этой ревизии, напряжение на проводе питания могло изменяться, принимая значения 5В, 12В или 20В при максимальном токе 5А.

Во второй ревизии USB PD 2.0, выпущенной вместе со спецификацией USB 3.1 в 2014 году, стандарт стал привязан к разъему USB Type-C. В новых кабелях информация о режиме работы Power Delivery передавалась по выделенному проводу, известному как Configuration Channel.

Промышленность начала выпускать кабели с утолщенными жилами, предназначенными для передачи большей мощности. В этих кабелях устанавливались новые микросхемы, которые сообщали источнику и потребителю о возможностях кабеля. Согласно этой ревизии, напряжение на кабеле могло увеличиваться с 5В до 9В, 15В или 20В при максимальном токе 5А. При этом для передачи тока выше 3А требовалась идентификационная микросхема в составе кабеля.

В следующей ревизии, USB PD 3.0, принятой в 2019 году, был введен режим Programmable Power Supply (PPS). В этом режиме потребитель мог запрашивать не фиксированное напряжение 5В, 9В, 15В или 20В, а напряжение в диапазоне от 3,3В до 21В с шагом 20мВ. Также новая ревизия позволяла потребителю запрашивать увеличение тока от источника с шагом 50мА.

В 2021 году появилась ревизия USB PD 3.1, которая ввела разделение на режимы Standard Power Range (SPR), совместимый с USB PD 3.0, и Extended Power Range (EPR), в котором были заявлены напряжения 28В, 36В и 48В. В режиме SPR был сохранен режим Programmable Power Supply, в то время как в новом режиме EPR он не поддерживался. Для регулировки высокого напряжения появился режим Adjustable Voltage Supply, в котором напряжение в диапазоне от 15В до 48В устанавливается с шагом 0,1В. В новой ревизии максимальная передаваемая мощность возросла до 240Вт. Для токов выше 3А и напряжений выше 20В по-прежнему требуется наличие специальной идентификационной микросхемы в составе кабеля. Кроме того, для кабелей повышенной мощности были введены специальные логотипы для их маркировки.

Таким образом, стандарт USB Power Delivery позволяет выполнять следующие действия:

- выбирать, какое из устройств будет выступать в роли источника, а какое — в роли потребителя энергии.

- осуществлять зарядку хоста от периферийного устройства.
- обеспечивать постоянное питание потребителя энергии от источника.
- источнику регулировать потребление энергии различными потребителями. Если одному из потребителей требуется больше энергии, источник может потребовать от другого потребителя снизить потребление.

1.2 Физический уровень реализации стандарта USB Power Delivery

На физическом уровне работа протокола USB Power Delivery представлена следующей эквивалентной электрической схемой, показанной на рисунке 1, соответствующей USB Power Delivery rev1.0 . [1, 11, 12].

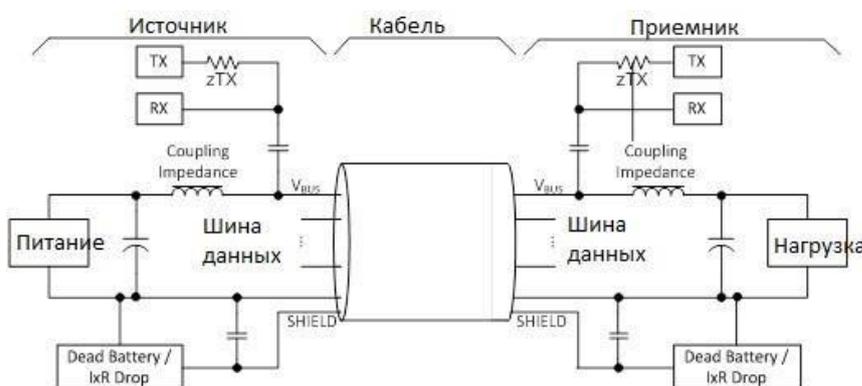


Рисунок 1 – Эквивалентная схема соединения USB Power Delivery

Из схемы видно, что оба устройства, функционирующие как источники и приемники, должны иметь схемы для детектирования скачков напряжения (в большую или меньшую сторону), через которые передается информация о передаваемом бите.

Ревизия USB Power Delivery rev1.0 использует для передачи данных линию USB VBus.

Основные элементы передатчика на линии VBus представлены на рисунке 2

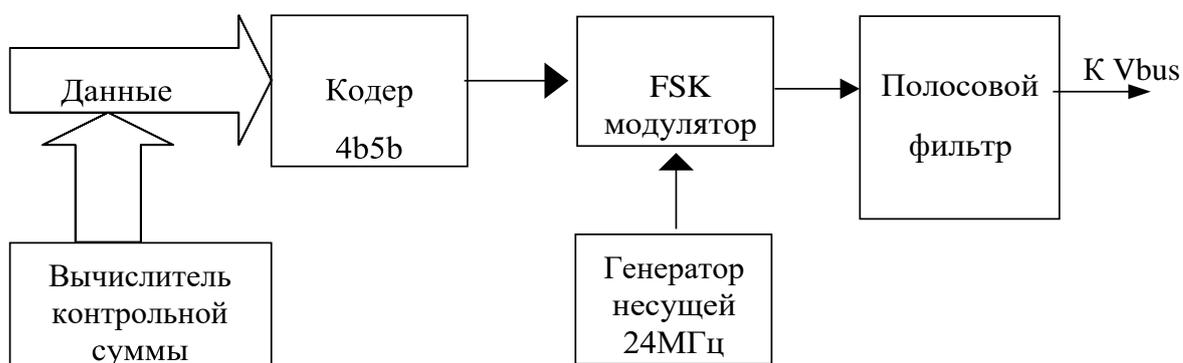


Рисунок 2 – Основная структура передатчика USB PD

Данные от контроллера Power Delivery, вместе с вычисленной контрольной суммой, поступают на вход кодера 4b5b [2], который преобразует каждые 4 бита исходных данных в 5 бит, передаваемых в канал передачи данных. Это создает избыточность, что способствует повышению помехозащищенности передачи кода. Таким образом, все данные пакета информационных байтов, кроме преамбулы, передаются в виде пятибитных комбинаций согласно таблице кодировки, определяемой стандартом. Каждые 10 бит кодируют 1 байт, 2 байта кодируются 20 битами, а двойное слово из двух байт требует 40 бит.

После преобразования кодером 4b5b данные поступают в FSK-модулятор, который реализует метод частотной манипуляции, в частности метод двоичной манипуляции (BFSK) [10]. В качестве несущей ($f_{carrier}$) используется синусоида с частотой 24МГц и отклонением частоты ($f_{deviation}$) 500кГц. FSK-модулятор преобразует каждый бит после кодера 4b5b в синусоидальное колебание: частотой $f_{carrier} + f_{deviation}$ для логической единицы и частотой $f_{carrier} - f_{deviation}$ для логического нуля. Работа FSK-модулятора показана на рисунке 3.

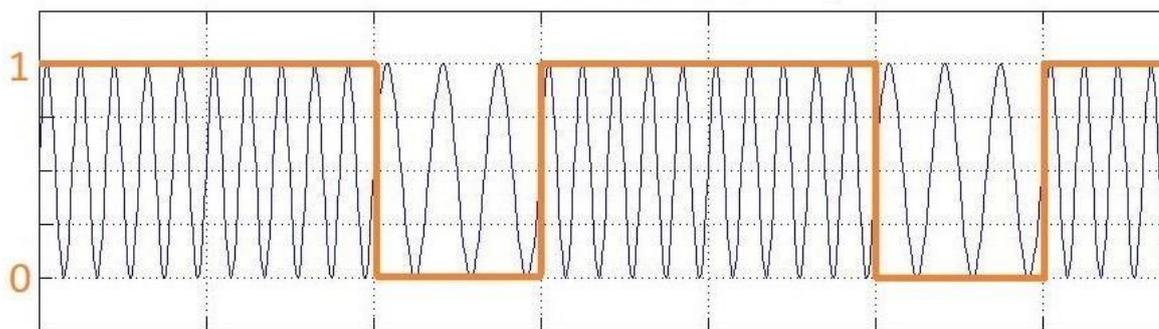


Рисунок 3 – Результат работы FSK-модулятора.

Этот вид модуляции обладает устойчивостью к импульсным помехам, поскольку такие помехи влияют на абсолютное значение напряжения, а модулятор работает с частотой колебаний.

После FSK-модулятора сигнал проходит через полосовой фильтр и подается на контакт Vbus.

Обратный процесс — прием и декодирование высокочастотного сигнала — выполняется приемной частью контроллера USB PD, обобщенная структура которого представлена на рисунке 4.

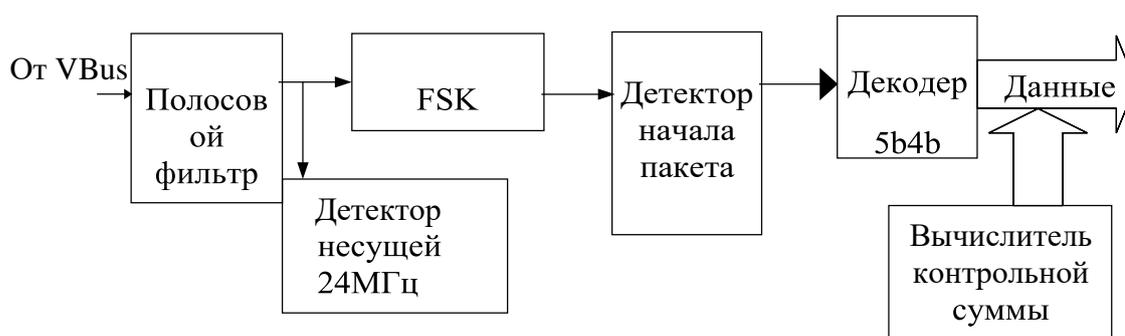


Рисунок 4 – Структура основных элементов приемника USB PD

Переменное напряжение, принятое по линии Vbus, поступает на полосовой фильтр, который пропускает полосу частот несущей и частоты отклонений. Очищенный сигнал направляется на FSK-демодулятор, который выделяет из смеси сигналов логические нули и единицы. Из последовательности этих битов детектор начала пакетов

формирует группы по 5 бит избыточного кода. Эти группы затем декодируются 5b4b декодером в стандартные байты, которые после вычисления контрольной суммы передаются контроллеру USB PD.

