

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

Высшая школа электроники и компьютерных наук
Кафедра «Электронные вычислительные машины»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой ЭВМ
_____ Д.В. Топольский
«__» _____ 2025 г.

Разработка программно-аппаратного комплекса передачи данных
с использованием технологии Li-Fi в видимом спектре

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУРГУ-090301.2025.405 ПЗ ВКР

Руководитель работы,
к.пед.н., доцент каф. ЭВМ
_____ Ю.Г. Плаксина
«__» _____ 2025 г.

Автор работы,
студент группы КЭ-405
_____ Н.А. Чуйдук
«__» _____ 2025 г.

Нормоконтролёр,
ст. преп. каф. ЭВМ
_____ С.В. Сяськов
«__» _____ 2025 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

Высшая школа электроники и компьютерных наук
Кафедра «Электронные вычислительные машины»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой ЭВМ
_____ Д.В. Топольский
«___» _____ 2025 г.

ЗАДАНИЕ
на выпускную квалификационную работу бакалавра
студенту группы КЭ-405
Чуйдуку Назару Александровичу,
обучающемуся по направлению
09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»

1. **Тема работы:** «Разработка программно-аппаратного комплекса передачи данных с использованием технологии Li-Fi в видимом спектре» утверждена приказом по университету от «21» апреля 2025 г. № 648-13/12.
2. **Срок сдачи студентом законченной работы:** 01 июня 2025 г.
3. **Исходные данные к работе:**
 - 3.1. Лабораторный блок питания:
 - входное напряжение 230 В (207...253 В);
 - выходное напряжение 0...30 В;
 - выходной ток 0...5 А.
 - 3.2. Светодиоды:
 - диапазон волн от ультрафиолетового до инфракрасного спектров;

- диаметр 0,5...1,0 см.

3.3. Фототранзистор:

- диапазон чувствительности 400...1100 нм;
- напряжение пробоя между эмиттером и коллектором 3...7 В;
- напряжение пробоя между коллектором и эмиттером 25...45 В;
- тёмный ток 100 нА;
- коллекторный ток 0,1...0,5 мА.

3.2. Фотодиод:

- диапазон чувствительности 350...1100 нм;
- обратное напряжение 32 В;
- напряжение холостого хода 0,44 В;
- тёмный ток 10 нА.

4. Перечень подлежащих разработке вопросов:

1. Аналитический обзор научно-технической, нормативной и методической литературы.
2. Проектирование программно-аппаратного комплекса передачи данных в видимом спектре.
3. Реализация программно-аппаратного комплекса передачи данных с использованием технологии Li-Fi в видимом спектре.
4. Тестирование программно-аппаратного комплекса.

5. Дата выдачи задания: 2 декабря 2024 г.

Руководитель работы _____ / Ю.Г. Плаксина/

Студент _____ / Н.А. Чуйдук/

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Этап	Срок сдачи	Подпись руководителя
Аналитический обзор научно-технической, нормативной и методической литературы	03.03.2025	
Проектирование программно-аппаратного комплекса передачи данных в видимом спектре	22.03.2025	
Реализация программно-аппаратного комплекса передачи данных с использованием технологии Li-Fi в видимом спектре	12.04.2025	
Тестирование программно-аппаратного комплекса	26.04.2025	
Компоновка текста работы и сдача на нормоконтроль	22.05.2025	
Подготовка презентации и доклада	30.05.2025	

Руководитель работы _____ / Ю.Г. Плаксина/

Студент _____ / Н.А. Чуйдук/

Аннотация

Н.А. Чуйдук. Разработка программно-аппаратного комплекса передачи данных с использованием технологии Li-Fi в видимом спектре. – Челябинск: ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», ВШ ЭКН; 2025, 91 с., 52 ил., библиогр. список – 29 наим.

В рамках данной выпускной квалификационной работы рассматривается процесс разработки программно-аппаратного комплекса передачи данных с использованием технологии Li-Fi в видимом спектре. Производится анализ предметной области и основных технологических решений. Осуществляются проектирование и реализация прототипа системы передачи данных.

Целью данной работы является разработка программно-аппаратного комплекса передачи данных с использованием технологии Li-Fi в видимом спектре (небинарный фотонный обмен данными).

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	8
1. Аналитический обзор научно-технической, нормативной и методической литературы.....	10
1.1. АНАЛОГИ.....	15
1.2. ВЫВОД ПО ГЛАВЕ 1.....	24
2. Проектирование программно-аппаратного комплекса передачи данных в видимом спектре.....	25
2.1. СВЕТОДИОД.....	25
2.2. ФОТОРЕЗИСТОР.....	28
2.3. ФОТОДИОД.....	29
2.4. ФОТОТРАНЗИСТОР.....	32
2.5. СХЕМЫ ТЕСТОВОГО УСТРОЙСТВА.....	34
2.6. ВЫВОД ПО ГЛАВЕ 2.....	36
3. Реализация программно-аппаратного комплекса передачи данных с использованием технологии Li-Fi в видимом спектре.....	37
3.1. ПЕРЕДАТЧИК.....	38
3.2. АЛГОРИТМ ПЕРЕДАЧИ.....	41
3.3. ФОТОПРИЕМНИК.....	48
3.4. ВЫВОД ПО ГЛАВЕ 3.....	54
4. Тестирование программно-аппаратного комплекса.....	55
4.1 ТЕСТИРОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ.....	55
4.2. ВЫВОД ПО ГЛАВЕ 4.....	58
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	59
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	60
ПРИЛОЖЕНИЕ А ИСХОДНЫЙ КОД ПРОГРАММ ДЛЯ РАБОТЫ КОМПЛЕКСА.....	63

ПРИЛОЖЕНИЕ В ОБЩАЯ СХЕМА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ LI-FI В ВИДИМОМ СПЕКТРЕ.....	88
ПРИЛОЖЕНИЕ С КОНЕЧНЫЙ ВИД СИСТЕМЫ ФОТОННОЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ.....	90

ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень развития средств передачи данных постоянно требует повышение производительности передачи данных. В настоящее время используется беспроводная передача данных в радиодиапазоне. При этом используется частотная модуляция сигналов – кодирование данных путём изменения мгновенной частоты радиосигнала (Wi-Fi). Сейчас в основном применяются интерфейсы Wi-Fi с 4 по 6 поколения с частотной передачей в диапазоне от 2,4 до 10 ГГц.

Сегодня люди используют в повседневной жизни мобильные устройства, использующие беспроводную коммуникацию. С 90-х годов XX века в России появились сотовые телефоны работающие на частотах 900 МГц и 1800 МГц. Далее появлялись новые телефонные операторы, каждый из которых работал на своей выделенной частоте. С появлением интернет-соединений были зарезервировали новые каналы: 800, 1800 и 2400 МГц. В настоящее время наибольшее распространение получил Wi-Fi 5 (до 5 ГГц).

К особенностям радиочастотной связи относится разделение частотного диапазона на множество каналов, работающих параллельно. Из-за данной особенности существует жёсткий регламент для различных сфер жизни: межконтинентальная радиосвязь, связь морских служб, авиационная связь, телевизионная связь и т. п. Чтобы обойти и облегчить коммуникацию устройств, учёные стараются найти новые способы использовать те спектры частот, которые не будут ограничены действующими регламентами организации связи. Поэтому для повышения производительности они всё чаще обращаются к коммуникации в видимом спектре – Visible Light Communications (далее LC, VLC). Данную коммуникацию можно назвать «Фотонным обменом данными».

Целью ВКР является исследование возможности модификации фотонного обмена – использование небинарного кодирования. Небинарное

кодирование – передача за один такт различного уровня сигналов. При условии достижения двухсот пятидесяти шести (256) возможных интерпретаций светового сигнала на стороне приёмника, мы можем сразу передавать ASCII-символы, то есть скорость передачи данных увеличится не за счет увеличения частоты, а за счёт увеличения веса одного такта сигнала.

1. Аналитический обзор научно-технической, нормативной и методической литературы

Visible Light Communications (далее VLC) – это технология, позволяющая передавать данные при помощи источника света, где источником сигнала является фотон. Также распространенным термином является Light Fidelity (далее Li-Fi). Li-Fi – это двухнаправленная технология, передающая данные вместе со светом от комнатных светодиодных источников освещения. Таким образом, Li-Fi принадлежит к технологиям VLC.

Первое упоминание Light Fidelity относится к июлю 2011 года. На конференции частного некоммерческого фонда «TED» был прочитан доклад «Беспроводная передача данных от каждой лампочки» (оригинальное название, «Wireless data from every light bulb») [1]. Доклад представил немецкий физик Харальд Хаас. Хаас помимо лекции и теоретических предположений продемонстрировал собственное устройство «D-Light». Возможная скорость передачи данных более десяти мегабит в секунду (10 Мбит/с) [2].

Преимущество Li-Fi в том, что его можно использовать в чувствительных зонах, не создавая радиопомех, например, в таких как самолёты, где радиопомехи могут привести к трагическим последствиям. Видимый свет – это электромагнитные волны, которые находятся в примерном диапазоне между 375 нм (800 ТГц) и 780 нм (400 ТГц). Это необходимо, так как частоты выше инфракрасного излучения (ИК) и до ультрафиолетового (УФ) имеют серьезное препятствие в виде стены, то есть через стену они не проходят. Данная особенность является как плюсом, так и минусом. Минус: распространение сигнала требует большого количества устройств передатчиков. К плюсам можно отнести защиту информации – для ограничения распространения данных необходима всего лишь стена из плотного материала, пропускающего свет.

Далее будут приведены примеры использования VLC со свойствами:

1. Промышленная беспроводная связь. Из-за сильных электромагнитных помех в радиосети возникает искажение сигналов. Также на предприятиях с огнеопасными веществами антенны мощных радиоизлучателей могут дать искру. Поэтому на больших предприятиях (заводах) LC может поддерживать:
 - 1.1. Беспроводное соединение с автоматизированными роботами и другим производственным оборудованием.
 - 1.2. Поток видео сверхвысокой чёткости для наблюдения, промышленного мониторинга и видеосвязи.
 - 1.3. Сверхнадёжная передача команд.
 - 1.4. Обеспечение обратной связи в реальном времени.
 - 1.5. Минимизацию появления случайных искр.
2. Беспроводной доступ в медицинской среде, где запрещены радиочастоты:
 - 2.1. Управление точным медицинским оборудованием.
 - 2.2. Связь между персоналом.
3. Корпоративная сеть:
 - 3.1. Требование к обеспечению связью большого количества пользователей ограничивает применение радиочастот.
 - 3.2. Быстрый обмен информацией между сотрудниками.
 - 3.3. Проблема защиты информации и конфиденциальности присутствует в большинстве компаний. LC способствует в решении данной проблемы простыми решениями такими как:
 - 3.3.1. Отделение световых устройств непрозрачными стенами.
 - 3.3.2. Каждому конфиденциальному пользователю выделить отдельный источник LC-связи.
4. Домашняя сеть:
 - 4.1. Безопасность.

- 4.2. Высокая пропускная способность для VR устройств.
 - 4.3. Быстрый доступ в интернет.
 - 4.4. Возможность плотного обеспечения LC-точками связи в каждой нужной комнате.
5. Вторичные сферы:
- 5.1. Широкополосная транспортная сеть.
 - 5.2. Транспортная сеть.
 - 5.3. Подводная связь.
 - 5.4. Связь газопроводе.

Немало важен факт существования множества стандартов для беспроводной передачи данных в радиочастотном диапазоне. Одной из рабочих команд, разрабатывающей стандарты, является «IEEE 802.11» – рабочая группа по стандартам для беспроводных локальных сетей. В таблице 1 приведён краткий список стандартов данной группы.

Таблица 1 – Пример стандартов 802.11

Год	Стандарт	Скорость, Мбит/с	Частота, ГГц
1997	802.11	1,0 и 2,0	2,4 и ИК
1999	802.11.a [3]	5,5 и 11,0	5,0 и 6,0
2009	802.11.n (Wi-Fi 4) [4]	600,0	2,4-2,5 или 5,0
2014	802.11.ac (Wi-Fi 5) [5]	6 770,0	5,0
2021	802.11.ax (Wi-Fi 6) [6]	11 000,0	1,0...7,0

Также параллельно 802.11 IEEE в начале 2000 годов была запущена новая рабочая группа 802.15 – это рабочая команда для WSN, то есть для специализированных беспроводных сетей (Wireless Specialty Networks), таких как беспроводные персональные сети (WPAN), Bluetooth, сети Интернета вещей, ячеистые сети, локальные сети, носимые устройства, средства связи с видимым светом и другие. Первый стандарт группы – 802.15.1 – был принят в 2002 году. В таблице 2 приведён краткий список 802.15.

Летом 2022 года появилась информация об завершение развития стандарта IEEE 802.11.bb [7][8] «Light Communication» – это стандарт, смысл которого в том, чтобы включить фотонным обмен в работу сетей Wi-Fi. В таблице 3 отражено развитие стандарта 802.11bb.

Таблица 2 – Краткий список 802.15

Год	Стандарт	Скорость, Мбит/с	Частота
2003	IEEE 802.15.3	11,0...55,0	2,4–2,5 ГГц
2011	IEEE 802.15.7 [9], IEEE 802.15.7m [10]	~96,0	Видим. света, ИК и УФ диапазонов.
2017	IEEE 802.15.13 [8] [11] [12]	~10 000,0	От УФ (190нм) до Икр спектра (10 000нм)

На примере устройства Харальда Хааса можно понять принцип работы Li-Fi на сегодняшний день. Процедура работы очень проста – если светодиодная лампочка горит, передаётся цифры 1, если выключена – цифра 0. Светодиоды можно включать и выключать очень быстро, что даёт хорошие возможности для передачи данных. Таким образом, все, что требуется, – это несколько светодиодов и контроллер, который кодирует данные на этих светодиодах. Для увеличения скорости передачи можно изменить скорость мерцания светодиодов. Также скорость мерцания может зависеть от данных, которые будут закодированы в сообщение [13]. Некоторые учёные предлагают использование массива светодиодов с различными частотами передачи данных [2]. Поскольку в данном способе используется бинарная модуляция, то появляется возможность использовать готовую базу: стандарты, технические решения и т.п.

В перспективе предлагаемая идея модификации фотонного обмена будет заключается в том, чтобы использовать изменение яркости светодиода и фиксировать колебания мощности излучения фоточувствительным элементом (фотоприёмником) – использование небинарной модуляции. В данной работе производятся научные исследования небинарной модуляции светового

потока. Вариантами фотоприемников являются фоторезистор, фотодиод и фототранзистор, передатчик – светодиод. Данные радиокомпонентами обладают своими особенностями и характеристиками, которые необходимо будет изучить на практике. Оба устройства (фотопередатчик и фотоприёмник) должны одинаково интерпретировать сигнал для однозначности передаваемых через свет данных.

Таблица 3 – Развитие стандарта 802.11bb

Год	Описание
2016	<p>Начало работы рабочей группы TGbb над 802.11bb в рамках LC Topic Interest Group.</p> <p>Задачи:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Определение возможности применить фотонную передачу данных. 2. Техническую осуществимость. 3. Экономическая осуществимость. <p>Вывод:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. С 2016 года ценность рынка световой коммуникации в течении следующих лет вырастит на 10 миллиардов долларов. 2. На рынке отсутствует регламент (стандарт) между производителями компонентов для LC-устройств. 3. Стандартизация ведёт к упрощению, удешевлению, увеличению энерго эффективности, облегчению вывода на рынок.
2017	<p>Реорганизация TGbb в исследовательскую группу.</p> <p>Результаты:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Исследовано использование изучаемой технологии. 2. Определены ключевые показатели производительности. <p>Вывод:</p> <p>Был предложен первоначальный взгляд на модели использования технологии фотонного обмена.</p>
2018	<p>Реорганизация TGbb в рабочую группу.</p> <p>Одобрено сценарии, функциональные требования, модели каналов, которые будут использоваться в дальнейшем для оценки.</p>
2020	Завершения проекта 0.1
2021	Опубликован проект 1.0
2023	Принятие стандарта летом 2023 года.

