

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ .....	4
<i>1 Основные спецификации USB .....</i>	<i>4</i>
1.1 Характеристики USB 1.0 .....	4
1.2. Характеристики USB 2.0 .....	4
1.3 Характеристики USB 3.0 .....	5
2 Принцип работы USB.....	5
3 Перевод High Speed в Full Speed.....	7
4 Принципиальная электрическая схема, позволяющая прерывать передачу данных через шину USB.....	8
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	10
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	11
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	12

## **ВВЕДЕНИЕ**

Цель– изучить принцип работы интерфейса USB различных версий, провести исследование в области перевода режима работы HighSpeed в FullSpeed и приобрести навыки построения принципиальных электрических схем.

Задачи прохождения практики:

- Изучить принцип работы интерфейса USB 1.0 / 2.0 / 3.0;
- Изучить возможность построения аппаратного комплекса, позволяющего перевести интерфейс USB из режима работы HighSpeed в режим FullSpeed;
- На основе изученных данных построить электрическую принципиальную схему устройства, позволяющего управлять передачей данных по интерфейсу USB.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В ходе работы был подготовлен отчет о проделанной работе. Основным объектом изучения стал интерфейс USB. В отчете подробно описаны особенности работы универсальной последовательной шины разных версий, способы перевода режима работы из высокоскоростной в полную, а также основные этапы построения схемы, реализующей устройство, управляющее передачей информации через шину USB.

### 1 Основные спецификации USB

USB (Universal Serial Bus – универсальная последовательная шина) – последовательный интерфейс, обеспечивающий соединение цифровых устройств между собой. Существует много различных спецификаций USB, однако основными являются USB 1.0, USB 2.0, USB 3.0 [1]. Для обеспечения работы устройств с ранними версиями USB разрабатывалась таким образом, чтобы каждое следующее поколение поддерживало предыдущее, поэтому существуют универсальные стандарты, характерные для каждой версии. Например, для всех серий максимальный ток, потребляемый периферийным устройством – 500 мА, а напряжение питания – 5 В.

#### 1.1 Характеристики USB 1.0

В 90-х годах был выпущен базовый протокол подключения устройств USB 1.0, который заменил последовательные и параллельные порты. Основной особенностью интерфейса USB 1.0 является способность к поддержке двух режимов работы: Full Speed, скорость передачи данных составляет до 12 Мбит/с, и Low Speed, максимальная скорость передачи данных достигает 1.5 Мбит/с. Однако в настоящее время первая версия считается устаревшим и найти ее сейчас практически невозможно.

#### 1.2. Характеристики USB 2.0

Интерфейс Universal Serial Bus получил широкое распространение с появлением второго поколения. USB 2.0 поддерживает несколько типов разъемов: типа А, mini, micro и другие. Визуально первая и вторая серии не отличаются, однако скорость передачи данных через USB 2.0 может достигать 480 Мбит/с –

High Speed. Второе поколение имеет четыре контакта, соответствующие четырем проводам в кабеле: красный (Vcc), белый (D-), зеленый (D+) и черный (GND). Красный провод отвечает за питание 5 В с максимальной силой тока 500 мА. Белый и зеленый – образуют витую пару и обеспечивают двунаправленную передачу данных, а черный провод необходим для заземления.

### **1.3 Характеристики USB 3.0**

Третье поколение USB появилось лишь в начале 2000-х. USB 3.0 обеспечивает максимальную скорость передачи информации, на порядок большую чем USB 2.0, она составляет 5 Гбит/с, а также отличается от предыдущих выпусков увеличенной максимальной силой тока – 900 мА. Для передачи высокоскоростных Super Speed сигналов в USB 3.0 было добавлено еще четыре линии – две витые пары – и один контакт земли (GND\_DRAIN), что сделало устройство толще. Добавленные линии в разъемах USB 3.0 расположены в другом контактном ряду отдельно от старого. Для идентификации третьей версии USB разъемы принято изготавливать из пластмассы синего цвета, однако, не все производители это соблюдают [2].

## **2 Принцип работы USB**

Все операции по передаче данных по шине USB инициируются хостом. USB-устройства могут только реагировать на команды от хоста, но сами начать обмен данными не могут.

Если к хосту не подключено устройство, то линии D- и D+ через резисторы номиналом 15 кОм заземлены. В случае подключения устройства для идентификации скорости его работы используется резистор 1.5 кОм, подтягивающий одну из сигнальных линий к высокому сигнальному уровню +3.3 В. Для устройств Low Speed подтягивается линия D-, для High Speed и Super Speed – линия D+.

