

НАО «Восточно-Казахстанский технический университет им. Д.Серикбаева»

УДК 681.58; 621.391.63

на правах рукописи

АЛИМХАНОВА АСЛИМА ЖЕҢІСҚЫЗЫ

**Система автоматизированного управления жизнеобеспечения с
использованием технологии VLC**

6D070200 – Автоматизация и управление

Диссертация на соискание степени
доктора философии (Ph.D)

Научный консультант
Ph.D, Григорьева С.В.

Зарубежный научный консультант
Ph.D, профессор,
Dr. György Györök

Республика Казахстан
Усть-Каменогорск, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ВИДИМОГО СВЕТА.....	10
1.1 Оптические беспроводные технологии.....	10
1.2 Организация передачи данных по технологии VLC.....	17
Выводы по первому разделу.....	22
2 ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА МОДУЛЯЦИИ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ VLC.....	24
2.1 Методы модуляции.....	24
2.2 Модуляция включения/выключения ООК.....	24
Выводы по второму разделу.....	48
3 РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕЛОГО СВЕТОДИОДА ОСВЕЩЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМИ РЕЖИМАМИ.....	50
3.1 Схемотехническое решение передающего и приемного модулей.....	50
3.2 Программное обеспечение.....	58
3.3 Экспериментальная установка передачи данных.....	61
Выводы по третьему разделу.....	68
4 ОРГАНИЗАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ VLC.....	69
4.1 Структурная схема автоматизированной системы управления на основе оптической беспроводной связи посредством светодиодного освещения.....	69
4.2 Реализация системы управления температурой в помещении по технологии VLC.....	76
Выводы по четвертому разделу.....	80
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	81
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	83
ПРИЛОЖЕНИЕ А - Акты внедрения.....	90

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

При написании диссертации использовались следующие стандарты:

1. Инструкция по оформлению диссертации и авторефератов, МОН РК, внешний аттестационный комитет. – Алматы, 2004.
2. IEEE 802.15.7-2018. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks, Part 15.7: Short-Range Optical Wireless Communications.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В тексте диссертационной работы использованы следующие сокращения:

ACO – Asymmetrically Clipped Optical (ассиметрично обрезанный оптический)

AM – Amplitude Modulation (амплитудная модуляция)

AWGN – Additive White Gaussian Noise (аддитивный белый гауссовый шум)

BER – Bit Error Rate (коэффициент битовых ошибок)

CNR – Carrier-to-Noise Ratio (отношение несущей к шуму)

CSK – Color-Shift Keying (цветовая модуляция)

DPIM – Digital Pulse Interval Modulation (частотно-импульсная интервальная модуляция)

FSO – Free Space Optics (оптика свободного пространства)

IoT – Internet of Things (Интернет вещей)

LDs – Laser Diodes (лазерные диоды)

LED – Light-Emitting Diode (светодиод)

Li-Fi – Light Fidelity (двунаправленная беспроводная технология передачи данных по видимому свету)

LOS – Line-of-Sight (зона прямой видимости)

MIMO – Multiple Input Multiple Output (множественный вход множественный выход)

NLOS – Non-Line of Sight (вне зоны прямой видимости)

NRZ – Non Return to Zero (код без возвращения к нулю)

OOK – On-Off Keying (включено-выключено)

OCC – Optical Camera Communications (связь через оптическую камеру)

OWC – Optical Wireless Communications (оптическая беспроводная связь)

OFDM – Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов)

PPM – Pulse Position Modulation (импульсно-позиционная модуляция)

RZ – Return to Zero (кодирование с возвращением к нулю)

QAM – Quadrature Amplitude Modulation (модуляция методом квадратичных амплитуд)

SNR – Signal-to-Noise Ratio (отношение сигнал/шум)

SCM – Sub Carrier Modulation (модуляция поднесущей)

UART – Universal Asynchronous Receiver Transmitter (универсальный асинхронный приемопередатчик)

VLC – Visible Light Communication (связь по видимому свету)

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Передовыми странами мира приняты и реализуются национальные программы цифровизации экономики. Такая тенденция связана с цифровой революцией, происходящей во всех отраслях экономики и сферах жизни людей. Каждая страна обозначает приоритеты цифрового развития, ориентируясь на свои потребности. В Казахстане в 2017 году постановлением правительства утверждена государственная программа «Цифровой Казахстан» [1], которая направлена на повышение уровня качества жизни казахстанцев за счет повсеместного внедрения в их жизнедеятельность цифровых технологий. Задачи программы охватывают широкий спектр и их решения должны стать основой в перспективе для перехода республики к цифровой экономике. Одной из приоритетных выделена задача, связанная с расширением покрытия сетей связи и доступностью информационно-коммуникационных технологий. Реализация цифровой экономики невозможна без развития информационно-коммуникационной инфраструктуры и применения новых инновационных подходов в данной отрасли.

Современные тенденции в области информационно-коммуникационных технологий заключаются в предоставлении возможности внедрения концепции вычислительно-коммуникационной сети физических объектов, оснащенных встроенными системами, для взаимодействия между собой и с внешней средой в автоматизированных системах управления, и в частности в системах управления параметрами жизнеобеспечения [2].

Система домашней автоматизации становится все более популярной и доступной с точки зрения финансовых затрат. Люди хотят жить в интеллектуальных «умных» жилых помещениях, оснащенных системами домашней автоматизации. Такие системы не только обеспечивают им удобство, комфорт, безопасность, но и снижают их повседневные расходы за счет энергосберегающих решений. В традиционных системах управления используются решения для проводного подключения устройств. Однако внедрение таких систем требует прокладки кабелей и наиболее рационально осуществлять это одновременно со строительством дома.

Для процесса обмена данными и работы приложений «умных» систем необходимо формирование особой среды, которая будет обеспечивать высокую скорость передачи данных, низкую задержку сигнала, поддерживать высокую плотность абонентских устройств. В настоящее время в домашней автоматизации для приема-передачи данных в основном используются беспроводные технологии Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, которые базируются на радиочастотном спектре. Реальные данные свидетельствуют, что беспроводные технологии, работающие в радиочастотном диапазоне, перегружены и в перспективе не смогут в полном объеме выполнить требования современной жизни. В нашей работе мы предлагаем использовать оптическую беспроводную технологию связи Visible Light Communication (VLC) для решения существующих проблем.

VLC - это новая технология беспроводной связи, основанная на передаче данных посредством светодиодных систем освещения. Светодиод на сегодняшний день вытесняет из нашей жизни универсальные лампы накаливания и люминесцентные лампы. Преимущества светодиодных осветительных приборов заключаются в длительном сроке эксплуатации, низком энергопотреблении и высокой светоотдачей, надежности, экологичности. Необходимо отметить, что светодиод обладает высокой чувствительностью отклика с возможностью поддержки высокоскоростной связи без снижения показателя надежности и эффективности. Такие свойства светодиодов позволяют использовать их непосредственно как источники искусственного освещения, так и дополнительно для передачи данных.

VLC – это перспективная технология беспроводной оптической связи, которая может одновременно обеспечивать освещение и беспроводную передачу данных. Технология обладает рядом преимуществ: высокой скоростью передачи, безопасной передачей информации, отсутствием помех от электромагнитных волн. Данная технология позволяет снизить потребление электроэнергии, так как в качестве канала передачи информация будут использоваться осветительные приборы. Наряду с этими характеристиками технология обеспечивает безлицензионную работу, поскольку системы работают в нерегулируемом спектре. Поэтому мы предлагаем дополнительно с существующими коммуникационными технологиями использовать технологию передачи данных по видимому свету.

Актуальность тематики диссертационной работы обусловлена необходимостью удовлетворения потребностей быстро растущего количества абонентов беспроводным трафиком с поддержкой качества требуемых сервисов. Исследование направлено на разработку систем управления использующих технологию VLC для связи внутри помещений, где она дополняет Wi-Fi и сотовую беспроводную связь.

Цель работы. Разработать автоматизированную систему управления параметрами жизнеобеспечения с организацией передачи данных через системы светодиодного освещения.

Основная идея работы заключается в использовании уже существующей инфраструктуры светодиодной системы освещения для внедрения технологии беспроводной связи для приложений малого радиуса действия. Мотивация к применению светодиодных светильников заключается в использовании «зеленой» технологии для беспроводной связи в отличие от радиочастотной.

Задачи исследования:

1) Провести анализ оптических беспроводных технологий и возможности организации передачи данных по технологии Visible Light Communication.

2) Выбор метода модуляции для передачи данных посредством светодиодов на основе анализа предлагаемых методов модуляции в оптической системе беспроводной связи.

3) Разработать приемо-передающее устройство с использованием светодиодов освещения для передачи данных в беспроводных системах управления.

4) Провести экспериментальные исследования автоматизированной системы управления параметрами жизнеобеспечения с передачей данных по технологии Visible Light Communication.

Объект исследования – автоматизированные системы управления параметрами жизнеобеспечения.

Предмет исследования – передача данных по беспроводной оптической технологии посредством видимого света в системах управления.

Основные методы исследования. При выполнении диссертационной работы применялись общенаучные теоретические и экспериментальные методы, такие как анализ, имитационное моделирование, эксперимент. В качестве специальных применялись методы модуляции в беспроводной оптической сети, методы теории автоматического управления. При проведении компьютерного моделирования использовались программа Simulink пакета MATLAB, расчеты проводились в программе Microsoft Excel. Разработка схмотехнического решения экспериментального устройства осуществлялась в программе sPlan 7.0, а программное обеспечение с помощью визуальной среды программирования FLProg.

Научные положения, выносимые на защиту:

1) Модель системы приема-передающего тракта с использованием модуляции ООК-NRZ позволяющая передавать данные по беспроводному оптическому каналу.

2) Приемно-передающее устройство с каналом передачи данных по световому потоку с использованием мощных белых светодиодов по технологии Visible Light Communication.

3) Светодиодная система освещения с функцией передачи данных по оптическому каналу в автоматизированной системе управления параметрами жизнеобеспечения.

Научная новизна:

– разработано приемно-передающее устройство по технологии Visible Light Communication для автоматизированной системы управления с функцией реализации управляющих воздействии;

– предложен новый подход организации передачи данных в автоматизированной системе управления параметрами жизнеобеспечения по беспроводному оптическому каналу посредством светодиодной системы освещения.

Обоснованность и достоверность. Обоснованность научных положений и выводов базируется на анализе научных публикаций по направлению диссертации, а также на применении комплекса общенаучных и специальных методов познания. Основные полученные результаты доложены на международных научных конференциях.

Результаты теоретических расчетов, компьютерного моделирования и экспериментальных исследований показывают высокую сопоставимость, что говорит о достоверности представленных результатов диссертационной работы.

Научная и практическая значимость работы. Выводы исследования могут быть использованы для решения проблем, связанных с электромагнитными помехами, для увеличения пропускной способности каналов связи, а также для разработки гибридных архитектур передач данных по беспроводным системам в автоматизации.

Практическая значимость заключается в возможности реализации предлагаемого подхода для регулирования физических процессов в системах управления жизнеобеспечения, а также возможность перехода к беспроводному управлению технологическими процессами.

Полученные практические результаты диссертационной работы приняты для внедрения ТОО «BFGROUP, ТОО «ISTOCKCHEMI», а также в учебный процесс ВКТУ им. Д.Серикбаева. Акты внедрения приведены в приложении А.

Апробация работы. Результаты работы доложены и обсуждены на международных конференциях Венгрии, России и Казахстана, а именно: 14th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas (Секешфехервар, Венгрия, 2019); Международной НТК студентов, магистрантов и молодых ученых «Творчество молодых инновационному и развитию Казахстана» (Усть-Каменогорск, Казахстан, 2019, 2020); 21st International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (Ерлагол, Россия, 2020); International Scientific Conference “Far East Con”/ Far Eastern Federal University (Владивосток, Россия, 2020); Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (Екатеринбург, Россия, 2021); International Siberian Conference on Control and Communications, (Казань, Россия, 2021).

Публикации. По теме диссертационной работы автором опубликовано 16 публикаций, из них 1 статья в журнале, индексируемом в Web of Science, имеющим Impact Factor за 2020 год равный 1,806 и квартиль по технике и междисциплинарным трудам Q3; 5 работ в изданиях рекомендуемых КОКСОН МОНРК и 6 публикаций в сборниках международных конференции, индексируемых в базе Scopus.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка использованных источников из 106 наименований. Работа изложена на 92 страницах компьютерного текста, включает 57 рисунков, 3 таблицы и 1 приложение.

В первой части работы приведен анализ технологии передачи данных на основе видимого света. Проанализированы оптические беспроводные технологии передачи данных. Рассмотрена организация передачи данных по технологии Visible Light Communication. На основе проведенного анализа научных исследований по тематике работы были сформулированы цель и задачи диссертации. Обоснована актуальность разработки автоматизированной системы управления жизнеобеспечением с использованием технологии передачи данных посредством видимого света.

Во второй части работы рассмотрены методы модуляции в беспроводной оптической сети связи. Изучены модуляционные характеристики имеющие важное значение для повышения производительности новой системы. Для типов импульсных модуляции рассчитана и исследована спектральная плотность мощности для получения временных форм сигнала с заданным отношением сигнал/шум. Построена модель идеальной системы приема-передачи для ООК-NRZ в присутствии аддитивного белого гауссовского шума, которая подходит для систем VLC внутри помещений. Исследованы формы сигналов и влияние инструментальных и внешних шумов. Приведены расчетные значения вероятности битовой ошибки по экспериментальным данным.

В третьем разделе представлены схемотехнические решения передающего и приемного модулей на базе микроконтроллеров ATmega, где в качестве линии связи был использован свет. Разработано программное обеспечение в среде программирования FLProg для микроконтроллеров. На базе разработанных схем собрано экспериментальное приемо-передающее устройство и проведен эксперимент. Продемонстрирована устойчивая передача данных с помощью мощного белого светодиода и физического кодирования светового сигнала по протоколу UART.

В четвертом разделе рассмотрен новый подход к организации автоматизированной системы управления параметрами жизнеобеспечения построенной на принципе передачи данных по видимому спектру в одном направлении. Выделены контуры управления, прямые и косвенные показатели каждого контура. Продемонстрирована реализация на примере организации автоматизированной системы управления температурой в помещении. Приведены экспериментальные данные.

В заключении сформулированы основные выводы по результатам представленных результатов диссертационной работы.

В приложении приведены акты внедрения полученных практических и научных результатов.

1 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ВИДИМОГО СВЕТА

1.1 Оптические беспроводные технологии

В настоящее время системы автоматизации получают информацию для мониторинга и управления физическими процессами от датчиков и исполнительных устройств, которые пространственно удалены друг от друга. Классическая передача данных между модулями системы управления осуществляется через физические провода. Необходимость физического подключения датчиков и исполнительных механизмов ограничивает гибкость, масштабируемость и надежность работы системы. Современные тенденции в системах управления техническими процессами предполагают использование беспроводных технологий связи. Переход на беспроводные системы связи позволяет снизить затраты на монтаж и время на ввод в эксплуатацию оборудования, повысить надежность связи без использования кабельных разъемов и снизить риски отказов при эксплуатации, изменять сетевую топологию и модернизацию оборудования в режиме реального времени без остановки производства и длительного простоя. Для пользователей основным привлекательным моментом является возможность установления связи с устройствами системы в любое время и из любой точки, т.е. организация интеллектуальных систем управления.

С массовым распространением мобильности пользователей и продвижением популярных платформ управления «Интернет вещей», «Умный дом», «D2D», «M2M» беспроводной доступ стал основным способом организации связи и превзошел проводной по объему прокачиваемого через него трафика [3, 4].

Большинство международных аналитических агентств дают высокие оценки росту числа соединенных устройств в мире. В 2016 году на конференции Internet of Things World, которая прошла в Санта Клара (США), компания Sig Fox привела прогнозируемые данные от различных компаний. По графику рисунка 1.1 видно, что значения отличаются на порядок. Например, аналитиками компании Gartner было заявлено, что количество соединенных устройств в 2020 году достигнет 21 млрд. шт., а специалистами компании Intel приводится значение в 200 млрд. шт. для этого же года [5].

Согласно отчету Cisco Visual Networking Index, прогнозируется увеличение объема мобильной передачи данных в семь раз в период с 2016 по 2021 год, а количество мобильных устройств на душу населения достигнет 11,6 миллиардов в 2021 году [6]. В мае 2019 года экспертами компании Strategy Analytics приведены данные о подключении к сети Интернет 22 млрд.шт. устройств.

Приведенный прогноз, а также реальные данные показывают необходимость внедрения сетевых архитектур с высокой пропускной способностью, которые смогут удовлетворить растущие потребности в ресурсах беспроводной сети.

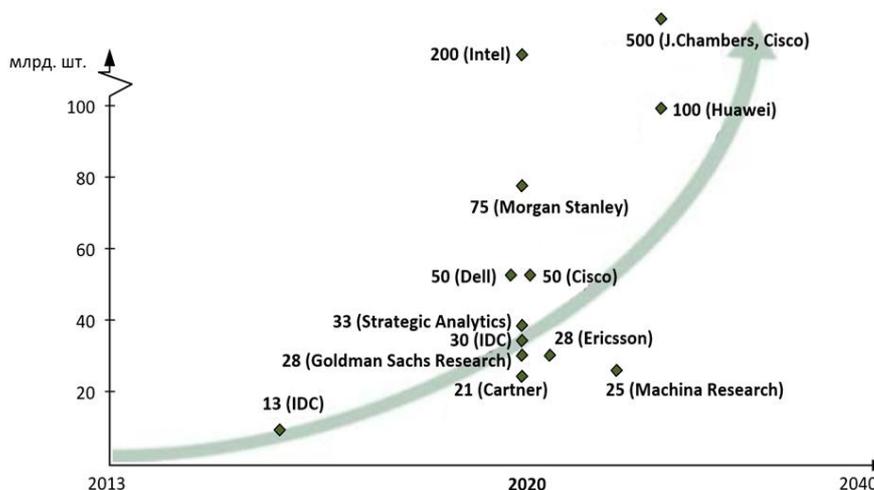


Рисунок 1.1 – Прогноз количества соединенных устройств по технологии Интернета вещей в мире, млрд.шт.

Примечание – составлено по источнику [7]

На сегодняшний день коммуникационные технологии, разработанные с целью предоставления беспроводной связи, в основном используют радиоволны. Необходимо отметить, что радиочастотный ресурс ограничен и диапазон оптимальный для использования (1-5 ГГц) уже перегружен [8, 9].

Анализ количества подключенных к сети устройств в мире и прогноз на ближайшие десять лет показывают назревающие трудности оказания спроса услуг по беспроводной связи в радиочастотном диапазоне [10]. Чтобы удовлетворить растущий спрос, следует использовать либо увеличение полосы пропускания, либо повышение спектральной эффективности. Однако увеличение спектральной эффективности происходит медленно и не может удовлетворить быстрорастущую потребность. Параллельно с развитием технологий в радиочастотной области дополнительно существует потенциал для использования оптической беспроводной связи (Optical Wireless Communication, OWC) как системы связи нового поколения. Дополнительное использование оптических частот позволит решить проблемы, связанные с дефицитом спектра в беспроводной связи на основе радиочастоты.

В системах на основе оптической беспроводной связи можно использовать три основные частоты спектра - ультрафиолетовый, инфракрасный и видимый свет. В пределах последних двух диапазонов возможна связь посредством видимого света (Visible Light Communications, VLC), оптической связи в свободном пространстве (FreeSpaceOptics, FSO) и связь через оптическую камеру (Optical Camera Communications, OCC) [11].

Технологии OWC обладают рядом уникальных преимуществ, таких как широкий спектр, высокая скорость передачи данных, низкая задержка, высокая информационная безопасность, устойчивость к радиочастотным электромагнитным помехам, свободное лицензирование, низкая стоимость и низкое энергопотребление [12-14].

Для систем OWC источники света должны иметь соответствующую длину волны, ширину спектральной линии, числовую апертуру, высокую яркость с небольшой площадью излучающей поверхности, продолжительное время работы, высокую надежность и широкую полосу пропускания модуляции. Выбор источника света в основном зависит от конкретных условий применения, поставленных задач и должны также учитываться такие параметры как оптическая мощность и профиль луча. Существует ряд доступных источников света, которые могут быть использованы в оптических системах связи, но наиболее часто применяются яркие мощные светодиоды (LED) и лазерные диоды (LDs). LED/LDs могут быть изготовлены для излучения света в широком диапазоне длин волн от видимой до инфракрасной частей электромагнитного спектра. Длины волн и соответствующий им энергетический спектр показаны на рисунке 1.2.

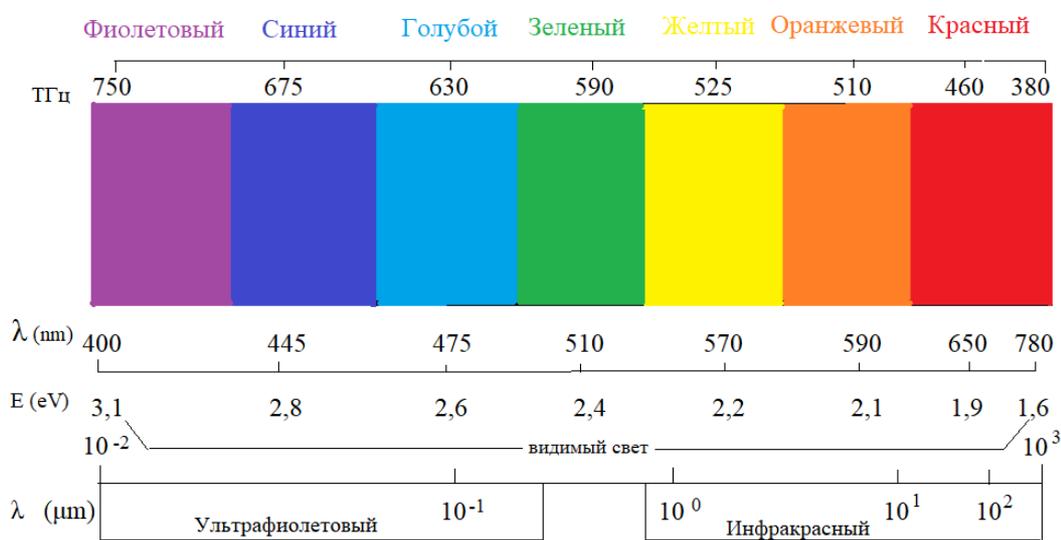


Рисунок 1.2 – Длина волны и энергия ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной части электромагнитного спектра

Возможность визуального диапазона человеческого глаза простирается от 370 нм до 780 нм. Эти длины волн видимого спектра представляют большой интерес для передачи данных по беспроводной оптической сети в различных областях. Например, зеленая часть видимого спектра в пределах 495-570 нм представляет особый интерес для подводной OWC из-за медленного затухания в этой полосе. Ближний инфракрасный спектр излучения (0,75-1,4 мкм) обычно используется в волоконно-оптической связи. Коротковолновый инфракрасный спектр излучения (1,4-3 мкм) является доминирующей спектральной областью для дальней связи, включая оптическое волокно и оптику свободного пространства. Инфракрасное излучение уже давно широко используется для оптических беспроводных приложений, включая пульты дистанционного управления телевизорами, обмен файлами между телефонами и другими персональными устройствами, а также двухточечные наружные соединения в оптике свободного пространства.

На рисунке 1.3 приведены схемы передачи данных технологий OWC, которые имеют индивидуальные отличные особенности и ограничения в применении. Можно выделить обзорные публикации, в которых подробно приводится сравнение технологий OWC по различным аспектам [12, с.3; 14, с.1] [15-17]. Отметим основные моменты, для обоснования технологии передачи данных в видимом диапазоне для организации беспроводной сети в системах управления.

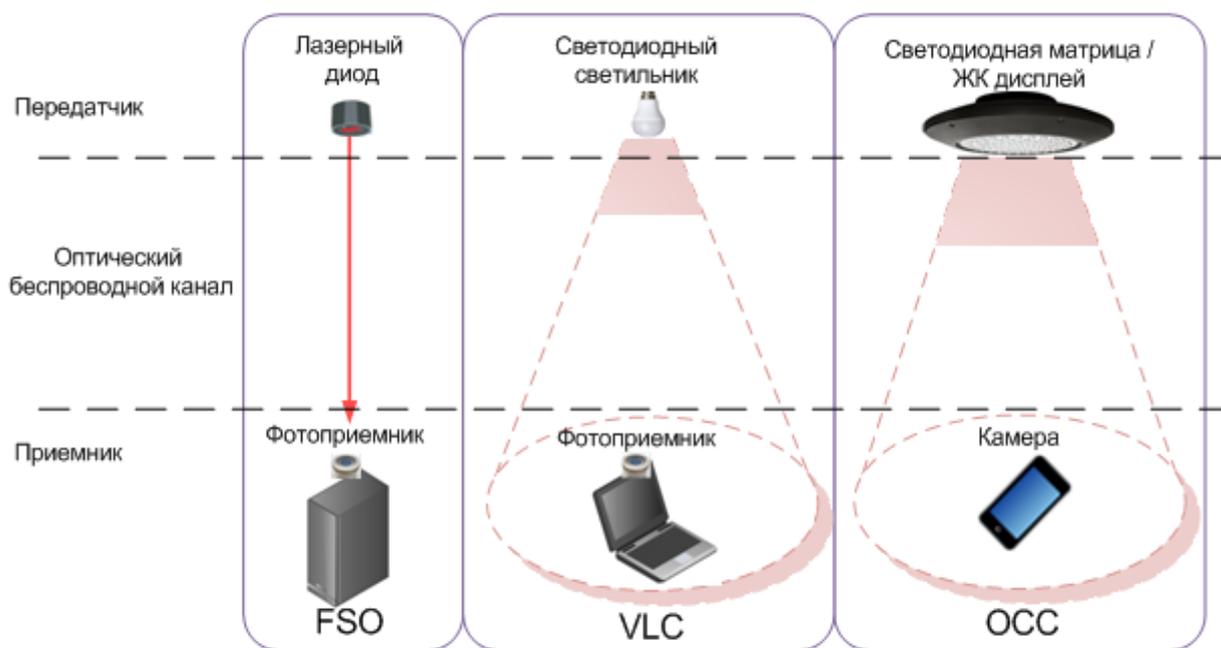


Рисунок 1.3 – Схемы передачи данных по оптической беспроводной связи

Технология FSO осуществляет передачу данных в инфракрасной части спектра через атмосферу. Приемопередающий модуль включает мощный лазерный диод для передачи сигнала и высокочувствительный фотодиод для приема (рисунок 1.3). Длина волны в существующих системах зависит от применяемого лазерного диода и изменяется в пределах 700-950 нм или 1550 нм [18]. Системы, организованные по технологии FSO, не требуют лицензирования и процедуры выделения частот, так как работают в диапазоне ~400 ТГц. Предлагаемые решения на рынке транзитных беспроводных сетей по технологии FSO в настоящее время поддерживают скорость до 30 Гбит/с, что считается самым высоким из когда-либо зарегистрированных [19]. Каналы FSO невосприимчивы к любому типу электромагнитных помех, создаваемых радиочастотными устройствами и линиями связи. За счет этого можно увеличить плотность покрытия, не обращая внимания на помехи от одновременной работы нескольких систем. Технология поддерживает высокую конфиденциальность, так как для передачи используется узконаправленный луч. Естественно, что перехватить сигнал, можно только непосредственно установив сканеры на линии лазера. Развертывание и демонтаж системы легко выполнить за несколько часов для установления связей между блоками

приемопередатчиков FSO. Система может работать в замкнутом и в открытом пространстве с высокой скоростью передачи данных до нескольких километров, тогда как связь в видимом свете может достигать расстояния всего в несколько метров [20].