1.1. АНАЛОГИ

В всемирной сети «Интернет» были найдены несколько компаний, занимающиеся разработкой систем беспроводной передачи при помощи фотонного обмена: «Signify», «pureLiFi», «Oledcomm», «LiFi Group», «LiFi Labs». Далее рассмотрим несколько продуктов двух более интересных фирм из приведённых.

Компания «pureLiFi» – иностранная компания, которая является глобальным лидером в разработке и инновациях технологии Li-Fi. Она была основана профессором Геральдом Хаасом, упоминаемого выше, и доктором Мостафой Афгани в 2012 году в качестве дочерней организации Эдинбургского университета. Данная компания производит много устройств, использующих технологию Li-Fi; далее будут приведены некоторые из них [14].

LiFi-XC – это полностью сетевая беспроводная система связи для оценки сценариев использования Li-Fi [15]. Система обеспечивает мобильную связь между несколькими точками доступа и предлагает USB-LiFi станцию, совместимую с рядом устройств Windows и Linux, таких как ноутбуки и планшеты. Система изображена на рисунке 1: слева приведена точка доступа, справа – USB-приёмник.

Система состоит из точки доступа, совместимой со стандартным светодиодным потолочным светильником. Система LiFi-XC использует видимый свет для связи и работает по протоколам 802.11, что означает, что она может быть легко внедрена в сеть Wi-Fi. Транспортная сеть Li-Fi может быть развёрнута с помощью стандартного решения с питанием от сети. Точка доступа LiFi также поддерживает PoE/PoE+ и Cisco UPOE (PoE++) для минимизации количества кабелей, необходимых для развёртывания сети.

Производитель приводит обзор производительности системы на своём сайте товара [15], который представлен в таблице 4.

Точка доступа (рис. 1, слева) выступает в роли интернет роутера. Используя проводную сеть Ethernet, точка доступа передаёт сигнал на светодиодную лампу, через драйвер передачи данных. Далее фотонный обмен происходит с конечным приёмником. Таких приёмников может быть до 8 штук, со средней скоростью 35 мегабит (Мб) на расстояние двух метров.

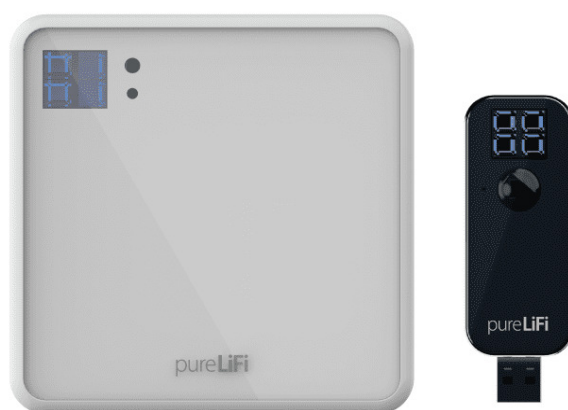


Рисунок 1 – Система LiFi-XC

Таблица 4 – Обзор производительности LiFi-XC

Параметр	Номинальное значение
Скорость нисходящей линии, не более, Мбит/с	43
Скорость восходящей линии, не менее, Мбит/с	43
Минимальное рабочее расстояние, м	1,0
Максимальная дальность работы, м	6,0
Максимальное количество одновременных пользователей	8
Передача данных между точками доступа (роуминг)	есть
Диаметр атто-ячеек (диапазон 2,5 м), м	2,8
Диаметр атто-ячейки (диапазон 3,0 м), м	3,5

Следующее предложение от «pureLiFi» – это Kitefin, создано совместно с компанией «Fairbanks Morse Defense» [16]. Товар «Kitefin» является первой LiFi системой, которая предназначена для силовых структур. Отсутствие радиочастот, кибербезопасность и возможность быстрого развертывания экономят время и деньги, обеспечивает защиту и безопасность сил. Точка

доступа Kitefin изображена на рисунке 2, а приемник соответствует USB-устройству LiFi-XC.



Рисунок 2 – Точка доступа Kitefin

Kitefin соответствует требованиям DISA WLAN STIGs, опираясь на физическую безопасность, присущую сдерживаемым световым коммуникациям. LiFi не подвержена подслушиванию через стены или тент палатки и очень устойчива даже к попыткам глушения с близкого расстояния. Система разработана для борьбы с внутренними угрозами, поэтому передаваемые данные доступны только тем людям, которые находятся в нужном месте. Система Kitefin обеспечивает простую настройку и управление группами, расположенными в одном месте. Система была опробована и протестирована европейским подразделением US ARMY [17].

Компания pureLiFi предлагает два варианта LiFi систем Kitefin – для тактических и офисных условий. Офисные точки доступа Kitefin могут быть установлены на месте существующего освещения, поддерживая или улучшая киберустойчивость штаба и вспомогательных объектов. Обзор производительности системы представлен в таблице 5.

Таблица 5 – Обзор производительности Kitefin

Параметр	Номинальное значение
Угол передачи/приема, градусы	60
Минимальное рабочее расстояние, м	0,5
Максимальная дальность работы, м	3,0
Пропускная способность нисходящей линии связи на расстоянии 1,5 м по оси, Мбит/с	30
Пропускная способность восходящей линии связи на расстоянии 1,5 м по оси, Мбит/с	25
Максимальное количество одновременных пользователей	Нет доступа

Компания «pureLiFi» также предлагает «Light Antenna ONE» – световую антенну ONE [18]. Данное устройство спроектирована для интеграции в мобильные устройства. Модуль был разработан с соответствием стандарту IEEE 802.11bb Light Communication, который утвердили и выпустили летом (июнь-июль) 2023 года. Согласованность со стандартом делает это устройство привлекательнее для предприятий, правительств и частных лиц, желающих воспользоваться преимуществами этой передовой технологии. Обзор производительности системы представлен в таблице 6.

Размеры модуля 14,5 мм на 5 мм, размер глубины не указаны на сайте производителя, но можно предполагать, что глубина световой антенны меньше 5 мм. На рисунке 3 изображен «Light Antenna ONE» в пинцете, а сравнение размеров антенны с телефоном представлено на рисунке 4.

Таблица 6 – Обзор производительности Light Antenna ONE

Параметр	Номинальное значение
Угол передачи/приема, градусы	24
Минимальное рабочее расстояние, м	0,2
Максимальная дальность работы, м	3,0
Пропускная способность, Гбит/с	1 и более

Продолжение таблицы 6

Параметр	Номинальное значение
Длина волны, нм	850 ± 10
Baseband	Agnostic
Одноканальная или многоканальная поддержка максимальной частоты, МГц	300
Соответствие	802.11bb Light Communications



Рисунок 3 – Модуль «Light Antenna ONE»

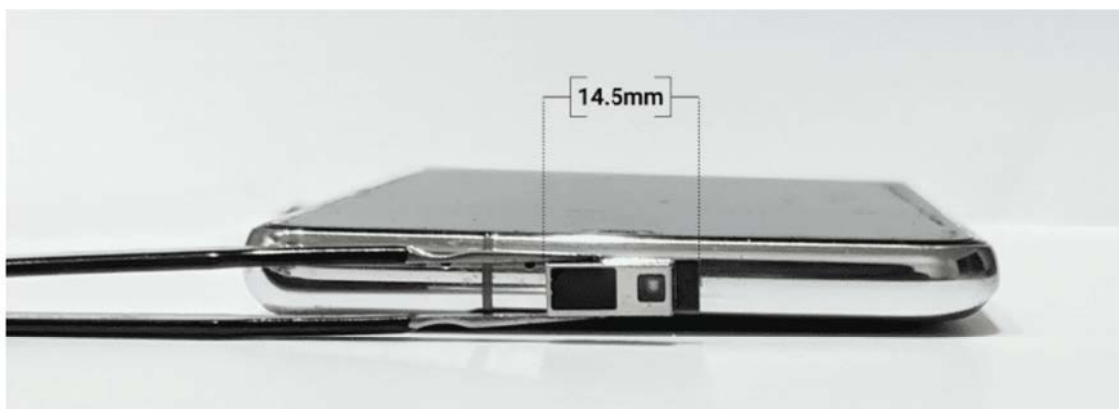


Рисунок 4 – «Light Antenna ONE» в сравнении с телефоном

Проверить данное устройство невозможно, потому что pureLiFi дает доступ к данной антенне только производителям мобильных устройств и не может «предоставить Light Antenna ONE студентам или частным лицам, желающим оценить LiFi.» Данное сообщение можно прочитать в конце страницы Light Antenna ONE на английском языке [18].

«Trulifi 6002.XX» от компании Signify – это стартовый комплект системы технологии Li-Fi [19][20]. Signify – это новая торговая марка Philips Lighting, занимающаяся традиционным, светодиодным и сетевым освещением [21]. Данная система предназначена для обеспечения инфракрасного Li-Fi подключения к ноутбукам и планшетам в конференц-залах. Его приемопередатчики имеют широкий угол луча, что позволяет создавать большие зоны покрытия Li-Fi на столах. Домены Li-Fi можно объединять, подключив несколько точек доступа Trulifi 6002.2. Такие совместные Li-Fi-домены позволяют осуществлять роуминг с бесшовными передачами при перемещении между доменами. Trulifi 6002 основан на ITU-T G.9991 и позволяет подключать до 16 USB-ключей к одной точке доступа. Приемник системы 6002.1 изображен на рисунках 5 и 6 слева и снизу, соответственно. Передатчик изображён на рисунке 7 и схематично на рисунке 6 (сверху).

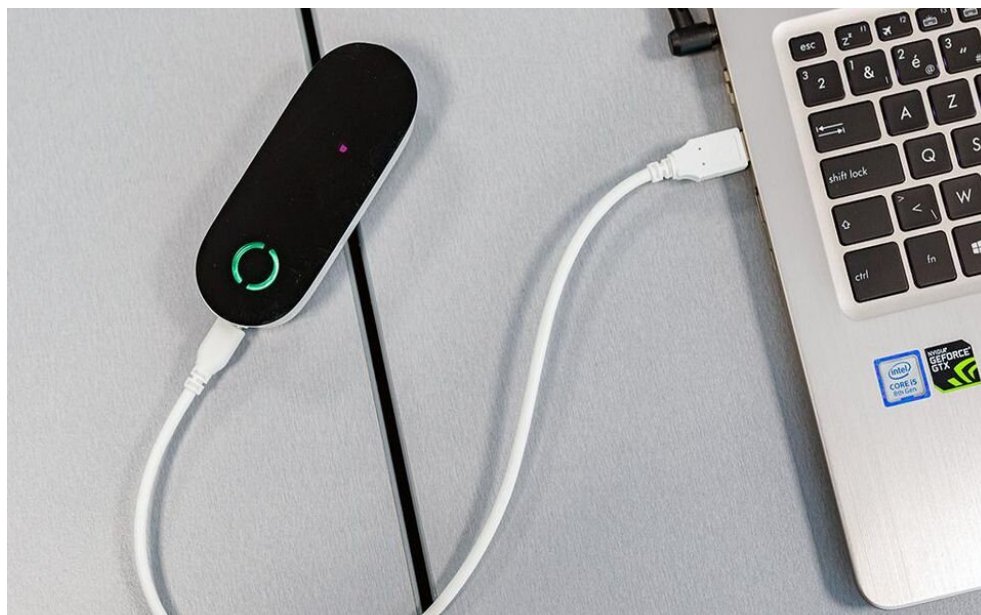


Рисунок 5 – Приёмник системы Trulifi 6002.1

Точка доступа версии 6002.1 достигает скорости от 140 до 150 Мбит/с, точка доступа версии 6002.2 – от 160 до 220 Мбит/с. Рабочее расстояние от 1,8 до 2,8 м.

Также на рынке от Signify есть Trulifi 6014. Данная система предназначена для двухточечной инфракрасной связи Li-Fi в промышленных

и транспортных приложениях. Конструкция с узким лучом оптимизирована для больших рабочих диапазонов и высокой скорости передачи данных. Trulifi 6014.01 и 6014.02 предлагают два различных угла луча для оптимальной адаптации рабочей скорости и требуемой скорости передачи данных к области применения. Функциональная система Trulifi 6014 требует подключения одной точки доступа и одной конечной. Точка доступа и конечные точки заказываются отдельно.

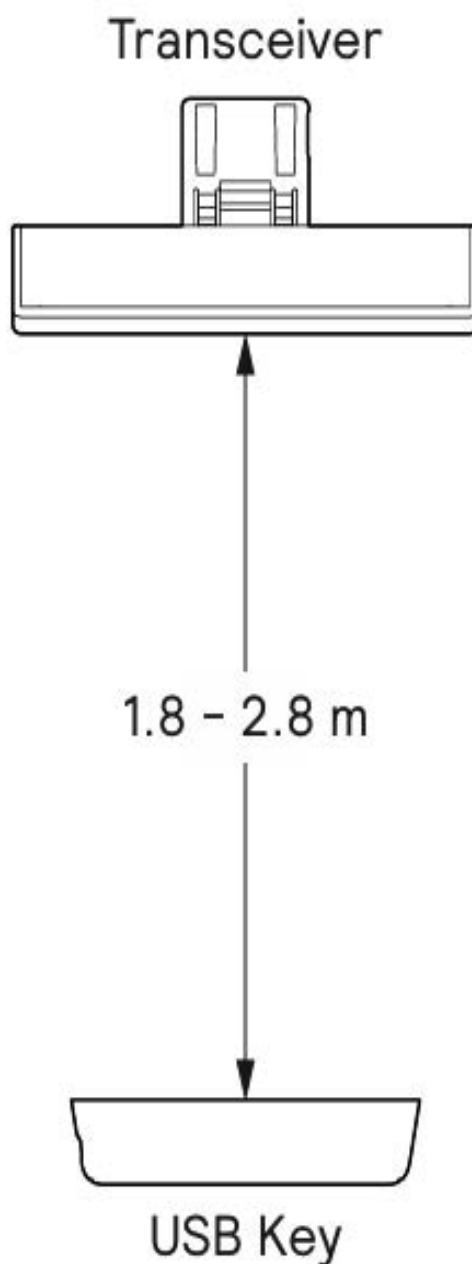


Рисунок 6 – Рабочее расположение системы Trulifi 6002.1



Рисунок 7 – Передатчик системы Trulifi 6002.1

Точка доступа и приёмник системы версии 6014.01 достигает скорости до 528 Мбит/с на расстоянии от 0,7 до 20 метров, точка доступа версии 6014.02 – до 845 Мбит/с на расстояние от 0,5 до 12 м.

Все приведённые выше аналоги систем фотонной передачи данных, использующие технологию Li-Fi, сведены и расписаны в таблице 7 с необходимыми для нас критериями.

Таблица 7 – Аналоги систем фотонной передачи данных

Параметр	Устройство						
	LiFi-XC	Kitefin	Light Antenna ONE	Trulifi 6002.1	Trulifi 6002.2	Trulifi 6014.01	Trulifi 6014.02
Скорость, Мбит/с	43,0	27,0	1000,0	145,0	190,0	528,0	845,0
Рабочее рас-стояние, не менее, м	1,0	0,5	0,2	1,8	1,8	0,7	0,5
Рабочее рас-стояние, не более, м	6,0	3	3,0	2,8	2,8	20,0	12,0
Количество приемников	8,0	-	-	16,0	16,0	1,0	1,0
Роуминг	+	-	-	-	-	-	-
Угол обзора, градусы (°)	-	60	24	-	-	-	-
Диапазон излучения	Видимый и ИК	Видимый и ИК	Видимый (850 нм) и ИК	ИК	ИК	ИК	ИК
Стандарт	802.11bb	802.11bb	802.11bb	ITU-T G.9991	ITU-T G.9991	Нет доступа	Нет доступа

1.2. ВЫВОД ПО ГЛАВЕ 1

Аналитический обзор показал, что предложенная в 2011 году технология Li-Fi развивается и находит применение в реальности. Так были найдены компании, занимающиеся производством устройств фотонной коммуникации.

Также в 2023 году был принят стандарт IEEE 802.11bb, который основывается на бинарной модуляции сигнала. Ещё IEEE 802.11bb является частью группы IEEE 802.11, по причине преимущества методов кодирования данных. Поэтому некоторые разработки нацелены на объединение инфраструктур Wi-Fi и Li-Fi.