Данные по линии USB передаются битовыми последовательностями с помощью дифференциального сигнала. Для передачи логической «1» необходимо повысить напряжение на линии D+ выше +2.8 В, а на D- понизить менее +0.3 В. В случае передачи логического «0» наоборот – на линии D+ напряжение

понижают менее чем 0.3 В, а на D– повышают более чем 2.8 В. Для передачи данных используется принцип кодирования NRZI (Non Return to Zero Invertive) [3]. Инверсное кодирование без возврата к 0 заключается в том, что при передаче нулевого бита состояние сигнала на шине изменяется на противоположное, в случае передачи единицы – оно не меняется (см. Рисунок 3.1).

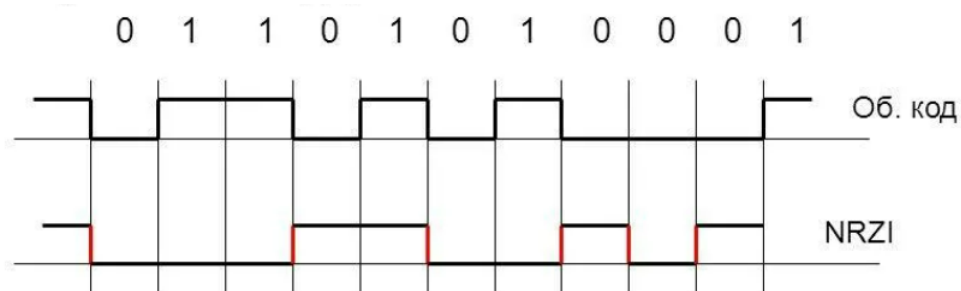


Рисунок 3.1 - Кодирование по принципу NRZI

Для исключения слишком длинной последовательности единиц происходит битстаффинг (bit stuffing), заключающийся в автоматическом добавлении 0 после шести единиц.

Информация по шине USB передается кадрами, состоящими из транзакций и отправляющимися через равные промежутки времени. Каждый кадр представляет собой пакет SOF (Start Of Frame), последовательность транзакций и пакет EOF (End Of Frame), определяющий временной интервал в конце каждого кадра. Транзакция состоит из Token, Data и Status пакетов. Token-пакет содержит в себе информацию об адресе устройства USB, номере конечной точки, для которой предназначена данная транзакция, и типе транзакции (IN или OUT). Data-пакет передает данные от хоста или конечной точки. Status-пакет предназначен для проверки корректной передачи информации.

Для передачи битов используется дифференциальный сигнал между D- и D+. Дифференциальный сигнал, при котором разница между D- и D+ больше 200 мВ при уровне напряжения на линии D+ > 2 В называется Diff1. Если же D- > 2 В, то такой дифференциальный сигнал называется Diff0. Состояние, при котором на обеих линиях низкий уровень напряжения относительно GND (D+ < 0.8 В и D- < 0.8 В) называется SEO (single-ended zero). Состояния шины кодируют

сигналы Diff0 и Diff1, которые называют J (data J state) и K (data k state) соответственно. Для Low Speed состояние J соответствует сигналу Diff0, а состояние K – сигналу Diff1. Для Full Speed и High Speed наоборот- J соответствует сигналу Diff1, K – сигналу Diff0. Состояние покоя шины для Low Speed, Full Speed соответствует длительному состоянию J, а для High Speed – состоянию SE0.

Начинается передача данных с перехода из состояния покоя шины в состояние K. Для синхронизации первым всегда передается нулевой бит, дальнейшая передача данных осуществляется согласно NRZI кодированию. Конец пакета для Low Speed и Full Speed обозначается с помощью сигнала SE0, а для High Speed сигналом конца пакета случит специальная последовательность бит.

### **3 Перевод High Speed в Full Speed**

USB 3.0 поддерживает стандарт USB 2.0 и при этом осуществляет передачу данных в режиме High Speed. В свою очередь USB 2.0 производит обмен данными со скоростью Full Speed. Значит возможно с помощью аппаратных средств перевести режим работы High Speed в Full Speed.

Изначально каждое устройств High Speed работает как Full Speed, только после согласование работы на высокой скорости оно переходит в режим High Speed. При подключении устройства, поддерживающего как High Speed, так и Full Speed сначала линия D+ подтягивается до +3.3 В с помощью резистора 1.5 кОм. После хост подает сигнал о состоянии шины RESET, заземляя сигнальные линии с помощью драйверов 45 Ом на 10 или 50 мс. Если устройство работает в режиме Full Speed, то оно будет ожидать окончания RESET. Если же устройство может работать со скоростью до 480 Мбит/с, то на линию D-отправится импульс с амплитудой 0.8 В под названием «Chirp-K» (см. Рисунок 4.1). По окончании импульса, если хост поддерживает High Speed, то он возвращает его же, но уже в течении 50 мкс, а потом напряжение на линии D+ возрастает до 3.3 В, образуя на 50 мкс «Chirp-J». После трех чередующихся сигналов K и J устройство распознает, что хост поддерживает работу в High Speed и само переключается на высокоскоростной режим. Амплитуда сигнала падает до 0.4 В, а после хост продолжает работу с пакетами в режиме High Speed.