В ревизии USB PD 3.0 поддерживается кодировка Viphase Mark Code (BMC). Для передачи информации используется дополнительно введенный контакт CC. Передача осуществляется в полудуплексном режиме, то есть информация передается по одному проводу в обе стороны по очереди. В этой ревизии также используется кодировка 4b5b.

Принципы кодировки BMC показаны на рисунке 5.

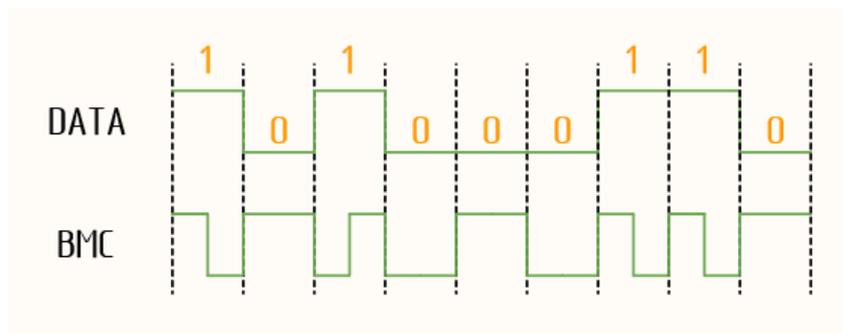


Рисунок 5 – Принципы кодировки Viphase Mark Code (BMC).

Для передачи каждого бита по линии CC в режиме USB Power Delivery 3.0 используется метод кодирования Viphase Mark Code (BMC). В этом методе каждый бит кодируется таким образом, что если передается бит "1", то происходит переключение уровня сигнала в середине битового интервала. Если передается бит "0", то уровень сигнала остается неизменным до конца битового интервала.

Таким образом, каждый разряд двоичного слова передается за один битовый интервал, при этом частота сигнала при BMC кодировании составляет 300 кГц $\pm 10\%$. Это кодирование обеспечивает надежную передачу данных и устойчивость к ¹³ помехам импульсного характера за счет

периодических переключений уровня сигнала.

1.3 Логический и уровень протокола в реализации стандарта USB Power Delivery

На уровне протокола USB Power Delivery создаются и передаются различные типы сообщений между соединенными устройствами. Эти сообщения могут быть информационными, управляющими или расширенными, в зависимости от целей передачи данных. Они могут происходить от источника энергии, потребителя энергии или от самого кабеля.

Каждое сообщение на логическом уровне формируется как пара запрос-ответ, которые последовательно передаются между устройствами. Запросы и ответы объединяются в пакеты данных, следующие определенной структуре. Каждый пакет включает:

Преамбулу: Начальный сигнал, который готовит устройства к передаче данных. Преамбула содержит синхронизационные сигналы Sync-1 и Sync-2, закодированные в формате 4b5b.

Начало пакета (SOP - Start of Packet): Маркер, обозначающий начало передачи данных. SOP включает в себя три сигнала Sync-1 и завершающий Sync-2, которые помогают устройствам правильно интерпретировать последующие данные.

Заголовок: Этот раздел содержит метаданные о типе сообщения (информационное, управляющее или расширенное), направлении передачи данных и другую важную информацию.

Информационные байты: Блок данных, который непосредственно содержит передаваемую информацию, такую как запросы, команды управления или другие данные.

Контрольная сумма (CRC): Для обеспечения целостности данных в пакет включается контрольная сумма. Она позволяет получающему устройству проверить, были ли ошибки в процессе передачи.

Конец пакета (EOP - End of Packet): Сигнал, обозначающий окончание передачи данных. EOP помогает устройствам правильно определить конец пакета и начало следующей передачи данных.

Эти компоненты вместе образуют структуру пакета данных в стандарте USB Power Delivery, который обеспечивает надежную и эффективную передачу информации между устройствами, подключенными через USB. Структура пакета графически показана на рисунке 6.

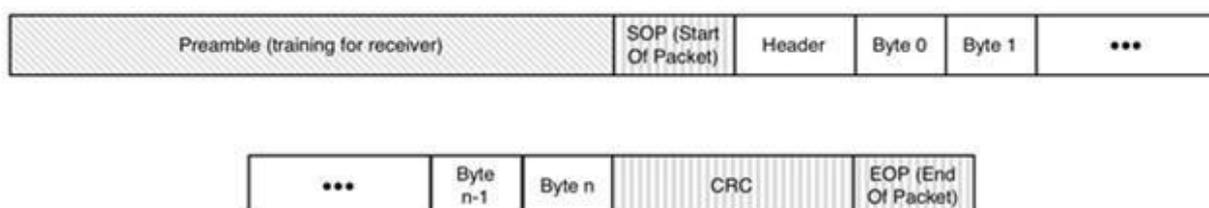


Рисунок 6 – Структура информационного пакета в USB Power Deliver

На уровне протокола USB Power Delivery сообщения состоят из заголовка и информационного сообщения произвольного размера. В зависимости от функции устройства в данный момент – приемника или передатчика данных – происходит создание сообщения на логическом уровне и его последующая передача на физический уровень, или же прием сигнала на физическом уровне с последующей интерпретацией и обработкой на логическом уровне до формирования полного сообщения.

Структура сообщения на логическом уровне начинается с заголовка, который идентифицирует тип сообщения и содержит другие метаданные, необходимые для правильной интерпретации данных.

На физическом уровне преамбула, SOP, CRC и EOP кодируются в формате 4b5b, что помогает обеспечить надежность и точность передачи данных. Сигналы RST1 и RST2 используются для сброса линии CC путем отправки тройного повтора сигнала RST1, за которым следует завершающий сигнал RST2, также закодированные в формате 4b5b. Заголовок сообщения

составляет первую часть пакета на логическом уровне, как показано на рисунке 7.



Рисунок 7 – Структура заголовка.

Длина заголовка фиксирована и имеет 16 бит. В состав заголовка входят следующие поля, показанные в таблице 1.

Таблица 1 - Поля заголовка

Бит(ы)	Название поля	Описание
15	Reserved	Зарезервировано (должно быть нулевым)
14...12	Number of Data Objects	Количество объектов данных (0.7), если 0 то это управляющее сообщение
11...9	MessageID	Идентификатор (устанавливается в 0 после сброса, увеличивается на единицу после подтверждения успешной передачи - GoodCRC)
8	Port Role	Роль в соединении (0 – приемник, 1 - источник)
7...6	Specification Revision	Версия спецификации(00b- Версия 1.0)
5...4	Reserved	Зарезервировано(должно быть нулевым)
3...0	Message Type	Тип сообщения

Информационные сообщения по протоколу USB Power Delivery бывают четырех типов, каждый из которых выполняет определенные функции:

- BIST (Built In Self Test) Data Object (BDO): Эти сообщения предназначены для проверки соединения на соответствие требованиям стандарта. Они используются на этапе

тестирования физического подключения.

- Power Data Object (PDO): Сообщения PDO используются для передачи информации о характеристиках порта источника или требований приемника, касающихся напряжения и силы тока.
- Request Data Object (RDO): Эти сообщения запрашиваются приемником для установки характеристик электропитания, необходимых для последующего соглашения с источником. RDO содержат данные, которые приемник хочет установить для поддержания электропитания.
- Vendor Data Object (VDO): В сообщениях VDO передается нестандартная, дополнительная или производственная информация, которая не регламентирована стандартом USB PD. Эти сообщения используются производителями устройств для передачи специфических данных.

Каждый тип информационного сообщения кодируется в поле заголовка, что позволяет идентифицировать его тип и правильно интерпретировать содержащиеся данные. Эти сообщения играют ключевую роль в установлении и поддержании правильного режима электропитания между устройствами, подключенными через USB Power Delivery.

Таблица 2 - Типы сообщений в поле «Message Type» заголовка сообщения.

Биты 3...0	Тип	Описание
0000	Reserved	Не используется
0001	Capabilities	PDO - сообщение о характеристиках
0010	Request	RDO - сообщение о запросе
0011	BIST	VDO - сообщение о проверке на соответствие требованиям

Биты 3...0	Тип	Описание
0100-1110	Reserved	не используется
1111	Vendor Defined	VDO - нестандартное сообщение, определяемое производителем оборудования

Сообщение о характеристиках порта источника (PDO) в стандарте USB Power Delivery представляет собой последовательность 32-разрядных объектов, которые передаются от источника к приемнику. Каждый объект PDO содержит информацию о возможностях источника в отношении энергопотребления

Структура сообщения показана на рисунке 8.



Рисунок 8 - Структура сообщения о характеристиках.

На рисунке 8 показано, что сообщения USB Power Delivery состоят из заголовка, за которым следуют один или несколько объектов, содержащих информацию о характеристиках электропитания. Существуют несколько способов передачи таких сообщений:

От источника к приемнику с фиксированным временным шагом при подключении кабеля. Источник пересылает сообщения с интервалом времени в течение минуты, пока не будет зафиксирован набор характеристик электропитания или пока приемник не отправит RDO с флагом Capability Mismatch, указывающим на несоответствие требованиям.

От источника к приемнику для принудительной переустановки характеристик электропитания.

В ответ на управляющие сообщения Get_Source_Cap или

Get_Sink_Cap.

Каждый элемент электропитания в устройстве описывается своим объектом PDO, который указывает на максимально допустимые напряжения. Все элементы электропитания должны поддерживать стандартное напряжение 5В. Каждый источник обязан предоставлять хотя бы один PDO с характеристиками 5В, и этот PDO должен располагаться первым в цепочке объектов PDO, если устройство поддерживает этот режим энергопотребления.

Эти меры гарантируют совместимость устройств и эффективное управление передачей энергии в соответствии с их требованиями и возможностями.

Структура объекта PDO показана в таблице 3.

Таблица 3 – Структура объекта PDO.

Биты	Описание
31..30	Тип электропитания 00 - Постоянное ($V_{min}=V_{max}$) 01 - Программируемый 10 - Вариативный, но не аккумуляторная батарея 11 — Батарея
29..0	Характеристики электропитания

Тип электропитания, который является постоянным, характеризуется постоянным напряжением. В соответствии со стандартом USB Power Delivery, источник должен предоставлять хотя бы один такой элемент. Структура такого элемента описана в таблице 4 стандарта

Таблица 4 – Структура элемента «Постоянный тип электропитания»

Биты	Описание
31..30	00b- Стационарный тип
29	Поддержка обмена ролями источник<-> приемник
28	Поддержка USB Suspend-понижения питания в USB порту до минимума при неактивности устройства
27	Флаг внешнего питания (например, устройство включено в розетку)
26..20	Не используется, должно быть нулевым
19..10	Напряжение инкрементами по 50mV
9..0	Сила тока инкрементами по 10mA

Программируемый тип электропитания предполагает возможность регулировки напряжения путем отправки запросов в заданных границах. Структура такого типа электропитания описана в таблице 5 стандарта USB Power Delivery.