Приведенные преимущества технологии FSO делает ее привлекательной для различных военных и гражданских целей по сравнению с традиционными сетями связи [21]. Основные проблемы для повсеместного внедрения связаны с зависимостью от погодных условий, необходимостью обеспечения прямой видимости между передатчиком и приемником [22].

Для организации системы передачи данных по оптической беспроводной связи в помещении наиболее перспективной является технология VLC. В технологии VLC используются светодиодные светильники и фотодетекторы. В качестве передатчика выступает светодиодный осветительный прибор, который одновременно обеспечивает передачу данных и выполняет свою основную функцию – освещение помещения (рисунок 1.3).

В отличие от традиционной осветительной инфраструктуры полупроводниковая светотехника на основе мощных белых светодиодах обладает высокими технико-экономическими показателями, а также возможностью создания динамичной комфортной световой среды. Данный тип источника света отличает низкое энергопотребление, надежность и длительный срок службы, высокая энергоэффективность, безопасность в эксплуатации, удобное техническое обслуживание, низкие характеристики выработки тепла, высокая скорость переключения. Необходимо отметить, что количество циклов включения и выключения не влияют на надежность и срок эксплуатации [23].

Идея использования видимой части электромагнитного спектра для обеспечения передачи данных и освещения на основе использовании белых светодиодов является относительно новой. Видимый диапазон длин волн обеспечивает пропускную способность ~ 400 ТГц, что в 10000 раз больше радиочастотной полосы пропускания [12, с. 6] [24, 25]. Кроме того, технология VLC включает внутреннюю безопасность на физическом уровне, устойчивость к радиочастотным электромагнитным помехам и свободное лицензирование.

Несмотря на то, что технология VLC разрабатывается и широко исследуется только последние десять лет, были продемонстрированы системы передачи со скоростью передачи данных от 100 Мбит/с до 100 Гбит/св зависимости от конструкции светодиода, что подтверждается результатами исследований [26-29].

В 2018 году Международный союз электросвязи инициировал вопрос об использовании для ближней связи волн видимого света, и рабочая группа по управлению спектром представила отчет о возможности снизить перегруженность радиочастотного спектра. В отчете было заявлено, что «исследования по разработке новых технологий в сочетании связи на основе электромагнитных волн видимого света могли бы создать интересную комбинацию для решения задач эффективного использования радиочастотного спектра» [11, с. 2].

Продвижение полупроводниковой светотехники на основе светодиодов в системы освещения и способность мощных белых светодиодов быстро переключаться и контролироваться, повлияли на разработку беспроводных систем передачи данных в оптическом диапазоне, интегрированных в системы освещения. Передача данных по световому потоку стала возможной так как в зданиях, офисах и производственных помещениях в основном используется светодиодное освещение, что сокращает эксплуатационные расходы.

Необходимо отметить проблемы, которые влияют на внедрение технологии VLC в реальные проекты. Во-первых, требуется прямой канал передачи и необходимость обеспечения равномерно покрытия от источников света в плоскости приема. Дополнительно следует отметить влияние возможных помех от естественного освещения. Во-вторых, скорость передачи данных зависит от расстояния до источника света, которая имеет ограничения. Вследствие этого при удалении от источника света скорость нелинейно падает. И, в-третьих, отсутствие единой разработанной и стандартизированной аппаратной части приемопередающих устройств.

VLC способен обеспечить высокую скорость передачи данных в диапазоне десятков метров, но не учитывает многопользовательский доступ. Взяв за основу принципы беспроводной оптической технологии, работающей в видимом спектре, в 2011 году был продемонстрирован прототип устройства с двунаправленным каналом передачи данных [30]. Технология получила название Li-Fi (Light Fidelity) и входит в стандарт коммуникаций в видимом свете. В отличие от VLC двунаправленная передача данных Li-Fi, представляет собой технологию сетей на основе светодиодных передатчиков, которая включает многопользовательский доступ [31]. Технология Li-Fi реализует высокоскоростное беспроводное соединение совместно с освещением, используя светодиоды в качестве передатчиков, а фотоприемники в качестве приемников. Видимый свет используется для прямого пути, а в качестве средства связи для обратного трансфера – инфракрасный порт или видимый свет. Приемные устройства в большинстве пользовательских устройств, таких как смартфоны, не оснащены мощными светодиодами, поэтому связь по восходящей линии связи в VLC и Li-Fi на данный момент осуществляется недостаточно хорошо.

Все приемники технологий FSO, VLC и Li-Fi состоят из фотоприемников, которые редко используются в современных приемных устройствах, и затраты на коммерциализацию для изменения структуры приемника высоки. За последние несколько лет появились интеллектуальные устройства со встроенными дополнительными металлоокислительно-полупроводниковыми камерами высокого разрешения, CMOS-камерами [32, 33]. Большинство смартфонов нового поколения имеют встроенные CMOS-камеры, обеспечивающие возможность фото- и видеосъемки, а также использоваться для передачи данных и местной локализации.

Использование смартфонов или видеокамер в рамках беспроводной оптической связи повлияло на развитие новой технологии – связь через оптическую камеру (ОСС), которая рассматривается в качестве кандидата на

включение в стандарт VLC [34-36]. OCC представляет собой расширение технологии VLC с преимуществом - отсутствии дополнительных аппаратных средств. В отличие от обычных систем VLC, в которых в качестве приемника используются фотоприемник, в OCC в качестве приемника используются камеры CMOS, которые встроены в современные стандартные смартфоны, цифровые камеры, задние камеры автомобиля, камеры наблюдения [37]. OCC захватывает двумерные данные в виде последовательностей изображений, что позволяет передавать больше информации по сравнению с VLC на базе фотоприемников. Существующей проблемой при организации передачи данных является низкая скорость передачи OCC по сравнению с очень высокоскоростной модуляцией светоизлучающих диодов [38].

В работе [39] нами обобщены особенности и приведены перспективные направления на основе оптической беспроводной связи. С точки зрения инфраструктуры, описанные технологии имеют различия в типе передатчика, приемника и средств связи. В таблице представлено сравнение показателей производительности технологий OWC [12, с. 4; 13, с. 2,3].

Таблица 1 - Показатели технологий OWC

Показатели	VLC	Li-Fi	FSO	OCC
Топология связи	Однонаправленная или двунаправленная	Двунаправленная	Однонаправленная или двунаправленная	Однонаправленная
Дальность связи	20 м	10 м	более 10,000 км	60м
Поддержка мобильной связи	необязательно	обязательно	отсутствует	Необязательно
Уровень помех	Низкий	низкий	низкий	Отсутствует
Скорость передачи данных	10 Гбит/с с использованием светодиодов	10 Гбит/с с использованием светодиодов	40 Гбит/с	55 Мбит/с
Безопасность	Высокая	Высокая	Высокая	Высокая

Двойная функциональность, предоставляемая технологией передачи данных посредством видимого света, предлагает целый ряд интересных приложений. VLC может применяться для высокоскоростной передачи данных через осветительные инфраструктуры внутри помещений [40] и организации

пространства «Умный дом» [41]; в распознавании и позиционировании человека или предметов [42, 43]; в безопасном и безаварийном доступе к данным в больницах [44, 45]; при проектировании «Умный город» и интеллектуальной транспортной системы через внешние осветительные системы [46 – 48]; в индустрии развлечений и культуры [49].

Большинство исследований направлено на разработку приложений для помещений и транспортной инфраструктуры. Переход на VLC является перспективным также для производства в рамках инновационного подхода Индустрия 4.0. Например, в некоторых технологических процессах внедрение беспроводных технологии ограничено из-за электромагнитных помех. Такая проблема может быть решена с использованием технологии VLC.

Для многих приложений с использованием VLC были достигнуты значительные успехи, однако существуют проблемы, которые ограничивают ее внедрение [50, 51], поэтому применение светодиодных осветительных источников в основном реализуется в системах передачи аудио и текстовой информации [52-55]. Автором были представлены собственные проекты передачи аудио [56] и символьных данных [57] посредством белого светодиода освещения. Полученные результаты легли в основу для дальнейших исследований и используются для решения задач диссертационной работы.

Проведенный анализ показал, что широкое внедрение устройств в интеллектуальную среду представляет собой серьезную проблему для поставщиков коммуникационных услуг в целях обеспечения экономичного и высококачественного беспроводного соединения. На сегодняшний день радиочастотные системы не могут удовлетворить высокие требования будущих коммуникационных сетей. Технологии оптической беспроводной связи являются лучшим дополнительным решением. Для организации систем коммуникации внутри помещений наиболее оптимальным является технология, построенная на передаче данных посредством видимого света через светодиодные системы освещения. Сценарии применения систем VLC во внутренней среде разнообразны. Однако, стоит отметить, что исследования в основном ведутся в направлении передачи информации разного формата между пользователями, т.е. как дополнение к существующим технологиям для организации локальных или глобальных сетей. В данной работе предлагается интегрировать в светодиодные системы освещения функцию передачи данных для управления физическими параметрами. Такой подход является новым при организации автоматизированных систем управления процессами жизнедеятельности.

1.2 Организация передачи данных по технологии VLC

Система VLC состоит из передатчика, который модулирует свет, создаваемый светодиодами, и приемника на основе фоточувствительного элемента (фотодиода, солнечной панели), который используется для извлечения модулированного сигнала из света. Передатчик и приемник физически отделены друг от друга, но подключены по световому каналу. Для систем VLC линия видимости является обязательным условием.

Схема типичной системы VLC представлена на рисунке 1.4, где для простоты представлен только однонаправленный канал от передатчика к приемнику. Передатчик и приемник состоят из оборудования и программного обеспечения. Программное обеспечение передатчика в основном отвечает за кодирование данных и управление оборудованием. После модуляции светодиодный драйвер в аппаратном обеспечении управляет светодиодами (например, путем их быстрого включения и выключения) для передачи модулированного сигнала. В приемнике световые сигналы, воспринимаемые фотодатчиком, фильтруются, усиливаются и преобразуются из аналоговых сигналов в цифровые. Преобразованные сигналы затем декодируются декодером в программной части приемника.

Приведем общее описание передающего устройства, приемного устройства и канала для передачи информации. VLC-передатчик – это устройство, которое преобразует данные в сообщения, которые могут быть отправлены через оптический носитель свободного пространства с использованием видимого света. Функции передатчика VLC – излучать свет и одновременно передавать данные. Однако передача данных не должна затрагивать в любом случае основную функцию устройства, которой является освещение. Из-за этой проблемы излучатель VLC должен быть способен адаптироваться к требованиям освещения. Это означает, что он должен использовать подходящую мощность, в зависимости от окружающего освещения. Кроме того, излучатель VLC не должен вызывать каких-либо заметных мерцаний.

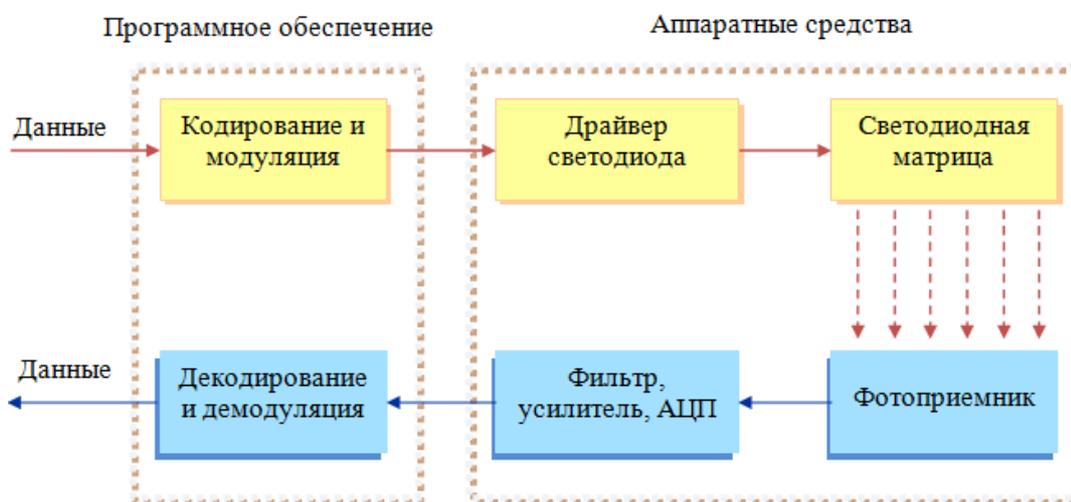


Рисунок 1.4 – Схема типичной системы передачи данных по технологии VLC

Параметры передатчика VLC в основном ограничены характеристиками светодиодов. Скорость передачи данных (частота передачи) зависит от коммутационных способностей светодиодов, в то время как зона обслуживания излучателя зависит от мощности передачи и от системы освещения (угла излучения). В настоящее время индустрия светодиодного освещения может создавать светодиоды, которые могут предлагать частоты переключения в несколько десятков мегагерц.

Приемники VLC основаны на светочувствительных элементах с высокой пропускной способностью и обеспечивают возможность высокоскоростной связи. Однако, поскольку падающий свет связан с другими источниками света (искусственными или естественными), приемник подвержен значительным помехам. Производительность приемника VLC может быть увеличена с использованием оптического фильтра, который отсекает нежелательные компоненты спектра, такие как инфракрасное излучение. Кроме того, в высокоскоростных передатчиках VLC, использующих белые светодиоды, оптический фильтр позволяет пропускать только узкополосное излучение, соответствующее синему цвету. Причиной этого выбора является то, что белый свет получается из синих светодиодов и желтого люминофора, и поскольку время переключения синих светодиодов короче, активируются более высокие скорости передачи данных.

Эффект помех можно также уменьшить, сужая поле зрения приемника, которое влияет на зону обслуживания. Более широкое поле зрения позволяет использовать более широкую зону обслуживания, но это связано с недостатком захвата большего количества шума, что приводит к уменьшению показателя отношения сигнал/шум. Тем не менее, применение коротковолновой технологии в здании требует повышенной мобильности и возможность сужения поля зрения не рассматривается в большинстве случаев. С другой стороны, для наружного длинноволнового применения, где диапазон индуцирует малые углы, узкое поле зрения является эффективным решением. Узкое поле зрения помогает системам VLC повысить их устойчивость к шуму от дневного света или от других передатчиков.

Фотоприемником обычно является обратный смещенный кремниевый фотодиод, работающий в фотопроводящем режиме, который генерирует ток пропорциональный падающему свету. Значение фототока также зависит от спектральной чувствительности фотодиодов. По этой причине увеличение площади фотоприемника может повысить производительность системы. Однако площадь фотоприемника сильно влияет на его емкость, что приводит к снижению пропускной способности. В этих условиях выбор области фотодетекторов представляет собой компромисс между отношением сигнал/шум и полосой пропускания. Далее, из-за малых значений генерируемого фототока, схема трансимпеданса (отношение выходного напряжения к входному току) используется для преобразования малого тока в напряжение. Напряжение усиливается и фильтруется для устранения высокого и низкочастотного шума, а также компонента постоянного тока. После всех этих операций принятый сигнал должен соответствовать испускаемому сигналу, содержащему данные. Блок обработки данных декодирует информацию из восстановленного сигнала, получая двоичное сообщение.

Как правило, свет, создаваемый светодиодами, модулируется амплитудной модуляцией, но другие методы модуляции, такие как, дискретная многотональная модуляция или метод прямой последовательности для расширения спектра также могут быть использованы.

Рассмотрим более подробно предлагаемые решения для выбора модуляционных схем в передаче данных по видимому свету с использованием светодиодов.

Для улучшения скорости передачи данных получили широкое распространение два варианта модуляции – это квадратурная амплитудная модуляция (QAM) на основе схемы модуляции с множеством несущих, в том числе с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM) и амплитудная модуляция без несущей (CAP).

В статье [58] авторами исследуются характеристики полосы пропускания нитридных светодиодов в сочетании с ортогональным частотным разделением каналов. В представленной экспериментальной системе на основе OFDM обеспечивается выравнивание с помощью эквалайзеров с одним нажатием в частотной области. Схема OFDM модуляции позволяет распределить данные и энергию адаптивно. Данная схема помогает избежать низкочастотных помех, которые вызваны освещением в помещении. В статье проводится сравнение двух методов преодоления эффектов частотно-зависимого ослабления сигнала. В результате получена высокая скорость передачи данных 3 Гбит/с для одноканальной беспроводной системы VLC. Однако демонстрация выполняется для канала с узким полем зрения на расстоянии 5 см. Авторами предполагается, что область покрытия может быть улучшена за счет введения специальной оптики, а также за счет объединения нескольких светодиодов для увеличения передаваемой оптической мощности.

Harald Haas с соавторами в работе [59] привели результаты экспериментальных исследований VLC каналов на основе модуляций OFDM и CAP с использованием RGB светодиодов, показывающие, что CAP предлагает на 19 % более высокую скорость передачи по сравнению с OFDM на том же отрезке канала.

Другой альтернативный подход основан на разделении сигнала на неравномерно разнесенные поднесущие известный как модуляция m-CAP. В работе [60] демонстрируется улучшение скорости передачи для канала VLC приблизительно на 30%. Однако, увеличение количества полос приводит к увеличению количества формирующих импульсных фильтров с конечной импульсной характеристикой, что значительно повышает вычислительную сложность.

В статье [61] авторы предлагают модифицированную модуляцию OFDM, основанную на многополосной схеме для системы связи в видимом свете. Метод может эффективно увеличить расстояние распространения и бороться с многолучевым распространением, вызванным интерференцией между символами и интерференцией между несущими. Чтобы увидеть поведение разработанной модели системы были проведены исследования с различными параметрами, такими как количество оптических диапазонов, входная мощность, расстояние и скорость передачи данных. Результаты показали, что предлагаемая система при входной мощности 2 дБм в случае полосы частот $B_{\text{band}}=3$ обеспечивает передачу данных на расстояние 12 м со скоростью 10 Гбит/с. Теоретические расчеты частоты битовых ошибок

показали, что предлагаемая система может работать и со скоростью передачи данных в 15 Гбит/с.

В системах, которые нацелены на передачу большого объема информации с высокой скоростью используются технологии ортогонального частотного разделения каналов с мультиплексированием со множественным входом и множественным выходом (OFDM–MIMO). Оптический метод MIMO также может быть использован с другими схемами модуляциями, построенными на несущих. Результаты исследования показывают, что такие системы могут работать со скоростью от несколько сотен Мбит/с до 5 Гбит/с [62]. Для достижения высокоскоростной передачи данных по ограниченной полосе пропускания используются сложные схемы модуляции. В диссертационной работе не ставится задача обеспечения высокой скорости, и поэтому мы не рассматриваем такие подходы.

В 2011 году IEEE ратифицировал стандарт беспроводной персональной сети 802.15.7 для VLC [63]. Деятельностью по стандартизации руководили компании Samsung (Корея) и Intel (США). Данным стандартом определены скорости передачи данных в световом спектре в диапазоне от 11 Кбит/с до 96 Мбит/с с использованием методов модуляции включения-выключения (OOK), позиционно-импульсной модуляции (L-PPM) и цветовой модуляции (CSK).

В статье [64] представлен анализ производительности VLC системы с позиционно-импульсной модуляцией (PPM) по каналу вне прямой видимости (NLOS). В частности, рассматривается система VLC с модуляцией L-PPM, в которой связь осуществляется через отраженные компоненты одного порядка, поскольку между передатчиком и приемником отсутствует линия прямой видимости (LOS). Точки отражения на стенах комнаты распределены случайным образом. Приближение Гаусса используется для определения частоты битовых ошибок предлагаемой системы VLC с совершенной и несовершенной информацией о состоянии канала доступной в приемнике. При заданной мощности передачи системы с модуляцией L-PPM с уровнем амплитуды больше двух производительность системы значительно улучшается по сравнению с модуляцией включения-выключения. Погрешность системы NLOS-VLC с модуляцией L-PPM также сравнивается с погрешностью системы LOS-VLC с модуляцией L-PPM. Для параметров системы с модуляцией L-PPM вне прямой видимости наблюдается увеличение погрешности.

В статье [65] авторами предлагается внутренняя система связи, в которой используется предварительное кодирование Уолша и несколько светодиодов в передатчике для мультиплексирования данных. Предлагаемая система VLC основана на модуляции интенсивности и использует понятие пространственной модуляции для передачи положительных и отрицательных значений синтезированного передаваемого сигнала с использованием технологии обработки сигнала в передатчике. Авторы попытались решить способность настройки системы в многопользовательской среде. Для этого предложили метод обнаружения с почти максимальным правдоподобием для эффективного декодирования битов данных в приемнике.

В статье [66] приведены результаты исследования по расширению полосы пропускания системы связи, в которой используется люминофорный светодиод. Медленный отклик фосфоресцирующего компонента ограничивает полосу модуляции белого светодиода до нижнего диапазона МГц. За счет синей фильтрации схемы пост-выравнивания в системе VLC была достигнута полоса пропускания 151 МГц, что позволило продемонстрировать передачу данных в режиме ООК-NRZ со скоростью до 340 Мбит/с. Канал VLC работает на расстоянии 43 см с использованием одного белого светодиода мощностью в 1Вт. Коэффициент ошибок в битах составил 10^{-3} , что соответствует пределу прямой коррекции ошибок.

В статье [67] рассматривается канал модуляции интенсивности/прямого обнаружения (IM/DD) на основе передатчика с несколькими люминофорными светодиодами и одним приемным лавинным фотодиодом. Авторами предлагается схема, построенная на модуляции интенсивности с пространственно-временным блочным кодом с фазовым сдвигом. Путем моделирования авторы достигли скорости передачи данных 1,5 Гбит/с.

Таким образом, рассмотрев модуляционные схемы для технологии видимого света можно сделать вывод, что для передачи данных в системах управления оптимальными являются схемы, построенные на амплитудной модуляции. Так как в диссертационной задаче не стоит вопрос о передаче данных с нескольких позиции, то модуляционную схему с несколькими несущими в нашем случае рассматривать будет не целесообразно, так как она более затратная. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать модуляцию без поднесущих.

Выводы по первому разделу

На основе проведенного анализа научных исследований по тематике работы были сформулированы цель и задачи диссертации. В ходе изучения научных публикаций и технических разработок по организации комфортной среды обитания человека с использованием систем автоматизации выявлены следующие особенности и проблемы.

Во-первых, при построении архитектуры автоматизированных систем управления техническими процессами наблюдается тенденция использования беспроводных технологии связи. Необходимо отметить, что большинство беспроводных систем используют для передачи данных радиоволны. Статистические данные международных аналитических агентств показывают загруженность радиочастотных диапазонов на сегодняшний день и прогнозный экспоненциальный рост подключаемых мобильных пользователей и устройств. Увеличение количества абонентов приводит к снижению скорости передачи данных, надежности и качества предоставляемых коммуникационных услуг. Для решения проблем, связанных с растущим спросом беспроводной связи, проводятся исследования в двух направлениях – это повышение спектральной эффективности радиочастотного диапазона и использование расширенного электромагнитного спектра.

Технологии на основе оптической связи рассматривают как системы связи нового поколения, которые смогут разгрузить радиодиапазон и решить часть существующих проблем.

Во-вторых, для внутренней связи с малым радиусом действий, т.е. внутри помещений нами выделена технология передачи данных посредством видимого света, VLC. Сценарии применения систем VLC во внутренней и наружной среде разнообразны. Однако, стоит отметить, что исследования в основном ведутся в направлении передачи информации разного формата между пользователями, т.е. как дополнение к существующим технологиям для организации локальных или глобальных сетей. Проведенный анализ показал, что использование передачи данных по видимому свету в автоматизированных системах управления не освещены в научных публикациях.

В-третьих, предлагаемая нами технология VLC подразумевает использование для передачи данных существующую светодиодную инфраструктуру. Дополнительно к основной функции освещения источники света должны передавать данные. Приоритетным является сохранение функциональности освещения, избегая при этом любого заметного мерцания или изменения цвета из-за модуляции интенсивности оптической мощности светодиода. Аспект связи, который является вторичным по отношению к требованиям к освещению, оспаривается нелинейностью светодиодов, с одной стороны, и ограниченной доступной пропускной способностью канала VLC, с другой стороны. Сочетание этих проблем привлекло внимание к методам модуляции.

Таким образом, сделаны следующие выводы, на основе которых поставлены задачи для решения в диссертационной работе:

1) Провести сравнительный анализ схем модуляции применяемых в оптических системах беспроводной связи с целью выбора метода модуляции для реализации передачи данных в автоматизированных системах управления посредством светодиодного освещения внутри помещений.

2) Исследовать приемо-передающий канал по видимому свету для увеличения пропускной способности и надежности передачи данных

3) Обеспечить требуемое качество освещения при разработке модуля передачи данных по технологии VLC с использованием мощных белых светодиодов в системе автоматизированного управления параметрами жизнеобеспечения.

Обозначенные выводы согласуются с задачами диссертационной работы, а их решение поможет достичь поставленной цели.

Результаты анализа исследований, приведенные в данном разделе, были опубликованы в [68].

2 ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА МОДУЛЯЦИИ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ VLC

2.1 Методы модуляции

Рассмотрим методы модуляции, которые являются наиболее популярными для организации передачи данных в помещении по оптической беспроводной связи с точки зрения эффективности использования оптической полосы пропускания. В оптических каналах могут быть применены традиционные методы модуляции, принятые в радиочастотных каналах. На основании проведенного анализа научных работ первой главы нами выделены методы модуляции оптических каналов [69], которые продемонстрированы на рисунке 2.1.

