

ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНОМИК»

Московский институт электроники и математики им. А.Н. Тихонова

Степушин Кирилл Алексеевич

РАЗРАБОТКА ОТЛАДЧИКА С МОНИТОРИНГОМ
ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

Выпускная квалификационная работа – магистерская диссертация
по направлению 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»
студента образовательной программы магистратуры
«Интернет вещей и киберфизические системы»

Студент

Рецензент
к.т.н., доцент

И.О.Фамилия

Научный руководитель
приглашенный преподаватель

И.О.Фамилия

Консультант
приглашенный преподаватель

И.О.Фамилия

Москва 2024

Оглавление

1	Введение	2
2	Описание структуры устройства	4
2.1	Подсистема управления	4
2.2	Подсистема питания	5
2.3	Подсистема измерения энергопотребления	6
2.4	Подсистема преобразования уровней	8
2.5	Подсистема Ethernet	8
2.6	Структурная схема устройства	9
3	Описание принципа работы подсистемы питания	11
3.1	Описание схемотехнического решения	11
3.2	Расчет элементов схемы	11
3.3	Результаты тестирования	11
	Список используемой литературы	12

Глава 1

Введение

Независимо от стараний разработчика или сложности проекта, большая часть времени разработки будет потрачена на то, чтобы убедиться, что устройство работает правильно, или – что наиболее вероятно – разобраться, почему устройство работает не так, как ожидалось. Отладчик – самый мощный инструмент в наборе инструментов разработчика, позволяющий напрямую взаимодействовать с процессором, задавать точки останова, пошагово управлять потоком выполнения инструкций и проверять значения регистров. [1]

Для устройств «интернета вещей» очень важно знать и отслеживать энергопотребление, ведь обычно такие устройства питаются от батарейки и каждое ненужное действие уменьшит срок службы. Мониторинг энергопотребления позволяет понять энергоэффективность каждого сенса связи, что позволит выбрать наиболее подходящий интерфейс и протокол передачи данных.

Об актуальности возможности мониторинга энергопотребления для отладчика говорит количество измерительных устройств на рынке. Характеристики основных из них приведены в таблице 1.0.1.

Таблица 1.0.1. Сравнение характеристик измерительных устройств

Устройство	Joulescope	Otii Arc	NanoRanger	Current Ranger
Диапазон тока	от -1 А до 3 А	от 0 до 2,5 А	от 1 нА до 800 мА	от -1,65 А до 3 А
Разрешение	1 нА	десятки нА	до 10 пА	до 1 пА
Погрешность	до 0,3%	до 0,1%	до 0,3%	до 0,1%
Цена	800 \$	700 \$	220 \$	120 \$

Перед проектированием отладчика с возможностью мониторинга энергопотребления IoT-устройств следует определиться с требованиями, предъявляемыми к отладчику. Для этого в качестве примера рассмотрим «усредненный» паттерн поведения устройства с BLE, одной из самых популярных технологий беспроводной передачи данных интернета вещей, у которого с периодичностью в несколько десятков мс повторяется такой цикл: спящий режим с токопотреблением единицы мкА, далее устройство просыпается, в этот момент энергопотребление составляет единицы мА, время просыпания – десятки мкс, далее происходит сеанс связи, который начинается с передачи, с токопотреблением примерно десятки мА и длительностью передачи «пустого» пакета величиной 27 байт около 200 мкс, и продолжается ожиданием ответа длительностью в среднем 150 мкс, после сеанс связи завершается приемом, при котором токопотребление составляет единицы-десятки мА длительностью 200 мкс. Данный паттерн поведения, при известной максимальной скорости передачи и приема в 2 Мбит/с для Bluetooth версии 5, позволяет оценить необходимую полосу пропускания подсистемы измерения, её разрешение по измеряемому току и скорость переключения диапазона измеряемых токов.

Для обеспечения конкурентноспособности отладчика, остальные характеристики можно определить из таблицы 1.0.1, а так же из анализа типичной используемой элементной базы.

Резюмируя вышесказанное, можно ориентироваться на следующие требования к разрабатываемому устройству:

- полоса пропускания – 200 кГц
- напряжение питания отлаживаемых устройств – от 1,8 В до 12 В
- погрешность измерения – до 0,5%
- диапазон тока – от 3,2 мА до 2 А
- разрешение – 0,16 мкА
- время переключения диапазонов - десятки мкс
- себестоимость устройства – 5000 руб.