Таблица 5 - Структура элемента «Программируемый тип электропитания»

Биты	Описание
31..30	01 b - Программируемый тип
29..20	Максимальное напряжение инкрементами по 50mV
19..10	Минимальное напряжение инкрементами по 50mV
9..0	Сила тока инкрементами по 10mA

В вариативном типе электропитания напряжение задается в пределах максимального и минимального значений и не может быть регулировано. Структура такого элемента описана в таблице 6 стандарта USB Power Delivery.

Таблица 6 - Структура элемента «Вариативный тип электропитания»

Биты	Описание
31..30	10b - Вариативный тип (кроме батарей)
29..20	Абсолютный выдаваемый максимум напряжения инкрементами по 50mV
19..10	Абсолютный выдаваемый минимум напряжения инкрементами по 50mV
9..0	Сила тока инкрементами по 10mA

Тип "Батарея" описывает аккумуляторные батареи, которые могут подключаться к линии VBus в рамках стандарта USB Power Delivery. Структура такого элемента – в таблице 7.

Таблица 7 - Структура элемента «Батарея»

Биты	Описание
31..30	11b- Батарея
29..20	Абсолютный выдаваемый максимум напряжения инкрементами по 50mV
19..10	Абсолютный выдаваемый минимум напряжения инкрементами по 50mV
9..0	Мощность инкрементами по 250mW

Сообщения о запросах передаются от приемника энергии к источнику при установлении соединения и настройке параметров электропитания. Они отправляются в ответ на сообщение о характеристиках и содержат объект

запроса данных RDO, который описывает требуемые характеристики электропитания.

В зависимости от типа элемента питания, переданного в сообщении о характеристиках источника, у этого запроса есть два типа [1]:

При запросах к объектам "Элемент электропитания постоянного типа", "Элемент электропитания вариативного типа" или "Батарея", поля "Operating Current / Power" и "Total Current / Prog Voltage" интерпретируются одним образом. Это означает, что требуется информация о текущем потреблении энергии или напряжении.

Для запросов к объекту "Элемент программируемого типа" интерпретация отличается, так как в этом случае запрашиваются как напряжение, так и сила тока

Структура объекта RDO приведена в таблице 8.

Таблица 8 - Структура объекта RDO

Биты	Описание
31	Зарезервировано, должно быть нулевым.
30..28	Позиция объекта PDO в изначальном сообщении о
27	GiveBack- поддержка приемником сообщения GotoMin
26	Capability Mismatch - обозначает удовлетворяют ли приемник характеристики по электропитанию предоставленные источником
25	USB Communications Capable - поддерживает ли приемник USB 2.0 или USB 3.0 протоколы
19..10	Operating Current/ Power Значение поля зависит от типа объекта PDO к которому относится данное RDO • Постоянный, программируемый, вариативный: Операционная сила тока в шагах по 10mA Батарея: Операционная мощность в шагах по 250mW
9..0	Total Current/ Prog Voltage Значение поля зависит от типа объекта PDO к которому относится данное RDO • Постоянный, вариативный, батарея: Максимальная сила тока в шагах по ЮтА или мощность в шагах по 250mW Программируемый: Напряжение в шагах по 50mV

Управляющие сообщения включают в себя заголовок и контрольную сумму CRC. Они не содержат объектов данных, поэтому количество объектов данных (Number of Data Objects) устанавливается в 0. Существует несколько типов управляющих сообщений, перечисленных в таблице 9.

Таблица 9 – Типы управляющих сообщений.

Биты 3..0	Тип сообщения	Кто посылает?	Description
1	2	3	4
0000	Зарезервирован	Никто	Не используется
0001	GoodCRC	Источник или приемник	Посылается принимающей стороной для подтверждения успешной передачи пакета.
0010	GotoMin	Только источник	Используется для установки минимального уровня электропитания, запрошенного приемником при первичном подключении.
0101	Ping	Только источник	Может периодически посыпаться с интервалом tSourceActivity для определения готовности приемника. Необязательное сообщение.
0110	PS_RDY	Только источник	Посылается для уведомления что модуль питания в источнике готов к использованию в соответствии с условиями, запрошенными приемником.
0111	Get_Source_Cap	Источник и приемник	Может быть отправлено одной из сторон с целью запроса возможностей и характеристик функционирования в качестве источника, либо возможности обмена ролей- приемник в источник. Если таковые не поддерживаются то другая сторона в ответ посылает Reject.
1011	CableVGO	Только приемник	VBus Ground Offset. Таким образом источник информирует приемник, что падение напряжения по земле превышает допустимые пределы. Соответственно приемник должен уменьшить потребляемую мощность если желает сохранить стабильное USB подключение.
1100	Wait	Только источник	Посылается для уведомления приемника о том что источник не может удовлетворить его запрос на данный момент. Приемник может повторить запрос через время tSinkRequest
1110-1111	Зарезервирован	Никто	Не используется

1000	Get_Sink_Cap	Источники и приемник	Может быть отправлено одной из сторон с целью запроса возможностей и характеристик функционирования в качестве приемника, либо возможности обмена ролей - источник в приемник. Если таковые не поддерживаются то другая сторона в ответ посылает Reject.
1001	Protocol Error	Источники и приемник	Посылается в ответ на любое не распознанное или неподдерживаемое сообщение.
1010	Swap	Источники и приемник	Может быть послано любой из сторон с целью обмена ролями источника и приемника. Варианты ответа: Assert- источники приемник начинают процедуру обмена ролей Reject- запрашиваемая сторона неспособна или нежелает обмениваться ролями Wait - запрашиваемая сторона не способна или не желает обмениваться ролями прямо сейчас, но способна это сделать в будущем

1.4 Взаимодействие с USB

Источник предпочтения системного менеджера или SPM при одновременной реализации протокола USB и Power Delivery оправдан наличием контроля устройств USB PD через запросы USB. Эта структура взаимодействия показана на рисунке 9 [1]

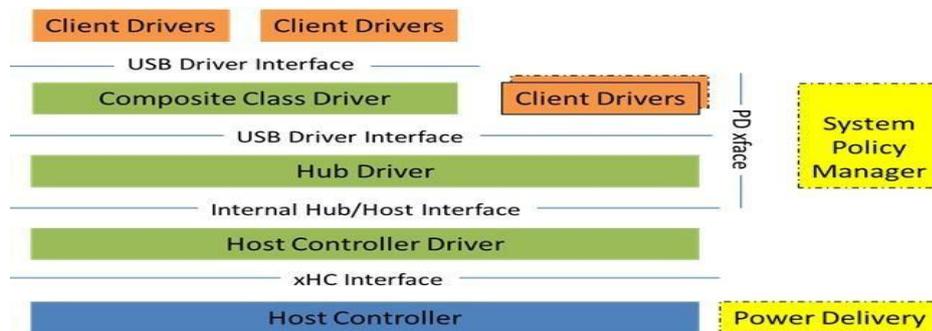


Рисунок 9 - Структура взаимодействия USB запросов с аппаратурой USB PD.

Системы, поддерживающие SPM, должны включать специфические типы USB дескрипторов для обеспечения функциональности Power Delivery:

Power Delivery Capability Descriptor:

- Определяет поддержку зарядки аккумулятора через USB.
- Указывает, поддерживается ли USB PD и может ли устройство действовать как источник или приемник питания.
- Включает информацию о количестве портов-источников и портов-приемников, а также о версиях поддерживаемых спецификаций.

Battery Info Capability Descriptor:

- Используется, если устройство поддерживает батарею как один из источников питания.
- Содержит информацию о названии, емкости, пороговых значениях тока в заряженном и разряженном состоянии, серийном номере и производителе батареи.

PD Consumer Port Capability Descriptor:

- Применяется, если устройство поддерживает хотя бы один порт-источник энергии.
- В этом дескрипторе указывается поддержка Power Delivery и Battery Charging.
- Включает список всех PDO (Power Data Object) объектов, характеризующих элементы электропитания, доступные устройству.

PD Power Requirement Descriptor:

- Необходим для устройств-приемников, поддерживающих USB PD.
- Этот дескриптор возвращается устройствами-приемниками в составе дескриптора конфигурации USB.

- Определяет требования к мощности устройства, включая максимальные значения напряжения и тока, которые может принять устройство.

Каждый из этих дескрипторов играет важную роль в обеспечении правильной работы и взаимодействия устройства с поддержкой Power Delivery через интерфейс USB.

Выводы

В результате выполнения первого раздела был проведён обзор стандарта питания USB Power Delivery. Рассмотрена реализация аппаратуры на физическом уровне этого стандарта, а также организация логического и протокольного уровней передачи данных. Освещено содержание различных объектов и дескрипторов протокола, необходимых для правильной работы устройств с поддержкой USB Power Delivery.