2. Проектирование программно-аппаратного комплекса передачи данных в видимом спектре

Фотоприёмник – это устройство, которое принимает фотонный сигналы и преобразует его в вид, позволяющий использовать содержащуюся информацию. Фотоприёмник в основе своей может состоять либо из фоторезистора, либо из фототранзистора, либо из фотодиода, то есть из фоточувствительных элементов, передатчик в свою очередь из светоизлучающих элементов – из светоизлучающего диода.

Рассмотрим сначала светодиода, после фоторезистор, фотодиод и фототранзистор, соответственно пунктам.

2.1. СВЕТОДИОД

Светодиод – это полупроводниковый источник света, который основан на р-п-переходе и предназначенный, в основном, для излучения света в видимом диапазоне. Отличительной особенностью светодиодов является достаточно узкий спектральный диапазон создаваемого ими излучения, показанный на рисунке 8, где 1 – зелёный светоизлучающие диоды (далее СИД); 2 – жёлтый СИД; 3 – красный СИД; 4 – инфракрасный СИД; 5 – лампа накаливания с вольфрамовой нитью, температура 2500 К; 6 – лампа накаливания с вольфрамовой нитью, температура 3400 К; 7 – неоновая лампа [22] [23].

Первое наблюдаемое явление полупроводникового излучения было зафиксировано 1923 году советским учёным О.В. Лосев, но оно было очень тусклым и научное сообщество не обратило на него своё внимание. Только спустя 40 лет учёные стали изучать и развивать полупроводниковые источники света. В 60-е годы на рынок вышли светоизлучающие диоды (СИД) от красного до зеленого спектров [25].

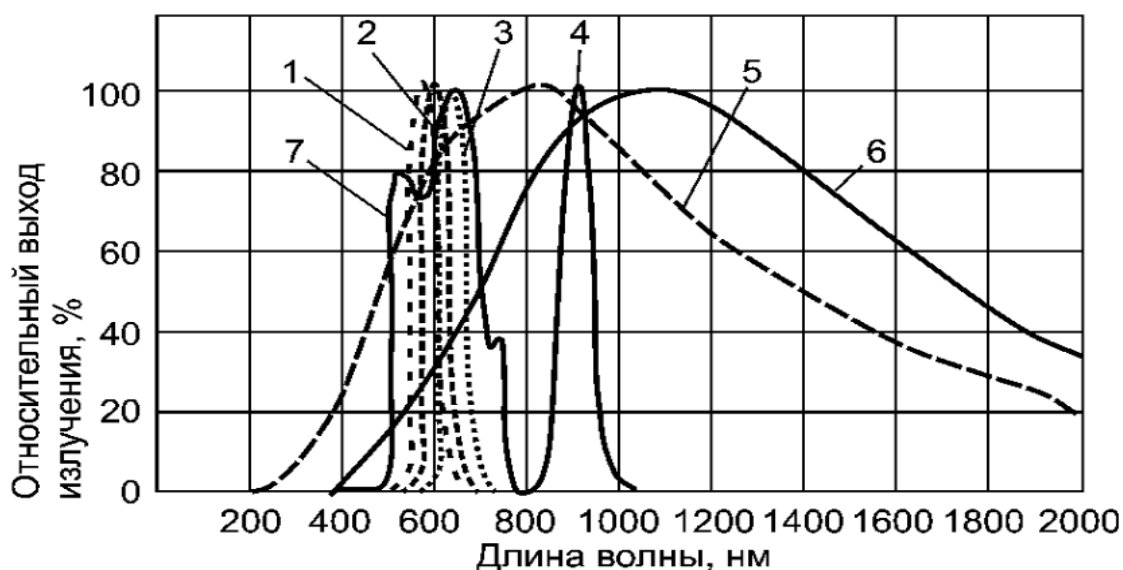


Рисунок 8— Нормализованные спектры некоторых источников излучения [24]

Как уже упоминалось, светодиод функционирует на основе р-п-перехода (кристалла), который представляет собой соединение двух частей полупроводников с различными типами проводимости. Полупроводники типа р имеют избыток положительных зарядов (дырок), в то время как n – избыток отрицательных зарядов (электронов). Когда светодиод подключается к источнику постоянного напряжения, при этом положительный контакт соединяется с р, а отрицательный – с n, через светодиод начинает проходить ток. При движении электронов через зону р-п-перехода (активная зона устройства) они рекомбинируют с дырками. Важно отметить, что для изготовления светодиодов используются материалы, в которых рекомбинация происходит не с выделением тепла, а с излучением света, то есть энергия, высвобождающаяся при рекомбинации, преобразуется в фотонное излучение в оптическом спектре. Цвет свечения зависит от материала кристалла [25]. Схематическое изображение конструкции светодиода представлено на рисунке 9.

Светодиоды можно классифицировать на следующие категории:

1. Светодиоды с током питания до 30 мА и яркостью 500-1000 мкд, используемые для сигнализации в информационных системах.

2. Светодиоды с током питания от 30 до 100 мА и яркостью 1-3 кд, применяемые как для сигнализации в информационных системах, так и для освещения помещений и т.п..
3. Светодиоды с током питания свыше 100 мА и световым потоком более 10 лм, предназначенные исключительно для освещения.
4. Светодиоды, оснащенные специальными устройствами для оптимизации их рабочих режимов.

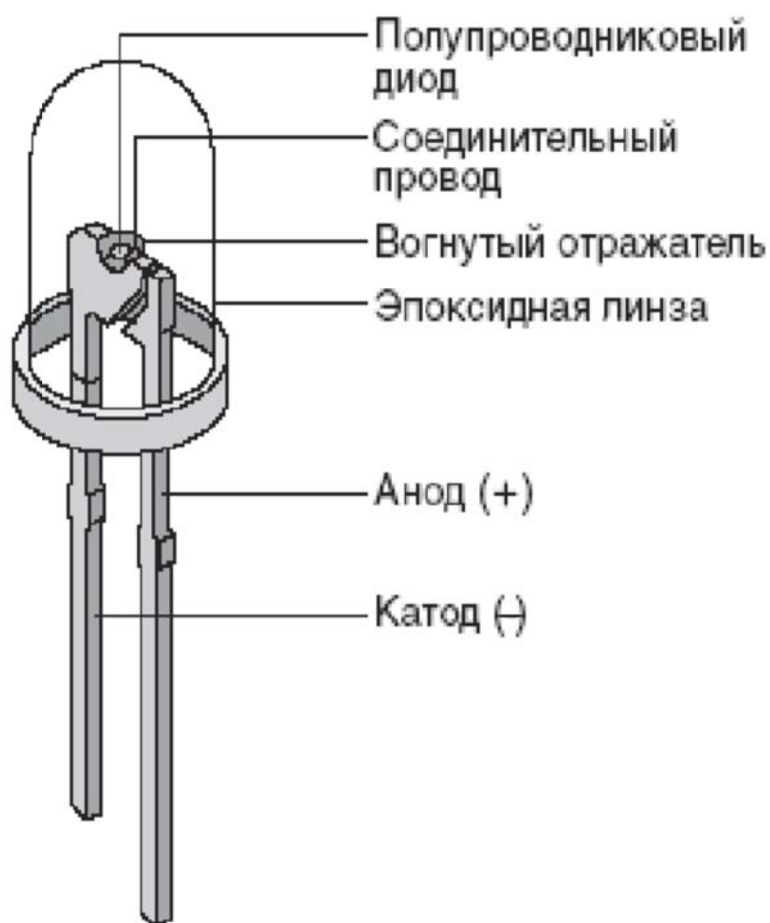


Рисунок 9 – Схематическое изображение конструкции светодиода [25]

2.2. ФОТОРЕЗИСТОР

Фоторезистор (далее ФР) – полупроводниковый резистор, принцип действия которого основан на фоторезистивном эффекте, т.е. на изменении сопротивления полупроводника под действием светового облучения [26].

Устройство ФР состоит из диэлектрической подложки, на которую нанесён слой полупроводника с двумя омическими выводами на концах, а сверху он покрыт прозрачной эмалью, через которую проникают фотоны света. Схематическое изображение конструкции фоторезистора на рисунке 10.

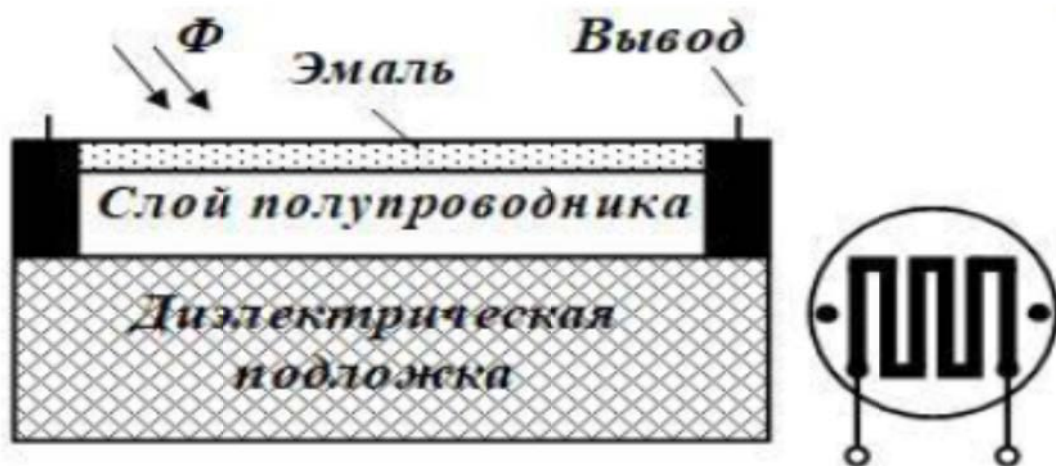


Рисунок 10 – Схематическое изображение конструкции фоторезистора [26]

Принцип эффекта фоторезистора заключается в том, что при более интенсивном облучении полупроводникового слоя процесс фотогенерации электронно-дырочных пар увеличивается, то есть увеличивается его проводимость – уменьшается сопротивление.

Ток в цепи ФР зависит от светового потока (Φ), внешнего напряжения ($U_{вн}$) и длины волны (λ). В связи с этим выделяют световую, вольт-амперную и спектральную характеристики, представленные на рисунке 11. Нелиней-

ность световых характеристик является недостатком фоторезистора, тогда как линейность вольт-амперной характеристики считается его преимуществом.

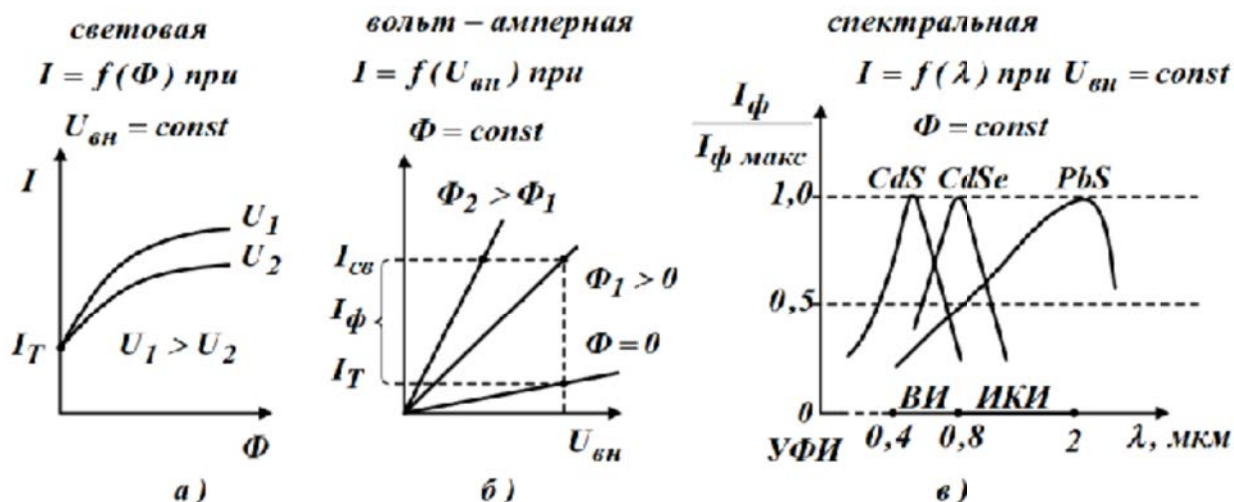


Рисунок 11 – Характеристики фоторезистора [26]

К преимуществам фоторезисторов можно отнести высокую чувствительность, длительный срок службы, небольшой вес и компактные размеры, а также низкую стоимость. Однако к недостаткам следует отнести нелинейность световой характеристики, низкую термостабильность и инерционность.

2.3. ФОТОДИОД

Фотодиод (ФД) – обратносмещённый полупроводниковый диод, ток которого определяется степенью освещённости [26]. Принцип работы ФД в том, что обратный ток (темновой ток) практически незаметен, когда на p-n-переход не падает свет, однако при попадании света на этот переход возникают дополнительные носители заряда, что приводит к увеличению обратного тока и снижению сопротивления диода. Обратный ток почти пропорционален интенсивности света [24]. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) ФД изображена на рисунке 12.

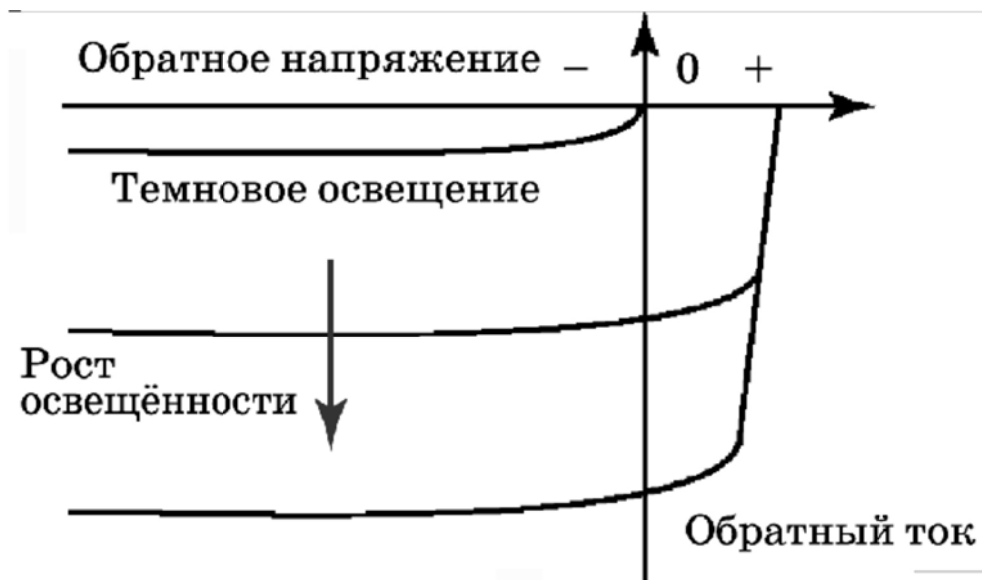


Рисунок 12 – ВАХ фотодиода [24]

К семейству фотодиодов относятся диоды с р-п-переходом, переходом Шоттки, гетеропереходом, а также р-і-п-фотодиоды и лавинные фотодиоды.

Фотодиоды обладают двумя режимами работы: фотодиодный и фотогальванический, схемы которого изображены на рисунках 13 и 14, соответственно. Если говорить о первом режиме, то для него достаточно подачи обратного напряжения на диод, что позволит регулировать сопротивление в меньшую сторону. Фотогальванический режим уместно сравнение с солнечной батареей, то есть если присутствует свет, то появляется и напряжение.

На рисунках 13 и 14 изображены, также, схемы с усилением сигнала на операционном усилителе. В параллель с фотоприемником был спроектирован резистор, номиналом равный резистору на неинвертирующем входе ОУ, чтобы скомпенсировать тепловые помехи. Также предусмотрена отрицательная обратная связь из резистора и конденсатора, включенных в параллель.

Фотодиоды обладают следующими свойствами:

1. Световая характеристика фотодиодов соответствует прямой пропорциональности фототока от освещенности.
2. Независимость интегральной чувствительности ФД от приложенного обратного напряжения, что является следствием предыдущего свойства.

3. Малая инертность.
4. Спектральная характеристика фотодиодов, которую можно изменять при помощи толщины балы и изменения скорости поверхностной рекомбинации [27].