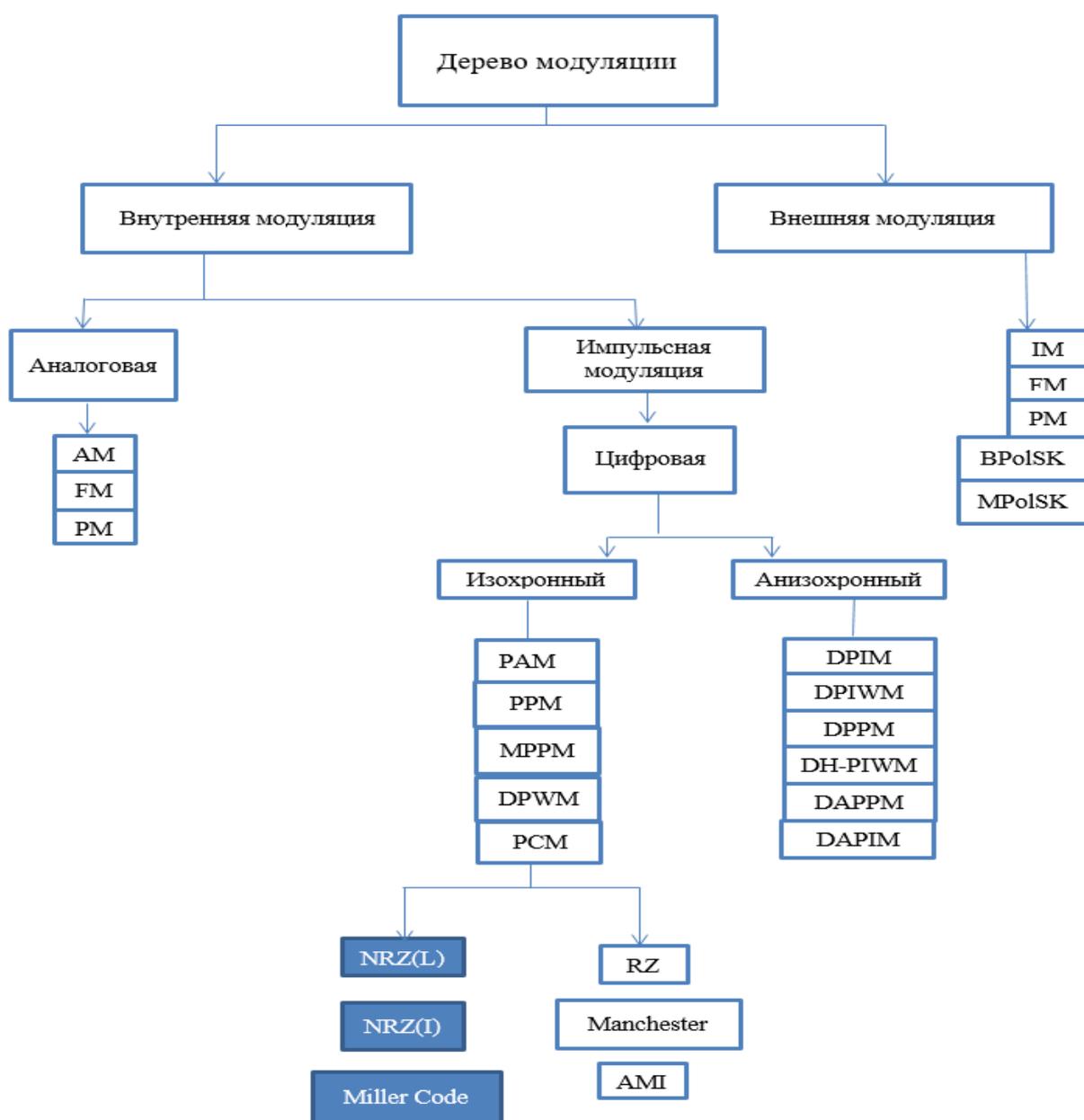


Рисунок 2.1 – Дерево методов модуляции оптических каналов

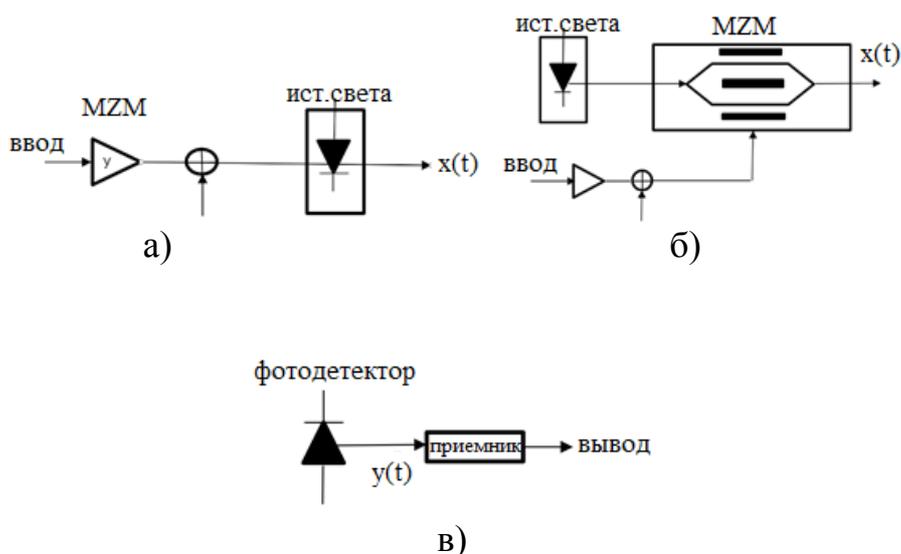
Предлагаемые подходы разбиваются на две основные подгруппы в зависимости от пространственной модели применения внутри или снаружи помещений. В диссертации разрабатывается система передачи данных внутри помещения. Остановимся более подробно на предлагаемых схемах передачи сигнала по оптическим каналам данной подгруппы.

Рассмотрим амплитудно-импульсную модуляцию. Методы амплитудно-импульсной модуляции просты и малозатратны по сравнению со схемой цифровой импульсной модуляции, которая может быть использована при распределении сигналов кабельного телевидения, передачи телевизионных сигналов высокой четкости, радиосвязи по оптоволокну, дистанционном управлении антеннами в сотовой связи.

Амплитудно-импульсная модуляция может быть реализована двумя способами (рисунок 2.2). Самый простой метод в оптической связи - это импульсная модуляция прямого детектирования (IM/DD), в котором интенсивность источника света модулируется аналоговым сигналом (предварительно модулированным высокочастотным модулятором), а фотодетектор на основе прямого обнаружения используется для восстановления (рисунок 2.2, а). Метод аналогового сигнала IM/DD не подходит для высокочастотных приложений. Это связано с ограниченной полосой пропускания оптических источников, а также с их нелинейными характеристиками [70].

Альтернативный вариант - использовать внешний модулятор, например, модулятор Маха – Цендера (MZM) для модуляции интенсивности непрерывного лазерного луча (рисунок 2.2, б).

Когерентный приемник используется для восстановления сигнала основной полосы частот (рисунок 2.2, в).



а – модуляция интенсивности, б – внешняя модуляция, в– приемник
 Рисунок 2.2 – Блок-схема системы оптической передачи

Примечание – составлено по источнику [71]

При условии, что источник и внешний модулятор являются линейными, оптический канал в свободном пространстве действует только как аттенуатор и поэтому прозрачен для формата модуляции радиочастотного сигнала [71, с.465]. Таким образом, в таких системах используются форматы амплитудной модуляции (АМ) и многоуровневой модуляции, такие как квадратурная амплитудная модуляция (QAM), амплитудно-импульсная модуляция (РАМ), а также может использоваться мультиплексирование поднесущих (SCM). Кроме того, сигналы миллиметровой волны, приближающиеся к 100 ГГц, могут передаваться с использованием внешних модуляторов [72]. Основной проблемой, с которой сталкиваются амплитудно-импульсные схемы, является линейность оптического источника.

Светодиоды демонстрируют приемлемую линейность при низких уровнях мощности, но при более высоких уровнях мощности они становятся прогрессивно нелинейными, что приводит к гармоническим и интермодуляционным искажениям, особенно в системах передачи с мультиплексированным частотным разделением частот в основной полосе частот.

Для улучшения характеристик искажения систем амплитудно-импульсной модуляции, включая пред искажение, обратную связь и прямую связь существует целый ряд методов. Предварительное искажение формы сигнала вводится с учетом нелинейности источника и имеет ограниченное применение, поскольку оно должно постоянно корректироваться по мере ввода информации. Отрицательная обратная связь обработки сигналов от модулированного оптического источника необходима, но она требует высокоточных усилителей для воспроизведения импульсных сигналов, чтобы ограничить задержку контура обратной связи до допустимого значения.

Наиболее перспективным методом является прямая компенсация, при которой характеристики идентичного источника используются для изменения формы управляющего сигнала с целью преодоления его нелинейности.

Авторами в работе [73] рассматривается фотодиод типа APD который представляет собой PIN-диод с усилением для улучшения линейности. В системах амплитудно-импульсной модуляции полоса пропускания оптической системы совпадает с полосой пропускания сигнала основной полосы (сигнал низких частот).

Средняя передаваемая оптическая мощность P_t в терминах импульсной модуляции сигнала $x(t)$ задается формулой

$$\begin{aligned} P_t &= P_0 (1 + x(t)), \\ P_t &= P_0 (1 + m \cos \omega_m t), \end{aligned} \quad (2.1)$$

где P_0 – мощность постоянного тока и индекс модуляции $m = (i_p/I_b - I_{th})$; i_p – пиковый ток лазерного диода выше тока смещения постоянного тока I_b , а I_{th} – пороговый ток.

Для каналов связи по атмосферной оптической линии связи с приемником, имеющим диаметр апертуры D , принимаемая оптическая мощность определяется как

$$P_r = \frac{\pi D^2}{8} I(0, L) \quad (2.2)$$

Отношение сигнал/шум (SNR) для оптической беспроводной системы, определяется функцией квадрата и задается следующим образом

$$SNR = \frac{R^2 H^2(0) P_r^2}{\sigma_T^2}, \quad (2.3)$$

где $H^2(0)$ – коэффициент усиления постоянного тока; σ_T^2 – общая дисперсия шума, определяемая как

$$\sigma_T^2 = 2q(i_s + i_d + i_b) + \sigma_{th}^2, \quad (2.4)$$

где i_s – импульсный токовый шум, i_d – темный токовый шум, i_b – фоновый шум, а σ_{th} – тепловой шум.

В обычных каналах отношение сигнал/шум пропорционально средней принимаемой мощности P_r , тогда как на каналах оптической беспроводной связи отношение сигнал/шум это функция квадрата мощности P_r^2 как показано в формуле 2.5, таким образом, подразумевает необходимость более высоких требований к оптической мощности для обеспечения той же производительности, а также ограниченные потери в диффузном канале.

$$SNR = \frac{(m/(1+M)RGP_r)^2}{[2qG^{2+x}(I_d + RP_r) + (RGP_r^2)RIN]B_m} \quad (2.5)$$

где R – чувствительность фотоприемника, I_d – темный ток, i_s^2 – дисперсия эквивалентного шумового тока приемника, B_m – полоса пропускания сигнала основной полосы, RIN – шум относительной интенсивности лазера, G – коэффициент усиления APD, CNR – отношение несущей к шуму.

Оптическая мощность P_r ограничена из-за соображений безопасности для глаз человека и предполагается, что методы модуляции, обеспечивающие высокое отношение пиковой мощности к средней, являются благоприятными. Обычно это достигается за счет компромисса между энергоэффективностью и эффективностью использования полосы пропускания. Когда дробовой шум является преобладающим источником шума, отношение сигнал/шум также пропорционально площади поверхности фотодетектора. Таким образом, одноэлементные приемники способствуют использованию детекторов большой площади. Однако с увеличением площади поверхности фотодетектора

увеличивается его емкость, что ограничивает полосу пропускания системы. Это находится в прямом противоречии с повышенными требованиями к полосе пропускания, связанными с энергоэффективными методами модуляции, и, следовательно, существует компромисс между этими двумя факторами, который необходимо принимать во внимание и учитывать при разработке систем передачи сигналов.

Многоуровневые схемы амплитудно-импульсной модуляции, такие как PAM, L-PAM и QAM, предлагают улучшенную эффективность использования полосы пропускания за счет передачи большего количества информации на символ по каналу за счет более низкой энергоэффективности. Однако по сравнению с бинарными схемами они более чувствительны к нелинейностям канала, а также к шуму.

В L-PAM импульс отправляется в каждом символьном интервале, где амплитуда импульса принимает один из L возможных уровней (рисунок 2.3).

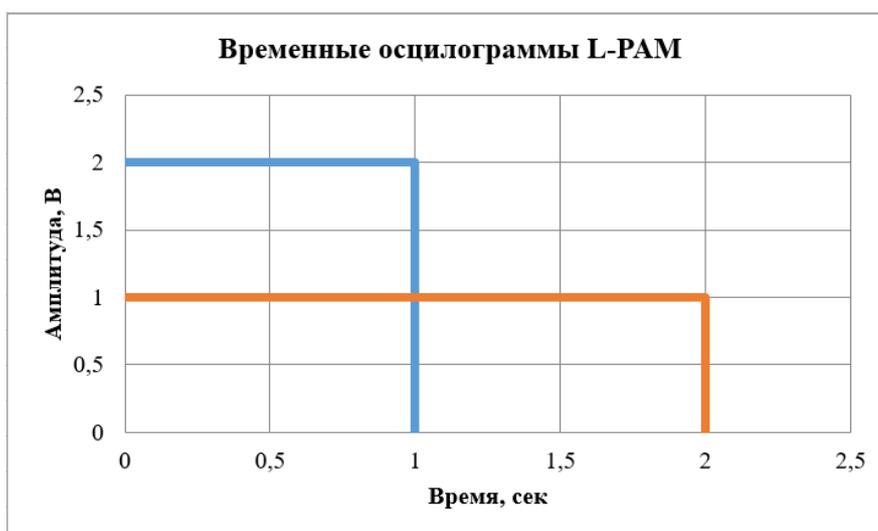


Рисунок 2.3 – Временные осциллограммы L-PAM

Его эффективность использования полосы пропускания определяется как

$$\eta_B = \frac{R_b}{B_m} = \log_2 L \quad (2.6)$$

Принимая стандартное значение PAM, показатель интенсивности битовых ошибок (BER) показан как [69]

$$P_{b-PAM} = \frac{2(L-1)}{L \log_2 L} Q \left(\frac{R_{Pr}}{L-1} \sqrt{\log_2 L / \sigma_T^2} R_b \right) \quad (2.7)$$

Методы расширения спектра двоичной прямой последовательности были приняты, чтобы уменьшить влияние межсимвольных помех, вызванного многолучевым распространением, для достижения более высоких скоростей передачи данных [74].

В цифровой модуляции рассмотрим модуляционные схемы основной полосы частот. Для передачи данных по оптическому каналу используются модуляции интенсивности излучения. Чтобы получить модуляции интенсивности излучения нужно промодулировать выходные излучения светодиода с изменением характеристик активного слоя. В большинстве случаев при изменении информационного сигнала при прямой модуляции изменяется выходная мощность за счет изменения величины силы тока. Таким образом, значительная часть мощности сигнала ограничена областью постоянного тока. Методы модуляции основной полосы называются так, потому что спектр модулированных данных находится вблизи постоянного тока.

Выделим популярные примеры таких схем. Позиционно-импульсная модуляция (PPM), при которой информация представлена положением импульсов в фиксированных временных рамках [75, 76]. Интервально фазово-импульсная модуляция (DPIM), в которой информация представлена количеством пустых слотов между импульсами. Модуляция включения и выключения (ООК), которая передает данные последовательно, включая и выключая светодиод, схема может обеспечивать поддержку уменьшения силы света.

Рассмотрим позиционно-импульсную модуляцию. В каналах оптической беспроводной связи по прямой видимости, где требование к полосе пропускания не является серьезной проблемой, позиционно-импульсная модуляция имеет улучшенную энергоэффективность, что позволяет использовать данный подход для решения широкого спектра задач в области оптической беспроводной связи.

PPM – это метод ортогональной модуляции и относится к классу импульсных модуляций (рисунок 2.4). Символ L в PPM состоит из импульса постоянной мощности, занимающего один интервал длительности в пределах $L=2^M$, где битовое разрешение $M > 0$ (целое число) возможных временных интервалов, а остальные слоты пусты. Информация кодируется в позиции импульса, и позиция импульса соответствует десятичному значению входных данных M -бита. Для достижения равноценной пропускной способности, что и в других схемах модуляции, длительность слота PPM T_{s_PPM} короче длительности книжного бита T_b на коэффициент L/M , то есть

$$T_{s_PPM} = \frac{T_b M}{L} \quad 2.8$$

Форма передающего импульса для L -PPM задается [74 стр.258]

$$x(t)_{PPM} = \begin{cases} 1 & \text{для } t \in [(m-1)T_{s_PPM}, mT_{s_PPM}] \\ 0 & \text{в другом месте} \end{cases} \quad 2.9$$

где $m \in \{1, 2, L\}$.

Следовательно, последовательность символов PPM задается

$$x(t)_{PPM} = LP_r \sum_{k=0}^{L-1} c_k p\left(t - \frac{kT_{\text{symsb}}}{L}\right) \quad 2.10$$

где $c_k \in \{c_0, c_1, c_2, \dots, c_{L-1}\}$ – последовательность символов PPM, $p(t)$ – функция формирования импульсов единичной высоты и длительности T_{symsb}/L , $T_{\text{symsb}} = T_b M$ – интервал символов, а LP_{avg} – пиковая оптическая мощность символа PPM.

В PPM все сигналы равноудалены друг от друга.

$$d_{\text{min-PPM}} = \min_{i \neq j} \int [x_i(t) - x_j(t)]^2 dt = 2LP^2 \log_2 \left(\frac{L}{R_b} \right) \quad 2.11$$

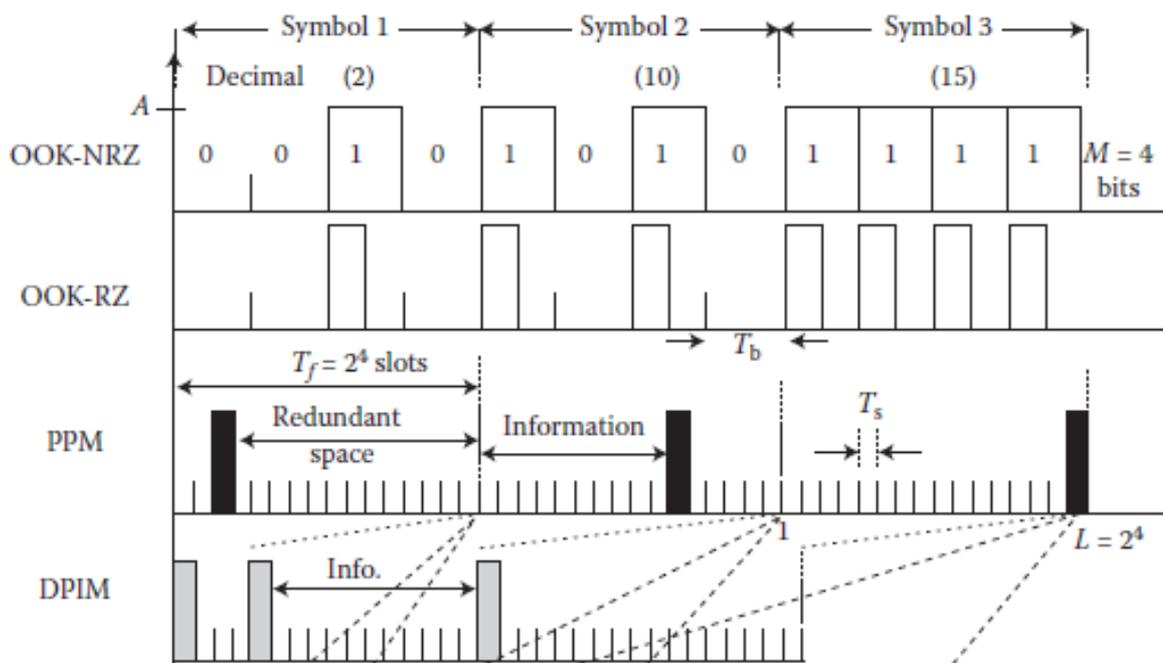


Рисунок 2.4 – Временные формы сигналов OOK, PPM, DPIM

Примечание – составлено по источнику [77]

На рисунке 2.4 показаны временные формы сигналов модуляции включения/выключения (OOK) и интервально фазово-импульсной модуляции (DPIM). Сравнив данные модуляции можно сказать, что DPIM модуляция потенциально позволяет повысить скорость передачи данных и повысить энергоэффективность по сравнению с OOK и PPM [77, с.189]. Но данная схема модуляции по сравнению с OOK и PPM приводит к увеличению сложности системы, поскольку приемник требует как слотовой, так и символьной синхронизации для демодуляции сигнала. Рассматривая энергетическую эффективность схем модуляции можно предположить, что PPM является наиболее широко используемым методом модуляции для систем оптической и беспроводной связи.

Спектр электрической мощности L-PPM приведен в виде

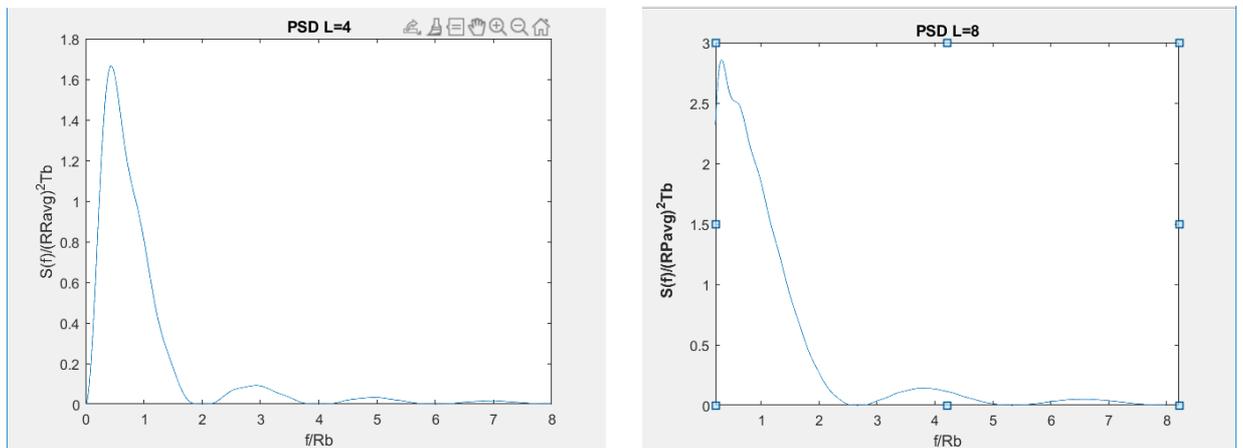
$$S_{PPM}(f) = |P(f)|^2 [S_{c,PPM}(f) + S_{d,PPM}(f)] \quad 2.12$$

где $P(f)$ - преобразование Фурье формы импульса, а $S_{c,PPM}(f)$ и $S_{d,PPM}(f)$ - непрерывная и дискретная составляющие, которые задаются как

$$S_{c,PPM}(f) = \frac{1}{T_{symp}} \left[\left(1 - \frac{1}{L}\right) + \frac{2}{L} \sum_{k=1}^{L-1} \left(\frac{k}{L} - 1\right) \cos\left(\frac{k 2\pi f T_{symp}}{L}\right) \right] \quad 2.13$$

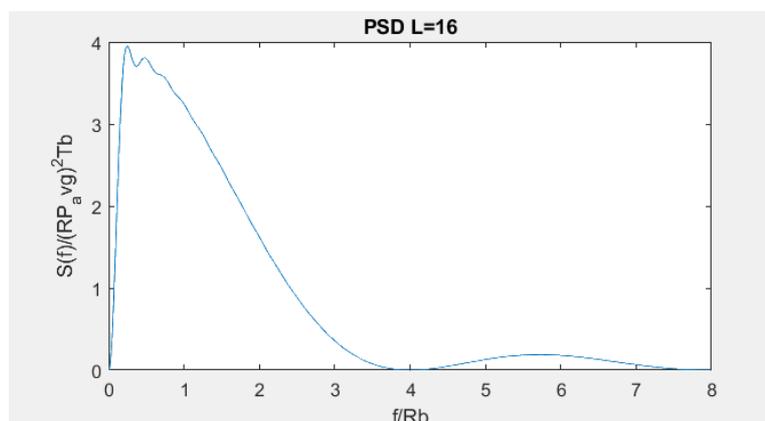
$$S_{d,PPM}(f) = \frac{2\pi}{T_{symp}^2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta\left(\frac{f-kL}{T_{symp}}\right) \quad 2.14$$

Спектральная плотность мощности для PPM со следующими значениями $L = 4, 8$ и 16 показана на рисунке 2.5.



а)

б)



в)

а – $L = 4$, б – $L = 8$, в – $L = 16$

Рисунок 2.5– Спектральная плотность мощности PPM

Три кривые были построены с использованием одной и той же средней оптической мощности, с использованием прямоугольных форм импульсов, занимающих полную длительность слота. Ось мощности нормирована на среднюю электрическую мощность, умноженную на продолжительность. Ось частот нормирована на скорость передачи R_b .

Для передачи данных в оптическом беспроводном канале рассмотрим позиционно-импульсную модуляцию в аддитивном канале белого гауссовского шума (AWGN). В аддитивном канале белого гауссовского шума для сигналов позиционно-импульсной модуляции можно использовать два алгоритма декодирования:

- декодирование жестких решений с помощью порогового детектора,
- мягкое декодирование решений с использованием максимума апостериорного или максимума детектор правдоподобия.

Предполагая, что полная синхронизация между передатчиком и приемником поддерживается постоянно, декодирование с жестким решением выполняется путем сравнения выходного сигнала согласованного фильтра с пороговым уровнем. «Единица» или «ноль» назначаются в зависимости от того, находится ли выходной сигнал согласованного фильтра выше или ниже порогового уровня в момент выборки. Для схемы «мягкого» решения блок из L выборок передается в детектор мягкого решения, который присваивает единицу слоту, который содержит наибольшую выборку, и нули для оставшихся слотов. Поскольку относительная амплитуда слота в символе имеет первостепенное значение при декодировании с мягким решением, декодирование с мягким решением является оптимальным для систем, в которых AWGN является доминирующим источником шума и отсутствуют искажения канала [78]. Декодирование с мягким решением также обеспечивает большую устойчивость к искусственным световым помехам, многолучевому искажению и турбулентности по сравнению с декодированием с жестким решением.

При наличии аддитивного канала белого гауссовского шума с двусторонней спектральной плотностью (PSD) мощности $N_0/2$ вероятность ошибки слота для жесткого декодирования может быть получена как [79]

$$P_{se-PPM-H} = P(0)Q\left(\frac{\alpha_{T-opt}}{\sqrt{N_0/2}}\right) + P(1)Q\left(\frac{\sqrt{E_s} - \alpha_{T-opt}}{\sqrt{N_0/2}}\right) \quad 2.15$$

где α_{T-opt} -оптимальный пороговый уровень, а $P(1)$ и $P(0)$ представляют вероятности получения импульса и пустого слота соответственно, как задано

$$P(0) = \frac{(L-1)}{L}; P(1) = \frac{1}{L} \quad 2.16$$

Поскольку пиковый выход согласованного фильтра при передаче импульса равен $\sqrt{E_s} = LRP_r\sqrt{T_s} = 0$ для пустого слота, вероятность ошибки слота для жесткого решения задается формулой

$$P_{sle-PPM-H} = \frac{1}{L} Q \left(\frac{LRPr\sqrt{T_s - \alpha_{T-opt}}}{\sqrt{N_0/2}} \right) + \frac{(L-1)\alpha_{T-opt}}{L\sqrt{N_0/2}} \quad 2.17$$

В позиционно-импульсной модуляции вероятности получения "нуля" и "единицы" не равны (вероятность получения нулей $(L - 1)$ раз выше, чем получение единицы). Следовательно, оптимальный пороговый уровень для жесткого декодирования решений не лежит посередине между единицей и нулем уровней, это сложная функция мощности сигнала и шума, а также порядка L . Однако для низкой вероятности ошибки $\alpha_T = \sqrt{E/2}$ предлагает вероятность ошибки, очень близкую к оптимальному значению, и (2.17) может быть упрощена до минимума.

$$P_{sle-PPM-H} = Q \left(\sqrt{\frac{E_s}{2N_0}} \right) \quad 2.18$$

Обратите внимание, что E_s -это энергия символа, который кодирует $\log_2 L$ бит данных. Следовательно, средняя энергия на бит E_b задается

$$E_b = \frac{E_s}{\log_2 L} = L(RP_r)^2 T_b \quad 2.19$$

Поскольку каждый символ содержит L слотов, вероятность ошибки слота может быть преобразована в соответствующую вероятность ошибки символа с помощью

$$P_{syse-PPM-H} = 1 - (1 - P_{sle-PPM-H})^L \quad 2.20$$

Предполагая, что данные являются ПД, каждый символ одинаково вероятен, и вероятность ошибки символа может быть преобразована в соответствующий BER с помощью [75, с.773]

$$P_{bse-PM-H} = \frac{L/2}{L-1} P_{syse-PPM-H} \quad 2.21$$

Для мягкого декодирования решений PPM при наличии AWGN с двусторонним PSD $N_0/2$ вероятность ошибки символа задается как [78 стр. 773]

$$P_{syse-PPM-S} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \{1 - [1 - Q(y)]^{1-7}\} e^{-(y - \sqrt{2E_s/N_0})^2/2} dy} \quad 2.22$$

Требования к высокой пропускной способности в PPM привела к разработке нескольких альтернативных схем модуляции, включая дифференциальный PPM [80, 81], кодированный PPM [82], множественный PPM [83], модуляцию положения края (EPM) [84] и гибридная модуляция. Последняя включает в себя дифференциальную амплитудно-импульсную

позиционную модуляцию (DAPPM), которая предлагает дополнительные преимущества перед PPM с точки зрения отношения пиковой мощности к средней [85]. В EPM время разделено на дискретные интервалы больше, чем время нарастания и дрожание импульса; однако ширина импульса может быть шире одного временного интервала, что позволяет передавать больше информации, чем для сопоставимой схемы PPM.