2 Конструкторское проектирование устройства

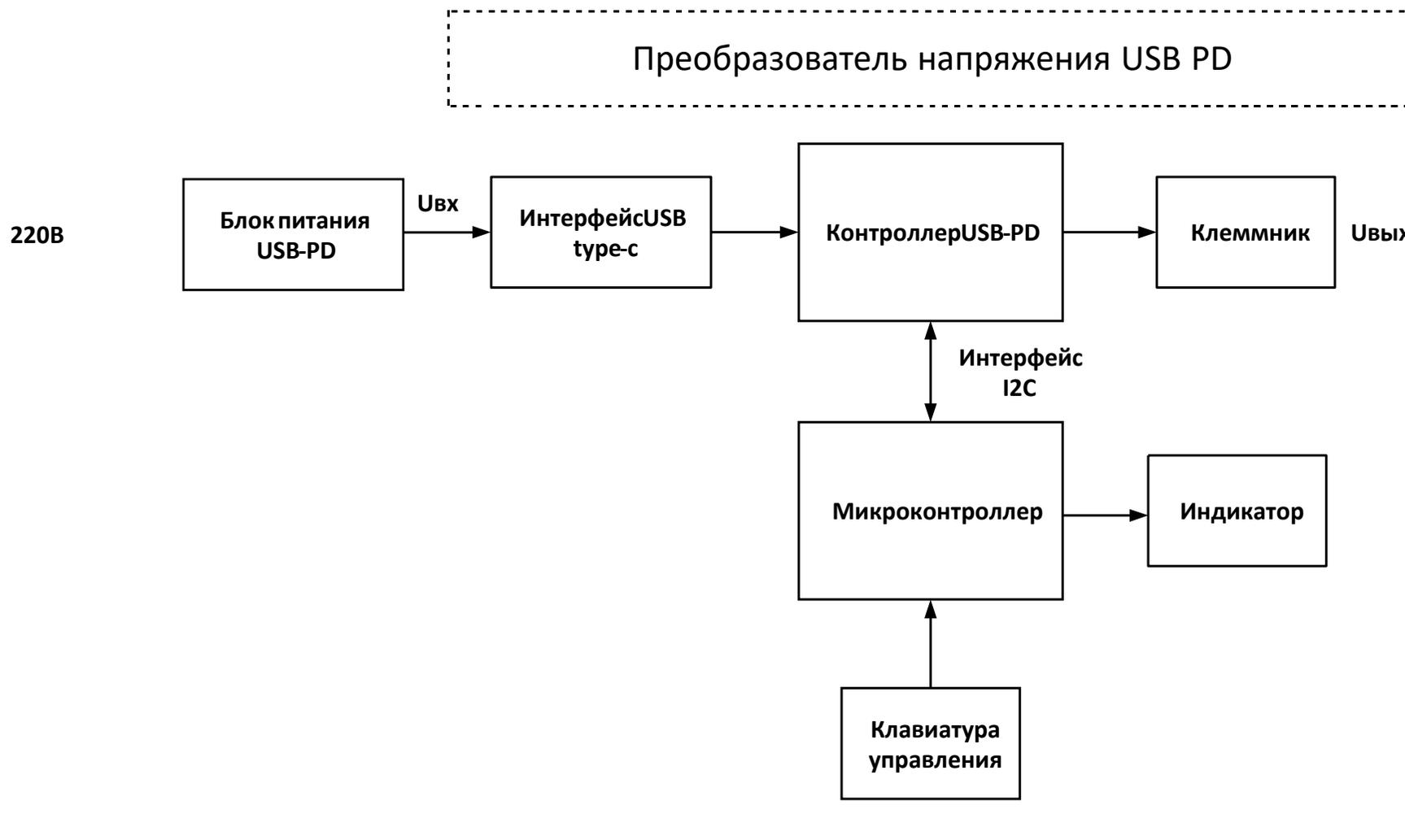
2.1 Разработка структурной схемы устройства

Анализ задания на выпускную квалификационную работу показал необходимость разработки преобразователя постоянного напряжения, работающего от сети 220В и поддерживающего стандарт USB Power Delivery. Устройство должно иметь интерфейс USB Type-C и предлагать пользователю выбор фиксированных выходных напряжений. Характеристики устройства включают: входной интерфейс USB Type-C Power Delivery, выходные напряжения и токи 5В/2,4А, 9В/3А, 12В/2А, 15В/2А, 20В/4,3А. Управление осуществляется поворотным переключателем, который имеет четыре позиции для выбора выходного напряжения, а выходной интерфейс представлен клеммами под винт. Устройство также может быть оснащено дисплеем или индикатором для отображения текущего режима работы и служебных сообщений.

На основе анализа задания и стандарта Power Delivery, рассмотренного в разделе 1, была предложена следующая структурная схема. Напряжение из разъема USB Type-C поступает на интегральный контроллер USB-PD и с его выхода направляется на выходные клеммы. Управление контроллером USB-PD осуществляется отдельным микроконтроллером через шину I2C. К микроконтроллеру подключены управляющие кнопки и служебный индикатор. Микроконтроллер задает режимы работы контроллера USB-PD с выбором необходимого пользователю выходного напряжения.

Эта структурная схема станет основой для разработки электрической принципиальной схемы устройства

Структурная схема, удовлетворяющая приведенному описанию показана на рисунке 10



2.2 Разработка принципиальной схемы устройства

Разработку принципиальной схемы устройства начнем с выбора контроллера Power Delivery. Поскольку устройство выступает в роли потребителя энергии в шине питания USB, контроллер должен выполнять функции приемника в терминологии Power Delivery.

Для выполнения задачи, поставленной в техническом задании, необходима шина для передачи внешним контроллером нужных настроек в PD-контроллер. Контроллер должен обеспечивать полную совместимость с существующими на рынке источниками USB PD и работать в архитектуре протокола USB-C.

Для этого выберем микросхему STUSB4500, которая является контроллером USB Type-C и Power Delivery для потребителей. Этот контроллер может заключать контракт на подачу питания с источником без использования внешнего микроконтроллера, хотя дополнительный микроконтроллер может подключаться по шине I2C для решения специфических задач. С помощью STUSB4500 можно использовать настраиваемые объекты данных питания (PDO) с использованием встроенной энергонезависимой памяти (NVM).

Функции STUSB4500 [7] включают:

- обнаружение подключения между двумя портами USB Type-C («Attach detection»);
- установка корректного соединения источник-приемник;
- установление соглашения с источником на поставку питания USB PD;
- контроль вывода питания VBUS и управление изменениями напряжения на VBUS;
- управление защитой от высокого напряжения;

- поддержка двух путей зарядки высокой мощности.

Условное графическое обозначение контроллера показано на рисунке 11.

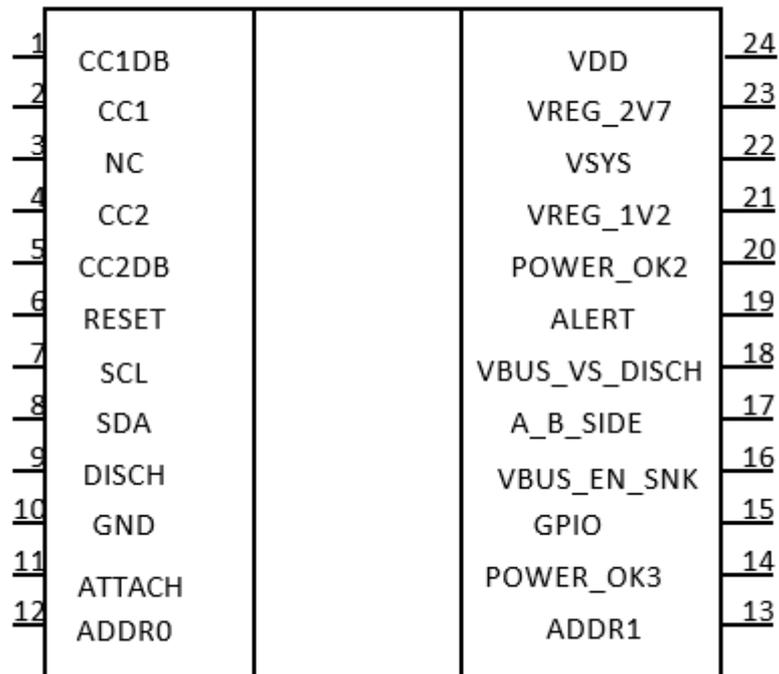


Рисунок 11 - Условное графическое обозначение контроллера STUSB4500

Помимо прямого подключения к шине USB-C, контроллер STUSB4500 способен проводить алгоритм зарядки полностью разряженного аккумулятора, предоставляет возможность изменения заводской схемы электропитания (PDO) в памяти контроллера и поддерживает режим отладки. Это значительно упрощает макетирование устройств, построенных на его основе. Внутренняя структура контроллера STUSB4500 показана на рисунке 12 согласно [7].

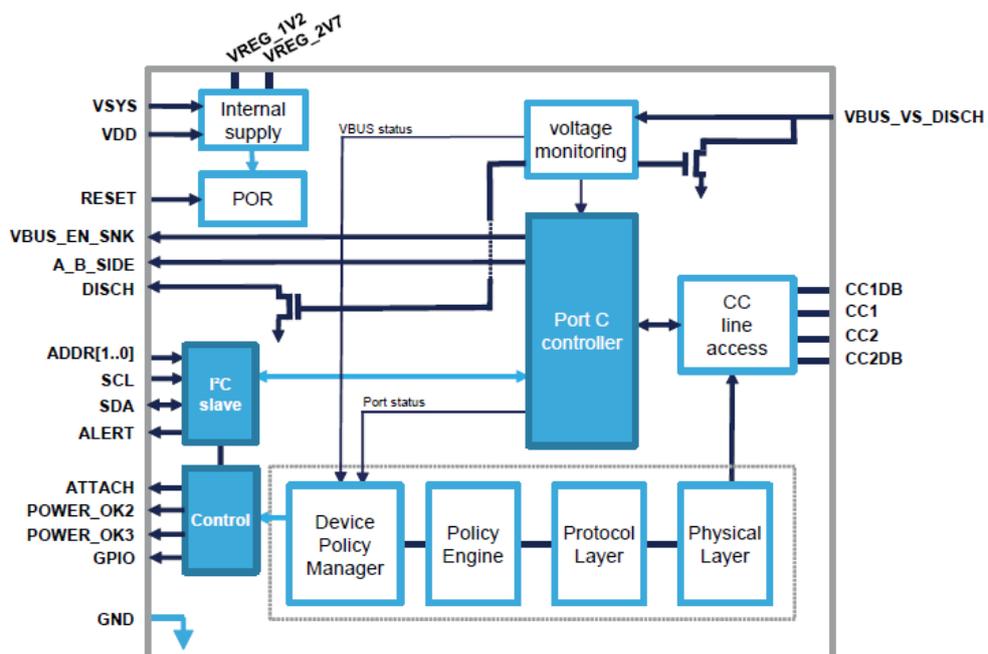


Рисунок 12 - Внутренняя структура контроллера STUSB4500.

Для выполнения выпускной квалификационной работы будет использоваться микросхема STUSB4500 в корпусе QFN-24. Внешний вид этого корпуса показан на рисунке 13.