Данные требования, предъявляемые на этапе начального анализа, в ходе более детальной проработки, изучения и тестирования в дальнейшем будут уточнены в соответствии с полученными результатами.

Глава 2

Описание структуры устройства

2.1 Подсистема управления

Проектирование любого устройства начинается с определения структуры, которая в дальнейшем поможет составить его структурную схему. А главным компонентом любого устройства является его подсистема управления.

Самые популярные подсистемы управления отладчиками базируются на микроконтроллерах, которые поддерживает основные отладочные интерфейсы – JTAG и SWD. В качестве типичного «отладочного» микроконтроллера было решено использовать STM32F107VCT6 из-за его следующих преимуществ [2]:

- *Хорошо проработанная документация* – компания STMicroelectronics является одним из лидеров на рынке микроконтроллеров, во многом благодаря замечательной документации, которая позволяет создавать на базе их решений проработанные и, по большей части, предсказуемо работающие проекты. Важно быть уверенным, что при разработке устройства микроконтроллер не начнет показывать «недокументированные» возможности и различные баги, и репутация компании STMicroelectronics позволяет быть в этом уверенным. Антипримером может служить компания Espressif, чьи многочисленные ошибки, выявленные после выпуска очередного микроконтроллера, иногда выливаются в довольно объемные errata документы.
- *Библиотеки* – наличие удобных и, самое главное, пригодных в использовании библиотек позолит значительно ускорить время разработки. STM32F107VCT6 построена на базе ядра Cortex-M3, для которого написано большое количество популярных библиотек, таких как HAL, LL, CMSIS, libopenm3 и другие.
- *Большое количество готовых решений* – некоторые из функций разрабатываемой системы могли быть реализованы ранее индивидуальным разработчиком, сообществом или предприятием. Разработку всегда стоит начинать с поиска готовых или похожих решений, которые, возможно, уже были разработаны и ждут интеграции в проект. Используемое в STM32F107VCT6 ядро сильно повышает шансы найти что-то готовое или то, что сильно ускорит и упростит разработку устройства, позволяя не писать отдельные модули с «нуля». [1]
- *Доступность* – в «санкционную» эпоху доступность компонента может стать решающим фактором при выборе. Благодаря своей массовости микроконтроллеры серии STM32 можно легко найти как у дистрибьюторов ориентированных на крупные компании, так и на тех, кто работает с физическими лицами, что важно в рамках студенческой дипломной работы.

2.2 Подсистема питания

Невозможно представить устройство без подсистемы питания, которая является его «сердцем», обеспечивая электроэнергией все остальные подсистемы. Плохо спроектированная система питания может стать большой проблемой, вплоть до вывода из строя отдельной подсистемы или устройства в целом.

В качестве питания для отладчика была выбрана связка из PoE + DC-DC преобразователь, выполненный по технологии изолированный fly-back, с возможностью подключения внешнего питания.

PoE (Power over Ethernet) — это технология передачи удаленным Ethernet-устройствам по витой паре электропитания вместе с данными. Данная технология позволяет питать подключенные устройства, к которым невозможно или нежелательно проводить кабели для питания.

Технология PoE была выбрана по причине удобства её использования в устройствах с передачей данных по Ethernet. Это избавляет от необходимости подключения дополнительных проводов, что делает отладчик более мобильным. С другой стороны необходимо сохранить возможность подключения питания более традиционными способами, например через внешний блок питания.

Характеристики различных стандартов PoE представлены в таблице 2.2.1.

Таблица 2.2.1. Основные характеристики стандартов PoE

Характеристика/Стандарт	802.3af	802.3at	802.3bt	802.3bt
Выходная мощность, Вт	15,4	30 А	60	90
Мощность на устройстве, Вт	12,95	25,5	51	71,3
Выходное напряжение на источнике, В	44–57	50–57	50–57	52–57
Напряжение на приемнике, В	37–57	42,5–57	42,5–57	41,1–57
Максимальный ток в витой паре, мА	350	600	600	960

Для понимания какой стандарт PoE будет необходимо реализовать в отладчике нужно проанализировать энергопотребление всего устройства.