Преимущества фотодиодов:

1. Частотная характеристика.
2. Спектральная характеристика и ее линейность.
3. Высокая чувствительность к свету.
4. Меньший уровень шума.
5. Возможность работы на высокочастотном уровне (около 1 МГц).

Недостатки фотодиодов:

1. Быстрое увеличение темнового тока в зависимости от температуры.
2. Малая активная площадь.

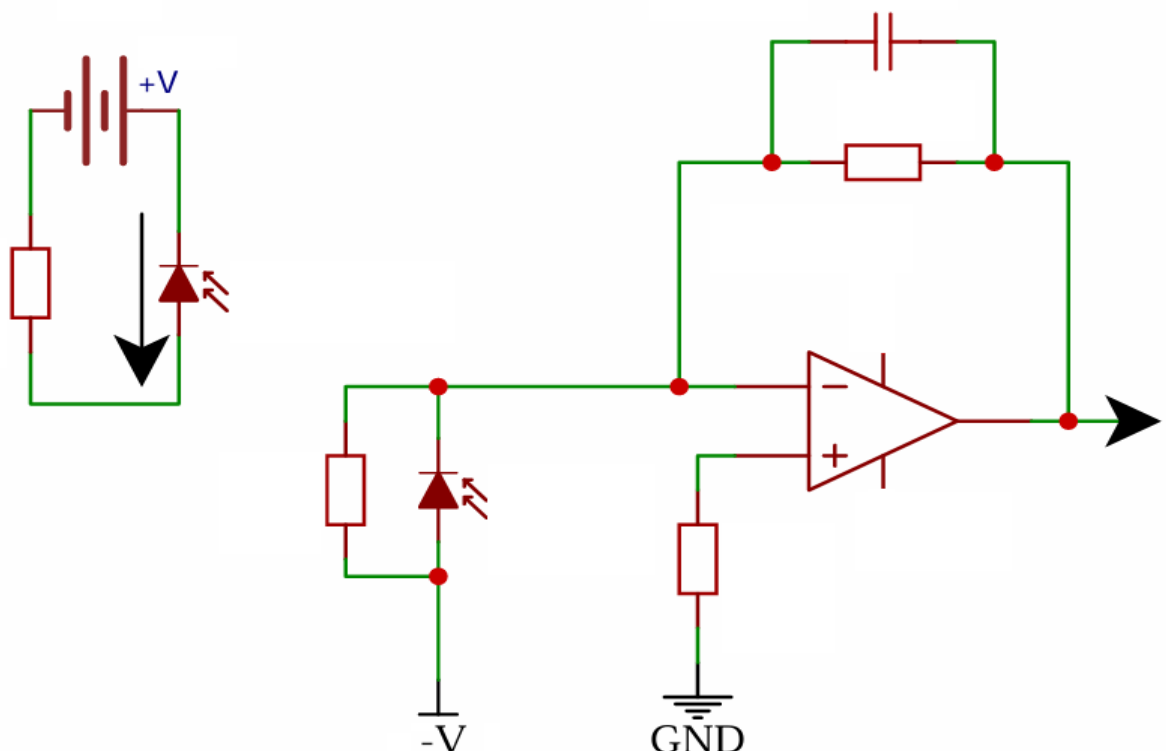


Рисунок 13 – Фотодиодный режим включения фотодиода

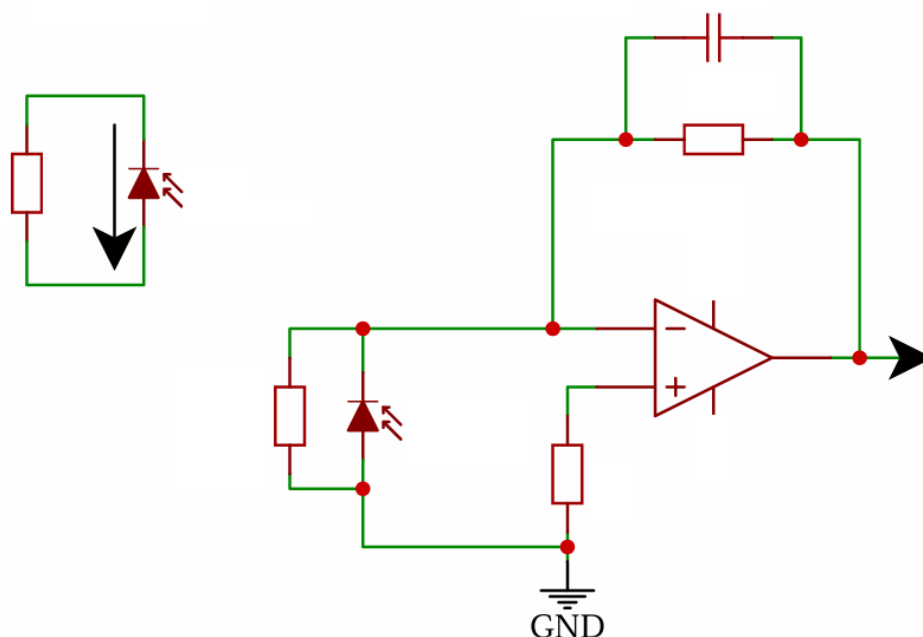


Рисунок 14 – Фотогальванический режим включения фотодиода

2.4. ФОТОТРАНЗИСТОР

Фототранзистор (ФТр) – фотогальванический приёмник светового излучения, обеспечивающий преобразование световой энергии в электрический ток и усиление его. Они имеют структуру биполярного или полевого транзистора с окном для освещения базы или затвора (канала) [26].

Принцип работы фототранзистора заключается в следующем: когда свет отсутствует, то есть база не освещена, ток между коллектором и эмиттером незначительный, но, когда транзистор освещён, база открывается для коллекторного тока на величину, по значению которого можно судить об интенсивности освещённости [24]. Структура и обозначение фототранзистора изображены на рисунке 15.

Вольт-амперные (выходные) характеристики выглядят аналогично характеристикам обычного биполярного транзистора в конфигурации с общим эмиттером, но вместо тока базы транзистора (IB) в качестве параметра

используется световой поток (Φ). Пример ВА-характеристики изображён на рисунке 16.

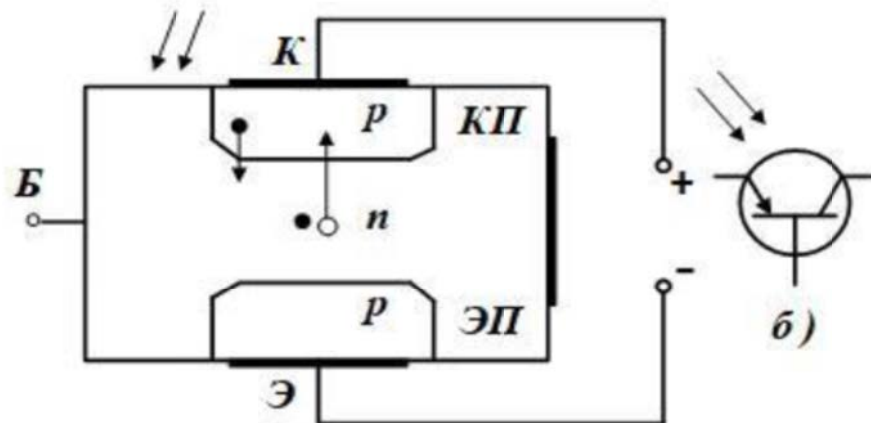


Рисунок 15 – Структура и обозначение фототранзистора [24]

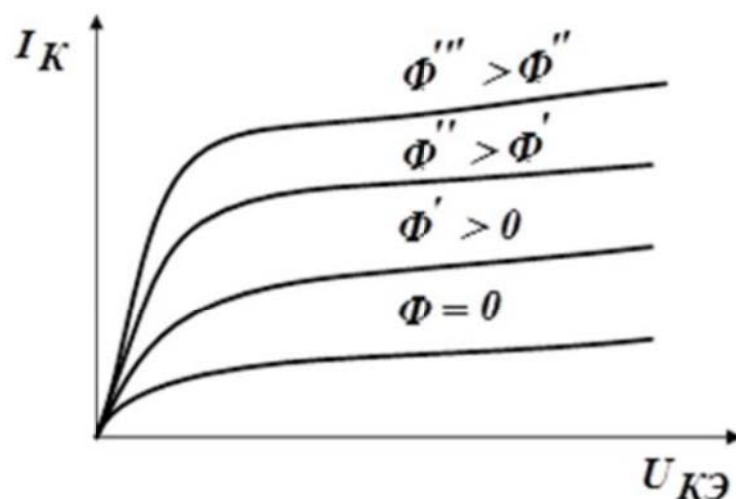


Рисунок 16 – Вольт-амперные характеристики фототранзистора [26]

Фототранзистор в линейном режиме находит применение для измерения постоянной освещённости, когда на базе фототранзистора можно построить простой люксметр и для приёма модулированных сигналов. Также ФТр способен работать только в фотодиодном режиме включения (см. рис. 13), в отличие от фотодиода.

Фототранзистор обладают следующими свойствами:

1. Высокая чувствительность непосредственно к излучению.

2. Нелинейная зависимость между освещённостью и фототоком.
3. Сниженная термостабильность по сравнению с фотодиодом.
4. Снижение пороговой чувствительности по причине возрастания теплового тока.
5. Темновой ток фототранзистора куда заметнее по сравнению с ФД.

2.5. СХЕМЫ ТЕСТОВОГО УСТРОЙСТВА

Аналоги, приведённые в первой главе «Аналитический обзор научно-технической, нормативной и методической литературы», используют бинарную модуляцию сигнала, что не соответствует идеи данной выпускной квалификационной работы (небинарная модуляция светового сигнала). Также в открытом доступе нет схем по которым реализованы данные устройства. Исходя из этих двух фактов был разработан первый вариант общей схемы разрабатываемого комплекса. Данная схема представлена на рисунке 17. Основываясь на данной схеме будут проведены первые эксперименты.

Далее для дальнейшей разработки было необходимо разработать алгоритм программно-аппаратного комплекса. Данный алгоритм фотонной передачи данных представлена в виде блок-схемы на рисунке 18.

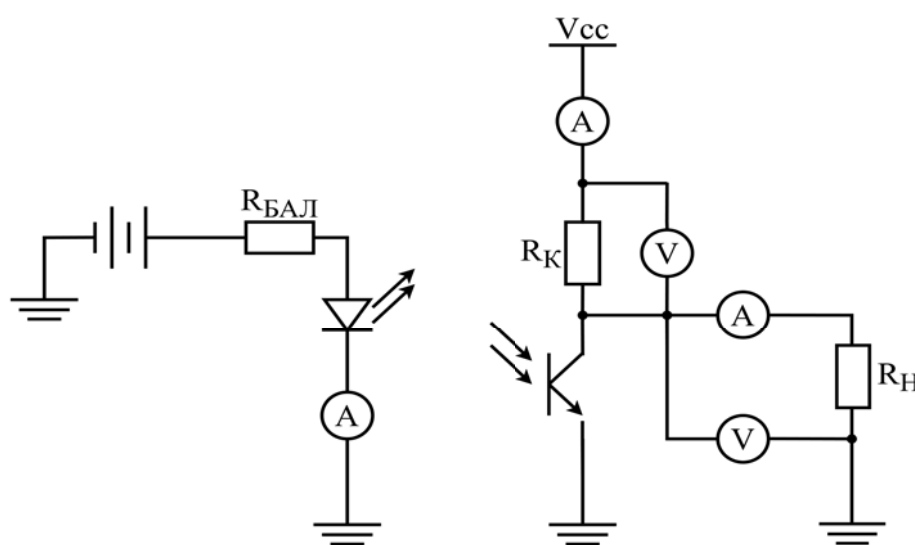


Рисунок 17 – Принципиальная схема установки с фототранзистором

Рисунок 18 – Блок-схема алгоритма фотонной передачи данных

2.6. ВЫВОД ПО ГЛАВЕ 2

1. Были проанализированы и изучены современные элементы: светодиод, фоторезистор, фотодиод и фототранзистор. В роли передатчика выступит СИД, на роль фотоприемника с большей вероятностью подойдут ФД или ФТ. Фоторезистор не подойдет по причине его долгого отклика в единицы и десятки миллисекунд по сравнению с ФД и ФТ - единицы и десятки микросекунд.
2. Была разработана схема прототипа.
3. Был разработан алгоритм фотонной передачи информации.

3. Реализация программно-аппаратного комплекса передачи данных с использованием технологии Li-Fi в видимом спектре

В ходе анализа устройств, реализующие Li-Fi технологии, были определены следующие возможные аналоги компонентов:

1. Светодиод «L-813SRC-J4».
2. Фототранзистор «BPW85B».
3. Фоторезистор «MLG5506».
4. Фотодиод «PD333-3C-H0-L2».

Светоизлучающий диод (СИД, светодиод) является полупроводниковым диодом, в котором при прохождении электрического тока генерируется оптическое излучение [27]. Из этого следует, что яркость свечения напрямую зависит от электрического тока в цепи, то есть от количества заряженных частиц в единицу времени. Поэтому в цепь последовательно с СИД включается ограничивающий по току резистор R , на котором падает напряжение ΔU , равное $\Delta U = U_{\text{пит.}} - U_{\text{СИД}}$, где $U_{\text{пит.}}$ – напряжение, которое приложено до резистора и больше $U_{\text{СИД}}$, а $U_{\text{СИД}}$ – напряжение, которое падает на светодиоде. Номинал R равен: $R = \Delta U / I_{\text{СИД}}$, где $I_{\text{СИД}}$ – номинальный прямой ток, то есть рабочий ток, при котором светодиод точно не перегорит и сможет нормально работать на протяжении всего срока эксплуатации.

Для регулировки напряжения и тока используются цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП). ЦАП – это устройство, которое преобразовывает количество, определенное в виде двоичного числа (или многоразрядного двоично-десятичного числа), в напряжение или ток, пропорциональное значению цифрового входа [28].

3.1. ПЕРЕДАТЧИК

Простая схема ЦАП, представленная на рисунке 19, использует способ масштабирующих резисторов. Смысл данной схемы заключается в том, что, подключая несколько резисторов к суммирующему входу операционного усилителя, на выходе можно получить напряжение, пропорциональное взвешенной сумме входных напряжений. При высокой разрядности ЦАП задающие резисторы должны быть согласованы с высокой точностью. Наиболее жесткие требования по точности предъявляются к резисторам старших разрядов, поскольку разброс токов в них не должен превышать тока младшего разряда. Поэтому разброс сопротивления в k -м разряде должен быть меньше, чем $\Delta R / R = 2^{-k}$.

Из-за требований к номиналам сопротивлений следует, что разброс сопротивления резистора, например, в четвертом разряде не должен превышать 6,25%, а в 10-м разряде – 0,09766% и т.д.

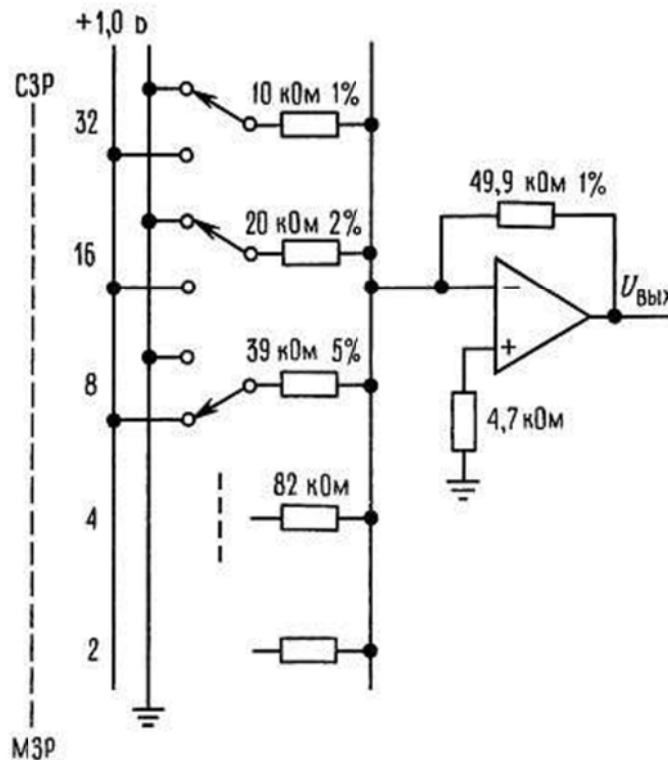


Рисунок 19 – Схема ЦАП с включением масштабирующих резисторов [28]

Рассмотренная схема при всей ее простоте обладает следующими недостатками: во-первых, при различных входных кодах ток, потребляемый от источника опорного напряжения (ИОН), будет различным, а это повлияет на величину выходного напряжения ИОН; во-вторых, значения сопротивлений весовых резисторов могут различаться в тысячи раз, а это делает весьма затруднительной реализацию этих резисторов в полупроводниковых ИМС. Кроме того, сопротивление резисторов старших разрядов в многоразрядных ЦАП может быть соизмеримым с сопротивлением замкнутого ключа, а это приведет к погрешности преобразования.