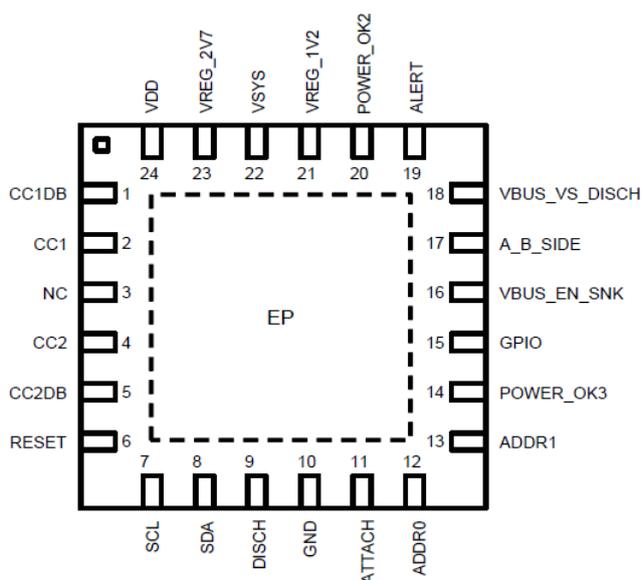


Рисунок 13 – Внешний вид корпуса QFN-24 микросхемы STUSB4500.

Назначение выводов микросхемы STUSB4500 в корпусе QFN-24 описано в таблице 10.

Таблица 10. - Назначение выводов микросхемы STUSB4500 в корпусе QFN-24

QFN	Name	Type	Description	Typical connection
1	CC1DB	HVAIO	Dead battery enable on CC1 pin	To CC1 pin if used or ground
2	CC1	HVAIO	Type-C configuration channel 1	To Type-C receptacle A5
3	NC	-	-	Floating
4	CC2	HVAIO	Type-C configuration channel 2	To Type-C receptacle B5
5	CC2DB	HVAIO	Dead battery enable on CC2 pin	To CC2 pin if used or ground
6	RESET	DI	Reset input, active high	From system
7	SCL	DI	I ² C dock input	To I ² C master, ext. pull-up
8	SDA	DI/OD	I ² C data input/output, active low open drain	To I ² C master, ext. pull-up
9	DISCH	HVAIO	Internal discharge path or external discharge path enable, active low open drain	From power system (internal path) or to the discharge path switch (external path), ext. pull-up
10	GND	GND	Ground	Ground
11	ATTACH	OD	Attachment detection, active low open drain	To MCU if any. ext pull-up
12	ADDR0	DI	I ² C device address setting	Static, to ground of ext. pull-up for address select on. to ground if no connection to MCU
13	ADDR1	DI	I ² C device address setting	Static, to ground of ext. pull-up for address selection. to ground if no connection to MCU
14	POWER_OK3	OD	Power contract Ack. active low open drain	To power system, ext. pull-up
15	GPIO	OD	General purpose output, active low open drain	To system, ext. pull-up

16	VBUS_EN_S NK	HVOD	V _{eu3} sink power path enable, active low open drain	To power switch or to power system, ext. pull-up
----	-----------------	------	--	---

Продолжение таблицы 10

QFN	Name	Type	Description	Typical connection
18	VBUS_VS_D I SC H	HVAI	Veus voltage monitoring зло discharge path	From VBUS. receptacle side
19	ALERT	O D	PC intemjpt. active low open drain	To I*C master, ext. pull-up
20	POWER_OK2	HVOD	Power contract flag. 3«ive low open drain	To power switch or to power system, ext. pull-up
21	VREGJV2	PWR	1.2 V internal regulator output	1 pF typ decoupling capacitor
22	VSYS	PWR	Power supply from system	From power system, connect to ground if not used
23	VREG_2V7	PWR	2.7 V internal regulator output	1 pF typ. decoupling capacitor
24	VDO	HV PWR	Power supply from USB power line	From Vsus. receptacle side
EP	EP	GND	Exposed pad is connected to ground	To ground

Контроллер STUSB4500 поддерживает хранение в энергонезависимой памяти трех профилей напряжения потребителя энергии. Первый профиль PDO1 фиксируется на уровне 5 В, а напряжения PDO2 и PDO3 программируются с шагом 50 мВ в диапазоне от 5 В до 20 В, как это определено в спецификации USB PD.

Конфигурации профилей тока потребителя в контроллере включают программируемые значения тока для каждого PDO. В справочной таблице предопределено 15 значений тока от 0,5 А до 5 А. Дополнительно можно задать одно пользовательское значение в диапазоне от 10 мА до 5 А с шагом 10 мА, которое будет общим для всех PDO, если используется.

Алгоритм принятия решения о выборе профиля контроллера начинается с самого приоритетного SNK_PDO и сравнивает его с возможностями SRC_PDO, полученными от источника. Сначала сравниваются напряжения, затем токи. Соответствие определяется двумя условиями: напряжения должны совпадать, а ток SNK_PDO должен быть меньше или равен току SRC_PDO. При совпадении формируется сообщение RDO, которое отправляется источнику. В случае отсутствия совпадения устанавливается контракт USB PD при напряжении 5 В.

Для создания принципиальной схемы устройства необходимо подключить к микросхеме STUSB4500 ключ на основе МДП транзистора для коммутации линии нагрузки с линией питания от разъема USB-C. Два светодиода будут указывать активный профиль PDO. К выводу VREG_2V7 следует подключить цепочку со стабилитроном на 2,7 В. Для сброса микросхемы после подключения питания следует предусмотреть кнопку, подающую напряжение на вывод RESET при нажатии. Для связи с внешним микроконтроллером нужно предусмотреть выводы для линий связи от контроллера SDA и SCL.

Схема подключения внешних элементов к микросхеме STUSB4500 показана на рисунке 14.

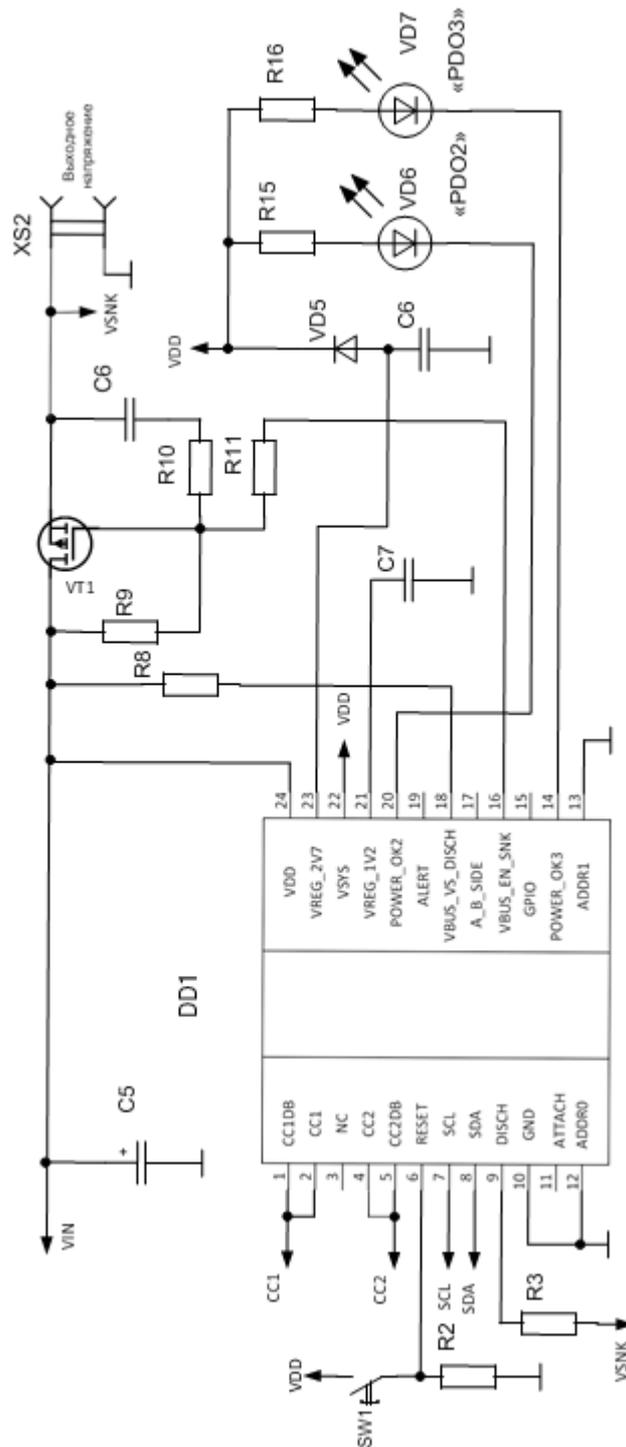


Рисунок 14 – Схема модуля на основе STUSB4500.

На данной схеме представлено следующее:

- DD1 - микросхема контроллера PD STUSB4500.
- SW1 и R2 - цепь принудительного сброса.

- C5 - фильтрующий конденсатор, сглаживающий низкочастотные пульсации напряжения, передаваемого по шине от источника энергии.
- R9, R10 и C6 - элементы, обеспечивающие функционирование ключа на МДП транзисторе VT1.
- VD5 и C6 - цепь стабилизации напряжения 2,7В.
- R15, VD6 и R16, VD7 - светодиодные цепи, индицирующие активный профиль PDO.
- XS2 - выходные клеммы для подключения нагрузки.

Для управления режимами работы контроллера STUSB4500 используется подключенный по линии I2C микроконтроллер AT Tiny 87 фирмы Microchip.

Назначение выводов микроконтроллера показано на рисунке 15.

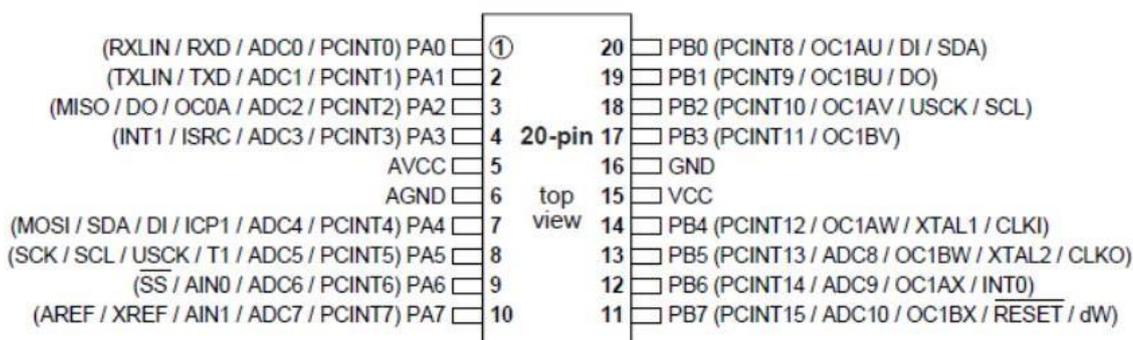


Рисунок 15 - Расположение выводов микроконтроллера ATtiny87

Этот микроконтроллер обладает 20 выводами, из которых 16 могут использоваться как порты ввода/вывода. Остальные 4 включают вывод питания, вывод опорного напряжения и два общих вывода.