В то время как разновидности схем амплитудной модуляции L-РАМ и L-QAM могут обеспечивать более высокую эффективность использования полосы пропускания за счет снижения энергоэффективности, временная модуляция L-импульса (например, L-PPM и L-DPIM) может обеспечить более высокую энергоэффективность, но за счет увеличения требований к полосе пропускания. Ограничения на оптическую мощность благоприятствуют схемам модуляции с высоким отношением пиковой оптической мощности к средней, такие как импульсная позиционная модуляция и интервально фазово-импульсная модуляция. ООК предлагает требования к мощности, аналогичные 2-PPM, тогда как схемы модуляции полосы пропускания, такие как двоично фазовая импульсная модуляция страдают от потери мощности. Полоса пропускания систем с высокой скоростью передачи данных ограничена из-за ограничений емкости фотодиодов большой площади, и, следовательно, должен быть достигнут компромисс между требованиями к мощности и полосе пропускания. Таблица сравнения различных схем модуляции показана в таблице 2.1

Таблица 2.1 – Сравнения различных схем модуляции

Виды модуляции	Сигнал/шум	Эффективность пропускной способности	Энерго-эффективность	Стоимость
AM	низко-умеренная	высокая	низко-умеренная	Низкая
FM/PM	умеренная	умеренная	умеренная	умеренная
Digital	высокая	низкая	высокая	Высокая
ООК-NRZ	умеренная	R_B	P	Низкая
ООК-RZ	умеренная	$2R_B$	$P-3$	низкая
PPM	низкая	$R_B L / \log_2 L$	$P - 5 \log_{10} [(L/2) \log_2 L]$	умеренная

Выбор метода модуляции является основным при проектировании любой системы связи. Необходимо определить критерии, по которым проводится анализ и оцениваются методы модуляции. Для оптического беспроводного канала нами выделены наиболее важные критерии – энергоэффективность, эффективность полосы пропускания и надежность передачи.

1) Энергоэффективность. В целях соблюдения требований стандартов безопасности для глаз средняя оптическая мощность, излучаемая оптическим беспроводным передатчиком, ограничена. Кроме того, в портативном оборудовании с батарейным питанием желательно сводить потребление электроэнергии к минимуму, что также накладывает ограничения на оптическую мощность передачи. Следовательно, наиболее важным критерием при оценке методов модуляции, подходящих для внутренних оптических систем беспроводной связи, является энергоэффективность. Каждая из рассмотренных схем модуляции предлагает определенную среднюю оптическую мощность. Поэтому их обычно сравнивают с точки зрения средней оптической мощности, необходимой для достижения желаемых характеристик показателя интенсивности битовых ошибок (BER) и отношения сигнал/шум (SNR).

Эффективность мощности η_p схемы модуляции определяется средней мощностью, необходимой для достижения заданного BER при заданной скорости передачи данных [86]. Математически η_p определяется как [87]

$$\eta_p = \frac{E_{\text{pulse}}}{E_b}, \quad (2.23)$$

где E_{pulse} – энергия на импульс, а E_b – средняя энергия на бит.

2) Эффективность полосы пропускания. Теоретически оптическая несущая может рассматриваться как имеющая «неограниченную полосу пропускания». Однако составляющие системы, такие как область фотоприемника и пропускная способность канала ограничивают величину полосы пропускания, которая практически доступна для системы связи без искажений. Последующее многолучевое распространение оптического сигнала в диффузном канале (атмосферный воздух) и вне прямой видимости (NLOS) также ограничивают доступную полосу пропускания канала.

Эффективность использования полосы пропускания η_B определяется как [85 стр.5]

$$\eta_B = \frac{R_b}{B}, \quad (2.24)$$

где R_b – достижимая скорость передачи битов, а B – полоса пропускания приемопередатчика.

Соотношение между пропускной способностью и энергоэффективностью зависит от среднего рабочего цикла γ , заданного [85 стр.5]

$$\eta_p = \frac{\eta_B}{\gamma}, \quad (2.25)$$

Когда дробовой шум является преобладающим источником шума, полученное отношение сигнал/шум пропорционально площади поверхности

фотодетектора. Следовательно, одноэлементные приемники предпочитают использование фотодетекторов большой площади. Однако высокая емкость, связанная с фотодетекторами большой площади, ограничивает полосу пропускания приемника. В дополнение к этому, для конфигураций ненаправленного прямой видимости и диффузного канала полоса пропускания канала ограничена многолучевым распространением. Следовательно, схемы модуляции, требующие большой полосы пропускания, более восприимчивы к межсимвольным помехам (ISI), и, следовательно, несут большие потери мощности. Таким образом, вторым наиболее важным критерием при оценке методов модуляции является эффективность использования полосы пропускания.

3) Надежность передачи. Метод модуляции должен обеспечивать минимально приемлемую частоту ошибок при неблагоприятных условиях, а также проявлять устойчивость к межсимвольным помехам, вызванным многолучевым распространением и изменениями в составляющей постоянного тока сигнала данных [88]. Длительное отсутствие перехода «0 в 1» может быть проблематичным, так как восстановление тактовой частоты с помощью цифровой схемы фазовой автоподстройки частоты может оказаться невозможным [89]. Более того, следует избегать множественных последовательных импульсов высокого уровня, поскольку результирующий сигнал будет искажен фильтром высоких частот в приемнике. Кроме того, метод модуляции должен быть устойчивым к ряду факторов, таких как паразитной фазовой модуляции сигнала тактовой частоты из-за изменений мощности сигнала, удлинение импульса из-за большей постоянной времени диффузионного компонента и искажение импульса из-за ограничения сигнала в ближней зоне [88, с.7,8].

Схемы модуляции в системах VLC, имеют отличия от схем модуляции оптических каналов. Разработчик технологии VLC Харальд Хаас предлагает следующие виды модуляции (рисунок 2.6)

В диссертации для передачи данных в автоматизированной системе управления нами предлагается использовать светодиоды освещения. Поэтому необходимо, чтобы выбранный метод модуляции был достаточно простым для реализации. Достижение высокой энергоэффективности и эффективности использования полосы пропускания не имеет особого смысла, если схема настолько сложна для реализации, что делает ее невозможной. Еще один показатель при оценке выбора метода модуляции - это способность подавлять помехи, исходящие от искусственных источников окружающего света. Самый простой способ снизить уровень мощности окружающего света - использовать электрическую фильтрацию верхних частот.

Также необходимо, чтобы схема была устойчивой к межсимвольным помехам (ISI) в результате многолучевого распространения. Для внутреннего оптического беспроводного канала с прямым обнаружением модуляции интенсивности, подходящие методы модуляции можно сгруппировать в три основные группы: модуляция поднесущей (SCM), мультиплексирование с ортогональным частотным разделением (OFDM), модуляция несколькими

несущими (МСМ). Модуляция OFDM обладает хорошими показателями для передачи данных по световому потоку, но трудна в реализации и является дорогостоящим в техническом исполнении. Данная модуляция чаще всего рассматривается в статьях по организации передачи данных по двунаправленному потоку. Модуляция с несколькими поднесущими находится в стадии исследования.

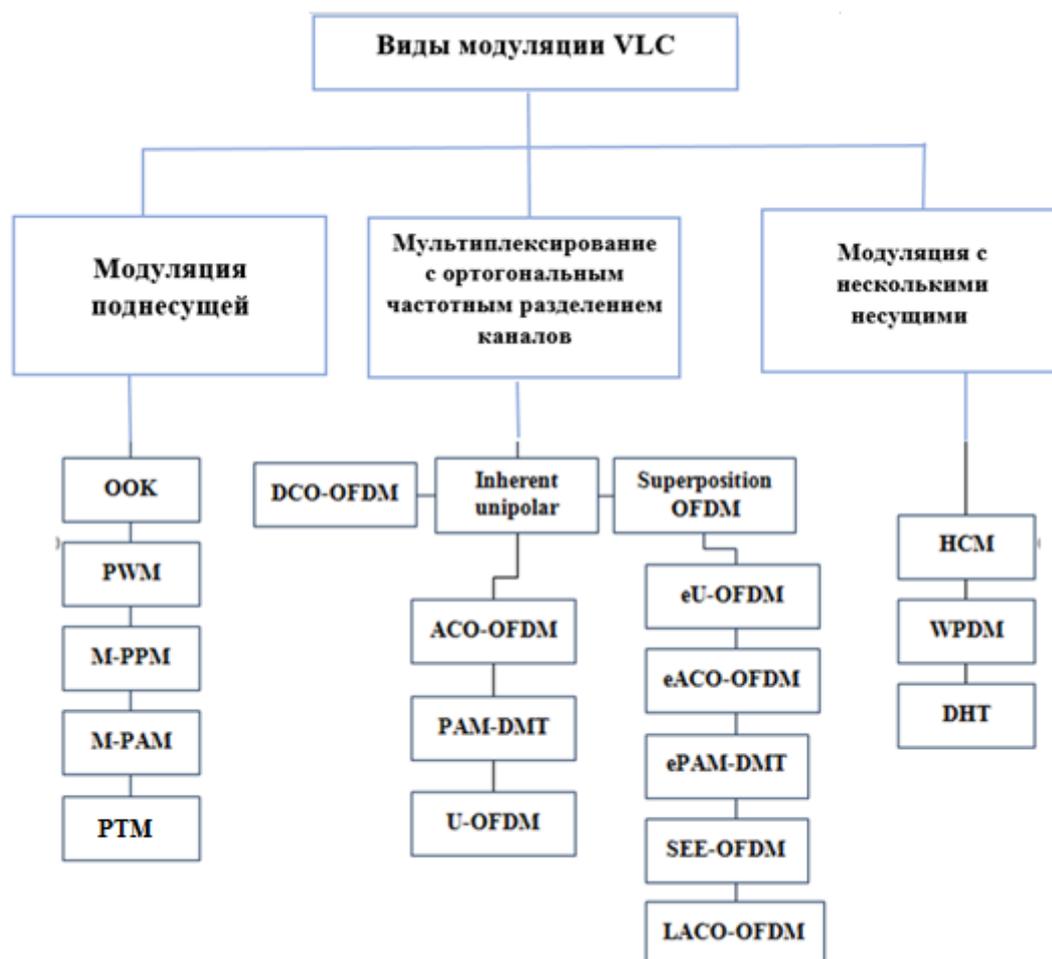


Рисунок 2.6 – Классификация методов модуляции технологии VLC

Примечание – составлено по источнику [90]

Модуляция поднесущей входит в основную полосу частот. Преимущество данной модуляции в надежности передачи данных и ее реализации. Схемы основной полосы частот, включающие, в частности, модуляцию включения/выключения (OOK) и семейство методов импульсной временной модуляции (PTM), более терпимы к воздействию многолучевого канала.

Проведенный анализ результатов научных публикаций о возможности использования схемы модуляции OOK-NRZ в технологии VLC обобщены в таблице 2.2. В данной таблице приведены показатели, полученные при использовании RGB и люминофорных светодиодах в схеме включения и выключения модуляции с возвратом к нулю.

Как видно из таблицы 2.2 полоса пропускания для люминофорных светодиодов составляет 50МГц, что позволяет организовать передачу данных по световому потоку без потерь. Необходимо отметить интенсивность битовых ошибок показанных в таблице соответствуют рекомендациям ITU-T G.821 и G.826. Скорость передачи в данной модуляции небольшие, но удовлетворяют поставленным задачам диссертации.

Таблица 2.2 – Производительность систем VLC

Тип светодиодов	Схема модуляции	Полоса пропускания модуляции	Скорость передачи данных
RGB- светодиод	OOK-NRZ	25 МГц	40 Mbps (BER < 10 ⁻⁶) [91]
Люминафорные светодиоды	OOK-NRZ	50МГц	120 Mbps (BER < 10 ⁻³) [92]
Люминофорные светодиоды	OOK-NRZ	50МГц	230 Mbps (BER < 10 ⁻³) [93]
Люминофорные светодиоды	OOK-NRZ	50МГц	80 Mbps (BER < 10 ⁻⁶) [94]
Люминофорные светодиоды	OOK-NRZ	50МГц	100 Mbps (BER < 10 ⁻⁹) [95]

Рассмотрев все положения для модуляционных схем пришли к выводу, что для реализации цели диссертационной работы нами будет использоваться модуляция поднесущей со схемой цифровой обработки сигнала OOK.

2.2 Модуляция включения/выключения OOK

OOK – это наиболее распространенный метод модуляции интенсивности, которое применяется совместно с методом прямого детектирования в оптической связи (IM/DD). Это обусловлено простотой практической реализации. Единичный бит представлен оптическим импульсом, который занимает всю или часть длительности бита, в то время как нулевой бит представлен отсутствием оптического импульса как возврат к нулю (RZ), так и невозврат к нулю (NRZ). В схеме NRZ импульс с длительностью равной длительности бита передается для представления 1, тогда как в схеме RZ импульс занимает только частичную длительность бита.

На рисунке 2.7 показано отображение OOK-NRZ и OOK-RZ с рабочим циклом $\gamma=0,5$ для средней передаваемой мощности P_r . Следовательно, огибающая для OOK-NRZ определяется выражением

$$p(t) = \begin{cases} 2P_r & \text{для } t \in [0, T_b) \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (2.26)$$

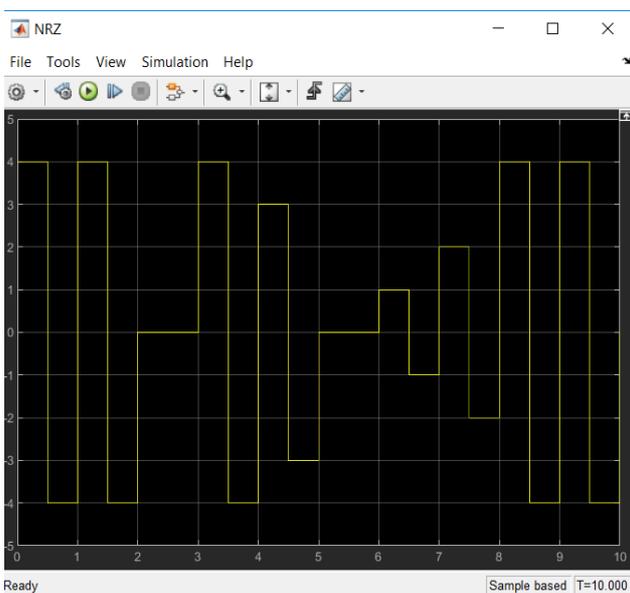
где P_r - средняя мощность, а T_b - длительность бита.

Спектральные плотности электрической мощности OOK-NRZ и OOK-RZ ($\gamma=0.5$) заданы формулой 2.27 и 2.28, если единица и ноль в предположении независимы и одинаково распределены.

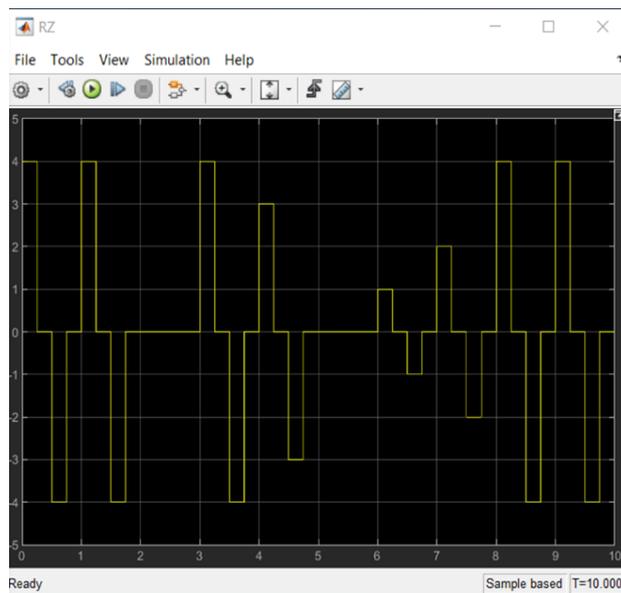
$$S_{OOK-NRZ}(f) = (P_r R)^2 T_b \left(\frac{\sin \pi f T_b}{\pi f T_b} \right)^2 \left[1 + \frac{1}{T_b} \delta(f) \right] \quad (2.27)$$

$$S_{OOK-RZ(\gamma=0.5)}(f) = (P_r R)^2 T_b \left(\frac{\sin(\pi f T_b / 2)}{\pi f T_b / 2} \right)^2 \left[1 + \frac{1}{T_b} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta\left(f - \frac{n}{T_b}\right) \right] \quad (2.28)$$

где $\delta(t)$ - дельта-функция Дирака



а)



б)

а – NRZ; б – RZ ($\gamma=0.5$)

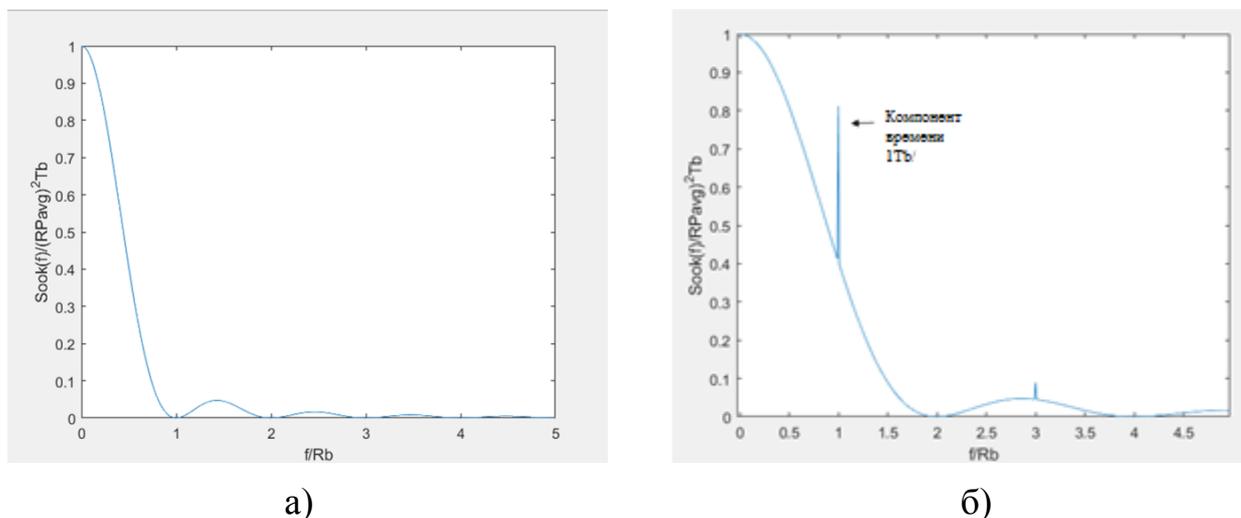
Рисунок 2.7 – Формы передаваемых сигналов для OOK

Построение спектральных плотностей электрической мощности для OOK-NRZ и OOK-RZ по формулам 2.27 и 2.28 были реализованы в MATLAB. Результаты решения показаны на рисунке 2.8.

Ось мощности нормализована к средней электрической мощности, умноженной на длительность бита $(P_r R)^2 T_b$, а ось частот нормирована на скорость передачи в битах ($R_b = 1/T_b$). Обе кривые построены с использованием одной и той же средней оптической мощности P_r .

Для методов модуляции основной полосы частот требования к ширине полосы обычно определяются как диапазон от значения постоянного тока до первого нуля в спектральной плотности электрической мощности передаваемого сигнала. Как и ожидалось, OOK-RZ ($\gamma=0.5$) имеет вдвое большую полосу пропускания, чем OOK-NRZ, так как ширина импульсов вдвое меньше. Оба OOK-NRZ и OOK-RZ ($\gamma=0.5$) имеют дискретные (импульсные)

члены на постоянном токе с весом P_r^2 . Частотный импульс равен скорости передачи в битах $f=R_b$ и может использоваться для восстановления тактового сигнала в приемнике OOK-NRZ.



а – OOK-NRZ, б – OOK-RZ ($\gamma = 0.5$)

Рисунок 2.8 – Спектральные плотности электрической мощности

OOK-NRZ и OOK-RZ имеют значительную энергоёмкость на постоянном токе и низких частотах. Эта характеристика означает, что электрическая фильтрация верхних частот неэффективна для уменьшения помех, создаваемых искусственными источниками окружающего света, поскольку высокие частоты среза не могут использоваться без существенного дрейфа базовой линии. Сравнивая площади под двумя кривыми, очевидно, что для данной средней оптической мощности передачи OOK-RZ ($\gamma=0,5$) имеет вдвое большую электрическую мощность, чем OOK-NRZ.

OOK-NRZ имеет энергоэффективность η_p равную 1 и эффективность использования полосы пропускания η_B равную 1. OOK-RZ имеет энергоэффективность η_p равную 1 и эффективность полосы пропускания η_B равной 2. Из этого следует что при одинаковой энергоэффективности для передачи одного бита ширина полосы пропускания у OOK-RZ будет в два раза больше. Эффективность использования полосы пропускания зависит от рабочего цикла. Соответственно показатель эффективности полосы пропускания выше для OOK-NRZ. Кроме того, RZ не поддерживает восстановление тактовой частоты дискретизации в приемнике, потому что он допускает длинный низкий сигнал без какого-либо перехода от 0 к 1, что еще больше снижает эффективность использования полосы пропускания.

По полученным расчетным данным выбираем модуляцию OOK-NRZ для построения модели приемо-передающего тракта по беспроводным оптическим сетям. Спроектируем идеальную систему приемо-передачи максимального правдоподобия для OOK-NRZ в присутствии аддитивного белого гауссовского шума.

На рисунке 2.9 представлена функциональная схема разработанная с использованием программы MATLAB. Схема представляет собой три функциональных взаимосвязанных блока: передатчик, канал связи и приемник. Остановимся на каждом из блоков и более подробно опишем их с целью показать отличия своего подхода при моделировании системы приема-передачи.

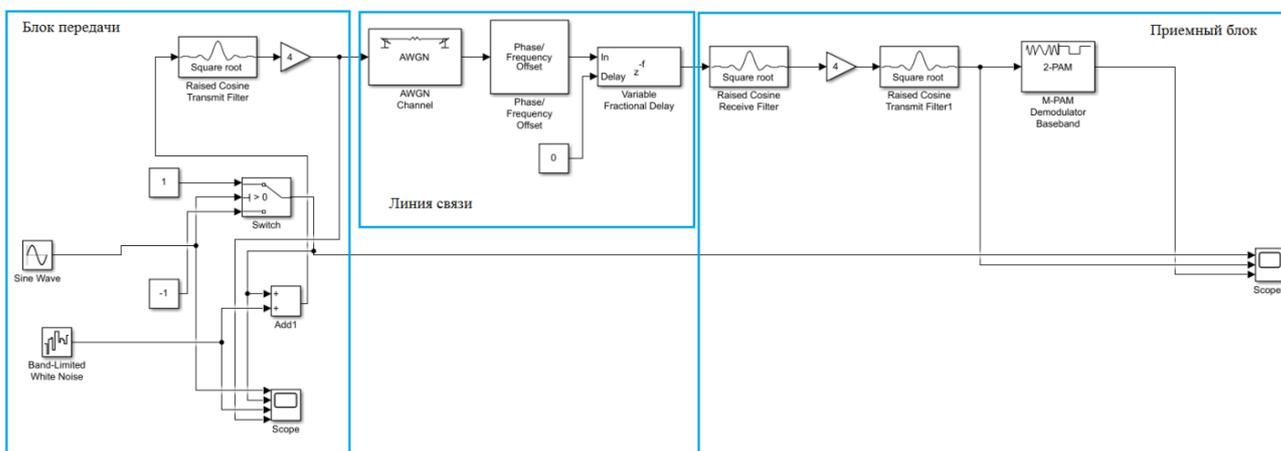


Рисунок 2.9 – Функциональная схема OOK-NRZ в присутствии аддитивного белого гауссовского шума

На рисунке 2.10 показана передающая часть системы. На вход передатчика системы приемо-передающего устройства нами подается синусоидальный сигнал с амплитудой 5В.

Для получения прямоугольного импульсного сигнала нами построен модулятор по схеме OOK-NRZ. В схеме модулятора используется ключ включения и выключения (Switch) на 1 и 3 входы (порты данных) подаются две константы +1 для верхнего уровня и -1 для нижнего, а на 2 вход управления нами подан сам синусоидальный сигнал. На выходе с ключа можно наблюдать сигнал NRZ (рисунок 2.11,б).

Для имитирования инструментального шума нами выбран блок белого шума (Band-Limited White Noise), в котором задали мощность шума $1 \cdot 10^{-6}$ Вт.

Для наложения инструментального шума на импульсный сигнал нами используется в схеме передатчика блок суммирования (Add1).

В данном передатчике нами используется идеальный передающий фильтр с поднятым косинусом (Raised Cosine Filter), который имеет бесконечную импульсную характеристику. Блок отсекает импульсную характеристику до количества символов, указанного параметром "Диапазон фильтра в символах". Диапазон фильтра в символах, N , и выходные отсчеты на символ, L , определяют длину импульсной характеристики фильтра, которая равна L , диапазон фильтрации в символах + 1.

Фильтр установленный на передатчике имеет единичную амплитудную прямоугольную импульсную характеристику $p(t)$, длительностью один бит T_b .

Выходной сигнал передатчика фильтра масштабируется пиковым детектируемым сигналом фототока $2P_r$, а P_r – это средняя мощность принимаемого оптического сигнала. Независимый от сигнала шум $n(t)$ затем добавляется к сигналу, который моделируется как белый гауссовский с двусторонней спектральной плотностью мощности $N_0/2$, заданной как [93, с.392]

$$\frac{N_0}{2} = qI_B \quad 2.29$$

где q - заряд электрона, а I_B -средний фототок, генерируемый фоновым светом.

Обнаруженный сигнал на входе согласованного фильтра может быть смоделирован следующим образом

$$i(t) = \begin{cases} I_p + n(t) & \text{для } a_i = 1 \\ n(t) & \text{для } a_i = 0 \end{cases} \quad 2.30$$

где $n(t) \sim N(0, \sigma^2)$ - аддитивный белый гауссовский шум, обусловленный окружающим светом с двусторонней спектральной плотностью мощности $N_0/2$, нулевым средним и дисперсией σ^2 , а I_p - пиковый фототок.

Для усиления сигнала в схеме передатчика на выходе с фильтра устанавливается блок усилителя.

Для исследования формы сигналов используется блок осциллографа (Scope).