Способ масштабирующих резисторов становится неудобным, когда появляется необходимость в большом количестве разрядов. Например, для 12-разрядного преобразователя потребуется соотношение величин резисторов 2000:1 с соответствующей точностью самого маленького резистора. Цепная R-2R-схема, показанная на рисунке 20, приводит к изящному решению этой задачи. Здесь требуются только 2 значения резисторов, по которым R-2R-схема формирует токи с двоичным масштабированием. Резисторы должны быть точно подобраны, хотя действительные их величины не так существенны.

Обе приведенные схемы используют в основе своей сумматор токов на ограничивающих резисторах, ключи между инвертирующим входом операционного усилителя (ОУ) и землей, а также преобразователь «Ток-напряжение» на базе ОУ, поэтому при различных входных кодах ток, потребляемый от источника опорного напряжения (ИОН), будет различным, что повлияет на величину выходного напряжения ИОН.

Так как свечение светодиода напрямую зависит от тока в цепи, и по свойством СИД при минимальном рабочем токе напряжение, падающее на нем, будет примерно равно напряжению при прохождении максимального тока. Следовательно в роли регулятора яркости свечения выступит ток цепи, который можно регулировать изменением сопротивлением ограничивающего резистора.

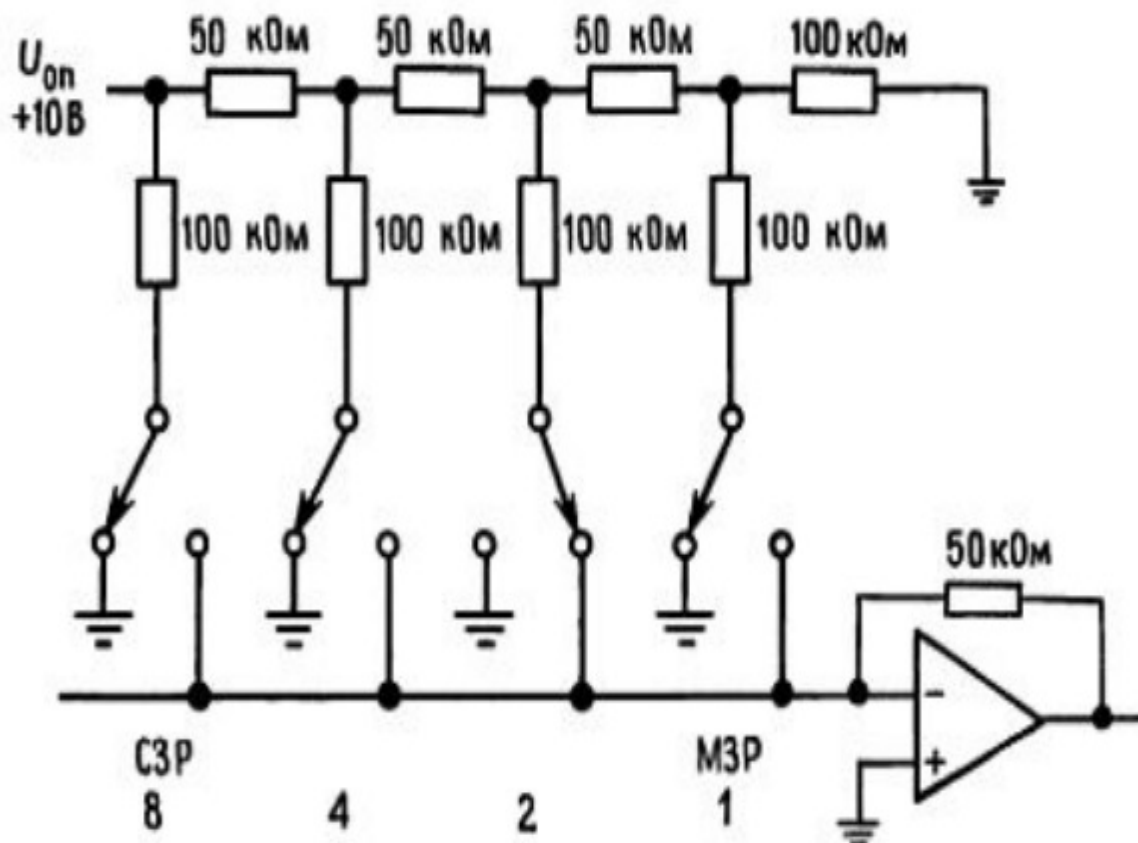


Рисунок 20 – Схема ЦАП «R-2R» [28]

Для регулирования тока в цепи были предложены следующие варианты: использование полевого транзистора как УРС (устройство регулирования сопротивления) и батарея резистор-ключ (сумматор токов). Для простоты реализации было принято решение использовать второй вариант с N-канальными МОП-транзисторы в роли ключей.

Для управления МОП-транзисторами на сумматоре тока необходимо использовать пятивольтовую логику, чтобы полностью открыть его, то есть уменьшить ток протечки. Для регулирования были предложены следующие варианты микросхемы: Arduino Nano, ESP32wroom32d, STM32F103C. Все варианты сведены в таблицу 8 с требуемыми критериями.

Таблица 8 – Сравнение микроконтроллеров

Критерии	Микроконтроллер		
	Arduino Nano	ESP32	STM32F103C
Пятивольтовая логика	Да	Нет	Нет
Доступность	Да	Да	Да
USB-порт	Да	Да	Да
Программирование через UART-интерфейс	Да	Нет	Нет
Техническая поддержка	Да	Да	Да

По таблице 9 можно сделать вывод, что подходящим микроконтроллером является Arduino Nano, отвечающий всем пяти критериям. После выбора микроконтроллера был создан первый вариант принципиальной электрической схемы передатчика, которая представлена на рисунке 21.

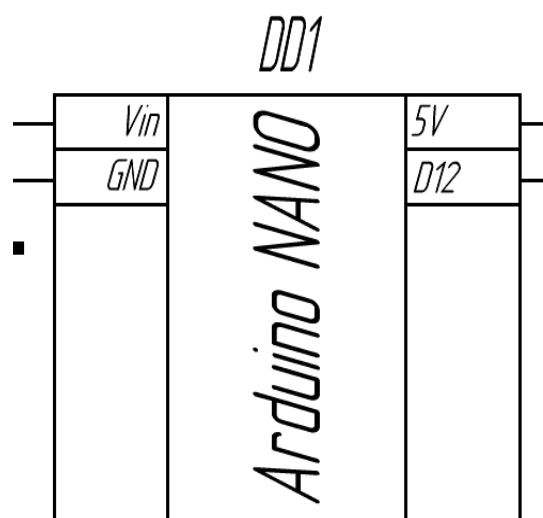


Рисунок 21 – Первый вариант принципиальной электрической схемы передатчика

3.2. АЛГОРИТМ ПЕРЕДАЧИ

Приведем характеристики светодиода «L-813SRC-J4». На рисунке 26 приведены два графика: вольт-амперная характеристика (ВАХ) и зависимость

яркости свечения в люменах (Люм.) от тока в цепи – люм-амперная характеристика (ЛАХ). В таблице 9 приведены необходимые параметры.

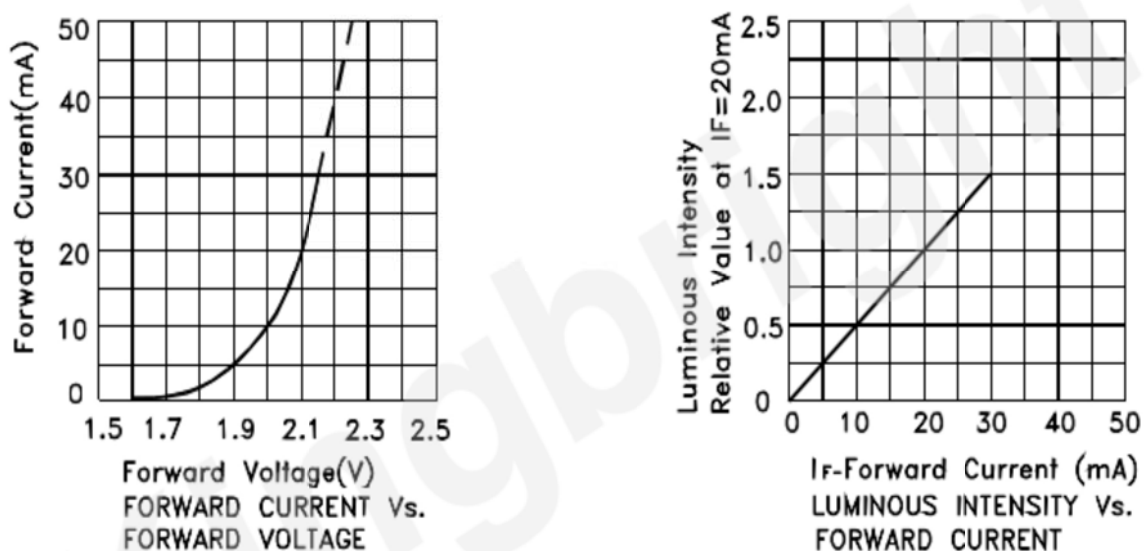


Рисунок 22 – ВАХ и ЛАХ светодиода «L-813SRC-J4»

Таблица 9 – Характеристики светодиода «L-813SRC-J4»

Параметр	Значение
Рассеиваемая мощность, мВт	75
Постоянный прямой ток, мА	30
Максимальный прямой ток, мА	150
Обратное напряжение, В	5
Прямое напряжение, В	2,1-2,5

На рисунке 27 представлена вторая версия принципиальной электрической схемы передатчика, по которой дальше была сделана разводка печатной платы, изображенной на рисунке 28.

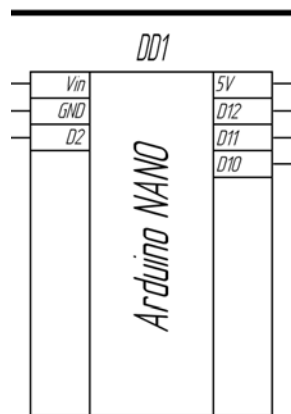


Рисунок 23 – Вторая версия принципиальной электрической схемы передатчика

После окончания разводки была вытравлена плата, и запаяны все компоненты передатчика. На рисунке 29 изображен низ вытравленной платы с запаянными элементами, контакты дорожки которой были залужены, на рисунке 30 – запаянная плата без микроконтроллера, на рисунке 31 – запаянная плата с микроконтроллера «Arduino Nano» и на рисунке С.1 приложения С – передатчик со светодиодом «L-813SRC-J4» в режиме готовности.

Рисунок 24 – Разводка печатной платы передатчика

Рисунок 25 – Запаянная вытравленная плата (низ)

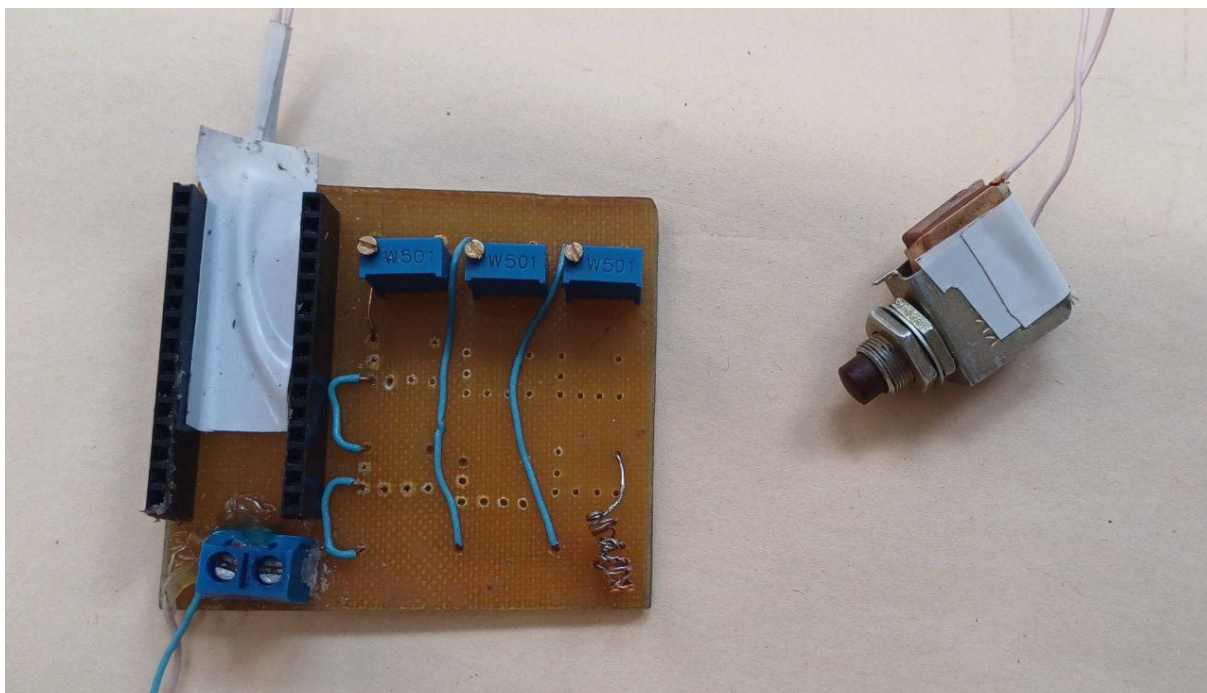


Рисунок 26 – Запаянная вытравленная плата (верх)

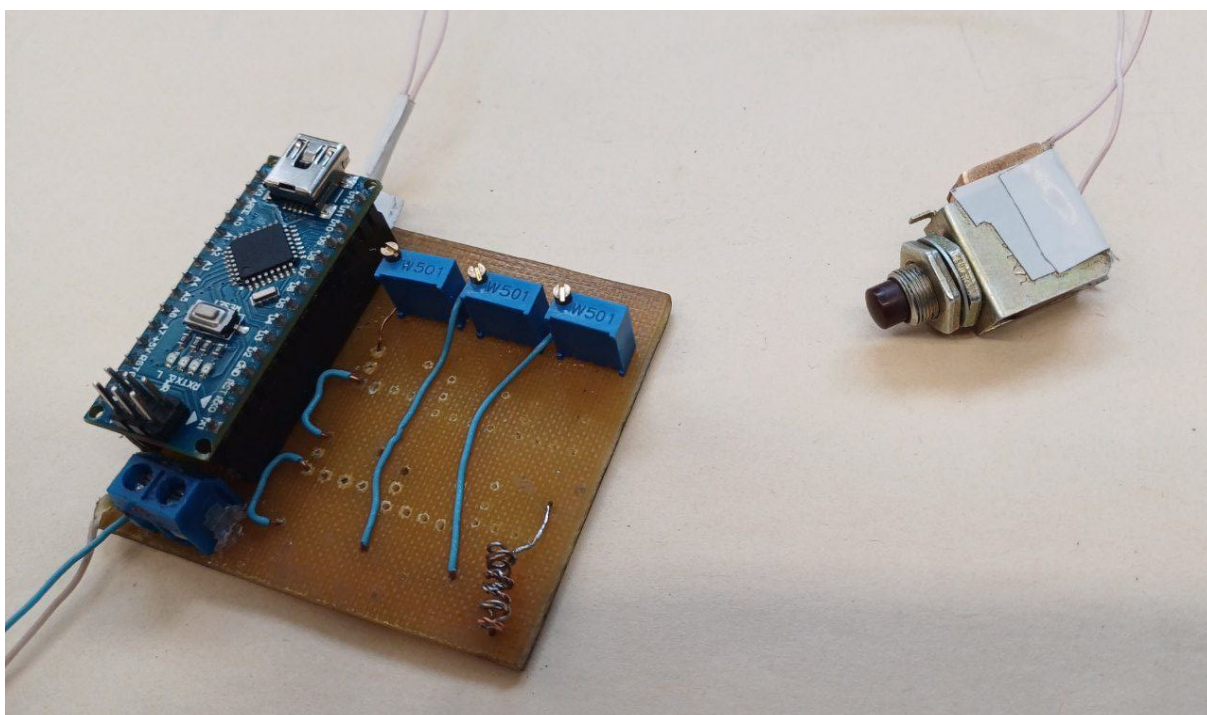


Рисунок 27 – Запаянная вытравленная плата с «Arduino Nano»

3.3. ФОТОПРИЕМНИК

В роли фотоприемника были выбраны фототранзистор «BPW85B», фоторезистор «MLG5506» и фотодиод «PD333-3C-H0-L2». Для них были разработаны схемы включения, изображенные на рисунках 32, 33 и 34.