Микроконтроллер оснащен 8 кБ flash-памяти с ресурсом в 10,000 циклов «запись/стирание», 512 байт EEPROM и 512 байт ОЗУ. Он имеет интерфейс I2C и может работать при напряжениях питания от 2.7 до 5.5 В, достигая тактовой частоты до 16 МГц.

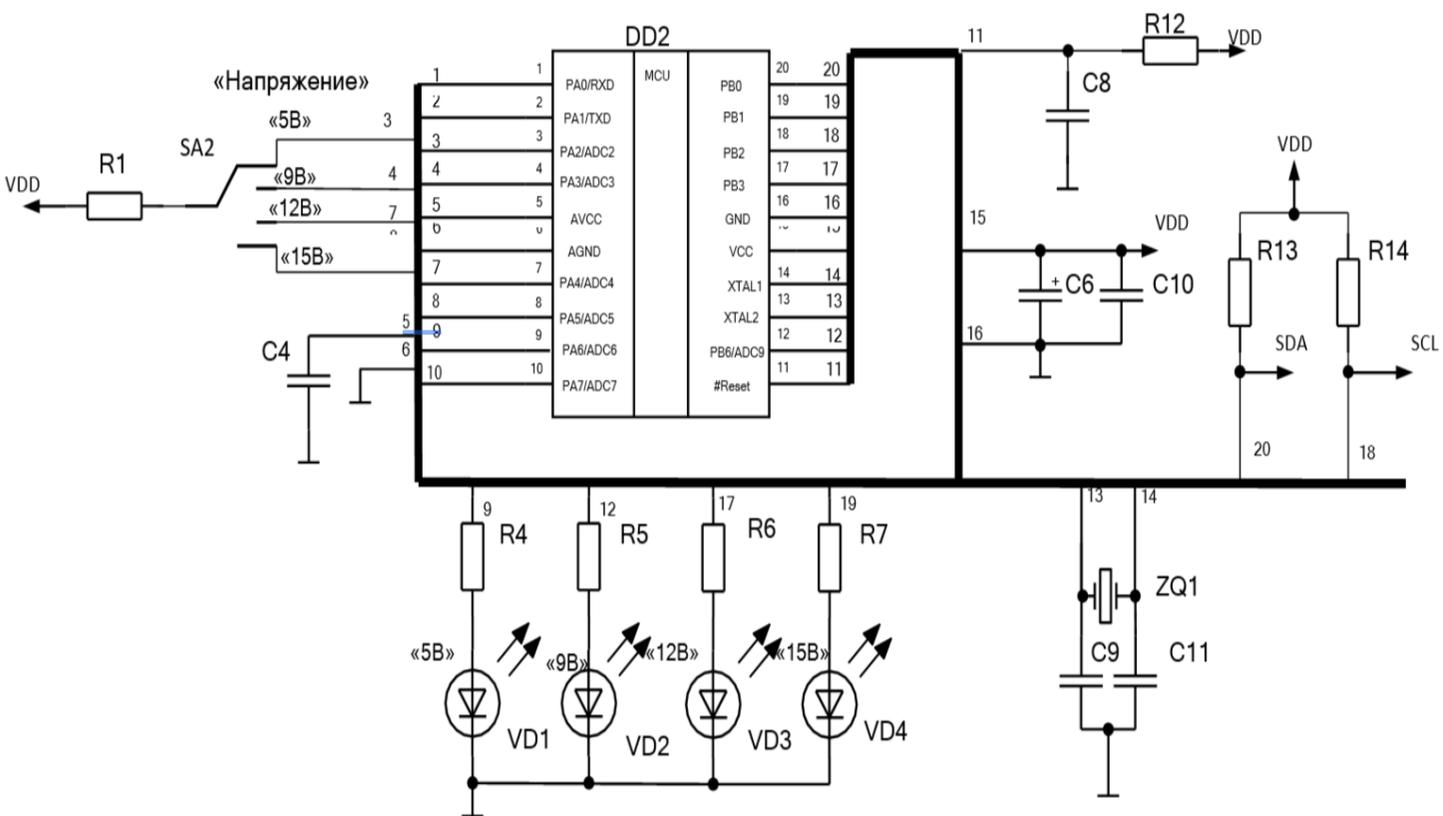


Рисунок 16 – Схема подключения микроконтроллера АТtiny87

Используемый схематический подход включает в себя выбор выходного напряжения через селекторный переключатель SA2, который подает напряжение питания VDD через резистор R1 на определенный вывод микроконтроллера. Это позволяет пользователю выбирать между выходными напряжениями 5, 9, 12 и 15 В. Светодиодные индикаторы на парах элементов R4VD1, R5VD2, R6VD3, R7VD4 используются для визуализации выбранного пользователем выходного напряжения.

Для стабилизации тактовой частоты работы микроконтроллера используется кварцевый резонатор ZQ1 вместе с конденсаторами C9 и C11, которые формируют внешнюю цепь тактового кварцевого генератора.

Схема также включает цепь сброса при подаче питания на элементах R12 и C8, а также фильтрующие конденсаторы C6 и C10 для сглаживания низкочастотных и высокочастотных пульсаций питающего напряжения соответственно.

Резисторы R13 и R14 подтягивают линии SDA и SCL к потенциалу источника питания.

Для стабилизации питания микросхемы и внешних элементов используется схема на стабилизаторе LM7805, что обеспечивает фиксированное напряжение.

Этот подход позволяет эффективно управлять и мониторить работу преобразователя напряжения, обеспечивая надежную и стабильную работу всей системы.

Схема на стабилизаторе LM7805 показана на рисунке 17.

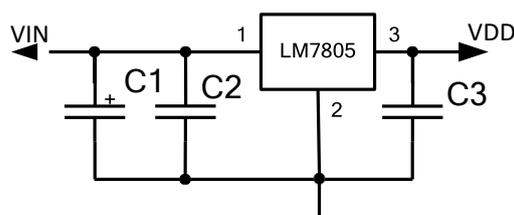


Рисунок 17 – Схема питающего стабилизатора напряжения.

Можно скомпоновать итоговую принципиальную схему и перейти к расчету и выбору элементов. Схема показана на рисунке 18.

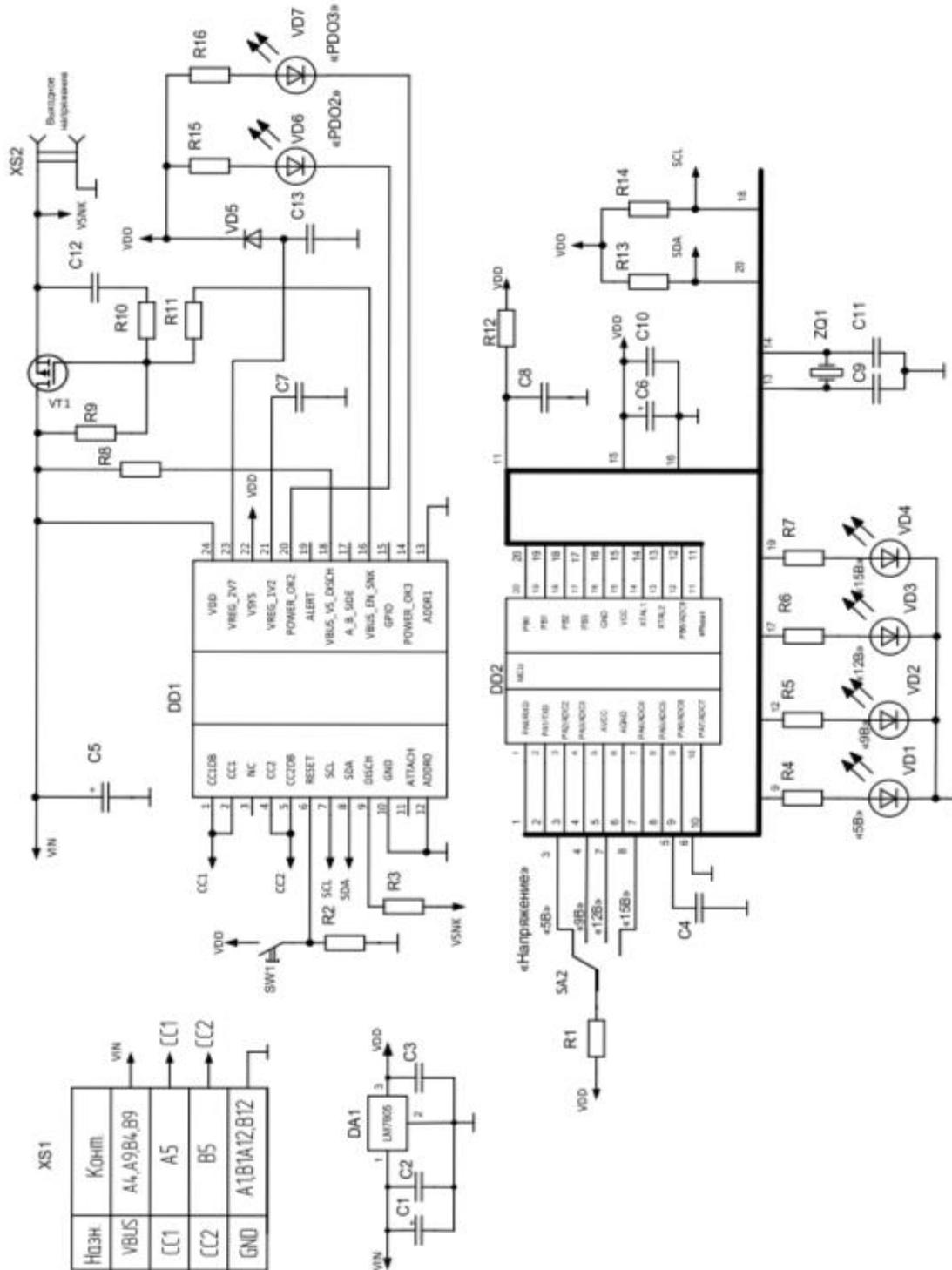


Рисунок 18 - Схема преобразователя напряжения USB PD.

2.3 Расчет и выбор элементов устройства

При выборе и расчете параметров элементов для схемы на рисунке 18 мы начнем с резисторов R1, R2, R3, R8, R13 и R14, которые используются для подтягивания потенциала выводов микросхемы к напряжению питания источника. Выбраны резисторы с номиналом 1 кОм, мощностью рассеяния 0.125 Вт, представленные в SMD исполнении NTM 0805-0,063-1 кОм±5%.