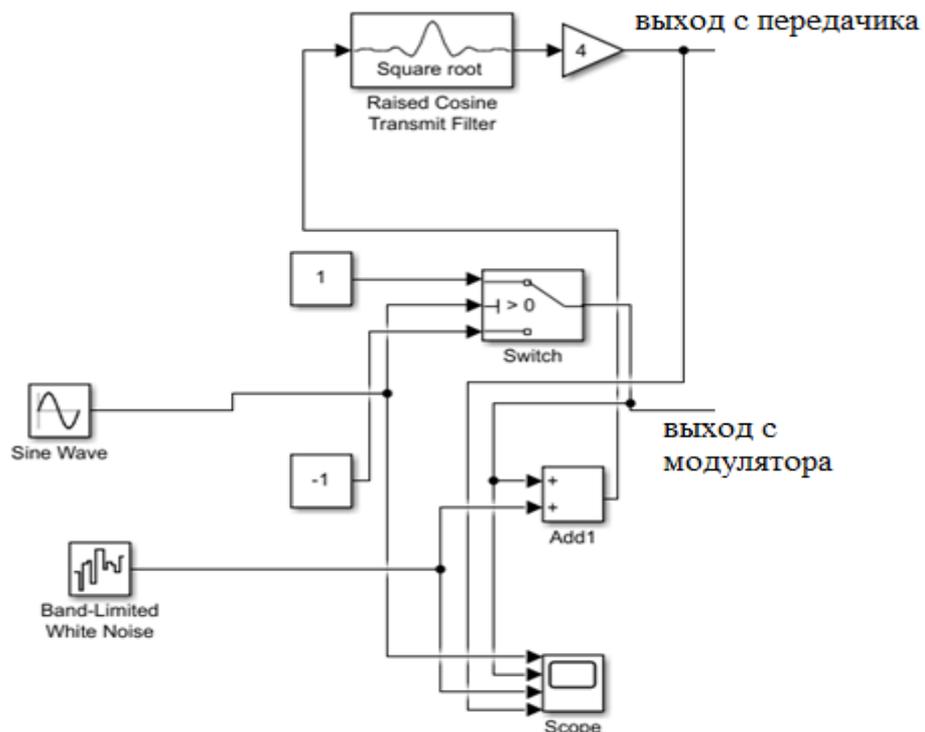
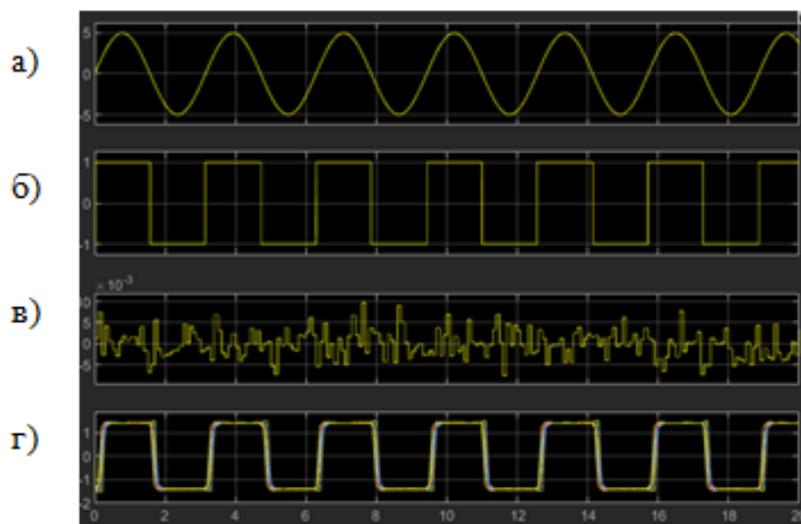


Рисунок 2.10 – Блок передачи

В результате имитационного моделирования получены временные формы сигналов: синусоидальный сигнал, промодулированный импульсный сигнал NRZ, инструментальный шум, сигнал после блока сложения прошедший через передающий фильтр (рисунок 2.11).



а – входной сигнал; б – сигнал после модулятора; в – сигнал от инструментального шума; г – сигнал после фильтра передатчика
Рисунок 2.11 – Временные формы сигналов передатчика

На рисунке 2.12 показан блок, имитирующий беспроводной оптический канал. Канал связи приемо-передающего тракта задан из блоков (AWGN) аддитивный белый гауссовский шум, блок смещения фазы/частоты (Phase/Frequency Offset), и блок задержки во времени числа периодов выборки (Variable Fractional Delay).

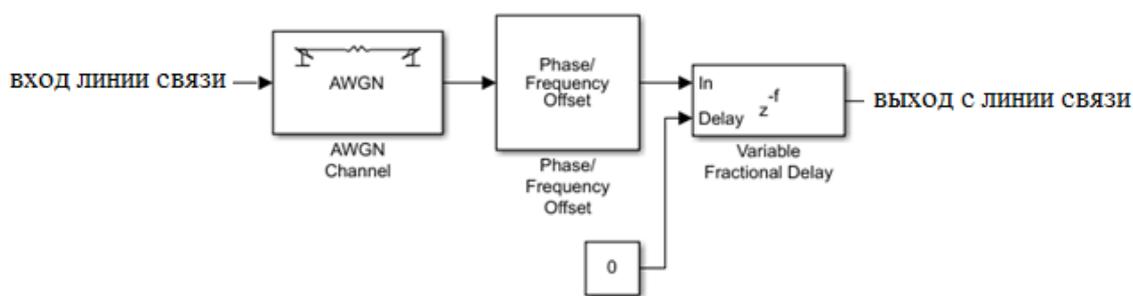


Рисунок 2.12 – Канал связи

Для имитации беспроводного оптического канала в программном обеспечении MATLAB предусмотрен блок AWGN. Блок аддитивного белого гауссовского шума характеризуется равномерной, то есть одинаковой на всех частотах, спектральной плотностью мощности, нормально распределёнными временными значениями и аддитивным способом воздействия, а также имитирует шум внешнего воздействия на линию связи.

В блоке смещения фазы и частоты выставляем в ноль оба параметра, так как в данном проекте фаза и частота нами не учитывается. Использование данного блока необходимо в сочетании с AWGN. Блок задержки во времени обеспечивает линейный сигнал, фильтрацию с использованием функции Найквиста, данный фильтр используется для уменьшения всех внеполосных сигналов естественного и искусственного света, тем самым улучшая показатель отношения сигнал/шум, когда значение полосы пропускания равно единице.

Приемная часть устройства представлена на рисунке 2.13 и построена из блоков идеального приемного и передающего фильтров с поднятым косинусом (Raised Cosine Filter) и демодулятора с M-импульсами (M-PAM). Демодулятор используется для преобразования модулированного сигнала в основной полосе частот в прямоугольный импульсный сигнал. В нашем случае использовался демодулятор с двумя импульсами по амплитудной импульсной модуляции.

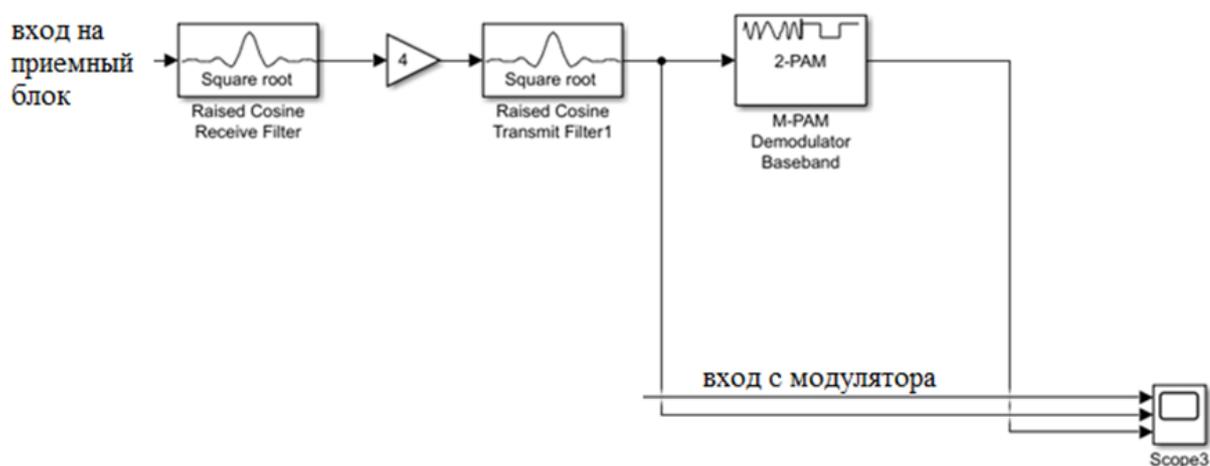


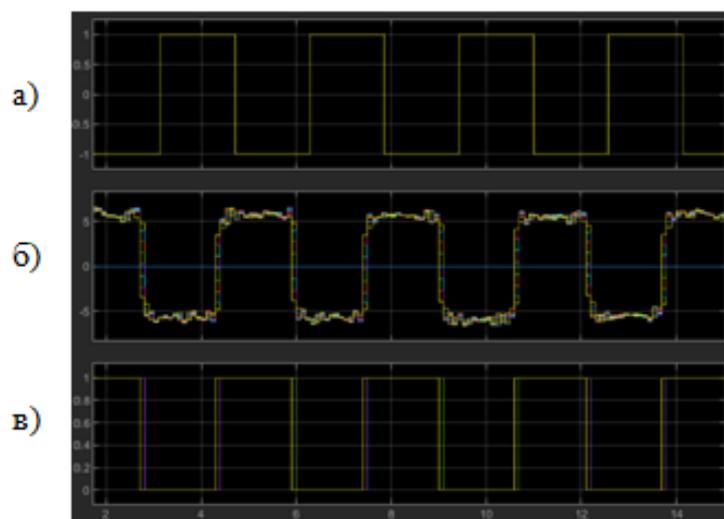
Рисунок 2.13 – Приемный блок

Необходимо пояснить для чего используются два фильтра. Первый фильтр принимает сигнал с канала связи и нормирует коэффициенты к модульной энергии. Второй фильтр играет роль передатчика сигнала, дискретизирует и фильтрует входной сигнал с помощью нормального повышенного фильтра с конечной импульсной характеристикой косинуса.

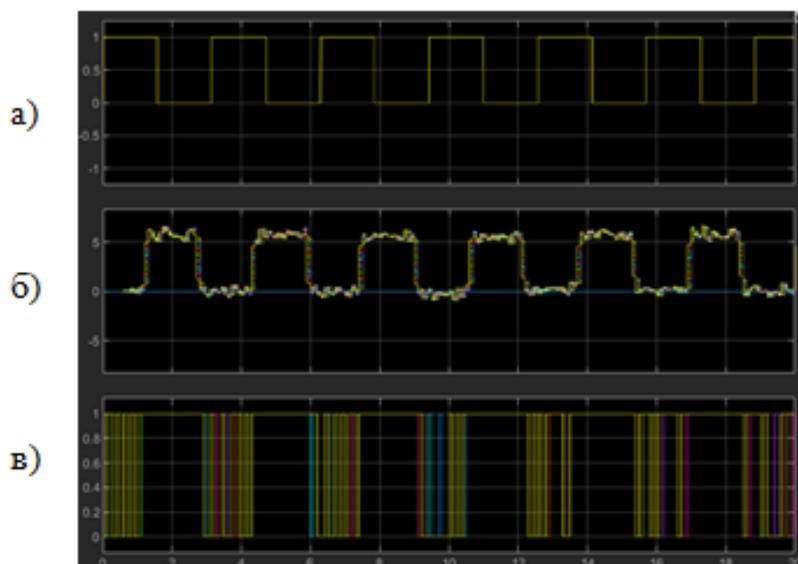
Для сравнения и исследования временных форм сигналов используется блок осциллографа (Scope3).

На рисунке 2.14 приведена осциллограмма выходного сигнала, который сравнивается с сигналом с выхода модулятора передатчика. Результаты имитационного моделирования показали одинаковые формы сигналов с передающего и приемного блока с задержкой во времени. Это подтверждает адекватность предложенной имитационной модели.

На рисунках 2.14,в и 2.15,в показаны осциллограммы с выхода приемного устройства с модуляцией OOK с добавлением NRZ кода и без NRZ соответственно. Сравнивая две осциллограммы можно увидеть, что если не добавлять NRZ код, то на выходном сигнале сигнал забивается помехами.



а – сигнал с модулятора; б – сигнал после фильтра; в – выходной сигнал
 Рисунок 2.14 – Осциллограмма с выхода приемного устройства с OOK-NRZ



а – сигнал с модулятора; б – сигнал после фильтра; в – выходной сигнал
 Рисунок 2.15 – Осциллограмма с выхода приемного устройства с OOK-RZ

Мы рассмотрели случай идеально приемо-передающей системы. Для расчета реальной системы передачи необходимо учитывать вероятности ошибки передачи. Цифровой символ "1" считается принятым, если принятый сигнал находится выше порогового уровня, а "0" – в противном случае.

Поэтому вероятность ошибки задается как

$$P_e = p(0) \int_{i_{th}}^{\infty} p(i/0) di + p(1) \int_0^{i_{th}} p(1) di \quad 2.31$$

где i -й - пороговый уровень сигнала, $p(0)$ и $p(1)$ - вероятности "нуля" и "единицы", а предельные вероятности определяются как

$$p(i/1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(\frac{-(i)^2}{2\sigma^2}\right) \quad 2.32$$

$$p(i/1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(\frac{-(i-I_p)^2}{2\sigma^2}\right) \quad 2.33$$

Для равновероятных символов $p(0) = p(1) = 0.5$, следовательно, оптимальной пороговой точкой является $i_{th} = 0.5 I_p$, а условная вероятность ошибки сводится к

$$P_e = Q\left(\frac{i_{th}}{\sigma}\right) \quad 2.34$$

где Q-функция Маркума, представляющая собой площадь под гауссовым хвостом, заданную

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-a^2/2} da \quad 2.35$$

На производительность канала ОВС влияют источники шума, а также частота и искажения, наведенные в канале связи. Кроме этого на канал передачи влияет шум электронного оборудования приемника и дробовой шум, наведенный на принимаемый фототок. Данные шумы являются наиболее преобладающими источниками шума на входе приемника. Для подавления помех возникающих в канале связи используется согласованный фильтр.

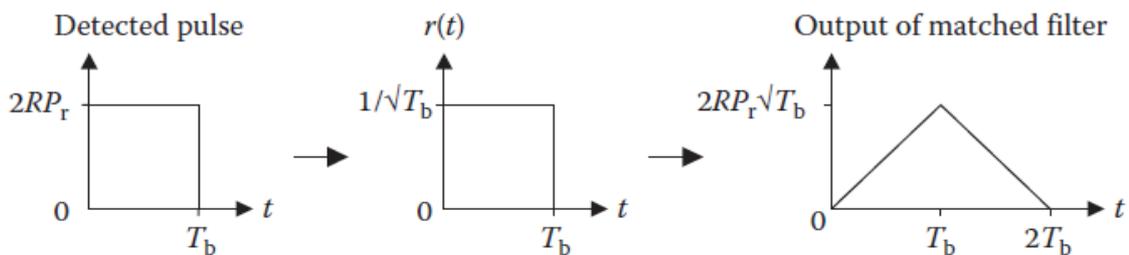


Рисунок 2.16. Выход согласованного фильтра для обнаруженного импульса ООК-NRZ

Примечание – составлено по источнику [75 стр. 119]

Сигнал ООК-NRZ, пренебрегая любыми помехами имеет прямоугольную импульсную характеристику с амплитудой $1/\sqrt{T_b}$ и длительностью T_b . Как показано на рисунке 2.16 при отсутствии шума пиковый выход этого фильтра при передаче одного сигнала составляет $I_p = \sqrt{E_b} = 2RP_r\sqrt{T_b}$, где R - чувствительность фотоприемника. Когда передается ноль, пиковый выход согласованного фильтра равен 0.

В случае согласованного фильтра система уравнения (2.30) может быть заменен на

$$y_i = \begin{cases} E_p + n_i & \text{для } a_i = 1 \\ n_i & \text{для } a_i = 0 \end{cases} \quad 2.36$$

Для согласованного фильтра дисперсия отсчетов шума на выходе фильтра зависит только от спектральной плотности мощности входного шума и энергии импульсной характеристики согласованного фильтра. Таким образом, если на входе AWGN с двусторонней спектральной плотностью мощности $N_0/2$, то дисперсия шума на выходе согласованного фильтра задается формулой [96]

$$\sigma^2 = \frac{N_0}{2} \int_{t=0}^{T_b} r^2(t) dt \quad 2.37$$

Следовательно, стандартное отклонение σ имеет значение

$$\sigma = \sqrt{\frac{N_0 E_p}{2}} \quad 2.38$$

Поэтому включение (2.30), (2.36) и (2.38), то есть замена E_p на I_p и $\sqrt{(N_0 E_p) / 2}$ на σ , дает

$$P_{e_bit_оок} = Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right) \quad 2.39$$

где средняя энергия на бит E_b задается

$$E_b = \frac{E_p}{2} = 2(RP_r)^2 T_b \quad 2.40$$

Расчет вероятности битовой ошибки произведен по формуле 2.39. Задавались значения параметров полученные в результате имитационного моделирования.

По расчетным показателям нами построен график зависимости вероятности битовой ошибки от E_b/N_0 для OOK-NRZ рисунок 2.17. Соотношение E_b/N_0 обычно называют соотношением сигнал / шум на бит и используется для цифровых модуляций. Данная кривая не зависит от скорости передачи и определяется только модуляцией и приемником.

Данный график характеризует количество битовых ошибок в единицу времени, где E_b – отношение энергии бита к спектральной плотности мощности шума N_0 . Под энергией бита E_b подразумевается энергия сигнала за длительность бита. Из графика видно, что при E_b/N_0 равной 9,8 дБ то частота возникновения ошибок равна 10^{-3} , что означает ошибочным будет является 1 бит из каждой 1000.

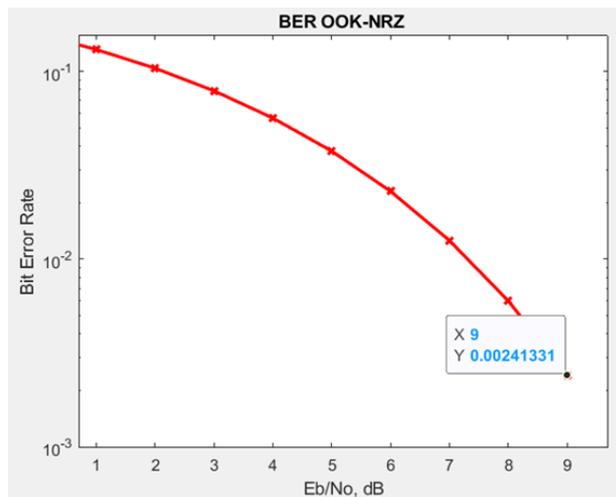


Рисунок 2.17– График частоты битовой ошибки для OOK-NRZ

Таким образом, предлагаемая нами функциональная схема удовлетворяет заданным требованиям и может быть использована при проектировании реальных приемо-передающих устройств в системе передачи по световому потоку и положено в основу нашего исследования.

Выводы по второму разделу

Проведен анализ предлагаемых в научных источниках методов модуляции в диапазонах оптических волн. Проведенный анализ показал, что не все методы модуляции могут быть использованы в технологии VLC. При анализе характеристик импульсных модуляций нами были выделены для исследования следующие модуляции: амплитудно-импульсная (PAM), частотно-импульсная (PPM), фазово-импульсная (DPIM). Результаты показали, что PPM и DPIM может обеспечить высокую энергоэффективность, но за счет увеличения требований к ширине полосы пропускания. PAM могут обеспечивать более высокую энергоэффективность за счет уменьшения ширины полосы пропускания. Для обеспечения надежности передачи данных в системе управления ширина полосы пропускания является важной характеристикой. Таким образом нами выбрана амплитудно-импульсная модуляция.

Рассмотрев все положения для модуляционных схем пришли к выводу, что для реализации цели диссертационной работы нами будет использоваться модуляция поднесущей со схемой цифровой обработки сигнала OOK.

Проведен сравнительный анализ двух схем кодирования OOK- модуляции. Результаты расчетов показали, что при одинаковом значении энергоэффективности для передачи одного бита ширина полосы пропускания у OOK-RZ будет в два раза больше чем у OOK-NRZ. Эффективность использования полосы пропускания зависит от рабочего цикла. Соответственно показатель эффективности полосы пропускания выше для OOK-NRZ. Кроме того, RZ не поддерживает восстановление тактовой частоты дискретизации в приемнике, потому что он допускает длинный низкий сигнал без какого-либо перехода от 0 к 1, что еще больше снижает эффективность использования полосы пропускания.

В программе MATLAB построена функциональная схема канала передачи ООК модуляции по беспроводной оптической сети. Блок модулятора построен на схеме модуляции ООК с линейным кодированием NRZ. Использование блока модулятор ООК-NRZ в модели приемо-передающего тракта по беспроводной оптической сети является новым. Результаты имитационного моделирования показали одинаковые формы сигналов с передающего и приемного блока с задержкой во времени. Это подтверждает адекватность предложенной имитационной модели.

Надежность модели подтверждается расчетами вероятности ошибки передачи. По расчетным данным построен график зависимости вероятности выпадения ошибок от E_b/N_0 для ООК-NRZ. Из графика видно, что при E_b/N_0 равной 9,8 дБ то частота возникновения ошибок равна 10^{-3} что означает ошибочным будет является 1 бит из каждой 1000.

Таким образом, в данном разделе подтверждено первое научное положение, выносимое на защиту – модель системы приемо-передающего тракта с использованием модуляции ООК-NRZ, позволяющая передавать данные по беспроводному оптическому каналу.

Результаты исследований, приведенные в данном разделе, были доложены на международной конференции и опубликованы в [69, с.11].

3 РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕЛОГО СВЕТОДИОДА ОСВЕЩЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМИ РЕЖИМАМИ

3.1 Схмотехническое решение передающего и приемного модулей

Предлагаемый в диссертации подход, заключающийся в применении мощных белых светодиодов для передачи данных, апробирован на примере передачи текущих значений температуры в помещении и описан в наших статьях [97, 98]. При проектировании приёмно-передающего устройства учитывалась разработанная имитационная модель системы передачи данных на основе метода импульсной модуляции с совместным использованием метода прямого детектирования в оптической связи.

Датчик температуры расположен в светодиодном осветительном приборе, который одновременно является передатчиком информации – в нашем случае текущей температуры. Исполнительный механизм регулятора температуры и приемник информации расположены удаленно от передатчика сигнала без использования кабельного соединения. Конструктивно передатчик с датчиком температуры это один прибор, а приемник с исполнительным механизмом – другой прибор.

На рисунке 3.1 показана схема передающего устройства. Для контроля температуры используется датчик температуры, позволяющий передавать измеряемые данные на микроконтроллер. Значения текущей температуры отображаются на индикаторе. Для передачи данных с использованием технологии VLC к системе питания светодиода добавляется сигнал, полученный с выхода микроконтроллера. Поскольку для надежной работы светодиода необходимо использовать стабилизированный ток дополнительно к источнику питания был подключен стабилизатор тока.

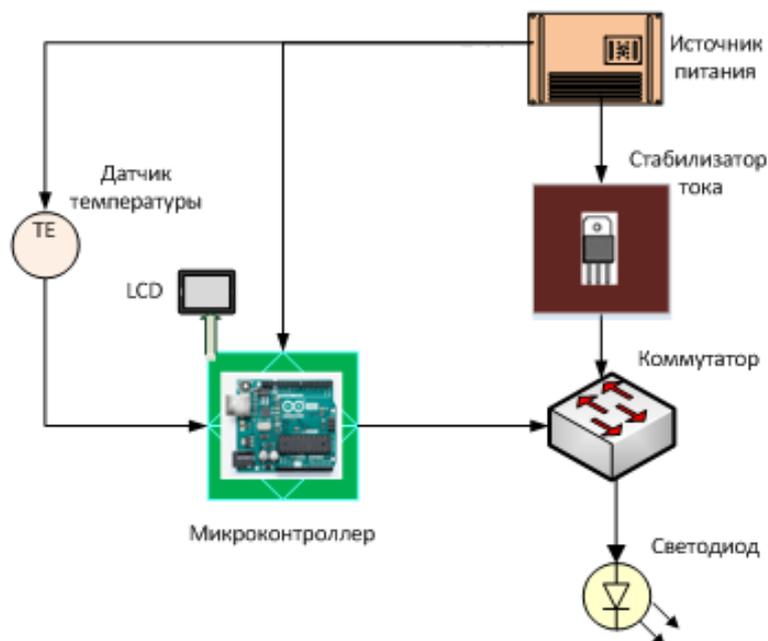


Рисунок 3.1 – Функциональная схема передатчика

Для устойчивой передачи данных светодиодом использовался коммутатор, который позволял соединять сигналы, поступающие от микроконтроллера, и подавать на светодиод стабилизированный ток. На выходе светодиода в оптическом канале имеет модулированный свет в соответствии с сигналом, поступающим с микроконтроллера.

На рисунке 3.2 показана схема приемного устройства. Работа приемника заключается в следующем: приемник излучения принимает световые импульсы от излучателя и преобразует их в электрические сигналы. Эти сигналы, проходя через усилитель, поступают на формирователь, где преобразуются в импульсы ТТЛ (транзисторно-транзисторная логика) формы для последующей обработки их микроконтроллером. Микроконтроллер расшифровывает информацию и обрабатывает алгоритм управления исполнительным механизмом в зависимости от поставленной задачи. Полученные данные о текущей температуре отображаются на индикаторе.

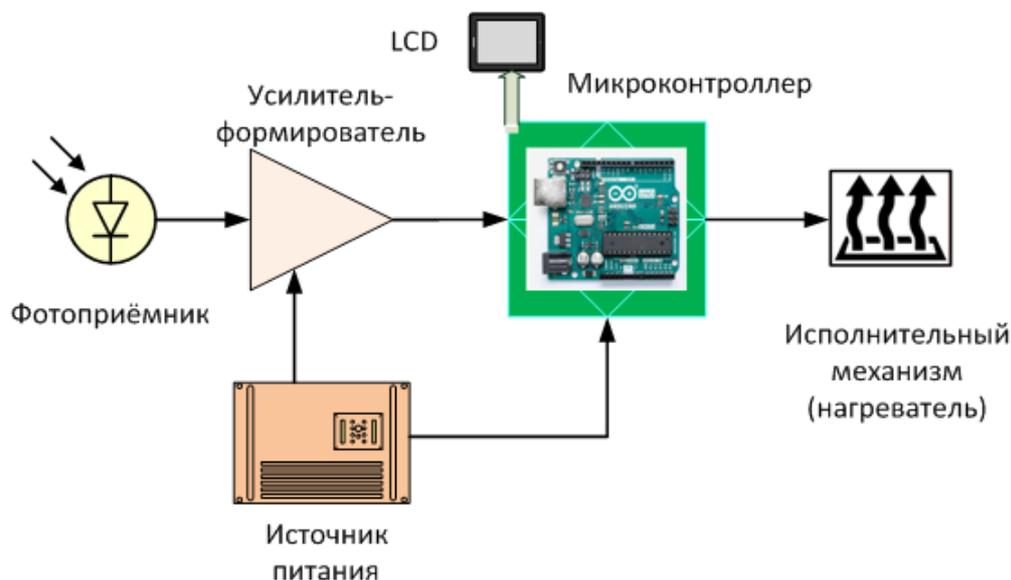


Рисунок 3.2 – Функциональная схема приемника

В соответствии с функциональными схемами (рисунки 3.1, 3.2) нами разработаны принципиальные схемы. Концепция работы передатчика состоит в том, что в светодиодный светильник встроен датчик температуры с передатчиком. Передатчик через светодиод светильника отправляет данные о температуре. Принципиальная схема передающего устройства, разработанная с учетом данной концепции, представлена на рисунке 3.3. С датчика температуры DD1 значения по запросу поступают в микроконтроллер DD2, где записываются в регистры временного хранения, обрабатываются, затем отображаются на индикаторе HG1. На индикаторе HG1 также отображается информация, необходимая для мониторинга и контроля. Из регистров временного хранения значение температуры после преобразования поступает в буфер FIFO (Fist In Fist Out) приемопередатчика микроконтроллера.