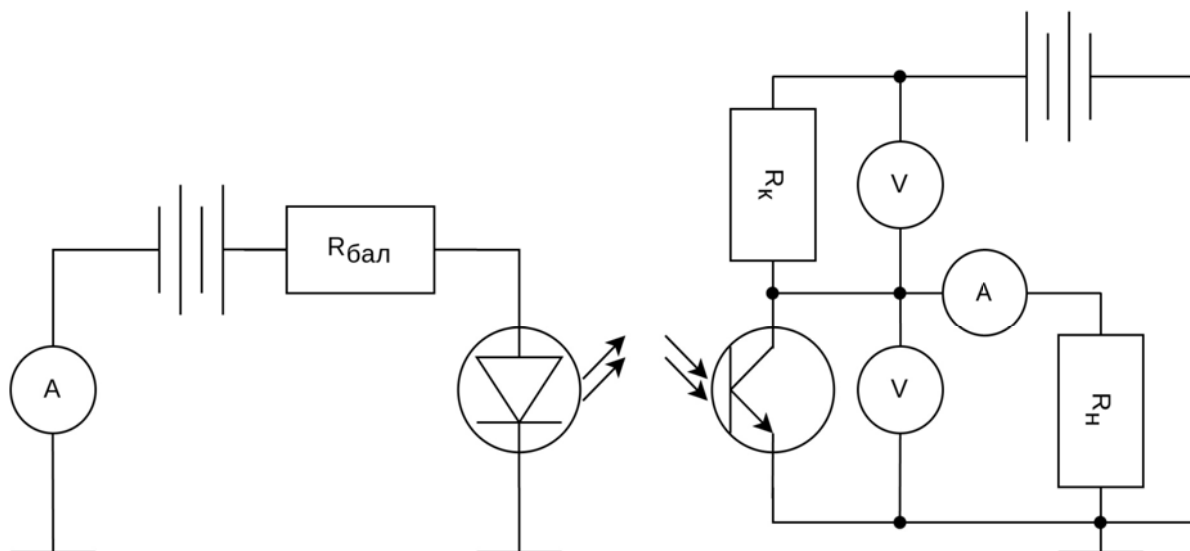


Рисунок 28 – Фотоприемник с ФТ

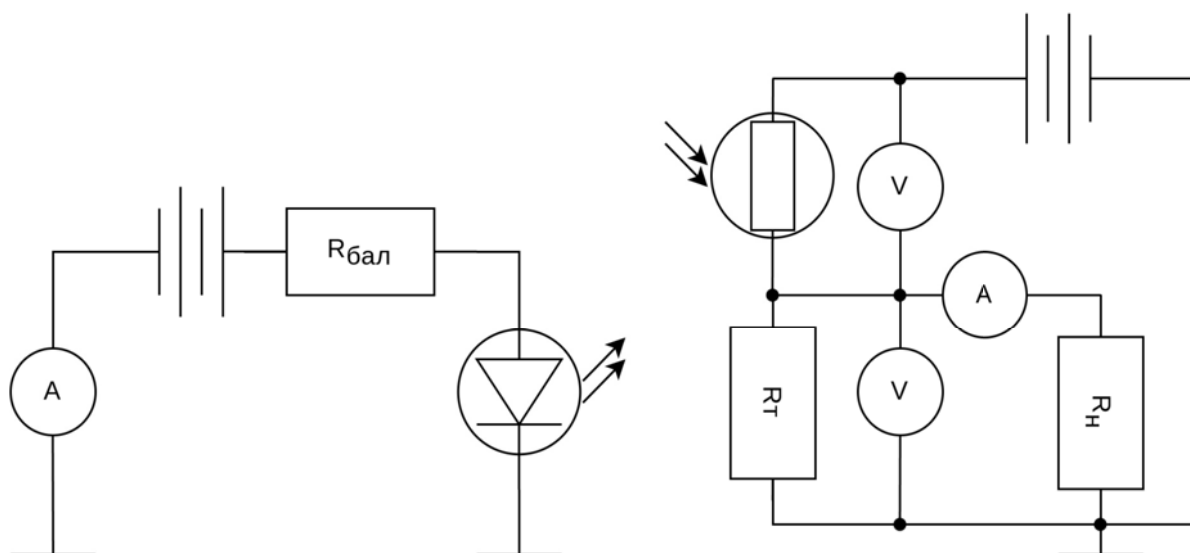


Рисунок 29 – Фотоприемник с ФР

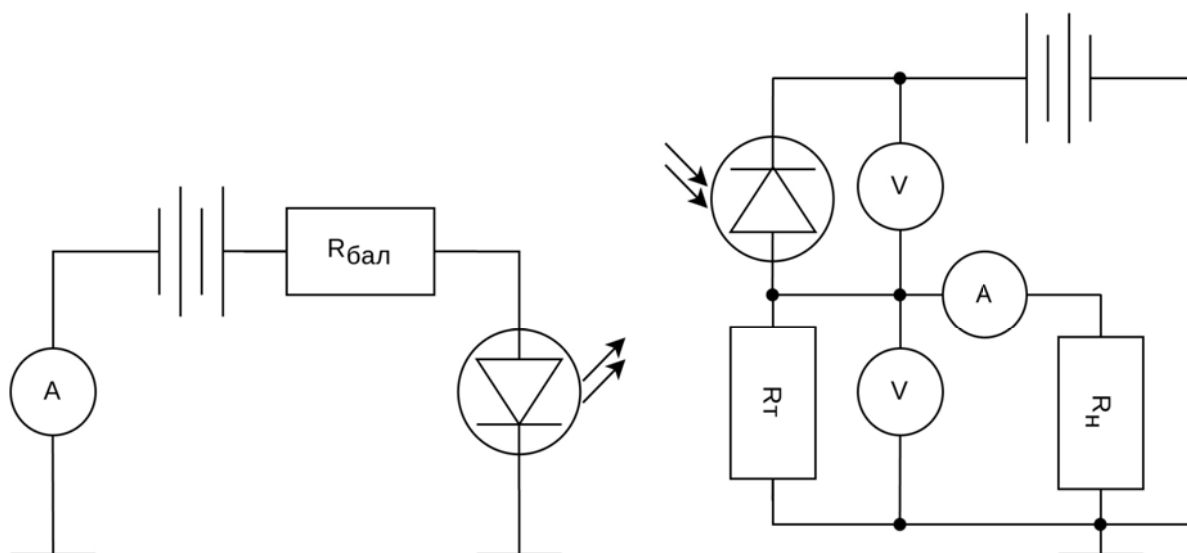


Рисунок 30 – Фотоприемник с ФД

Далее был собран стенд с передатчиком и ответной частью, в роли которой были данные фотоэлементы. В роли двух вольтметров выступил двухканальный цифровой осциллограф. После первых экспериментов минус верхнего вольтметра каждой схеме был заземлён. Далее был закодирован алгоритм передачи ступенчатого сигнала, то есть ток светодиода ступенчато изменялся от максимального до нуля и находился в каждом положении равное количество микросекунд. Отметим, что каждый эксперимент имел свои этапы, которые изменялись по нажатию кнопки. Данные эксперименты представлены далее. Код передатчика эксперимента представлен в листинге А.1 приложения А.

Результаты каждого эксперимента представлены в следующем порядке: 2 500 мкс, 1 000 мкс, 500 мкс и 100 мкс. Данный порядок обозначает значение длительности уровней сигнала. Каждый график имеет два канала синий и жёлтый. Жёлтый канал отслеживает сигнал, синий – напряжение питания. Эксперимент с фотодиодом представлен в виде значений осциллографа на рисунках 35, 36, 37 и 38. Эксперимент с фоторезистором – на рисунках 39, 40, 41 и 42. Эксперимент с фототранзистором – на рисунках 43, 44, 45 и 46.

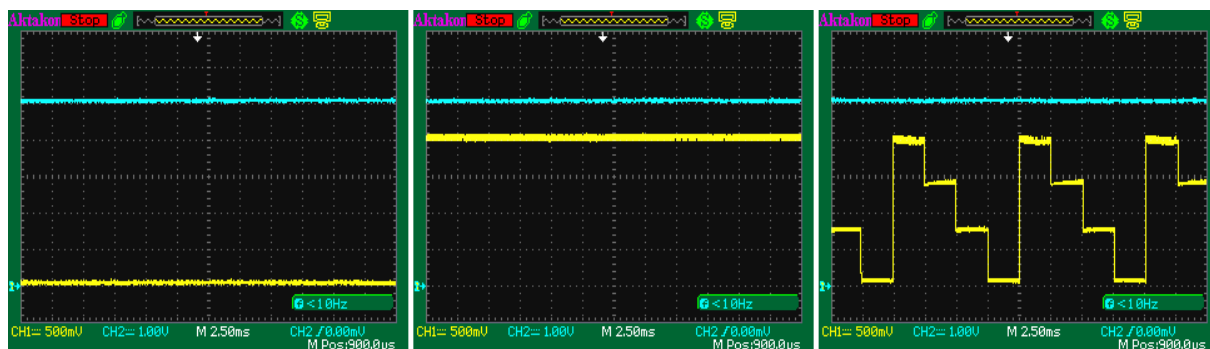


Рисунок 31 – Эксперимент с фотодиодом (2 500 мкс)

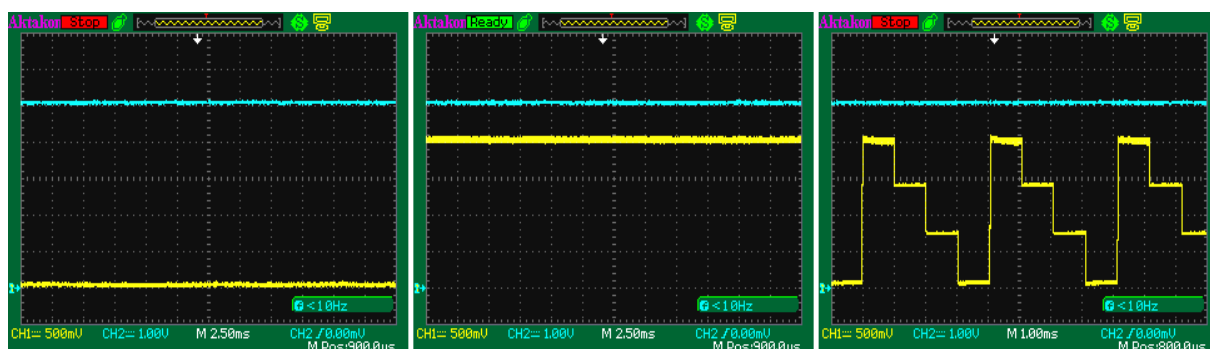


Рисунок 32 – Эксперимент с фотодиодом (1 000 мкс)

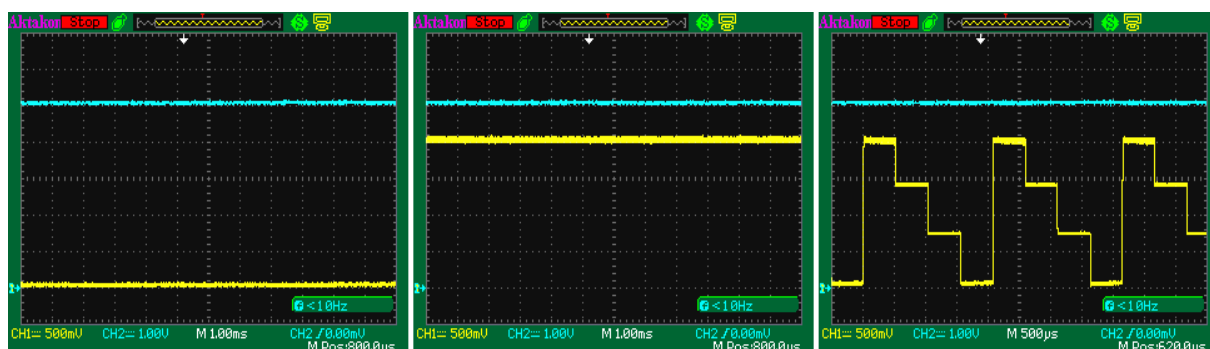


Рисунок 33 – Эксперимент с фотодиодом (500 мкс)

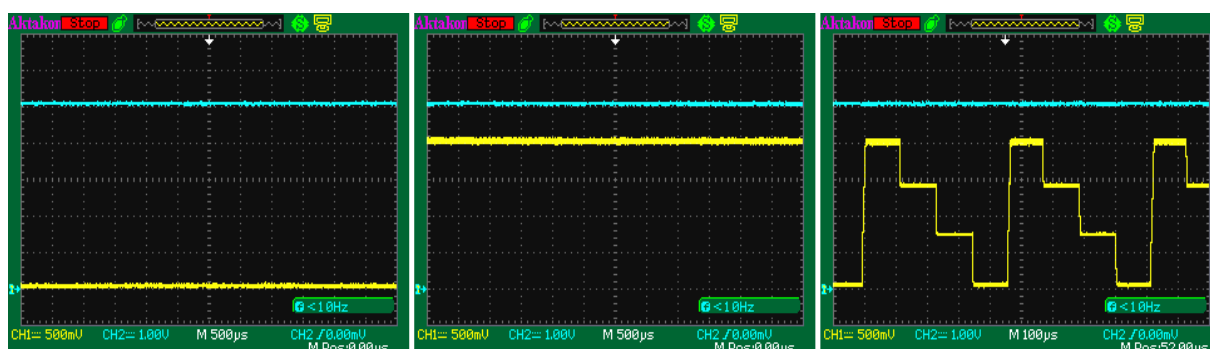


Рисунок 34 – Эксперимент с фотодиодом (100 мкс)

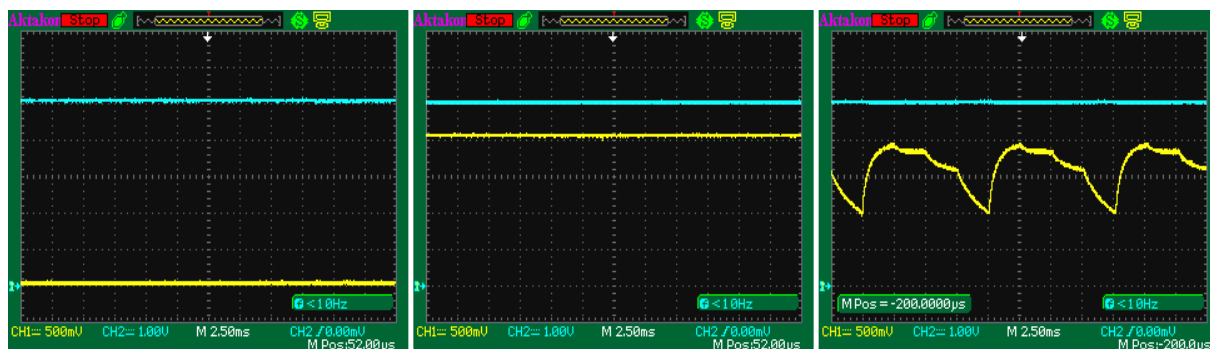


Рисунок 35 – Эксперимент с фоторезистором (2 500 мкс)