Для индикации выбранного режима мы используем зеленые SMD светодиоды с размерами 0805 (2x1.3 мм), световым потоком 360 мКд, углом излучения 130° и длиной волны 525 нм (Ultra Green).

Резисторы R4-R7, R15 и R16 устанавливаются для ограничения тока через светодиоды. При предположении, что напряжение логической единицы на выходах микроконтроллера составляет 4 В, выбраны резисторы, обеспечивающие ток через светодиоды 10 мА

$$UR = 4.0 - 2.1 = 1.9 \text{ В}$$

Тогда сопротивления резисторов должны быть больше

$$R = \frac{1.9}{10 \times 10^{-3}} = 190 \text{ Ом}$$

Для сборки схемы на рисунке 18 выбраны следующие элементы. Резисторы R4-R7 и R15-R16 имеют номинал NTM 0805-0,063-210 Ом±5%. Резистор R12 в цепочке сброса микроконтроллера выбран с номиналом NTM 0805-0,063-10 кОм±5%, обеспечивая напряжение уровня логической единицы на выводе Reset.

Ключевым транзистором VT1 выбран STL6P3LLH6, который поддерживает максимальный ток 7.6 А, максимальное напряжение 30 В и имеет сопротивление в открытом состоянии 29 мОм. Сопротивления R9, R10 и R11 выбраны в соответствии с рекомендациями производителя STUSB4500: 100 кОм, 100 Ом и 22 кОм соответственно, с использованием резисторов NTM 0805-0,063-100 кОм±5%, NTM 0805-0,063-100 Ом±5% и NTM 0805-0,063-22 кОм±5%.

В качестве стабилитрона VD5 принят модель ВАТ60А. Для конденсаторов С1, С5 и С6 выбраны электролитические поверхностного монтажа емкостью 10 мкФ и напряжением 50 В. Конденсаторы С2-С4, С7, С8, С10 и С12 выполнены из керамики СМД, с емкостью 0.1 мкФ и напряжением 50 В.

Переключатель SA2 выбран в виде 4-х полюсного галетного переключателя RS003-3-4-P-20-KQ (SR25P-1-3-4).

Выводы

В результате выполнения второго раздела работы были определены основные узлы и разработана структурная схема устройства. Определен способ взаимодействия с пользователем и разработан сценарий использования устройства. Была разработана электрическая принципиальная схема, включающая в себя следующие основные микросхемы: контроллер Power Delivery STUSB4500, микроконтроллер Microchip ATtiny87 и стабилизатор напряжения LM7805.

Также были выбраны источники излучения в виде светодиодов, стабилитрон и рассчитаны необходимые параметры резисторов и конденсаторов. Модели компонентов были выбраны на основании требований их работы в предложенной схеме. В качестве переключателя был выбран галетный тип для обеспечения удобства и надежности при выборе выходного напряжения, чтобы избежать ошибок при использовании кнопок или тумблеров.

Этот подход позволяет обеспечить надежную и эффективную работу устройства, соответствующую требованиям и сценариям использования, описанным в проекте.

3 Разработка конструкции печатной платы

Программный пакет Altium Designer 2021 [29] будет использован для разработки печатной платы устройства. Этот инструмент позволяет начать с создания электрической принципиальной схемы проектируемого устройства и затем перейти к размещению компонентов на печатной плате. С помощью заданных правил трассировки можно выполнить автоматическую или ручную (интерактивную) разводку дорожек на печатной плате. Altium Designer предоставляет возможность генерации чертежей трассировки как для одностороннего, так и для двухстороннего размещения проводящих дорожек и элементов.

Для изготовления печатной платы выбран стеклотекстолит фольгированный двухсторонний СФ-2-105Г-1,5. Геометрические размеры его частей представлены в таблице 11.

Altium Designer поддерживает разводку элементов как поверхностного, так и объемного монтажа, что позволяет эффективно реализовать проект и обеспечить его соответствие требованиям дизайна и функциональности.

Таблица 11 - Параметры стеклотекстолита фольгированного СФ-2-105Г-1,5

Марка	Электрические параметры фольгированного стеклотекстолита			
	Толщина изоляции d, мм	Толщина фольги h, мкм	Максимальная плотность тока J, А/мм ²	Удельное сопротивление изолятора ρ, Ом/м
СФ-2-105Г-1,5	1,5	105	4	1,2·10 ⁹

Ширину дорожки рассчитаем в соответствии с выражением 1.

$$l = \frac{I}{j \times h} \quad (1)$$

где I – потребляемый ток, J – максимальная плотность тока, h – толщина медной фольги, наклеенной на поверхность стеклотекстолита.

Для разработки печатной платы в программе Altium Designer 2021 с учетом заданных параметров были приняты следующие решения.

Максимальный ток по поверхности проводящего слоя ограничен 3А, что требует ширину дорожек не менее 1,5мм для обеспечения максимальной плотности тока 4А/мм². Для прохождения информационных сигналов ширина других дорожек должна быть не менее 0,05мм. Переходные отверстия между сторонами платы обеспечены металлизацией для надежного электрического соединения. Компоненты размещены таким образом, чтобы входной разъем USB и выходные клеммы находились на противоположных сторонах. Галетный переключатель устанавливается на корпусе устройства, а его соединение с платой осуществляется проводами. Результаты трассировки, отображенные на рисунках 19 и 20, показывают различную ширину дорожек в зависимости от их функционального назначения и соответствие требованиям надежности и функциональности устройства.

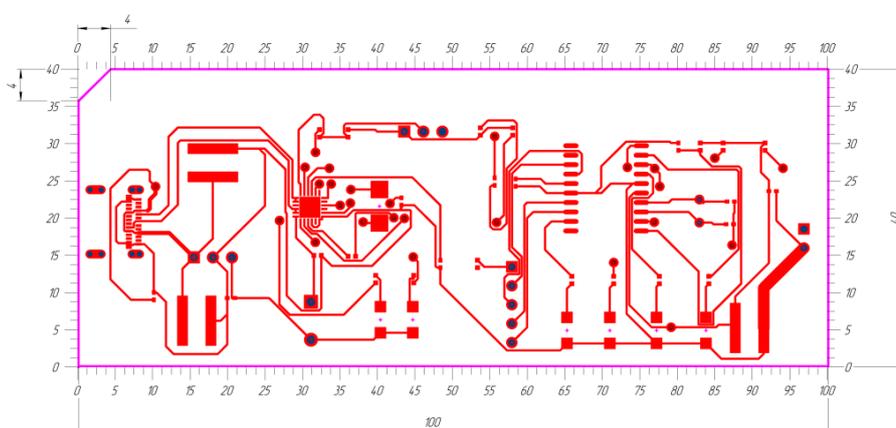


Рисунок 19 – Печатная плата вид сверху.

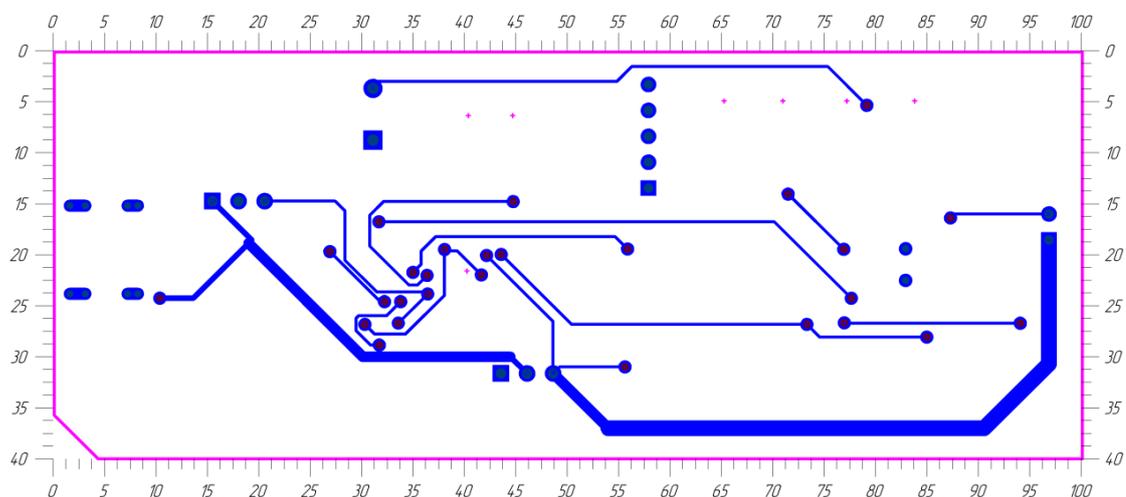


Рисунок 20 – Печатная плата вид снизу.

Изготовление печатной платы комбинированным способом начинается с нанесения рисунка на изначальный медный слой. Наносится слой лака, который защищает медь от воздействия раствора для травления. В результате травления медь вытравливается только в открытых местах под лаком, оставляя проводящие дорожки. Затем в стеклотекстолите производится сверление отверстий.

После выполнения этапа травления осуществляется электрохимическое осаждение проводящего слоя на переходные отверстия. Завершающим этапом является нанесение обозначений элементов и служебных надписей методом шелкографии.

Внешний вид расположения элементов на печатной плате продемонстрирован на рисунке 21.

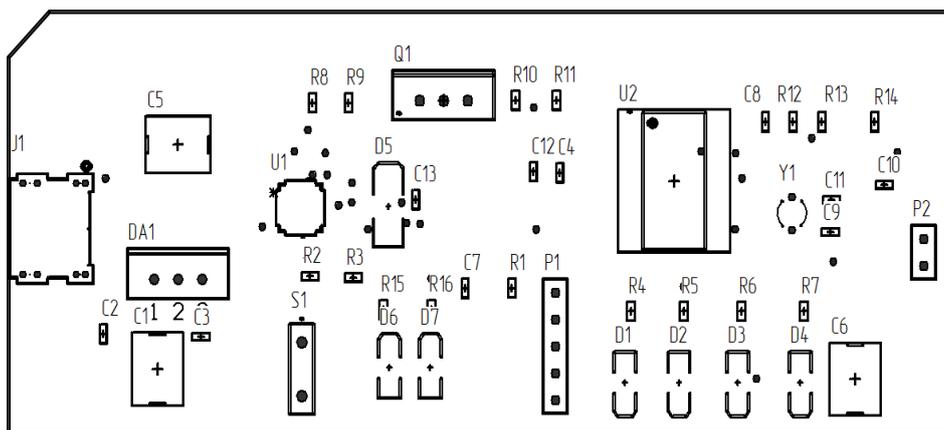


Рисунок 21 – Расположение элементов на плате преобразователя.