Максимальная потребляемая мощность микроконтроллера STM32F107VCT6 в корпусе LQFP64 составляет 444 мВт [2], ток потребления выбранного контроллера PoE до 50 мА [3], усредненный ток потребления измерительного операционного усилителя – до 5 мА, потребляемая мощность выбранной РНУ микросхемы до 270 мВт [4]. С учетом усредненного КПД импульсного DC-DC преобразователя, который составляет 70 %, можно рассчитывать на то, что мощности 12,95 Вт, которую обеспечивает стандарт 802.3af, должно хватить.

Для маломощных источников питания часто используют fly-back-конверторы, они же обратноходовые преобразователи. Преимуществами данного решения являются [6]:

- Сравнительная простота
- Малое количество используемых элементов
- Дешевизна
- Мало чувствителен к короткому замыканию на выходе

Использование же изолированного fly-back преобразователя дает гальваническую развязку по питанию, что защищает пользователя в случаях случайного касания разъемов, к которым в отладчике планируются свободный доступ.

2.3 Подсистема измерения энергопотребления

Для измерения тока используется метод снятия напряжения с шунта, который представляет собой резистор известного сопротивления с малым отклонением номинала, который обычно составляет менее 1%, с помощью операционного усилителя, включенного по схеме дифференциального усилителя. Существует два основных способа подключения измерительной цепи – со стороны низкого или высокого уровня. В ходе производственной практики были рассмотрены и изучены схемы подключения измерительной цепи по схеме верхнего плеча, которая представлена на рисунке 2.3.1 и по схеме нижнего плеча, которая представлена на рисунке 2.3.2.