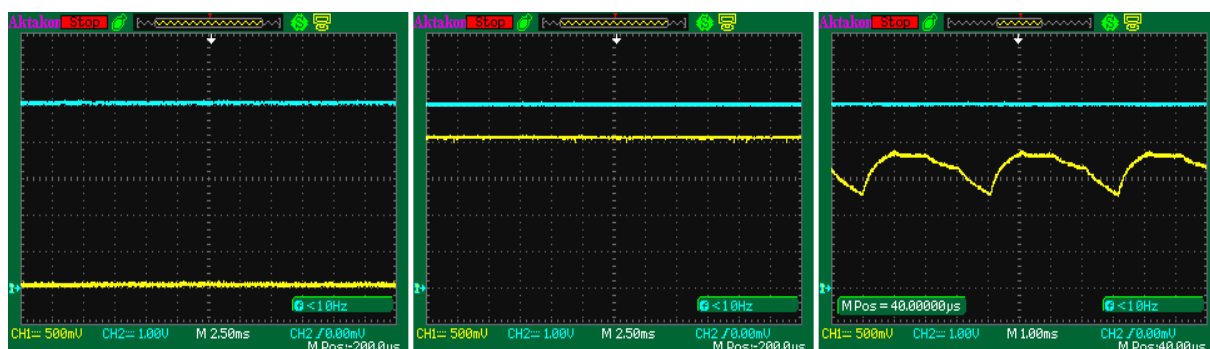


Рисунок 36 – Эксперимент с фоторезистором (1 000 мкс)



Рисунок 37 – Эксперимент с фоторезистором (500 мкс)

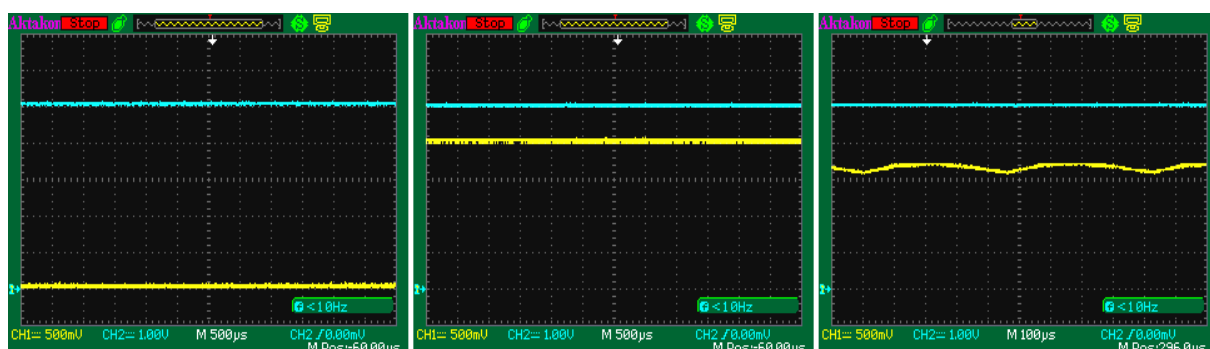


Рисунок 38 – Эксперимент с фоторезистором (100 мкс)

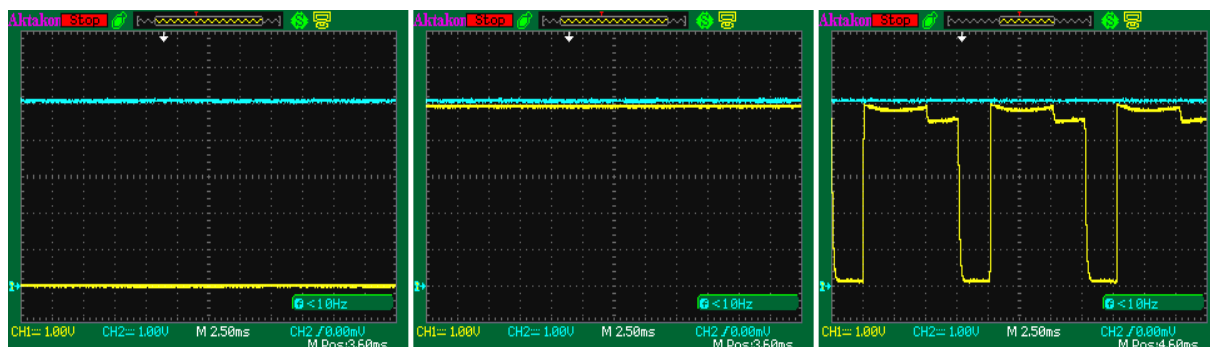


Рисунок 39 – Эксперимент с фототранзистором (2 500 мкс)

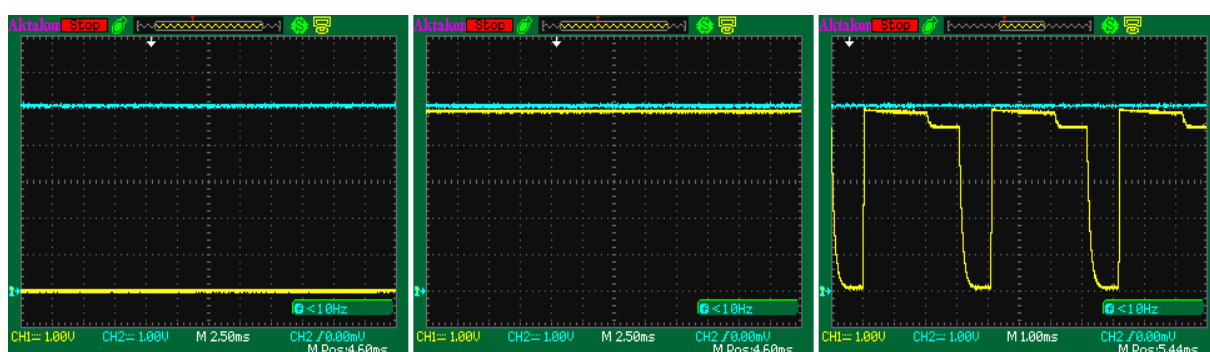


Рисунок 40 – Эксперимент с фототранзистором (1 000 мкс)

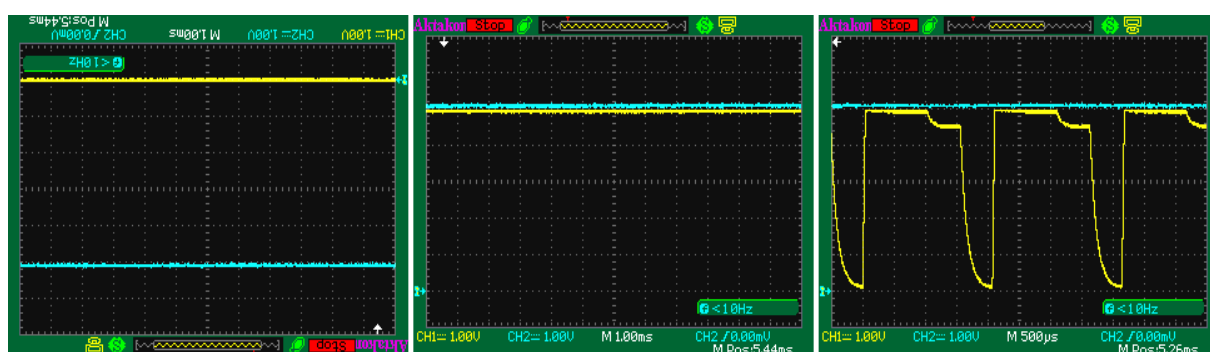


Рисунок 41 – Эксперимент с фототранзистором (500 мкс)

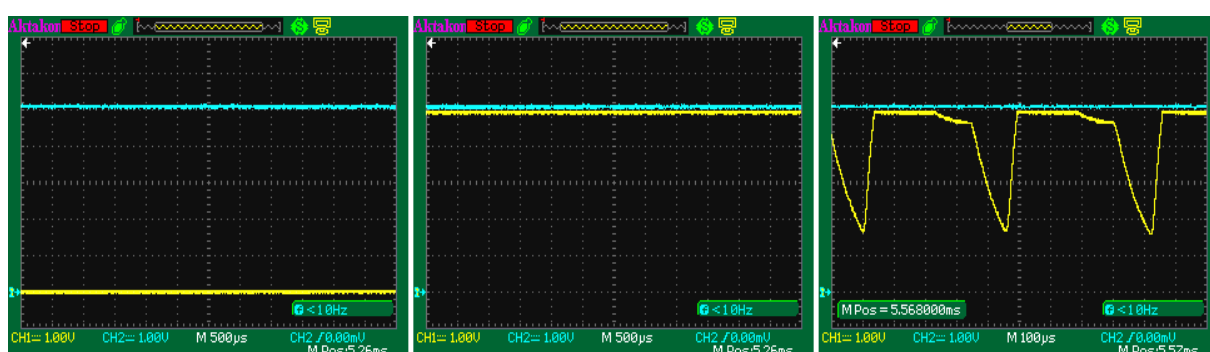


Рисунок 42 – Эксперимент с фототранзистором (100 мкс)

По полученным данным, приведенным на рисунках выше, был сделан вывод, что наилучшим вариантом является фотодиод «PD333-3C-H0-L2». На данном диоде будет основываться приёмное устройство – фотоприемник. Схема фотоприемника изображена на рисунке 47.

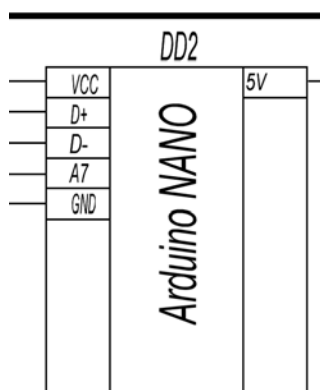


Рисунок 43 – Принципиальная электрическая схема фотоприемника

Коды для передатчика и приемника приведены в листинге A.2 и листинге A.3 приложения A, соответственно, также на рисунке B.1 приложения B представлена принципиальная электрическая схема программно-аппаратного комплекса передачи данных с использованием технологии Li-Fi в видимом спектре. Фото собранного макета программно-аппаратного комплекса представлено на рисунок C.2 приложения C.

3.4. ВЫВОД ПО ГЛАВЕ 3

1. В ходе проектирования программно-аппаратного комплекса нами был разработан ЦФП – цифrofотонный преобразователь, устройство преобразующее цифровой код в фотонное излучение.
2. Для алгоритма были разработаны методы небинарной модуляции сигнала. Для дальнейших экспериментов была выбран метод 2БМ.
3. По окончании тестирования был выбран фотодиод «PD333-3C-H0-L2».
4. Была смоделирована схема передатчика и воссоздана на самодельной печатной плате. Также созданы приёмник и его схема. Общая схема представлена в приложении В с комментариями.

4. Тестирование программно-аппаратного комплекса.

Для проверки работоспособности программно-аппаратного комплекса были проведены функциональное и нефункциональное тестирования.

4.1 ТЕСТИРОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ

Цель функционального тестирования – обеспечить правильное функционирование программы с точки зрения конечного пользователя, то есть проверить, выполняет ли программно-аппаратный комплекс свои функции в соответствии с требованиями технического задания или нет.

Для уменьшения помех и концентрации внимания на передачи данных в световом диапазоне, было принято решение поместить Li-Fi систему в светонепроницаемый корпус, в роли которого выступила картонная коробка. Данная конструкция изображена на рисунке 48.

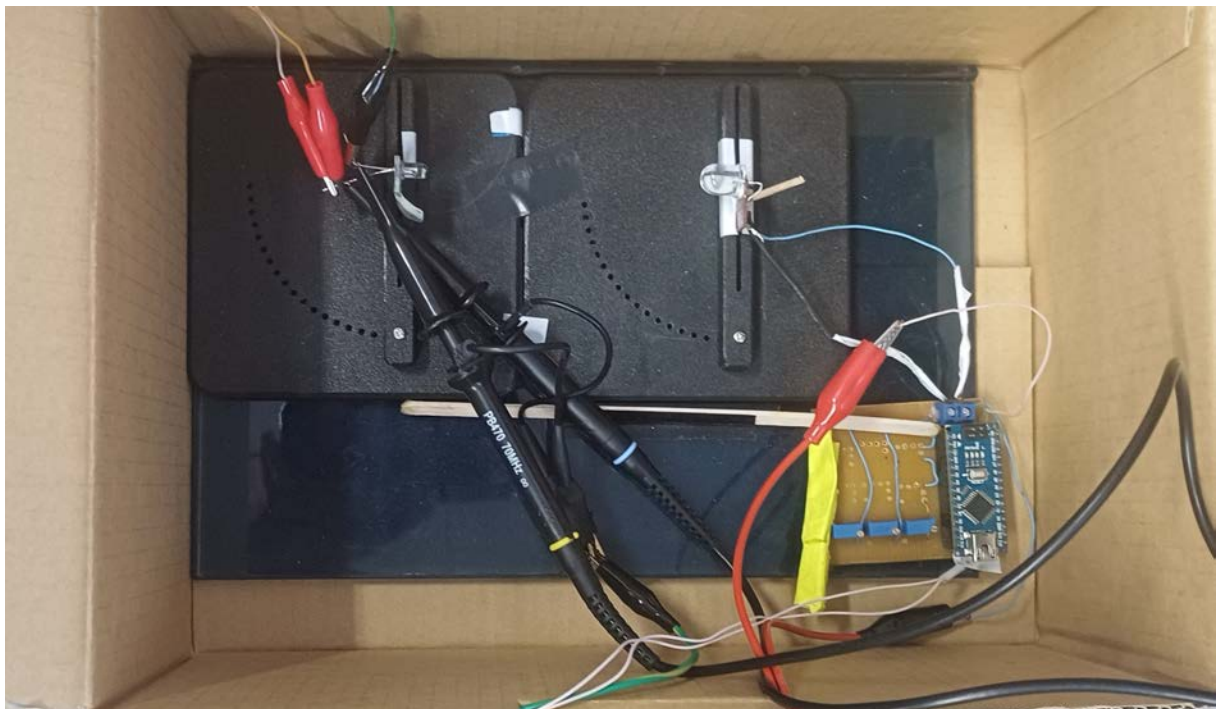


Рисунок 44 – Система фотонной передачи данных в коробе

Микроконтроллер Arduino NANO имеет на своей плате USB-разъём, который коммутирован с преобразованием интерфейсов USB-UART. Данный функционал позволяет создать связь с исследовательским компьютером при помощи встроенной в среду разработки «Arduino IDE» функции «Serial.println()». Данная функция отправляет в порт компьютера сообщение с определённой скоростью в 1 000 000 бод, то есть количество передаваемых символов сигнала в секунду.

Для мониторинга порта и фиксации данных была использована программа «PuTTY.exe». Данная программа является свободно распространяемым клиентом для различных протоколов удалённого доступа, включая SSH, Telnet, rlogin. Также в функционал приложения включена возможность работы через последовательный порт. Данная программа была настроена на работу с виртуальным COM-портом (COM4) со скоростью в 1 000 000 бод. Все данные выводились в терминал и записывались в табличный файл с расширением «CSV» для логирования. Отрывок из лог. файла, в который были записаны данные тестирования передачи данных, представлен на рисунке 49.

Как видно из рисунка 49 структура сигнала состоит из трёх частей: стартового байта, пакета в 1 байт и байта окончания. Сообщение считается полученным верно, если конечный байт и стартовый совпадают после их оцифровки.

Полный список полученных данных от приёмника был выложен на веб-сервисе для хостинга IT-проектов и их совместной разработки «GitHub». Ссылка на полный список приведена в библиографическом списке под номером 29 [29].

После окончания передачи 256 различных чисел, начиная с 147, было посчитано количество ошибок, которое равно 7. В процентном соотношении – 2,734375% от количества неповторяющихся чисел. Наличие ошибки говорит, что есть необходимость дальнейшей работы над алгоритмом и техническими средствами фотонной передачи данных.