Посредством режима последовательной асинхронной передачи данных, биты через выход TX микроконтроллера, через резистор R2 поступают на затвор транзистора VT1. Транзистор, работая в ключевом режиме в зависимости от потенциала на затворе – то разрешает, то запрещает прохождение тока через светодиод VD1.

Микроконтроллером DD2 является микросхема ATmega328P, которая входит в состав платы Arduino NANO и Arduino Uno.

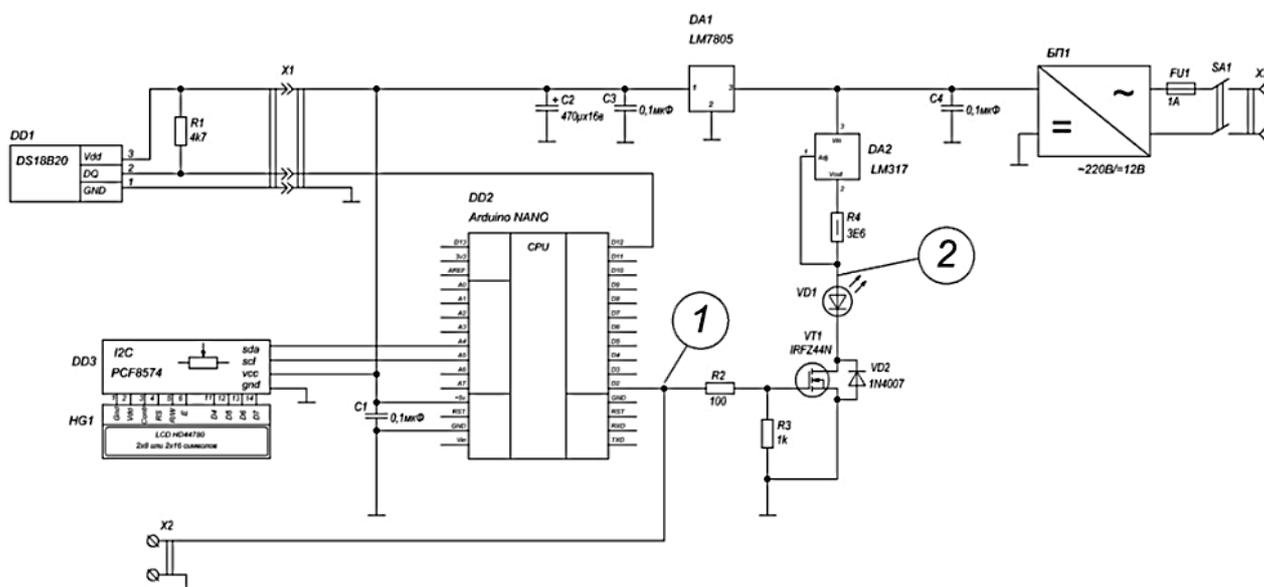


Рисунок 3.3 – Принципиальная схема передатчика

В качестве датчика температуры DD1 использован интегральный датчик температуры DS18B20. Для данного датчика имеются в открытом доступе необходимые драйвера и программы подключения. Резистор R1 с номиналом 4,7кОм рекомендован производителем микросхемы DS18B20.

Индикатор HG1 – ЖК индикатор LCD1602 с модулем I2C.

Транзистор VT1 – выбран IRFZ44N, но может быть любым n-канальным MOSFET, рассчитанным для используемого светодиода VD1. Диод VD2 необходим для шунтирования транзистора от импульса тока, образующегося при отключении нагрузки. В транзисторе IRFZ44N этот диод расположен внутри корпуса.

Резистор в цепи затвора R2 ограничивает ток при открытии транзистора. Резистор R3 подключен к затвору для надежного и быстрого запираения транзистора. Это исключит возможность возникновения неопределенного состояния транзистора и как следствие устранит наличие ошибок в передатчике по этой причине.

Светодиод VD1 – белый мощный на ток 700 мА с возможностью установки на радиатор охлаждения.

Микросхема DA2 - интегральный стабилизатор LM317 включен по схеме стабилизации тока. Резистор R4 является шунтом для стабилизатора. В нашем случае сопротивление резистора R4 составляет 3,6 Ом.

Микросхема DA1 – интегральный стабилизатор LM7805 постоянного напряжения 5В обеспечивает питание платы микропроцессора, индикатора, датчика температуры.

Источник питания БП1 - осуществляет питание от сети переменного тока ~220В, 50Гц. БП1 – импульсный и выдает стабилизированное напряжение 12В, током 1,5А.

C1, C3, C4 - конденсаторы фильтров, C2 – сглаживающий конденсатор.

Принципиальная схема приемного модуля устройства представлена на рисунке 3.4.

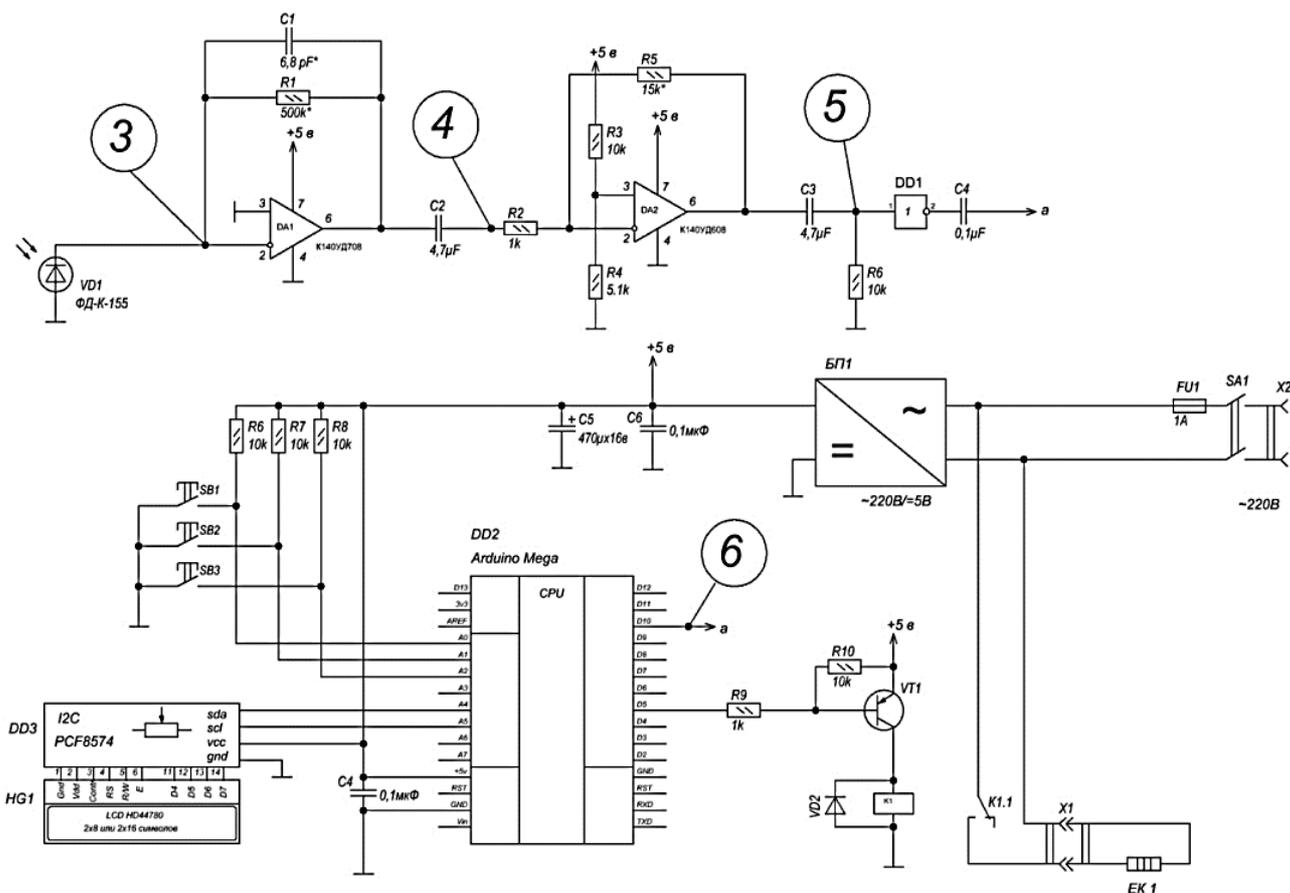


Рисунок 3.4 – Принципиальная схема приемника

Принятый световой сигнал преобразуется фотодиодом VD1 в фототок и через усилитель-преобразователь тока в напряжение DA1 через разделительный конденсатор C2 поступает на вход усилителя DA2. С выхода усилителя DA2 через дифференцирующую цепочку C3-R6 поступает на вход логического элемента DD1, который выполняет функцию буферного элемента и одновременно инвертирует сигнал для последующей обработки. Инвертирование сигнала необходимо для того, чтобы привести форму сигнала нужной полярности для приемопередатчика, поскольку фотодиод, включенный обратной полярностью, генерирует импульсы тока инверсные. С выхода инвертора сигнал поступает на вход приемопередатчика UART микроконтроллера DD2, где расшифровывается.

Микроконтроллером DD2 является микросхема ATmega2560, которая входит в состав платы Arduino Mega.

Полученные данные записываются в регистры хранения временных переменных. Откуда поступают для дальнейшей обработки и вывода на жидкокристаллический индикатор. Кнопки SB1-SB3 служат для изменения температуры регулирования.

Дальнейшая обработка данных зависит от того какие данные передаются и для чего они используются. В нашей установке мы передаем значение температуры для регулятора температуры – нагревателя EK1.

В качестве фотодиода VD1 выбран фотодиод ФД-К-155. Микросхема DA1 выполнена на операционном усилителе KP140УД708, DA2 на операционном усилителе KP140УД608.

Конденсатор C1, подключенный параллельно резистору R1 отрицательной обратной связи, необходим для уменьшения усиления высокочастотных шумов. Подобрать его номинал необходимо особо тщательно.

Резисторы R1, R2, R5, влияющие на коэффициент усиления операционных усилителей, конденсаторы C2 и C3, от которых зависит крутизна фронтов и спадов импульсов, подобраны таким образом, чтобы на установленной скорости передачи данных форма сигнала в контрольных точках 4, 5 и 6 была максимально приближена к форме ТТЛ импульсов.

Были проведены исследования для оптимизации параметров приемопередающих модулей устройства, разработанных на основе схемотехнических решений каждого модуля [99, 100]. На рисунке 3.5 представлен внешний вид экспериментального стенда.



Рисунок 3.5 – Внешний вид экспериментального стенда

При наладке приемной части устройства необходимо контролировать осциллографом наличие и форму сигнала в некоторых точках. Важными являются уровень и форма выходного сигнала с микроконтроллера передатчика и сигнала, поступающего на микроконтроллер приемника.

Наиболее важные точки контроля обозначены на принципиальных схемах передатчика и приемника (рисунки 3.3, 3.4) маркерами с 1 по 6. Формы, полученных импульсов представлены на рисунках 3.6 – 3.10.

Сигнал, поступающий с микроконтроллера передатчика, является эталоном формы и количества импульсов (маркер 1). Осциллограмма в этой точке контролируется вторым лучом осциллографа и присутствует на всех осциллограммах контрольных точек для синхронизации. Все остальные осциллограммы контрольных точек сняты первым лучом осциллографа.

Сигнал на светодиод (маркер 2) поступает с транзистора, являющегося коммутатором в передающей части. Контроль данной точки дает нам сведения о работоспособности коммутатора. При выходе из рабочего состояния коммутатор может не открываться или не закрываться либо делать это не полностью. Форму сигнала в этой точке можно увидеть на рисунке 3.6.



Рисунок 3.6 – Осциллограмма сигнала с передатчика

При работе приемного устройства важно контролировать уровень сигнала, после всех электронных компонентов до входа на микроконтроллер.

Контроль сигнал после фотодиода (маркер 3) показывает работоспособность источника фототока, в нашем случае фотодиода ФД-К-155 приемной части установки. Форму сигнала в этой точке можно увидеть на рисунке 3.7. Из осциллограммы видно, что амплитуда сигнала на фотодиоде очень мала (0,8В), учитывая, что осциллограмма снята, когда светодиод передатчика и фотодиод находились на небольшом расстоянии. Увеличивая расстояние между светодиодом и фотодиодом, амплитуда сигнала уменьшается в разы, поэтому для работы с сигналами такой амплитуды необходим усилитель.

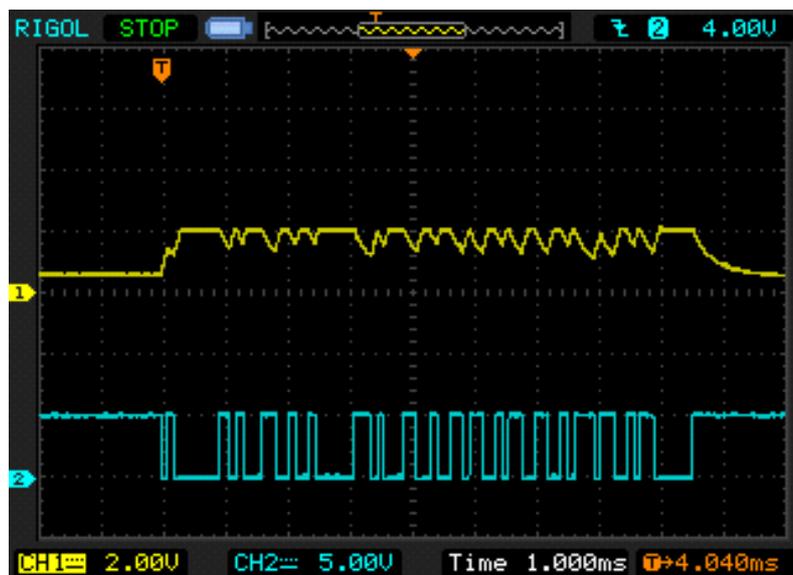


Рисунок 3.7 – Осциллограмма сигнала на фотодиоде приемника

Предусмотрено измерение сигнала для налаживания работы первого каскада усиления фототока. Форму сигнала в этой точке (маркер 4) можно увидеть на рисунке 3.8. По осциллограмме сигнала в этой точке можно настроить коэффициент усиления первого каскада на микросхеме К561ЛН2, подбором резистора обратной связи. В схеме имеется конденсатор, шунтирующий на землю и предназначенный для устранения или уменьшения до минимума высокочастотных шумов на выходе первого каскада усиления.

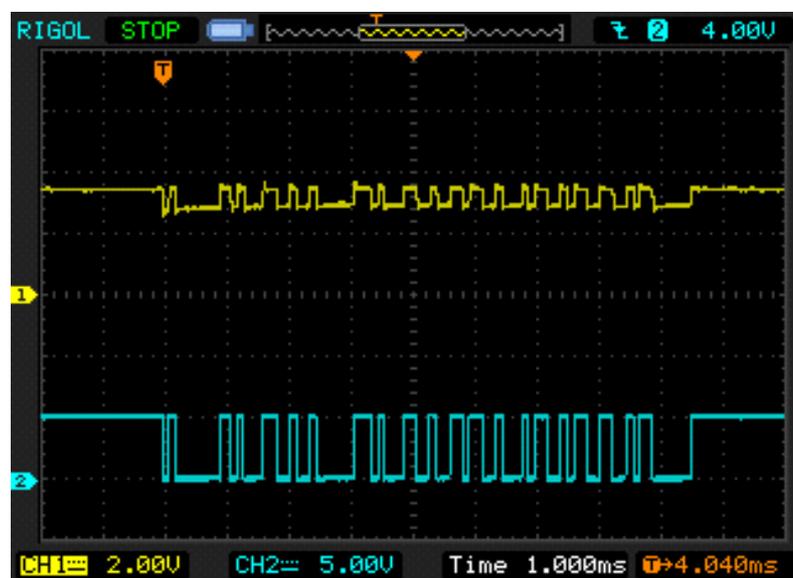


Рисунок 3.8 – Осциллограмма сигнала после первого каскада усиления приемника

По осциллограмме сигнала после второго каскада усиления (маркер 5) настраиваем коэффициент усиления на второй микросхеме К561ЛН2 подбором резисторов. Форма сигнала в этой точке изображена на рисунке 3.9.



Рисунок 3.9 – Осциллограмма сигнала после второго каскада усиления приемника

После буферного усилителя-инвертора (маркер б), можно наблюдать сигнал, практически полностью совпадающий с эталонным сигналом, что подтверждается осциллограммой на рисунке 3.10.

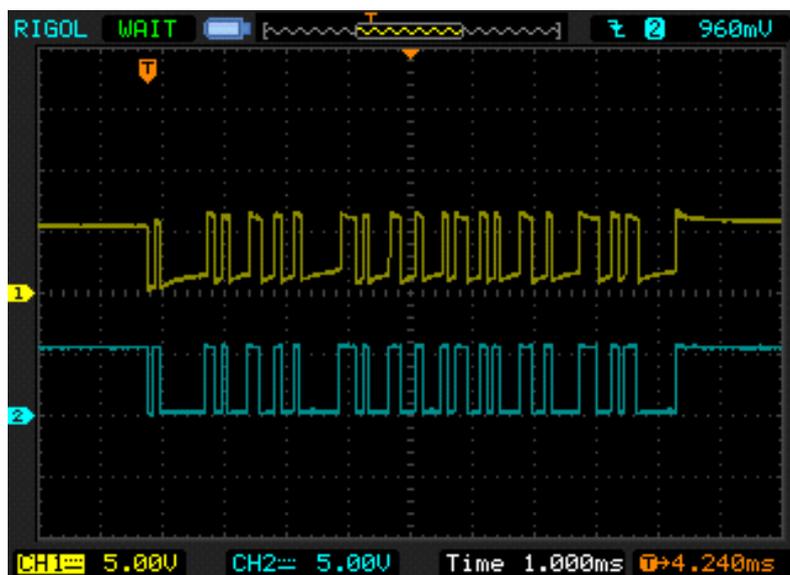


Рисунок 3.10 – Осциллограмма сигнала после буферного усилителя-инвертора приемника

Таким образом, настраивая каскады усилителя в каждой контрольной точке, мы добились идентичной формы отправленного и принятого сигнала и длительности импульсов. Это подтверждает адекватность новых схемотехнических решений. В результате получили стабильную передачу посылки импульсов, что говорит о надежной и стабильной работе приемо-передающих модулей устройства.

3.2 Программное обеспечение

Для обработки информации и управления электронными устройствами использованы микросхемы ATmega328P и ATmega2560, которые входят в состав плат Arduino Nano и Arduino Mega. Организация физического кодирования информации осуществлялась с использованием интерфейса UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter).

По данному протоколу передача данных по цифровой линии от одного устройства аналогичному осуществляется преобразование данных в последовательный вид. При кодировании в одинаковые промежутки времени происходит передача одного бита данных. Диапазон времени задается скоростью UART, который имеет общепринятый ряд стандартных скоростей. Установка скорости зависит от физических возможностей (параметров) электронных компонентов приема/передающего тракта.

Для нашей системы при увеличении скорости выше 9600 бод соответственно уменьшалась длительность передачи информации по времени. В приемной части характеристики узлов не позволяли отработать поступающий сигнал. При скорости меньше 9600 бод увеличивалась длительность передачи информации по времени, и соответственно увеличивалось время. Вследствие чего яркость светодиода уменьшалась, происходило мерцание светодиода. Поэтому нами установлена скорость 9600 бод из стандартного ряда. Данная скорость была выбрана в ходе проведения настроек приемо-передающего устройства, как наиболее оптимальная для используемых электронных элементов.

Скорость работы UART не означает скорость передачи данных, так как вместе с полезными данными UART передает служебные импульсы: стартовый бит, стоповый бит, бит четности. Например, расчетное время передачи 1 МБ (1048576 байт) со скоростью 9600 бод составляет 18 минут и 12 секунд.

В нашем случае скорость передачи данных не являлась основным критерием. Ставилась задача получения достоверных данных о температуре окружающей среды, а также поддержка уровня освещенности и отсутствие мерцания светодиода. Поэтому для работы предлагаемой системы данная скорость достаточна и даже избыточна.

Для контроля и управления температурой в помещении на базе предлагаемого подхода передачи данных нами было разработано программное обеспечение. Применялась визуальная среда программирования FLProg [101], которая позволяет использовать графические языки программирования при работе с платами Arduino. Данная среда предлагает два языка программирования FBD и LAD. Нами был использован язык графического программирования LAD (Ladder Diagram).

При проектировании рассматривались два отдельных устройства – приемник и передатчик, соответственно были разработаны два отдельных проекта программ.

Программное обеспечение для передающего устройства включает три блок-схемы – опрос датчика температуры (рисунок 3.11), работа UART порта (рисунок 3.12), отображение данных на индикаторе (рисунок 3.13).

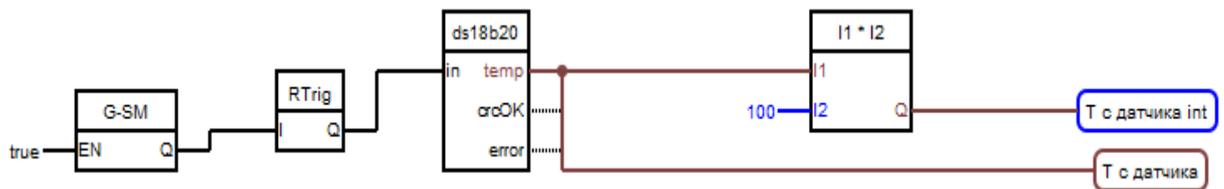


Рисунок 3.11 –Блок-схема «Опрос датчика температуры»



Рисунок 3.12 – Блок-схема «Передача в UART-порт»

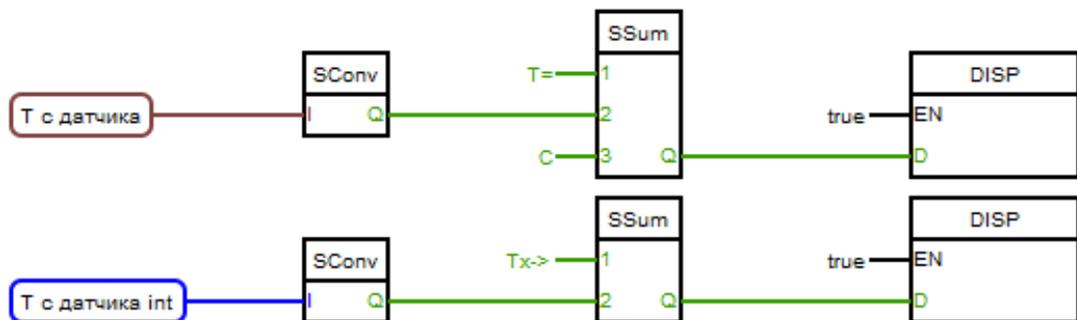


Рисунок 3.13 –Блок-схема «Отображение данных на жидкокристаллическом мониторе»

Программное обеспечение для приемного устройства включает следующие блок-схемы: прием данных из UART-порта (рисунок 3.14), выделение целой и дробной части значения температуры (рисунок 3.15), отображение данных на мониторе (рисунок 3.16), задание температуры в ручном режиме (рисунок 3.17), работа регулятора (рисунок 3.18).