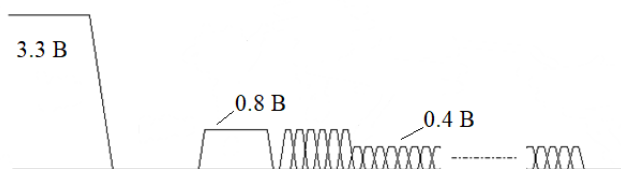


Рисунок 4.1 - Согласование работы в режиме High Speed

Поскольку согласование режима работы в High Speed осуществляется с помощью импульса 0.8 В, то, если понизить это напряжение до 0.8 В, попытки согласования не будет. В таком случае устройство продолжит работать в режиме Full Speed. Это можно сделать за счет включения в линию D- диодов с учетом двунаправленной передачи данных через линии данных. Также для блокировки согласования работы в режиме High Speed существуют USB-изоляторы, которые обеспечивают работу устройства на полной скорости.

Каждое следующее поколение USB поддерживает предыдущее. Максимальную скорость Full Speed для передачи информации поддерживает USB версий 1.0 и 1.1. Поэтому одним из способов перевода высокой скорости в полную служит использование концентратора USB 1.1.

#### **4 Принципиальная электрическая схема, позволяющая прерывать передачу данных через шину USB**

В настоящий момент не существует механизма, позволяющего прерывать передачу данных через USB без извлечения периферийного устройства. Разработанная принципиально-электрическая схема обеспечивает прерывание линии питания Vbus и линий передачи информации D+ и D- с помощью запрограммированного микроконтроллера ESP32.

Принципиальная схема устройства, позволяющего прерывать передачу данных через интерфейс USB представлена в приложении см. Рисунок А.3. Замыкание, размыкание электрической цепи осуществляется с помощью ключей. Для бесперебойной работы схемы важно подобрать быстродействующие ключи, причем должны соблюдаться следующие критерии: максимальный ток стока должен быть больше 500 мА, пороговое напряжение открытия транзистора должно быть много ниже 3.3 В, а максимальное напряжение затвор-исток – выше

3.3 В. Для достижения соответствующих требований был использован полевой транзистор р-типа с логическим управлением IRF7406 [4]. Разрыв линии питания осуществляется с помощью данного транзистора, работающего в ключевом режиме. Управление им происходит за счет запрограммированного микроконтроллера ESP32, выдающей на вход D13 напряжение либо 3.3 В, либо 0 В. В первом случае линия питания разомкнута, транзистор закрыт, во втором – замкнута, транзистор открыт. Резистор R1 является токоограничивающим, он необходим для уменьшения тока, потребляемого затвором в момент открытия. Без него транзистор может выйти из строя. Поскольку транзистор управляется полем, на его затворе могут наводиться помехи от электромагнитных полей и скапливаться излишний заряд [5]. Чтобы устранить такие проблемы, используется заземленный резистор R2 с высоким сопротивлением.

Прерывание передачи данных осуществляется с помощью двунаправленного аналогового ключа SN74HC4066D [6]. В зависимости от подаваемого напряжения с выходов контроллера осуществляется управление передачей данных через D+ и D-. Ключ при подаче на управляющий выход напряжения 3.3 В открыт, в случае нулевого напряжения – закрыт.



## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В результате проведенной работы были достигнуты поставленные задачи и получены следующие результаты. В ходе работы были изучены особенности работы различных версий универсальной последовательной шины USB, проведено исследование в области перевода высокой скорости в полную и предложены варианты программно-аппаратной реализации данной задачи. С помощью полученных данных был разработан программно-аппаратный комплекс, позволяющий прерывать передачу данных и разрывать линию питания USB.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Учебник общения 05\_USB Интерфейс, стандартный и основной принцип [Электронный ресурс] // Russianblogs.com – URL: <https://russianblogs.com/article/59652312246/> (дата обращения: 04.07.2023).
- 2 USB 2.0 vs 3.0: What is the Difference and Which One Is Better [Электронный ресурс] // partitionwizard.com – URL: <https://www.partitionwizard.com/partitionmagic/usb-2-0-vs-usb-3-0-006.html> (дата обращения: 06.07.2023).
- 3 USB Universal Serial Bus Specification Универсальная последовательная шина [Электронный ресурс] //softelectro.ru URL: – <http://www.softelectro.ru/usb.html#M2.1> (дата обращения: 08.07.2023).
- 4 IRF7406TRPBF, Транзистор P-MOSFET 30В 5.8А [SOIC-8] [Электронный ресурс] // chipdip.ru – URL: <https://www.chipdip.ru/product/irf7406trpbfineon?ysclid=llzgk8gap7722392448> (дата обращения: 11.07.2023).
- 5 Ключ на полевых транзисторах [Электронный ресурс] // chipinfo.pro – URL: [https://chipinfo.pro/elements/transistors/general/mosfets\\_as\\_key.shtml](https://chipinfo.pro/elements/transistors/general/mosfets_as_key.shtml) (дата обращения: 11.07.2023).
- 6 SN74НС4066D, Четыре двунаправленных ключа [SO-14] [Электронный ресурс] // chipdip.ru – URL: <https://www.chipdip.ru/product/sn74hc4066d> (дата обращения: 11.07.2023).