4.2. ВЫВОД ПО ГЛАВЕ 4

В результате тестирования системы было выявлено возможность передачи небинарного сигнала. Данный вывод сделан на основе анализа файла логирования фотоприёмника. Анализ также показал наличие 7 неправильно принятых пакетов из 256 различных сообщений (2,734375 %) от фотопередатчика, небинарно смодулированных при помощи метода 26М. Данные ошибки приёма светового сигнала ставят новые задачи: повышение производительности системы и увеличение точности приёма фотонного сигнала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технология фотонной передачи данных на сегодняшний день является незабытой и используется в устройствах взаимодействия. Так был создан новый стандарт IEEE 802.11bb, который использует бинарную модуляцию светового потока. Также данный стандарт основывается на группе IEEE 802.11, что позволяет упростить объединения технологии Li-Fi и Wi-Fi в одну единую структуру беспроводной коммуникации.

В ходе проектирования программно-аппаратного комплекса передачи данных с использованием технологии Li-Fi в видимом спектре были проанализированы светодиод, фоторезистор, фотодиод и фототранзистор, что позволило разработать первый вариант общей схемы данного комплекса. Также был разработан алгоритм фотонной передачи данных. После проектирования системы фотонной передачи данных был разработан и изготовлен цифро-фотонный преобразователь (ЦФП) – устройство преобразующее цифровой код, в роли которого выступило двоичное представление числа, в фотонное излучение. После были разработаны методы небинарной модуляции сигнала. Для дальнейших реализации и тестов был выбран метод 26М.

Были смоделированы схемы передатчика и приёмника светового сигнала. После все схемы были сведены в конечный вариант общей схемы комплекса. По конечной общей схеме были изготовлены приёмник (навесным монтажом) и передатчик (на макетной плате).

В результате тестирования системы было выявлено возможность передачи небинарного сигнала. На данный момент присутствует 2,7343 % неправильно принятых пакетов от 256 различных сообщений, небинарно смодулированных при помощи метода 26М. Данные ошибки приёма светового сигнала ставят новые задачи: повышение производительности системы и увеличение точности приёма фотонного сигнала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. «Беспроводная передача данных от каждой лампочки» (оригинальное название, «Wireless data from every light bulb») https://www.ted.com/talks/harald_haas_wireless_data_from_every_light_bulb?subtitle=en. Дата обращения 24.12.2024.
2. Bolannavar, J. Li-Fi (Light-Fidelity) – A Future Wireless Technology / J. Bolannavar // 2018 International Journal of Scientific Engineering and Research – IJSER, 2018 – P. 1-6.
3. IEEE 802.11.a – <https://standards.ieee.org/ieee/802.11a/1165/>. Дата обращения 25.02.2025.
4. IEEE 802.11.n – <https://standards.ieee.org/ieee/802.11n/3952/>. Дата обращения 25.02.2025.
5. IEEE 802.11.ac – <https://standards.ieee.org/ieee/802.11ac/4473/>. Дата обращения 25.02.2025.
6. IEEE 802.11.ax – <https://standards.ieee.org/ieee/802.11ax/7180/>. Дата обращения 25.02.2025.
7. IEEE 802.11.bb – <https://standards.ieee.org/ieee/802.11bb/10823/>. Дата обращения 25.02.2025.
8. Khorov, E. Current Status and Challenges of Li-Fi – IEEE 802.11bb / E. Khorov, I. Levitsky. // 2022 IEEE Communications Standards Magazine – IEEE, June 2022 – P. 1-8.
9. IEEE 802.15.7 – <https://standards.ieee.org/ieee/802.15.7/6820/>. Дата обращения 25.02.2025.
10. IEEE 802.15.7m – https://www.ieee802.org/15/pub/IEEE%20802_15%20WPAN%2015_7%20Revision1%20Task%20Group.htm. Дата обращения 25.02.2025.
11. IEEE 802.15.13 – <https://standards.ieee.org/ieee/802.15.13/10269/>. Дата обращения 25.02.2025.
12. IEEE 802.15 WPAN – <https://www.ieee802.org/15/pub/TG13.html>. Дата обращения 25.02.2025.
13. Hranilovic, S. Visible light communications: the road to standardization and commercialization (PART 1) / S. Hranilovic, L. Lampe, S. Hosur. // 2013 IEEE Communications Magazine. – IEEE, 2013. – P. 1-2.
14. Компания «pureLiFi», раздел сайта «О нас» <https://www.purelifi.com/about-purelifi/>. Дата обращения 03.03.2025.

15. Компания «pureLiFi», раздел – товар «LiFi-XC»
<https://www.purelifi.com/products/lifi-xc/>. Дата обращения 03.03.2025.
16. Компания «pureLiFi», раздел – товар «Kitefin»
<https://www.purelifi.com/products/kitefin-tactical/>. Дата обращения 03.03.2025.
17. Light technology firm strikes deal with US Army
<https://www.bbc.co.uk/news/uk-scotland-scotland-business-56900762>. Дата обращения 03.03.2025.
18. Компания «pureLiFi», раздел – товар «Kitefin»
<https://www.purelifi.com/products/light-antenna-one/>. Дата обращения 03.03.2025.
19. «Беспроводное подключение к Интернет посредством LiFi теперь доступно и в общественном транспорте»
<https://www.signify.com/ru-ru/our-company/news/press-releases/2019/2019119-everywhere-you-go-always-take-trulifi-with-you>. Дата обращения 04.03.2025.
20. «Trulifi» product information
<https://www.signify.com/global/innovation/trulifi/downloads>. Дата обращения 04.03.2025.
21. «О нас» (об компании Signify) <https://www.signify.com/ru-ru/our-company/about-us>. Дата обращения 04.03.2025.
22. Игнатов, А.Н. Оптоэлектроника и нанофотоника: учебное пособие / А.Н. Игнатов. – 4-е изд., стер. – СПб: Лань, 2020. – 596 с. – ISBN 978-5-8114-5149-4. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/133479> (дата обращения: 25.03.2025). – Режим доступа: для авториз. Пользователей.
23. Карабанов, С.М. Фотоэлектричество. Современное состояние и перспективы развития // Электронная промышленность. - 2003. - No 4. - С. 75-81.
24. Мехатроника. Инженерный подход: учебное пособие для вузов / А.Н. Веригин, Н.А. Незамаев, А.Г. Ишутин [и др.]; под редакцией А.Н. Веригин. – 2-е изд., стер. – СПб: Лань, 2025. – 644 с. – ISBN 978-5-507-52181-4. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/439847> (дата обращения: 29.03.2025). – Режим доступа: для авториз. Пользователей.
25. Оптимизация электротехнологий в АПК : сборник научных трудов / под редакцией Л.В. Вороновой. – Ярославль : Ярославский ГАУ, 2016. – 120

- с. – ISBN 978-5-98914-173-9. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/131378> (дата обращения: 27.03.2025). – Режим доступа: для авториз. Пользователей.
26. Элементная база радиоэлектронной техники. Поупроводниковые компоненты: учебник : учебник / П.А. Пашинцев, В.П. Пашинцев, Г.И. Линец, В.И. Никулин. – Ставрополь : СКФУ, 2022. – 456 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/386729> (дата обращения: 29.03.2025). – Режим доступа: для авториз. Пользователей.
27. Варфоломеев, Л.П. Светоизлучающий диод // Большая российская энциклопедия. Том 29. М., 2015, стр. 540-541
28. Хоровиц, П. Искусство схемотехники: В 3-х томах. Т. 2. Пер. С англ. / П. Хоровиц, У. Хилл. – 4-е изд., М.: Мир, 1993. – 371 с. – ISBN 5-03-002338-0.
29. Репозиторий с версиями программно-аппаратного комплекса передачи данных на облачной платформе «GitHub» – <https://github.com>. Дата обращения: 24.05.24.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ИСХОДНЫЙ КОД ПРОГРАММ ДЛЯ РАБОТЫ КОМПЛЕКСА

Листинг А.1 – Программный код реализации алгоритма эксперимента с фотоприемниками – передатчик

Продолжение приложения А

Листинг А.2 – Программный код реализации алгоритма фотонного передатчика программно-аппаратного комплекса

Продолжение приложения А

Листинг А.3 – Программный код реализации алгоритма фотоприемника
программно-аппаратного комплекса

ПРИЛОЖЕНИЕ В

ОБЩАЯ СХЕМА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ LI-FI В ВИДИМОМ СПЕКТРЕ

В данном приложении В представлена полная принципиальная электрическая схема программно-аппаратного комплекса передачи данных с использованием технологии Li-Fi в видимом спектре. В таблице В.1 приложения В представлен перечень использованных элементов.

Таблица В.1 – Перечень элементов принципиальной электрической схемы программно-аппаратного комплекса передачи данных с использованием технологии Li-Fi в видимом спектре

Поз. обозначение	Наименование	Кол.

Продолжение приложения В

Рисунок В.1 – Принципиальная электрическая схема
программно-аппаратного комплекса передачи данных с использованием
технологии Li-Fi в видимом спектре

ПРИЛОЖЕНИЕ С

КОНЕЧНЫЙ ВИД СИСТЕМЫ ФОТОННОЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

На рисунке С.1 приводится изображение фотонного передатчика с подключенными питанием и светодиодом.

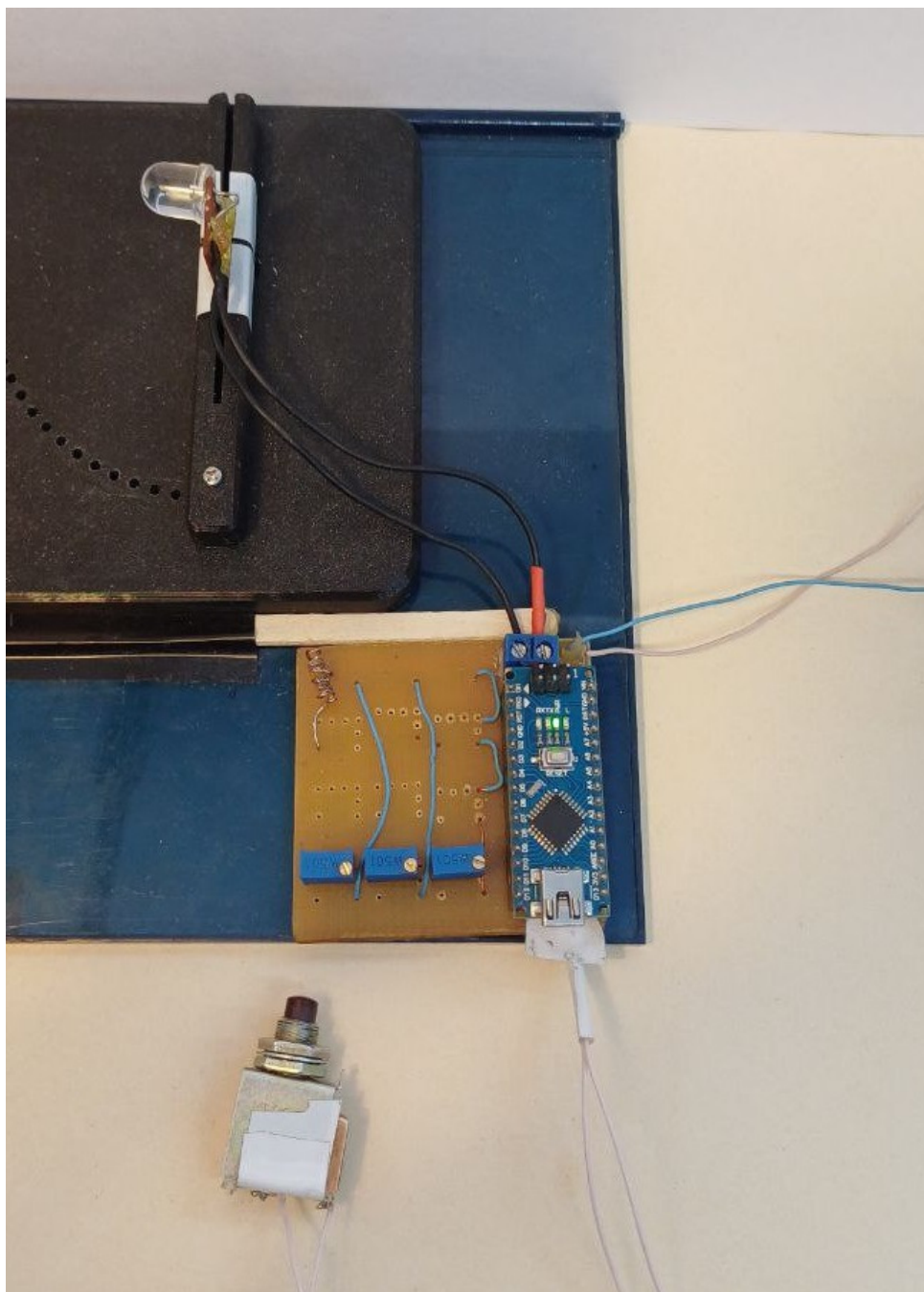


Рисунок С.1 – Передатчик со светодиодом в режиме готовности

Продолжение приложения С

Рисунок С.2 представляет собой изображение макета комплекса передачи данных с использованием технологии Li-Fi в видимом спектре

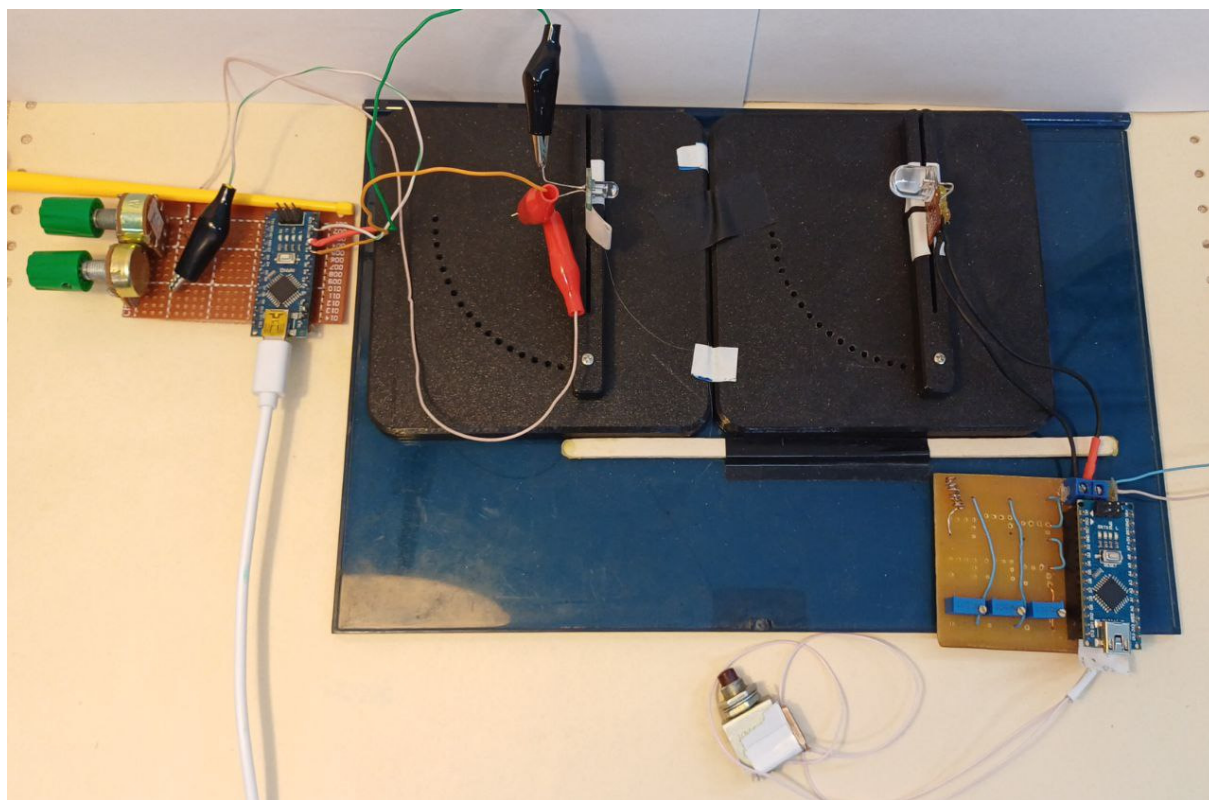


Рисунок С.2 – Макет программно-аппаратного комплекса