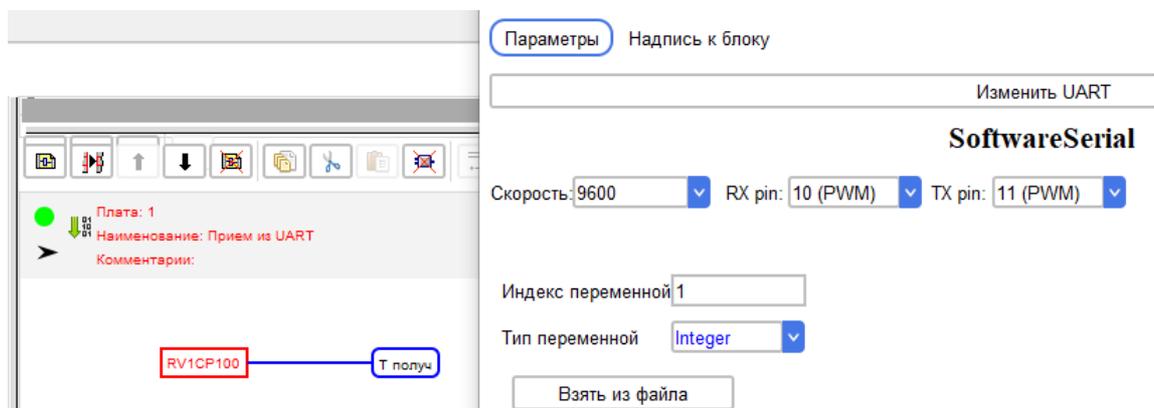


Рисунок 3.14 –Блок-схема «Логика приема из UART-порта»

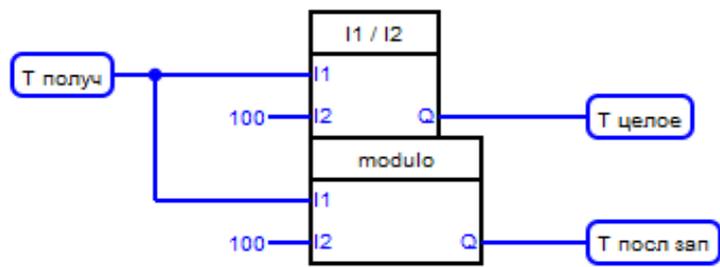


Рисунок 3.15 – Блок-схема «Выделение дробной и целой части значения температуры»

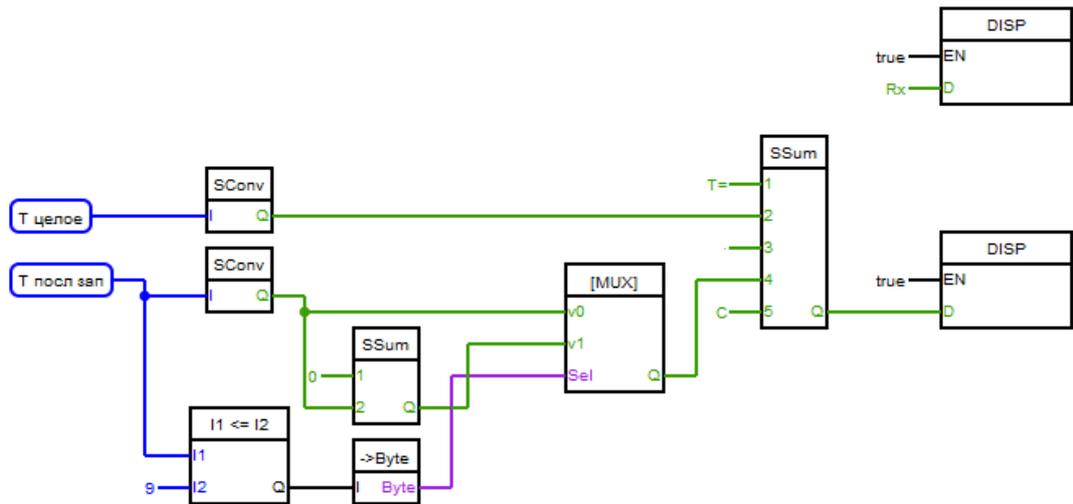


Рисунок 3.16– Блок-схема «Отображение данных на жидкокристаллическом мониторе»

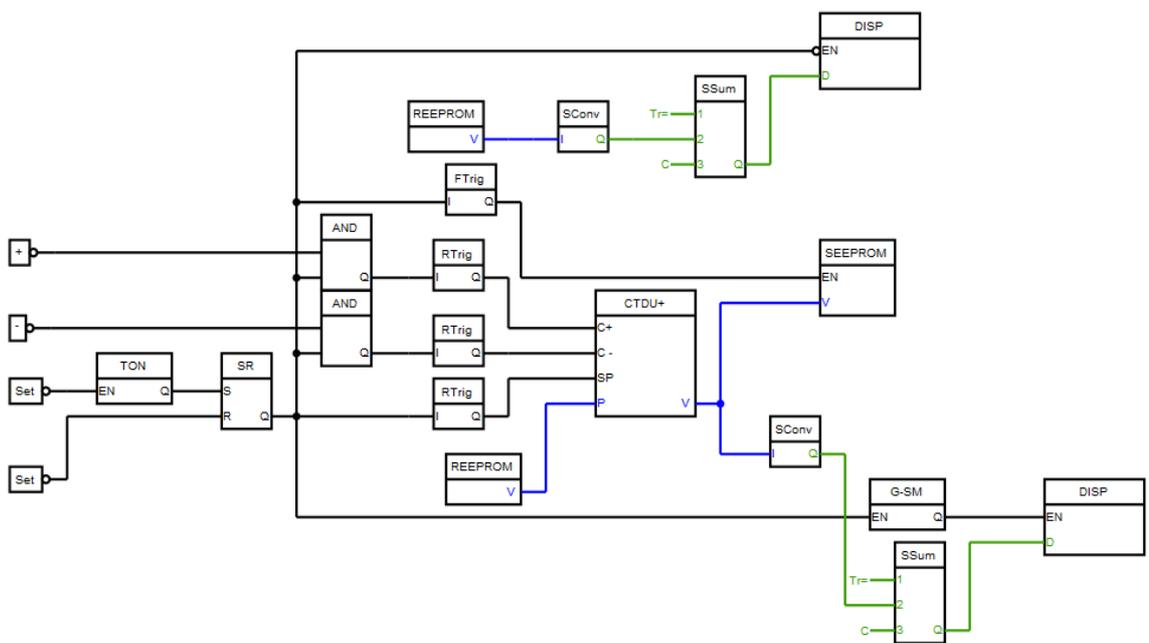


Рисунок 3.17– Блок-схема «Настройки регулятора температуры в ручном режиме»

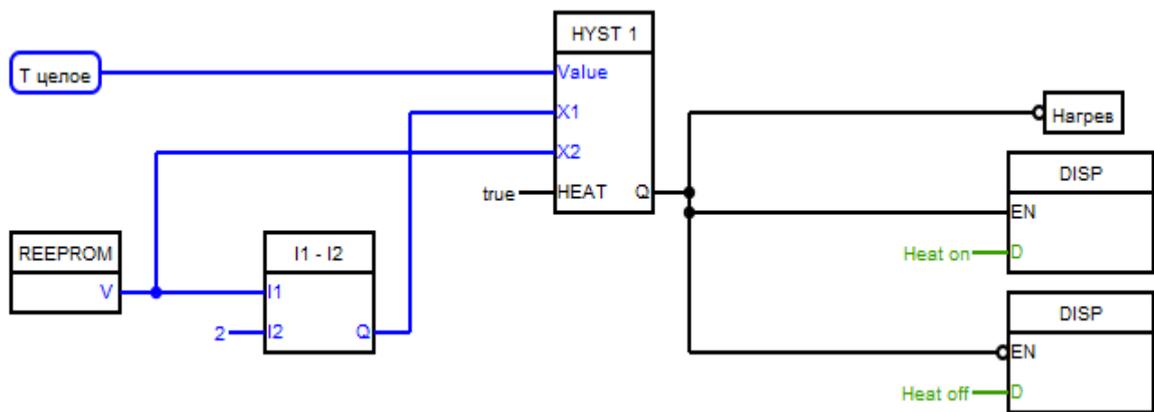


Рисунок 3.18– Блок-схема «Регулятор»

Разработанные графические блок-схемы в среде FLProg при компиляции преобразуется в код на языке Processing Wiring, который передается в программную среду Arduino IDE для дальнейшей прошивки в микроконтроллер.

Полученные результаты позволяют применить разработанные схемотехнические решения, алгоритм и программное обеспечение для разработки приемо-передающего устройства с передачей значений о текущей температуре в помещении по технологии VLC.

3.3 Экспериментальная установка передачи данных

Схема экспериментальной установки для передачи значений о температуре для применения в автоматизированной системе контроля температурными режимами и управления нагревателем по технологии VLC разработанной на основании функциональных схем (рисунки 3.1-3.2) и принципиальных схем (рисунки 3.3-3.4) представлена на рисунке 3.19. Экспериментальная установка состоит из двух модулей – передающего и приемного.

Приведем описание элементов передающего модуля. Светодиодная матрица (1) мощностью 3Вт и стабилизированным током 700 мА закреплена на алюминиевом радиаторе (2). Радиатор установлен с зазором на пластине из гетинакса. Радиатор был рассчитан и изготовлен таким образом, чтобы при непрерывной работе светодиода не происходило перегрева кристаллов светоизлучающей матрицы. Зазор необходим для обеспечения отвода тепла от радиатора. С обратной стороны передней панели, на которой закреплен светодиод, расположены стабилизатор тока (3), коммутатор (4) и источник питания (5), плата Arduino Nano. Загрузка скетча предусмотрена через мини USB-порт микроконтроллера.

На передней стороне задней панели закреплен интегральный цифровой датчик температуры производства фирмы Dallas Semiconductor DS18B20 в корпусе TO-92 (7) и индикатор LCD1602 с модулем I2C (6) для контроля и визуализации температурных параметров системы управления.

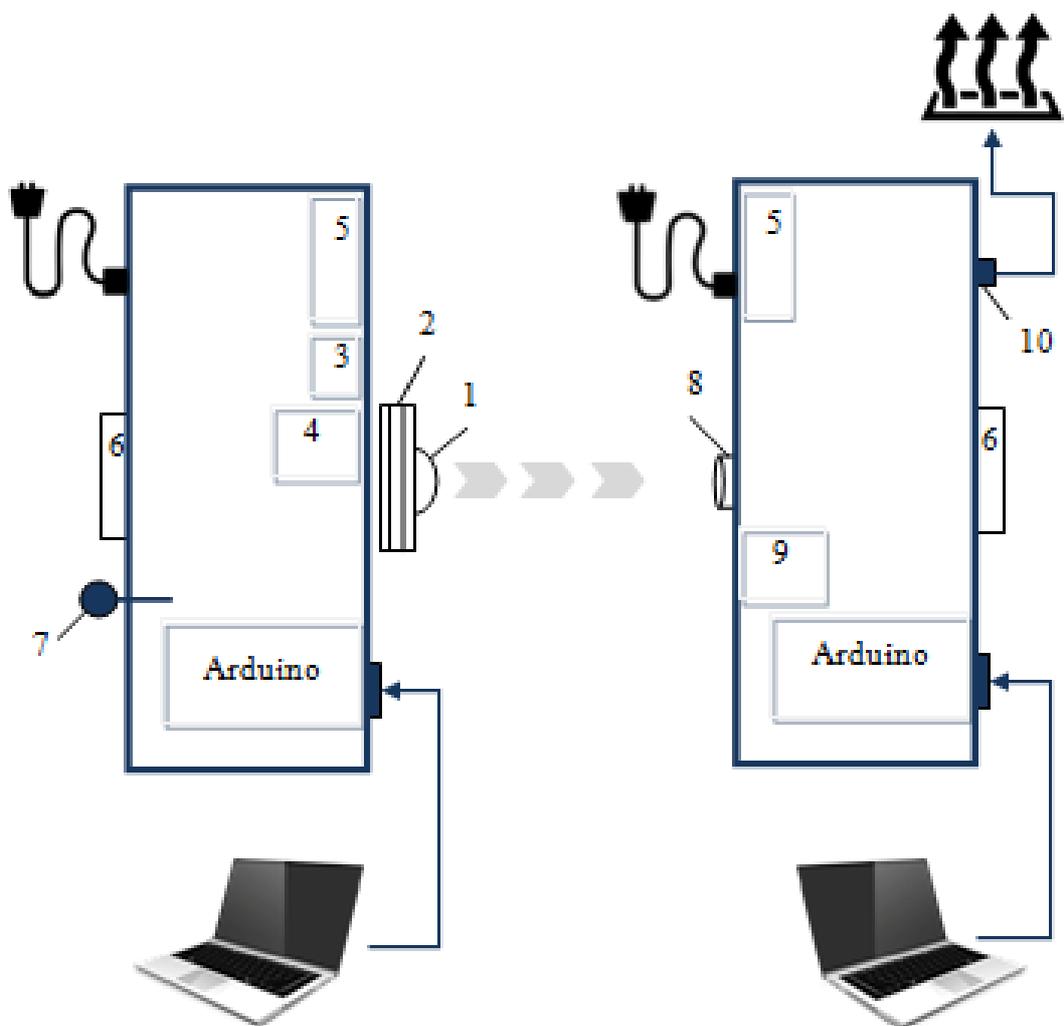


Рисунок 3.19 – Схема конструкции экспериментального стенда

На рисунке 3.20 показаны элементы и внешний вид передней панели передатчика.

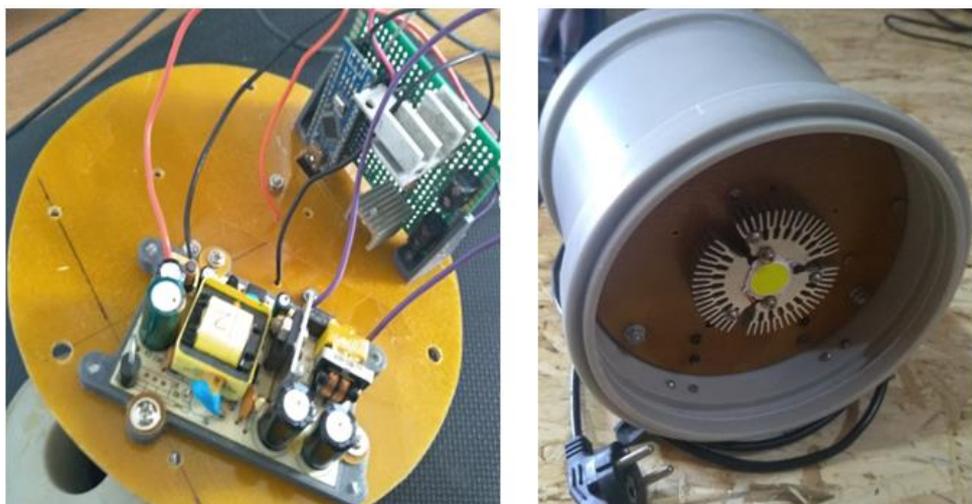


Рисунок 3.20 – Передающее устройство (передняя панель)

На рисунке 3.21 показаны элементы и внешний вид задней панели передатчика.

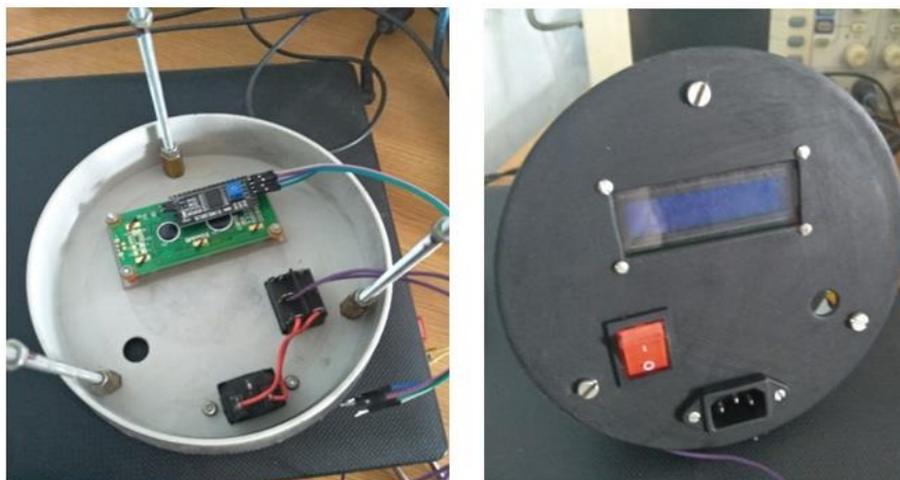


Рисунок 3.21 – Передающее устройство (задняя панель)

Приведем описание элементов приемного устройства. Для приема светодиодных импульсов используется фотодиод ФД-К-155 (8), который закреплен на внешней панели устройства. С внутренней стороны расположены усилитель, выполненный на микросхеме К561ЛН2 (9), источник питания (5) приемника и микроконтроллер Arduino Mega. Для контроля сигнала и визуализации данных о температуре на внешней задней панели расположен LCD монитор (7), выход для подключения и управления нагревательным элементом (10), кнопки для задания требуемых значений температуры пользователем.

На рисунке 3.22 показаны элементы и внешний вид передней панели приемника.



Рисунок 3.22 – Приемное устройство (передняя панель)

На рисунке 3.23 показаны элементы и внешний вид задней панели приемника.



Рисунок 3.23 – Приемное устройство (задняя панель)

Опишем алгоритм работы экспериментального стенда.

1. Включаем приемник и передатчик. Приемное устройство должно располагаться напротив передающего устройства. Нами проведены экспериментальные исследования работоспособности приемно-передающего устройства на прохождение сигнала без потерь по световому потоку от расстояния. Результаты показаны на графике рисунок 3.24. Снимались значения напряжения после второго каскада усиления в зависимости от расстояния. Информационные данные перестали передаваться при напряжении ниже 2В. По графику видно, что максимальное значение расстояния предела работоспособности составило 80 см.

2. Пользователь устанавливает заданную температуру при помощи кнопок на приемном устройстве. Заданное значение температуры отображается на мониторе.

3. Датчик температуры, расположенный на передающем устройстве определяет значение температуры внешней среды и передает на микроконтроллер.

4. Микроконтроллер обрабатывает данные, отображает значение температуры на мониторе и передает их через светодиод.

5. Фотодиод, расположенный на приемном устройстве считывает сигнал и передает его через усилитель в микроконтроллер.

6. Микроконтроллер обрабатывает сигнал и отображает на мониторе полученные данные о температуре.

7. Если полученное значение температуры меньше заданного значения, то включается нагревательный элемент и на мониторе отображается надпись “heat_on”. Если значение измеренной температуры больше заданного, то нагревательный элемент не включается/отключается и отображается надпись “heat_off”. Диапазон регулирования заданного значения температуры устанавливается программно.

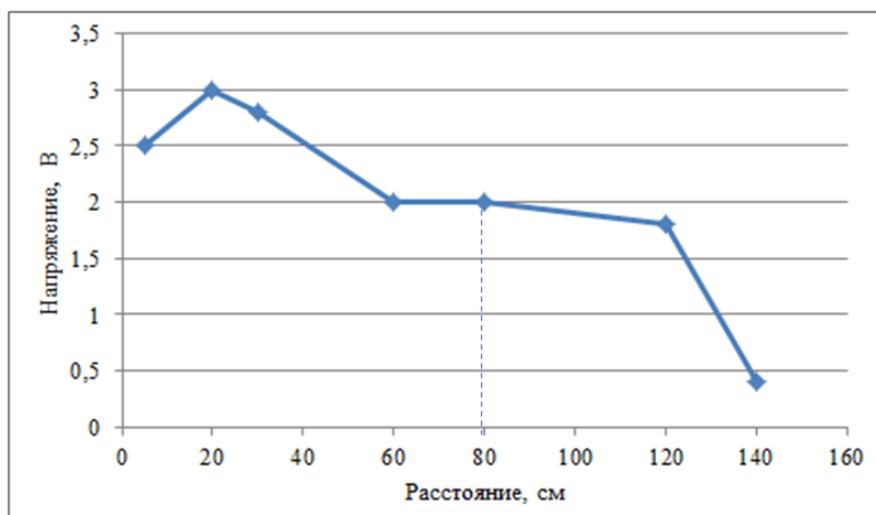


Рисунок 3.24 – График зависимости значения напряжения после второго каскада усиления от расстояния между приемником и передатчиком

Для демонстрации работоспособности и удобства фотофиксации значений передаваемых данных модули экспериментального стенда были расположены своей чувствительной частью напротив зеркала (рисунок 3.25).



Рисунок 3.25– Демонстрация индикация системы передачи и приема значений температуры

На передающем устройстве показана температура 15.19°C . Приемное устройство принимает сигнал и считывает значение температуры 15.18°C . Заданная программно температура «уставки» составляет 28°C , поэтому индикация на мониторе приемника показывает, что нагревательный механизм должен быть включен «heat_on».

Представленные выше результаты экспериментальных исследований были зафиксированы в помещении с естественным и/или дополнительным искусственным светом в соответствии с уровнем освещенности не превышающем указанный в СП 52.13330.2016 для жилых и офисных помещений в 300 лк [102].

Требования к качеству передаваемой информации заставляют обратить внимание на проблемы при организации VLC систем, такие как необходимость обеспечения линии прямой видимости, воздействие помех на информационный сигнал от внешних источников света (солнечный свет и соседние источники искусственного света).

Для работы системы приемник должен находиться в зоне светового потока излучателя передатчика. Даже без направленного излучения светодиода на фотоприемник видно, что происходит корректная передача данных (рисунок 3.25). Используемая в устройстве светодиодная матрица имеет угол обзора 120° . Проведенные эксперименты показывают стабильную передачу данных при отклонении приемника на половину угла обзора светодиодной матрицы от направляющего луча.

Проводились исследования качества передающего сигнала, связанные с дополнительным возмущением от источников искусственного света (рисунок 3.26). Приемно-передающие модули располагались на плоскости стола. Между приемником (2) и передатчиком (1) расстояние составляло 0,8 метра. Передавались данные от цифрового датчика температуры (3). Сигнал от передатчика и приемника фиксировался осциллографом (4).

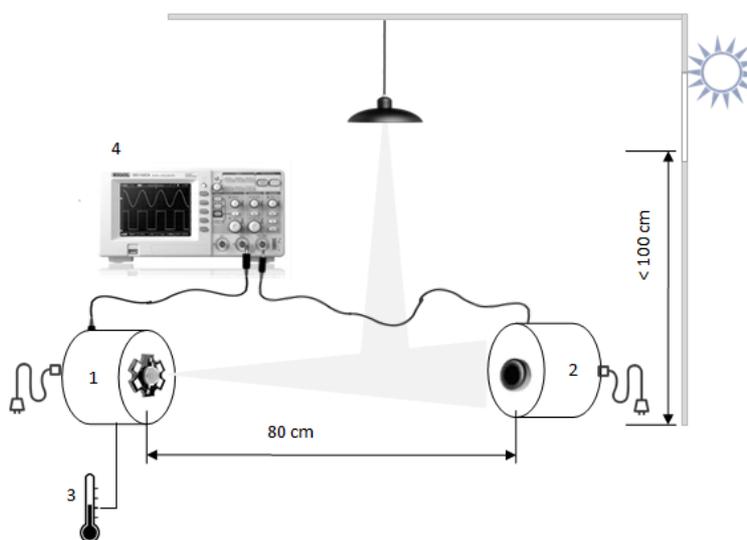
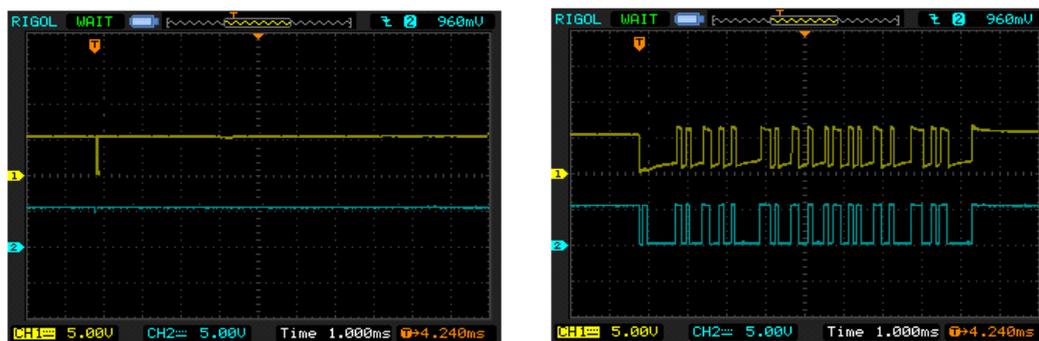


Рисунок 3.26 – Исследования качества передающего сигнала при внешнем возмущении от искусственного света

При включенных потолочных светильниках и уровне освещенности в помещении в пределах нормы передача сигнала была устойчивой. При включении светодиодной лампы с направленным световым потоком менее одного метра от приемно-передающей модели экспериментального стенда

система начинает работать некорректно. Осциллограмма сигнала при внешнем направленном световом потоке приведена на рисунке 3.27. Прямой луч света, попадая на линию связи, перебивает сигнал, это видно на рисунке 3.27(а). Сигнал полностью пропал как с передатчика, так и на приемнике. После принудительной перезагрузки системы на осциллограмме рисунок 3.27(б) отчетливо видно появление потерь передачи данных. Первый контрольный бит на приемнике пропал (первый луч осциллографа) соответственно сигнал с передатчика на приемник не пришел. Система не работает даже после перезагрузки.



а)

б)

а – осциллограмма сигнала при направленном световом потоке, б – осциллограмма после перезагрузки системы

Рисунок 3.27 – Осциллограмма сигнала при внешнем возмущении

Из этого следует, что при организации передачи данных в помещении по технологии VLC необходимо учитывать влияние направленного света от любых дополнительных источников излучения, а также угол направленности светового потока светодиода используемого в качестве передатчика. Данная проблема может быть решена при проектировании системы освещения за счет оптимального расположения светодиодных светильников или регулирования уровня освещенности с целью равномерного освещения и представлена в нашей статье [103].

Передача данных является дополнительной функцией в системе освещения. Были проведены исследования по качеству освещенности при работе светодиодной матрицы экспериментального стенда в качестве передатчика. Проводились измерения двух показателей это уровень освещенности и мерцания. ГОСТР 51317.4.17-2000 [104] определяет, что коэффициент пульсации светового потока считается вредным для зрительного восприятия человеческим глазом при показателе ниже 300 Гц. Снятые экспериментальные данные показали, что устройство в рабочем состоянии соответствует требованиям ГОСТ.

Таким образом, нами реализовано приемо-передающее устройство передачи данных по оптической беспроводной линии связи с использованием технологии VLC.

Выводы по третьему разделу

В данном разделе приведены собственные схемотехнические решения передатчика и приемника. При проектировании учитывалась разработанная имитационная модель системы передачи данных на основе метода амплитудно-импульсной модуляции в оптической связи. Проведены настройки для оптимизации параметров работы приемно-передающих устройств. Настраивая каскады усилителя приемника в каждой контрольной точке, получены идентичные формы отправленного и принятого сигнала и длительности импульсов. В результате получили стабильную передачу посылок импульсов, что говорит о надежной и стабильной работе приемно-передающих модулей устройства.

Разработано программное обеспечение для микроконтроллеров ATmega328P и ATmega2560 приемно-передающих устройств. Организация физического кодирования информации осуществлялась с использованием интерфейса UART. Установленная экспериментально скорость в 9600 бод позволила модулировать световые импульсы без мерцания, воспринимаемые человеческим глазом.

Собрана экспериментальная установка. В результате экспериментов получена устойчивая передача данных с помощью белого светодиода мощностью 3 Вт и физического кодирования светового сигнала по протоколу UART. При передаче данных использовался метод импульсной модуляции с наложением передаваемой информации на световой поток, излучаемый светодиодом. При передаче приемное устройство должно находиться в пределах светового потока. Максимальное расстояние считывания сигнала в экспериментальной установке соответствует 80см. Увеличение расстояния коммуникации более 80см возможно при использовании светодиодов с высокой мощностью, а также подбором усилителей с высоким коэффициентом усиления.

Разработанные собственные решения приемно-передающего устройства позволили передавать данные на примере температуры окружающего воздуха в помещении с помощью оптической беспроводной системы связи через светодиодную систему освещения.

Необходимо выделить технико-экономические показатели, которые отличают предлагаемое решение – простота схемотехнического решения, низкая стоимость радиоэлектронных элементов, высокая скорость передачи данных в режиме реального времени с достаточной точностью.

Таким образом, нами подтверждено второе научное положение, выносимое на защиту: приемно-передающее устройство с каналом передачи данных по световому потоку с использованием мощных белых светодиодов по технологии VLC.

Результаты исследований и технические решения, приведенные в данном разделе, были опубликованы в работах [97, с.24; 98, с.23; 99, с.5; 100, с.5].

4 ОРГАНИЗАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ VLC

4.1 Структурная схема автоматизированной системы управления на основе оптической беспроводной связи посредством светодиодного освещения

Для правильного и полноценного понимания использования технологии передачи данных с помощью мощных белых светодиодов для организации системы управления параметрами жизнеобеспечения требуется сформировать концепцию. Стоит также учитывать технические особенности построения самой системы автоматизации с использованием передачи данных с помощью видимого спектра.

Система должна интегрироваться в уже существующие и дополнять системы управления с помощью своих сильных сторон, нивелируя слабые стороны популярных на данный момент систем (повышенная радио зашумленность, возможность перехвата сигнала, конечная скорость передачи данных и т.д.). Отличной аналогией является возможность параллельного использования мобильного трафика через сотовые сети и Wi-Fi, что в повседневной жизни позволяет пользователю оставаться «онлайн».

Технология VLC подразумевает передачу данных при включенных устройствах освещения. Возникает вопрос об энергоэффективности системы. В жилом секторе современных городов пиковая нагрузка беспроводных систем приходится на вечернее время, т.е. когда в помещениях система освещения активна. Предлагаемый подход позволяет снизить зашумленность и нагрузку радиочастотного диапазона в это время.

Необходимо отметить, что внедрение технологии передачи данных посредством видимого света не предполагает полного доминирования и замены уже существующих беспроводных технологий. Необходимо четкое понимание, что система должна работать в симбиозе с уже имеющимися беспроводными технологиями передачи данных.

Для эффективной интеграции системы целесообразно использовать уже существующие источники освещения в помещении. Так как на данный момент в Республики Казахстан обязательно использование светодиодного освещения с заданными ГОСТом параметрами в ряде государственных учреждениях, такая интеграция вполне реальна. Несмотря на то, что каждый гражданин в своем личном доме может использовать любые типы разрешенного освещения, в Республике на протяжении последних лет наблюдается устойчивая тенденция использования светодиодного освещения и в жилых домах. Таким образом, внедрения предлагаемой технологии возможно повсеместно в Казахстане на основе уже готовой инфраструктуры.

Построение системы управления параметрами жизнеобеспечения с использованием технологии передачи данных посредством светодиодного освещения нами предлагается реализовать по принципу работы Master – Slave (ведущее устройство – ведомое устройство).