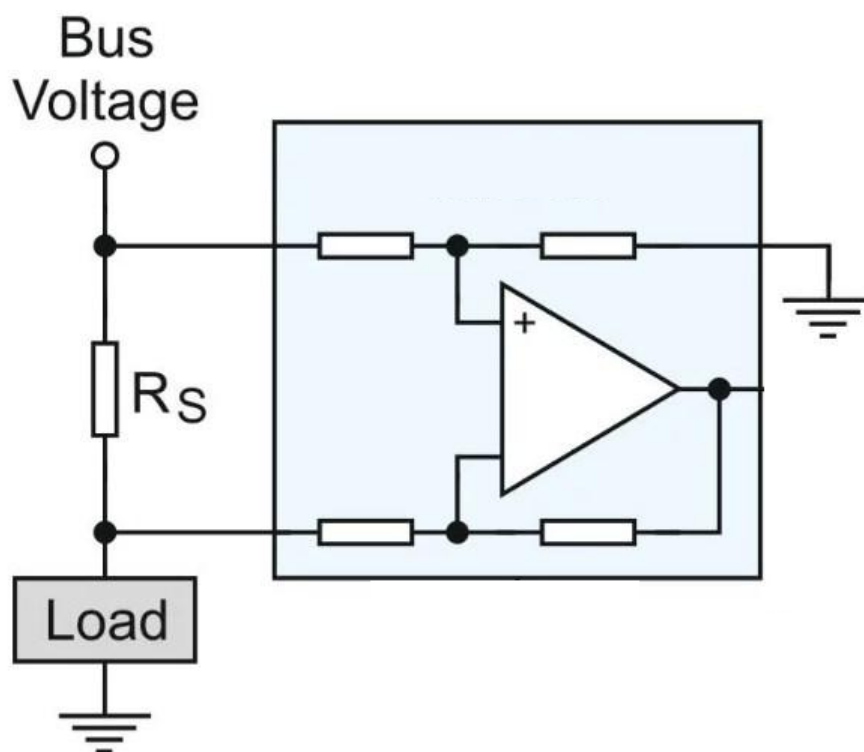


Рис. 2.3.1. Схема верхнего плеча

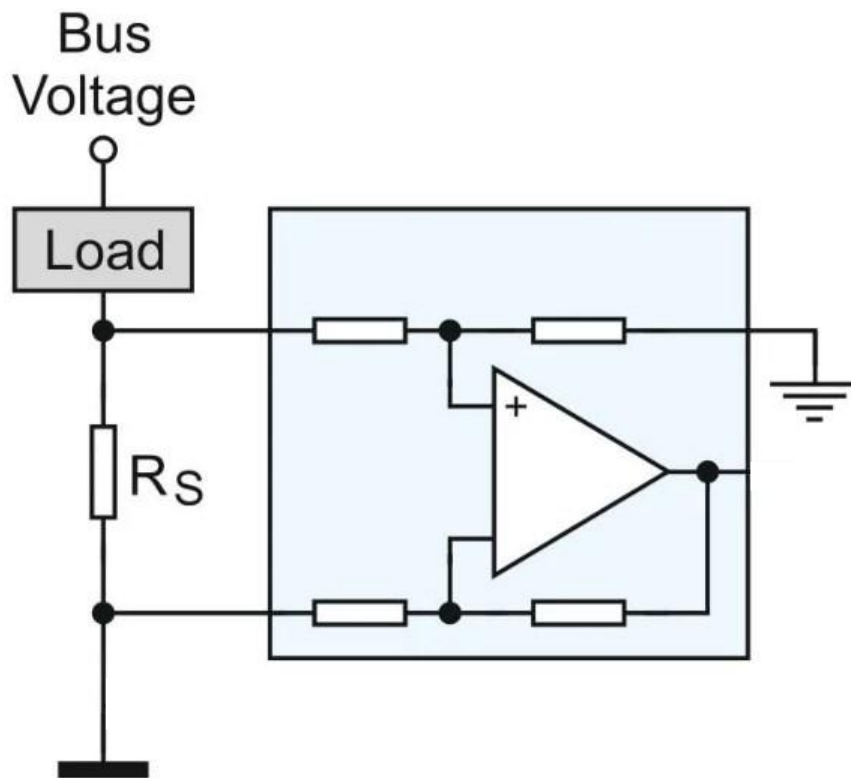


Рис. 2.3.2. Схема нижнего плеча

Измерение тока в конфигурации нижнего плеча заключается в размещении измерительного элемента между нагрузкой и землей. Этот тип решения довольно легко реализовать, поскольку напряжение на измерительном элементе измеряется по отношению к массе цепи. Усилитель работает с низкими значениями напряжения (порядка милливольт по отношению к массе схемы), что значительно упрощает подбор компонентов и снижает его стоимость.

Основным недостатком этого метода является то, что нагрузка больше не связана напрямую с массой. Минусовой вывод нагрузки имеет потенциал на несколько сотен милливольт выше земли, а лучше держать это значение меньше 100 мВ – эта разница примерно равна падению напряжения на шунтирующем резисторе и канале полевого транзистора. Отсутствие прямого соединения с землей может стать проблемой если в другом месте цепи произойдет короткое замыкание, например, если проводящий компонент в устройстве коснется металлического корпуса. Однако для нашего устройства это не будет являться проблемой, так как такой вариант развития событий не предусмотрен.

В случае работы с малыми сигналами довольно большую роль играет входное напряжение смещения усилителя. Чем меньше значение этого параметра, тем выше точность измерения.

Несмотря на эти недостатки, измерение тока на стороне низкого напряжения является хорошим выбором, когда нагрузку не нужно подключать напрямую к земле и где нет необходимости обнаруживать короткие замыкания на массу. Но в случае устройств, которые должны соответствовать более строгим требованиям безопасности, измерение тока на стороне высокого напряжения является лучшим выбором. После усиления напряжение на выходе ОУ оцифровывается 12-битным АЦП с опорным напряжением 3,3 В, соответственно, каждый значащий разряд АЦП – это $3,3/4096 = 0,805$ мВ. При коэффициенте усиления $K_u = 50$ нашего ОУ, шаг измеряемого напряжения на шунте – около 16 мкВ. Соответственно, при шунтах 100, 1 и 0,01 Ом младшему разряду АЦП соответствует потребляемый ток в 0,16 мкА, 16 мкА и 1,6 мА соответственно [7].

2.4 Подсистема преобразования уровней

Подсистема преобразования уровней нужна для согласования уровней и изоляции от паразитного питания шин с разным напряжением. Подсистема будет согласовывать уровни напряжения между отладчиком и отлаживаемым устройством по линиям передачи данных.