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

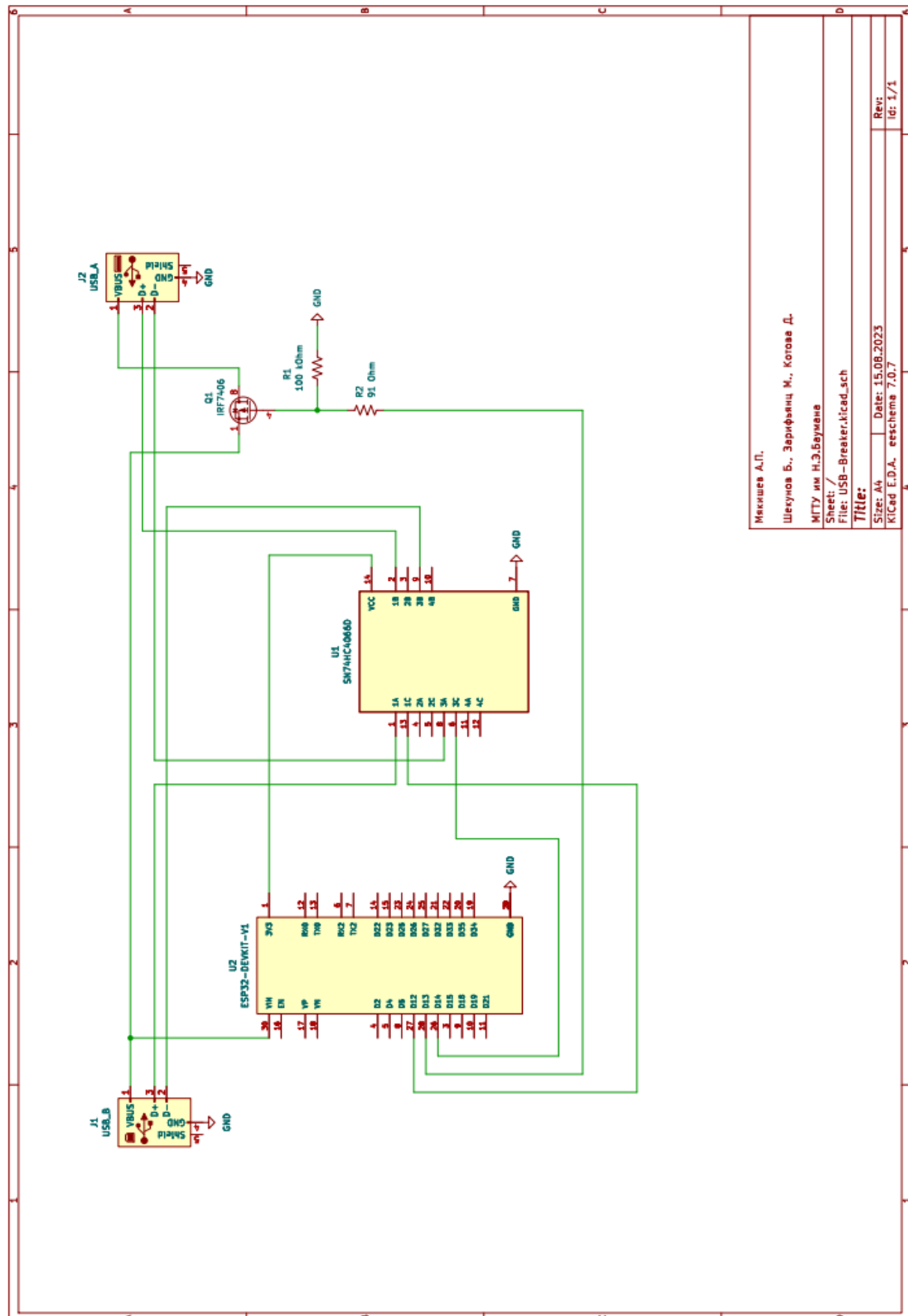


Рисунок 1 - Принципиальная электрическая схема устройства, управляющего передачей данных через интерфейс USB