Выводы

В третьем разделе работы был проведён обзор программного пакета для разводки печатных плат, а также выполнена трассировка двусторонней печатной платы с односторонним расположением элементов. Программный пакет, использованный для разработки и трассировки, был подробно рассмотрен, выявлены его основные возможности и функции, включая возможность автоматической и ручной трассировки, управление правилами трассировки и создание чертежей.

Также в разделе была описана технология изготовления печатной платы, начиная с процесса нанесения рисунка на медный слой с использованием лака, защищающего медь от травления. После этого производится травление, в результате которого вытравливаются лишь открытые участки меди. Далее проводятся сверление отверстий в стеклотекстолите и осаждение электрохимическим способом проводящего слоя на переходных отверстиях. Завершающим этапом является нанесение шелкографических обозначений элементов и других служебных надписей на поверхность платы.

4 Экономическая часть

Для вычисления затрат на приобретение покупных изделий и материалов, воспользуемся данными, приведенными на сайтах розничных интернет магазинов.

Расчеты стоимости материалов выполним с учетом их порционности в продаже. Стоимость материалов свели в таблице 12.

Таблица 12 – Стоимость затрат на материалы для изготовления печатной платы

Наименование материала	Марка	ГОСТ, ТУ	Ед. имз.	Норма расхода, шт	Цена за единицу (руб.)	Затраты (руб.)
Флюс	Канифольный раствор на спирту	19113-84	шт.	1	70	70
Припой оловянно свинцовый	ПОС60	48-0220-57-93	шт.	1	55	55
Стеклотекстолит фольгированный двухсторонний	СФ-2-105Г-1,5	10316-78	шт.	1	100	100
Хлорное железо	FeCl ₃	6-00-05763458-129-91	шт.	1	247	247
Итого						472

Для расчета затрат на покупные изделия сведем все комплектующие в одну таблицу 13.

Таблица 13 - Стоимость комплектующих

Наименование изделия	Марка, размер	Количество, шт.	Цена за единицу (руб.)	Затраты (руб.)
Микросхемы	STUSB4500	1	800	800
	ATtiny87	1	200	200
	LM7805	1	120	120
Кнопка	1825027-8	1	17	17
Разъемы	1054500101	1	50	50
	53047-0510	1	35	35
Светодиод	FYLS-0805PGC	6	30	180
Резисторы	NTM 0805-0,063-1 кОм±5%.	6	0,2	1,2
	NTM 0805-0,063-210 Ом±5%.	4	0,2	0,8
	NTM 0805-0,063-10 кОм±5%.	1	0,2	0,2
Конденсаторы	CC0603JRNPO9BN101 - 100 пФ	2	0,6	0,6
	EEUFR1E101B - 10 мкФ	3	21	63
	GRM155R71C104KA88 D - 0,1 мкФ	8	13	39
Транзисторы	STL6P3LLH6	1	60	60
Стабилитрон	BAT60A	1	80	80
Переключатель	RS003-3-4-P-20-KQ	1	120	120
Итого				1764

В итоге суммарные - 2236 рублей.

Заключение

Выпускная квалификационная работа была успешно завершена с выполнением всех поставленных задач, связанных с разработкой преобразователя напряжения по стандарту USB Power Delivery. Преобразователь имеет возможность работы с входным напряжением стандарта USB Power Delivery и выходным напряжением 5, 9, 12 и 15 Вольт при выходном токе до 3 Ампер.

В пояснительной записке работы были рассмотрены основные ревизии стандарта USB Power Delivery, ключевые аспекты его работы и влияние на аппаратные и программные части устройств. Определены критерии для разработки преобразователя напряжения, на основе чего была разработана структурная схема устройства с определением основных узлов и их функций.

С учётом структурной схемы была разработана принципиальная схема преобразователя, включающая в себя интегральный контроллер Power Delivery STUSB4500, микроконтроллер ATtiny87 и стабилизатор напряжения 5В LM7805. Для каждой микросхемы были учтены необходимые элементы внешнего обвеса, включая цепи питания, тактовые и интерфейсные цепи.

Были произведены расчёты параметров элементов схемы и выбор компонентов из доступного ассортимента интернет-магазинов. Также были выбраны модели галетного переключателя, входного разъёма USB Type-C и выходных клемм, соответствующие требованиям проекта.

В рамках работы был проведён обзор программного продукта Altium Designer 2021 для трассировки печатных плат, выполнена разводка двусторонней печатной платы с односторонним расположением элементов, а также описаны особенности технологии изготовления печатных плат, включая процесс сверления отверстий, травления медного слоя и нанесения шелкографии для обозначений элементов.

Список используемой литературы

1. 100 ватт по USB или как работает Power Delivery [Электронный ресурс]: URL: <https://habr.com/ru/articles/166661/> (дата обращения 25.04.2024)
2. 4B5B [Электронный ресурс] : URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/4B5B>
3. AVR® Microcontroller Hardware Design Considerations. AN2519. DS00002519B // Application Note. Microchip Technology 2018
4. FYLS-0805PGC. Светодиод ультразеленый SMD 0805=2x1.3мм, 360мКд, 130°, 525нм (Ultra Green) [Электронный ресурс]: URL: <https://www.chipdip.ru/product0/8007848725>
5. Power Delivery Board - USB-C (Qwiic) Hookup Guide. [Электронный ресурс], URL: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/power-delivery-board--usb-c-qwiic-hookup-guide/all>
6. Res Thick Film 0805 100K Ohm 1% 0.125W(1/8W) [Электронный ресурс] : URL <https://www.chipdip.ru/product/0.125w-0805-100-kom-1> (дата обращения 22.05.2024)
7. STUSB4500. Datasheet. DS12499 - Rev 5 [Электронный ресурс]: URL: <https://static.chipdip.ru/lib/129/DOC032129293.pdf>
8. UMW 2N60. // Youtai Semiconductor Co., Ltd. [Электронный ресурс] URL: https://www.umw-ic.com/ru/product?category_key=mos-field-effect-tube&search_key=&page=8 (дата обращения 03.05.2024)
9. USB [Электронный ресурс]: URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/USB#USB_Power_Delivery (дата обращения 21.03.2024)
10. USB Power Delivery. Bob Dunstan, Richard Petrie. // USB Developer Days 2019 – Taipei, Taiwan November 20, 2019
11. USB type C: новые возможности и принцип работы порта [Электронный ресурс], URL: <https://2shemi.ru/usb-type-c-novye-a-vozmozhnosti-porta/>

12. Варианты аппаратной реализации USB Type-C, или Когда не требуется Power Delivery [Электронный ресурс], URL: <https://habr.com/ru/companies/sberdevices/articles/522344/>
13. Изьюрова Г.И. и др. «Расчет электронных схем» М.: Высшая школа, 1987г. – 335с., ил.
14. Когда используется Power Delivery, и что происходит при установлении соединения между блоком питания и устройством [Электронный ресурс]: URL: <https://habr.com/ru/companies/sberdevices/articles/571362/>
15. Конденсатор керамический 56нФ 100В [Электронный ресурс] URL: <https://www.chipdip.ru/product/grm31mr72a563ka011> (дата обращения 11.05.2024)
16. Конденсатор электролитический ECAP 100/50V 0812 [Электронный ресурс] : URL: <https://www.chipdip.ru/product0/8007874325> (дата обращения 08.05.2024)
17. Микросхемы контроллеры для USB-C [Электронный ресурс], URL: <https://2shemi.ru/mikroshemy-kontrollery-dlya-usb-c/>
18. Переключатель галетный 20KQ [Электронный ресурс], URL: <https://www.chipdip.ru/product/rs003-3-4-p-20-kq>
19. Платы ACELEX PDC004 со статичным PD-триггером на 9В, 12В и 20В [Электронный ресурс], URL: <https://mysku.club/blog/aliexpress/92151.html>
20. Попов В.Н. Расчет электронных устройств: учебно-метод. пособие / В.Н. Попов. – Кострома: Изд-во Костром. гос. технол. ун-та, 2009. - 18 с.
21. Резистор GRM2165C1H222FA01D [Электронный ресурс] : URL: <https://www.chipdip.ru/product/grm2165c1h222fa01d> (дата обращения 15.05.2024)
22. Резистор, толсто пленочный RC1206FR-071KL [Электронный ресурс]

- URL: <https://www.chipdip.ru/product/0.25w-1206-1-kom-1> (дата обращения 20.04.2024)
23. Резисторы RC1206JR [Электронный ресурс] URL: <https://www.chipdip.ru/product/0.25w-1206-27-om-5> (дата обращения 20.05.2024)
24. Резисторы постоянные RC1206FR-0710KL [Электронный ресурс] URL: <https://www.chipdip.ru/product/0.25w-1206-10-kom-1> (дата обращения 15.05.2024)
25. Резисторы постоянные RC1206FR-0710KL [Электронный ресурс] URL: <https://www.chipdip.ru/product/0.25w-1206-10-kom-1> (дата обращения 15.05.2024)
26. Руководящий документ РД50-708-91 «Инструкция. Платы печатные. Требования к конструированию». Госстандарт СССР 1992г.
27. Светодиод GNL-3012-GD [Электронный ресурс] URL: <https://www.chipdip.ru/product/gnl-3012gd-green> (дата обращения 15.05.2024)
28. Стабилитрон-диод Зенера BZV85C15V0 (1N4744) DO-41 [Электронный ресурс] URL: <https://www.chipdip.ru/product0/8001911814> (дата обращения 20.05.2024)
29. Суходольский В. Ю. Altium Designer: проектирование функциональных узлов РЭС на печатных платах — СПб.: БХВ-Петербург, 2010. — 480 с.: ил. — (Учебное пособие)
30. Транзистор 2SC3852, тип NPN [Электронный ресурс] URL: <https://www.chipdip.ru/product/2sc3852a> (дата обращения 15.05.2024)
31. Чип-конденсатор керамический, номинал 0.47мкФ [Электронный ресурс] URL: <https://www.chipdip.ru/product/grm31mr71h474k> (дата обращения 20.05.2024)

32. Чип-конденсатор керамический, номинал 2.2пФ, напряжение 50В
SMD03216C2[1206] [Электронный ресурс] : URL:
<https://www.chipdip.ru/product0/8008631044> (дата обращения 20.05.2024)