Надежным и быстрым решением будет использование специализированной микросхемы 74LVC2T45, из-за следующих преимуществ [8]:

- Работает во всем диапазоне напряжений от 1,65 В до 5,5 В
- Имеет функцию изоляции напряжения питания отлаживаемого устройства переводом каналов в высокоимпедансное состояние
- Малый ток потребления – до 4 мкА
- Минимальная скорость передачи данных 75 Мбит/с
- Имеет защиту от статики в соответствии со стандартом JESD20

Ее функциональная диаграмма изображена на рисунке 2.4.3.

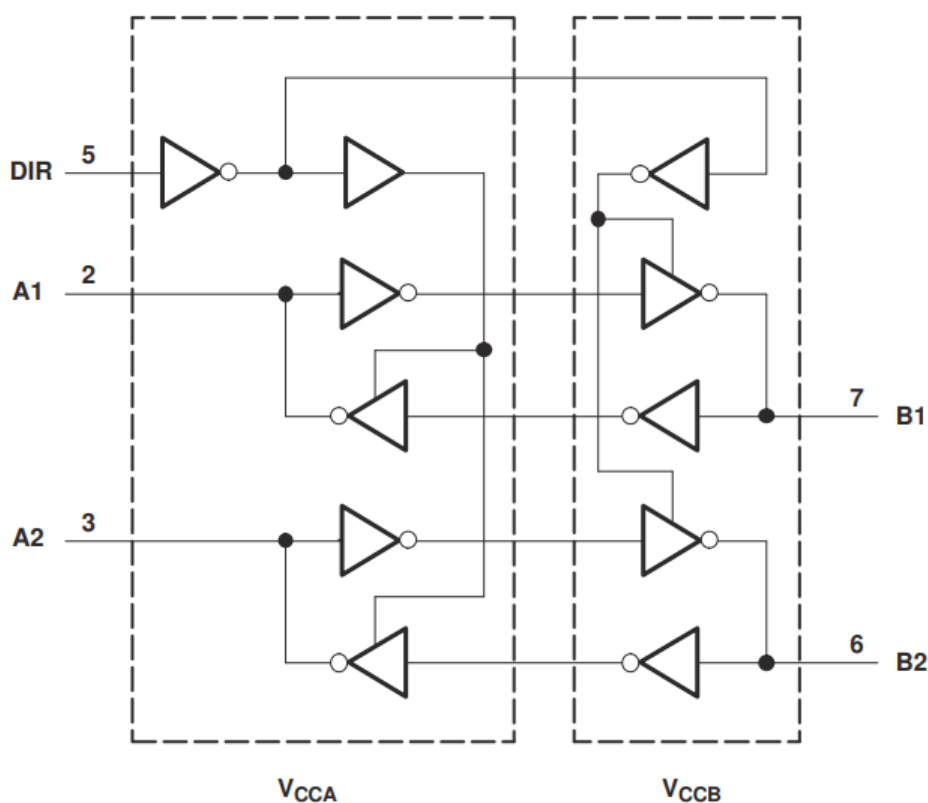


Рис. 2.4.3. Функциональная схема 74LVC2T45

2.5 Подсистема Ethernet

Данная подсистема будет состоять из входного безтрансформаторного разъема типа RJ-45, согласующего трансформатора, и PHY-микросхемы, предназначенной для выполнения функций физического уровня сетевой модели OSI.

Связка из безтрансформаторного разъема и согласующего трансформатора отдельной микросхемой была выбрана для совместимости с PoE, так как большинство доступных разъемов со встроенным трансформатором не имеют отводов от средней точки трансформатора со стороны кабеля, что необходимо для работы PoE.

На рисунке 2.5.4 изображена внутренняя структура согласующего трансформатора на примере микросхемы HX1188NL. Проблема у большинства разъемов со встроенным трансформатором возникала из-за отсутствия связей 2 и 7.

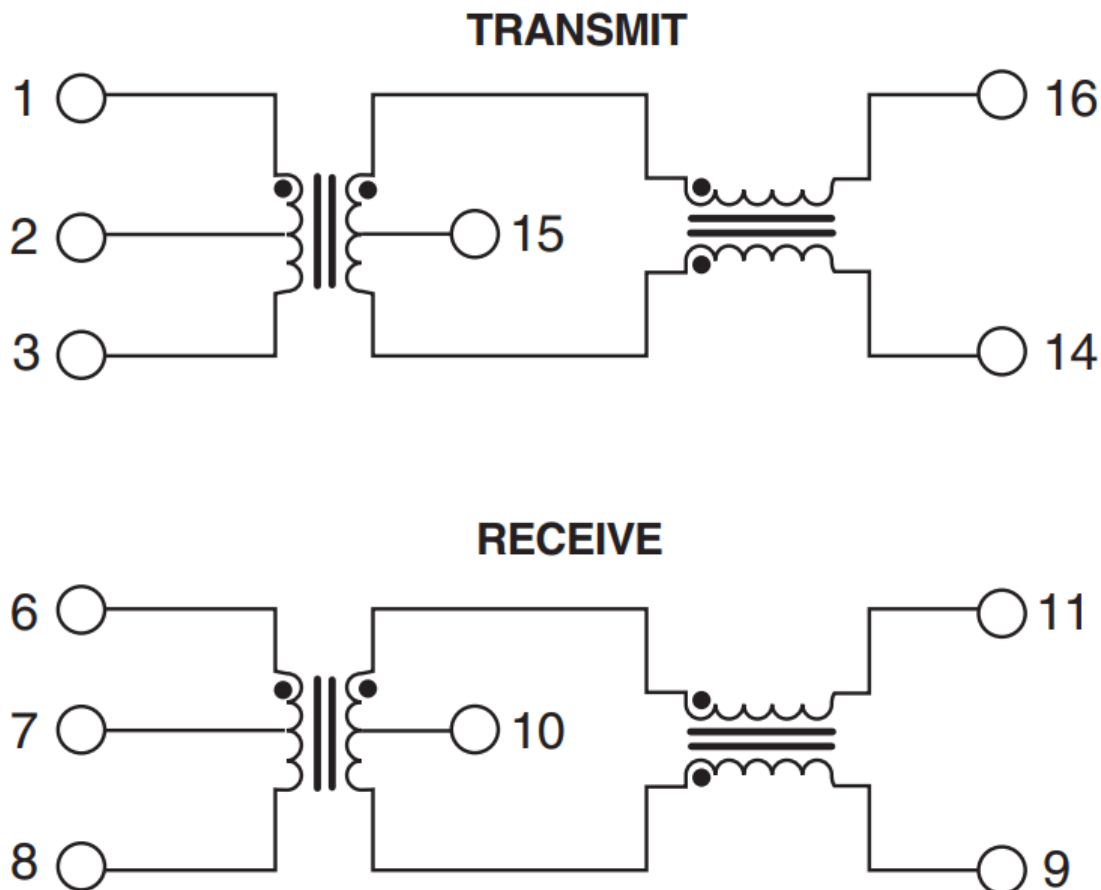


Рис. 2.5.4. Внутренняя структура HX1188NL

В качестве Ethernet-контроллера была выбрана микросхема DP83848-EP из-за того, что при отладке прошивки использовалась отладочная плата именно с этой РНУ-микросхемой «на борту». Использование другой микросхемы привело бы к увеличению времени отладки устройства и более глубокой переработки уже готового решения, что нерационально.

2.6 Структурная схема устройства

Исходя из всего вышесказанного, можно составить структурную схему устройства, которая изображена на рисунке 2.6.5.

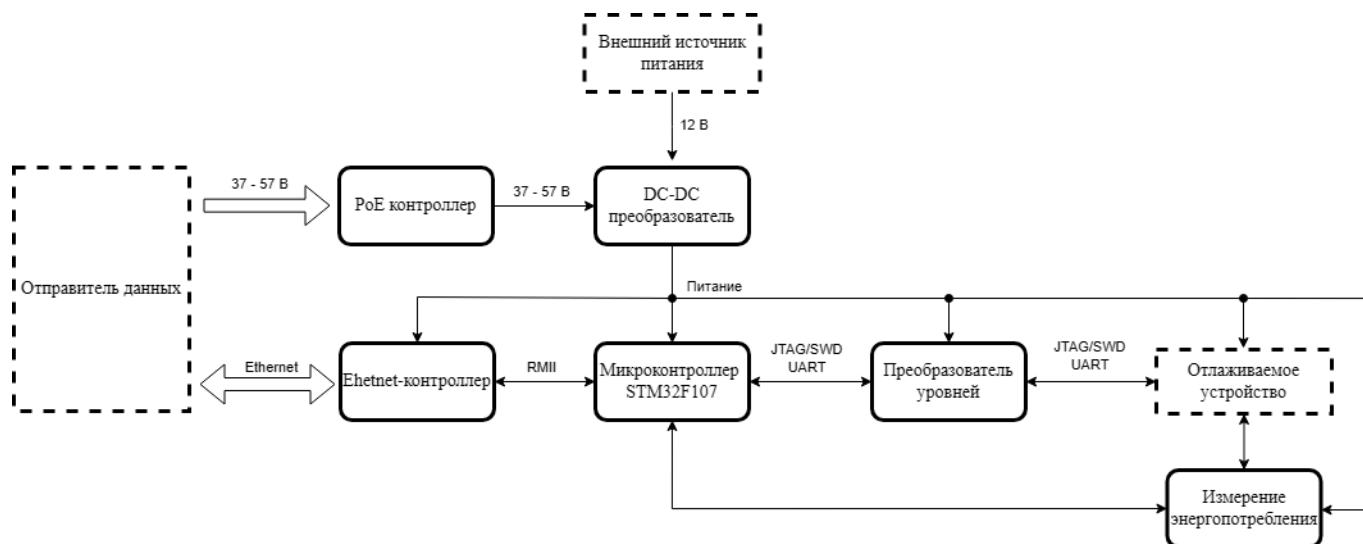


Рис. 2.6.5. Структурная схема устройства

Здесь в качестве отправителя выступает условное устройство, от которого будут приходить команды по Ethernet, PoE-контроллер и DC-DC преобразователь вместе составляют подсистему питания, Ethernet-контроллер является подсистемой Ethernet, STM32F107 – подсистема управления, преобразователь уровней является подсистемой преобразования уровней, измерение энергопотребления – это одноименная подсистема, а отлаживаемое устройство представляет собой целевой микроконтроллер, на который будет отправляться прошивка и чье энергопотребление будет измеряться.

Глава 3

Описание принципа работы подсистемы питания

3.1 Описание схемотехнического решения

3.2 Расчет элементов схемы

3.3 Результаты тестирования

Литература

1. Лакамера, Д. *Архитектура встраиваемых систем* /Д. Лакамера // ДМК Пресс – Москва – 2023. – 332 с.
2. Connectivity line, ARM®-based 32-bit MCU with 64/256 KB Flash, USB OTG, Ethernet, 10 timers, 2 CANs, 2 ADCs, 14 communication interfaces – datasheet/ [Электронный ресурс] /STMicroelectronics// – Март, 2017 – URL:<https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f107vc.pdf> – (Дата обращения: 15.05.2024)
3. IEEE 802.3af PoE POWERED DEVICE CONTROLLERS – datasheet/ [Электронный ресурс] /Texas Instrument// – Апрель, 2008 – URL:<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps2376.pdf?ts=1715733862395> – (Дата обращения: 15.05.2024)
4. DP83848-EP PHYTER™ Military Temperature Single Port 10/100 Mbps Ethernet Physical Layer Transceiver – datasheet/ [Электронный ресурс] /Texas Instrument// – Июнь, 2019 – URL:<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/dp83848-ep.pdf> – (Дата обращения: 15.05.2024)
5. Хоровиц, П. *Искусство схемотехники издание седьмое* /П. Хоровиц, У. Хилл // «Бином» – Москва – 2003. – 704 с.
6. Обратногоходовой преобразователь / [Электронный ресурс] /Алфавит силовой электроники// URL:<https://www.power-electronics.info/flyback.html> – (Дата обращения: 15.05.2024)
7. M. G. Liberty, “Auto ranging ammeter with accurate measurement during range changes. – URL: <https://patents.google.com/patent/US11774469B2> (Дата обращения: 31.03.2024).
8. 2-Bit Dual Supply Transceiver with Configurable Voltage-Level Shifting and 3-State Outputs – datasheet/ [Электронный ресурс] /Texas Instrument// – Октябрь, 2022 – URL: <https://www.ti.com/product/SN74LVC2T45> –(Дата обращения: 15.05.2024)