Так как система ограничена возможностью направления сигнала передачи данных, Master (ведущее устройство) должно транслировать данные сразу на все устройства, а Slave (ведомые устройства) должны в режиме реального времени «слушать» ведущее устройство. Если Slave (ведомое устройство) понимает, что обращаются к нему, оно должно принять передаваемую информацию и выполнить команду без формирования ответного сообщения.

Предлагаемая система управления построена на принципе передачи данных по видимому спектру в одном направлении. Простыми словами, в комнате светодиодные лампы на потолке будут являться частью ведущего устройства, а ведомое устройство не оборудовано осветительными элементами, а только фотоприемником. Следовательно, ведомое устройство не будет формировать ответного сигнала в направлении Master, а только выполнять его команды. Такой подход соответствует концепции построения однонаправленной передачи данных присущей технологии VLC.

При построении устойчивой и стабильной системы автоматизации обеспечения жизнедеятельности необходимо учитывать наличие межконтурных связей. Современные технологии позволяют по-новому взглянуть на принципы регулирования и управления и применить их для решения задач диссертационной работы.

Для организации системы управления жизнеобеспечения требуется сформировать контуры регулирования следующих параметров – температура помещения, влажность воздуха, анализ газов (воздуха), положения окон и дверей, уровень освещенности.

Предлагается следующая структурная схема.

Ведущий контроллер оснащен сенсорной панелью и располагается внутри помещения. С помощью данного контроллера осуществляется программное управление всей системы управления. Требуется предусмотреть возможность выбора ручного управления системой и автоматического режима работы.

Управляющий блок состоит из светодиодных осветительных приборов и контроллера. Контроллер соединен с осветительными приборами. Осуществить связь возможно как с помощью кабельной продукции (проводов), так и с помощью беспроводной связи (Wi-Fi, Bluetooth). Стоит отметить, что при использовании беспроводных систем, имеется как положительная сторона, так и отрицательная. Положительным является возможность быстрой интеграции системы в существующую. Дополнительно такое построение позволит управлять системой удаленно, но как следствие теряется уникальная повышенная защищенность системы от проникновения на основе технологии передачи данных с помощью видимого спектра.

Контроллер интерфейса. Требуется организовать интерфейс передачи данных между приемником и передатчиком. Для этих целей используется контроллер интерфейса. В светодиодном устройстве контроллер интерфейса выполняет более сложную функцию, так как одновременно является частью светодиодного драйвера. В приемнике контроллер интерфейса «расшифровывает» аналоговый сигнал, полученный с фотодиода, приводит его в требуемый формат посылки и согласно протокола выполняет команду.

Измерительный блок включает набор следующих датчиков: датчик температуры, датчик влажности, датчик анализа газов, датчики концевого положения, датчик освещенности. Датчики подключаются к контроллеру и располагаются в соответствии существующими нормативами и ГОСТами. Специфичных требований при установке датчиков по технологии VLC не предусмотрено. Подключение также можно осуществить как проводным, так и беспроводным способом.

Блок исполнительный механизм рассматривается как совокупность исполнительных механизмов системы. Исполнительные механизмы для данной системы: интеллектуальные батареи/ТЭН/кондиционер, увлажнитель воздуха, принудительная вытяжка, сервоприводы для окон и дверей. Исполнительные механизмы оборудованы дополнительно фотоприемниками для реализации технологии передачи данных по видимому спектру. Исполнительные механизмы не соединены между собой, и не имеют информационно-коммуникационных каналов связи друг с другом. Вся интеллектуальную работу выполняет ведущее устройство, а ведомые устройства только подчиняются командам.

На рисунке 4.1 представлена схема описанного подхода на примере организации управления температурным режимом в помещении.

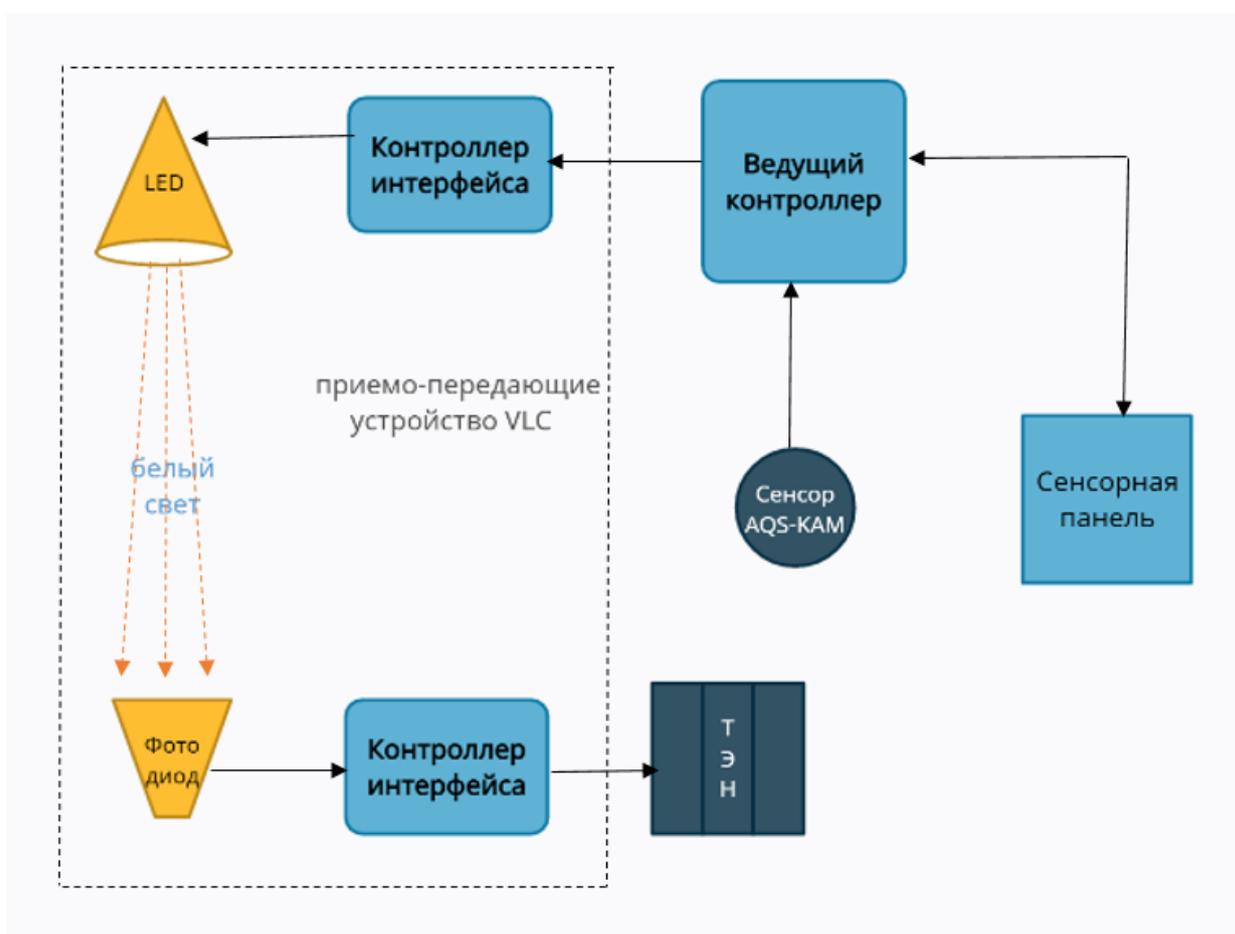


Рисунок 4.1 – Схема автоматизированной системы управления температурой в помещении с использованием технологии VLC

В системе управления жизнеобеспечения присутствуют несколько контуров регулирования. Все получаемые данные можно разбить на прямые и косвенные показатели для каждого контура. В каждом выделить возможную взаимосвязь, которая воздействуют на регулируемый параметр. Технология VLC предусматривает однонаправленную связь в системе передачи данных, поэтому имеет смысл в ходе управления каждым конкретным контуром помимо учета прямых параметров регулирования обратить внимание так же на косвенные параметры. Несмотря на то, что ряд параметров не имеют между собой четкой линейной зависимости, современные технологии позволяют обрабатывать большой массив данных, обучаться и адаптироваться. Это в конечном итоге позволит формировать сигналы управления косвенными исполнительными механизмами, обеспечить стабильность работы конкретного контура и повысить устойчивость всей системы.

На рисунке 4.2 приведена структурная схема контура управления температурой помещения.

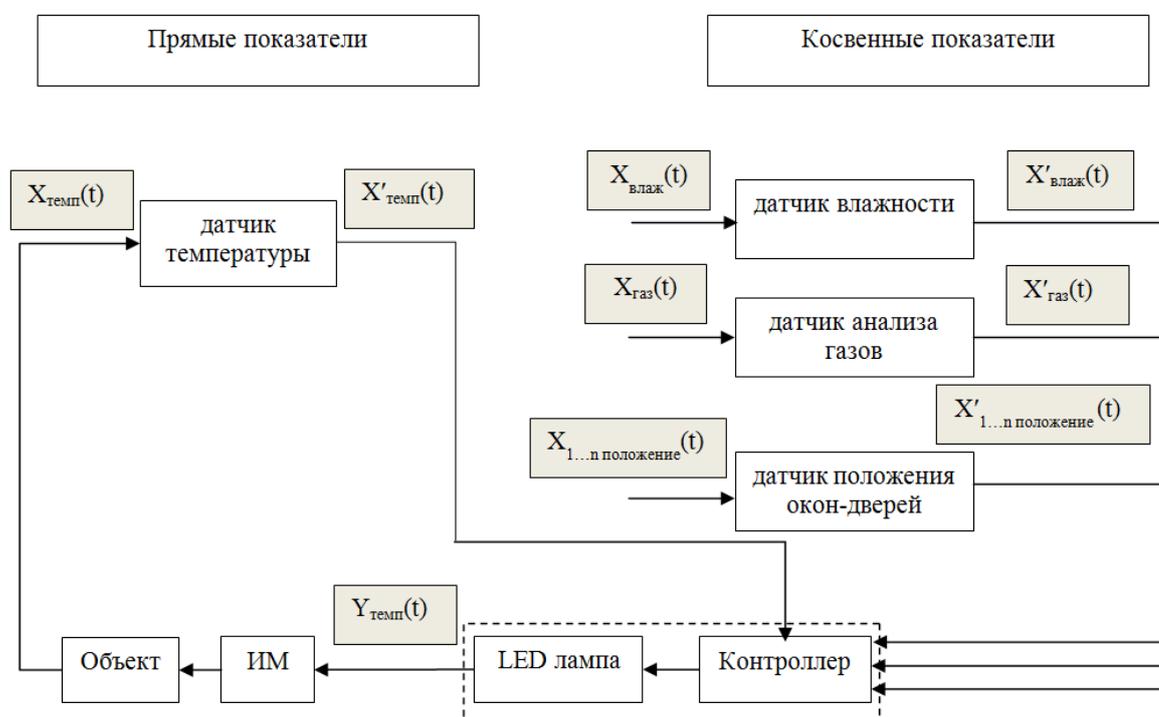


Рисунок 4.2 – Структурная схема контура управления температурой

На рисунке введены следующие обозначения:

$X_{\text{темп}}(t)$, $X'_{\text{темп}}(t)$ – сигнал на входе и выходе датчика температуры соответственно;

$X_{\text{влаж}}(t)$, $X'_{\text{влаж}}(t)$ – сигнал на входе и выходе датчика влажности соответственно;

$X_{\text{газ}}(t)$, $X'_{\text{газ}}(t)$ – сигнал на входе и выходе датчика газа соответственно;

$X_{1...n \text{ положение}}(t)$, $X'_{1...n \text{ положение}}(t)$ – сигнал на входе и выходе датчиков положения соответственно;

$Y_{\text{темп}}(t)$ – управляющее воздействие.

Комнатной температурой согласно ГОСТ считается 18-24⁰С, а минимальная относительная влажность для комфорта и здоровья человека составляет 30% -60%.

Есть линейная зависимость между температурой воздуха и относительной влажностью. Зимой наружный воздух в туманный день при 0⁰С имеет влажность около 100%, а нагретый воздух в помещении до 22 ⁰С выдает около 30% влажности.

По стандартам каждому человеку, находящемуся в помещении в течение часа требуется от 30 до 60 кубометров чистого воздуха в час. С помощью датчика анализатора воздуха можно получать данные о состоянии воздуха в помещении. Приток свежего воздуха в помещение можно обеспечить разными способами, например, с помощью принудительной вытяжки или кондиционера. В предлагаемой системе проветривание осуществляется с помощью открытия/закрытия окон. С помощью сервопривода возможно открывать окно согласно заданному градусу открытия (процент открытия). Концевой датчик предназначен для проверки положения окна, и как защита от перерегулирования, процент открытия задается программно на сервопривод, и отслеживается только в нулевом положении. Логично, что при открытии окон и/или дверей для проветривания, будет меняться как температура, так и влажность помещения.

Составив ряд предположений, и используя известные линейные зависимости, можно рассчитать поведение объекта управления.

На рисунке 4.3 приведена структурная схема контура управления влажностью помещения.

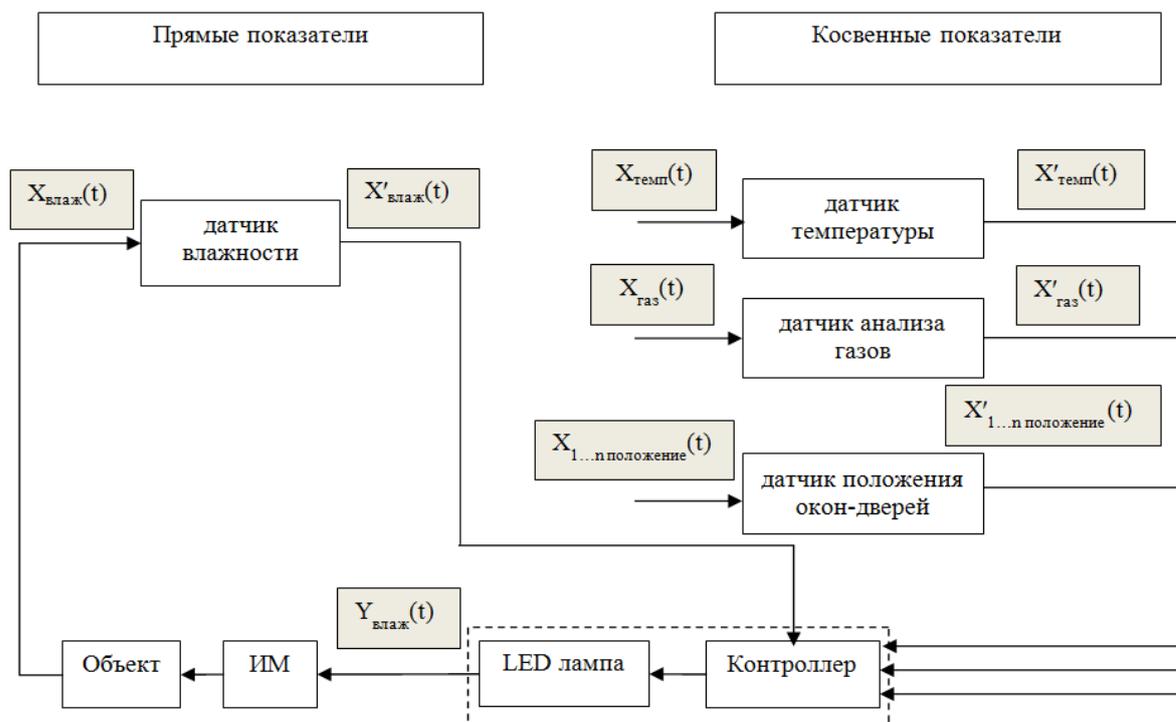


Рисунок 4.3 – Структурная схема контура управления влажностью

Согласно ГОСТ 30494-2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» качество воздуха в помещении является важным параметром для жизнеобеспечения. Влажность воздуха в помещении должна поддерживаться от 30-60%.

На рисунке 4.4 приведена структурная схема контура управления составом воздуха помещения.

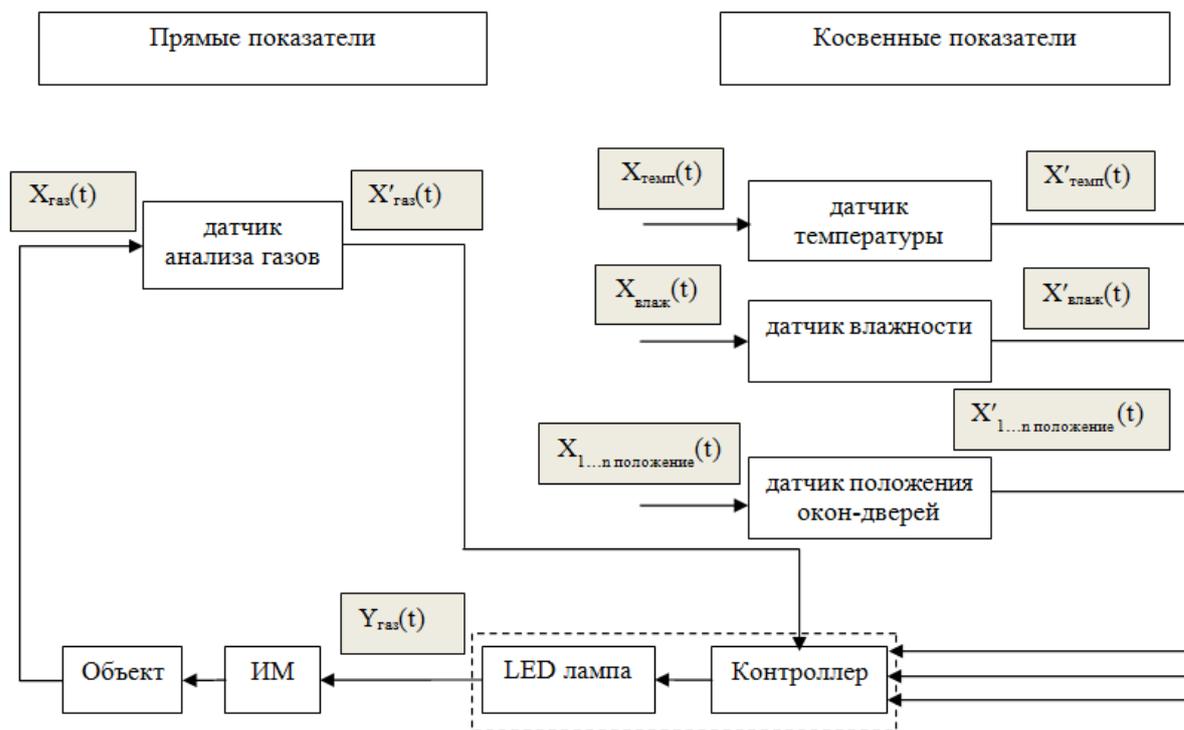


Рисунок 4.4 – Структурная схема контура управления составом воздуха

Для обеспечения заданного качества воздуха в помещении состав воздуха определяется предельно допустимой концентрацией углекислого газа, монооксида углерода, диоксида азота, оксид серы находящийся в атмосфере подаваемые в помещение системой вентиляции и эффективности воздухо-распределения.

На рисунке 4.5 приведена структурная схема контура управления положением окон/дверей.

При таком подходе к построению системы автоматизации важным этапом будет написание алгоритма работы системы с учетом конкретных особенностей объекта управления. Данная задача ложится на инженерный состав, который будет непосредственно производить работы по проектированию, установке и пусконаладочным работам. В диссертации не лежит цель предоставить конкретное инженерное решение, научная составляющая, концепция и описание процесса позволит инженеру произвести расчеты и настройку системы под конкретные требования. От параметров помещения и функционального назначения будут отличаться как зависимости в формулах, так и ГОСТы на обеспечение жизнедеятельности.

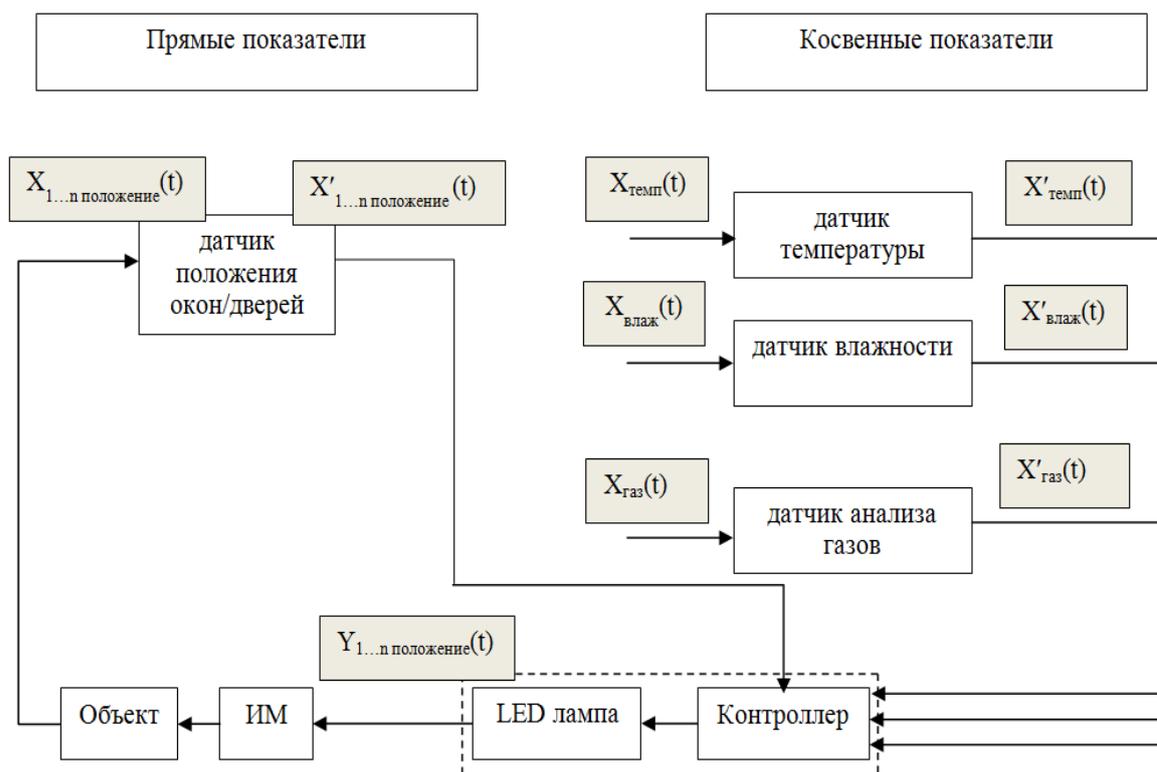


Рисунок 4.5 – Структурная схема контура управления положением окон/дверей

Современные системы автоматизированного управления могут быть реализованы как интеллектуальные. Преимущество интеллектуальных автоматизированных систем управления заключается в возможности обучения системы и адаптации к воздействиям на основе анализа получаемой информации о состоянии объекта управления, а также информации о поведении окружающего мира, с которым объект находится во взаимодействии. Для реализации такой системы необходимо наличие не только базы данных, но и базы знаний, алгоритма для машинного логического ввода данных и т.д. С учетом всех требования, предъявляемых при построении интеллектуальных автоматизированных систем управления появляется возможность организации управления плохо формализованными или сложными техническими объектами за счет “обучения” системы в целом в режиме реального времени.

В нашей системе управления, учитывая помимо прямых параметров регулирования и косвенные показатели, можно реализовать интеллектуальную систему, так как предлагаемая система обладает следующими свойствами.

- система обладает возможностью взаимодействия с внешним миром с использованием информационно-коммуникационных каналов связи, в нашем случае посредством видимого света источников освещения;
- система является открытой, что позволяет пополнять и приобретать нужные знания;
- наличие возможности прогнозировать поведение объекта управления (параметров) за счет косвенных данных;

- система обладает свойством компенсировать неточную информацию о состоянии объекта управления за счет обучения и реализации нового алгоритма управления;
- система не снижает качественного функционирования при нарушении межконтурных связей в процессе управления.

Таким образом, на основе концепции технологии VLC описана предлагаемая структурная схема автоматизированной системы управления параметрами жизнеобеспечения в помещении. Выделены контуры регулирования. Учитывая однонаправленность технологии VLC при передаче данных, помимо прямых параметров регулирования предложено учитывать влияние косвенных показателей. С учетом этого разработаны контуры регулирования.

4.2 Реализация системы управления температурой в помещении по технологии VLC

Нами предлагается использовать в системах управления физическими параметрами передачу данных по технологии VLC. В данном параграфе такой подход рассматривается на примере организации автоматизированной системы управления температурой в помещении.

На рисунке 4.6 представлена классическая одноконтурная система автоматического регулирования с обратной связью по отклонению. Взаимодействие объекта регулирования и регулятора осуществляется в замкнутой системе регулирования. На выходе объекта управления формируется выходной сигнал $U_{\text{вых}}$, который поступает на вход датчика. Сигнал формируемый на выходе датчика X_1 суммируется с заданным значением $X_{\text{зд}}$ и формирует сигнал X_0 , который подается на вход регулирующего устройства. Таким образом, на вход регулятора подается действительное значение выходной переменной, а также вручную заданное значение требуемой величины. Задача регулятора на основе входного сигнала, сформировать сигнал управления U_p , который поступает на исполнительный механизм и приведёт объект управления к заданным параметрам.

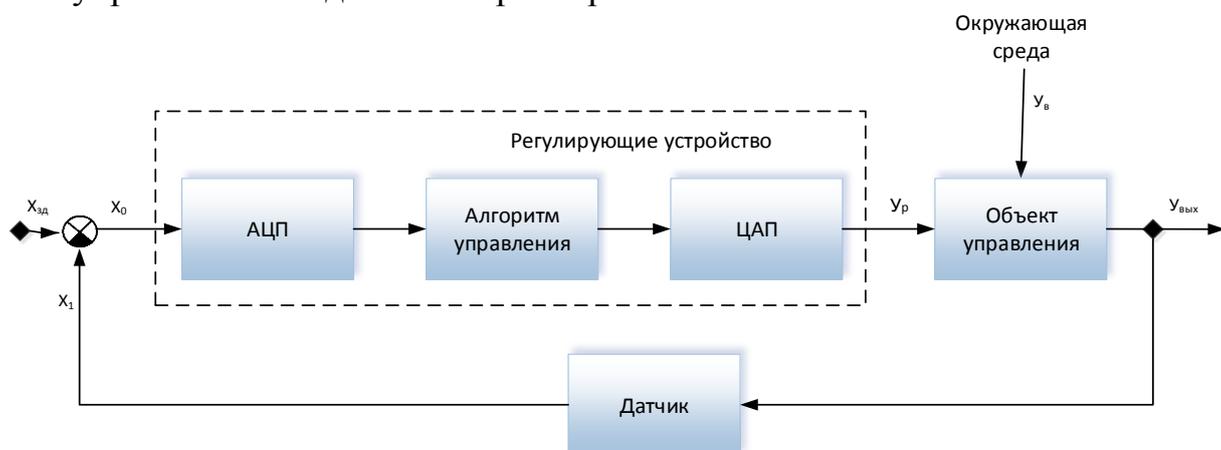


Рисунок 4.6 – Классическая схема автоматического регулирования

Задачи системы управления заключаются в измерении температуры в помещении, передаче данных, управление нагревательным элементом, поддержание заданного температурного режима.

Отличие предлагаемой системы управления заключается в использовании светодиодных ламп дополнительно для передачи данных получаемых с датчика температуры по беспроводной оптической линии связи. Для обработки сигналов в приемном и передающем модуле используются микроконтроллеры.

Структурная схема, реализующая задачи с использованием нового подход приведена на рисунке 4.7.

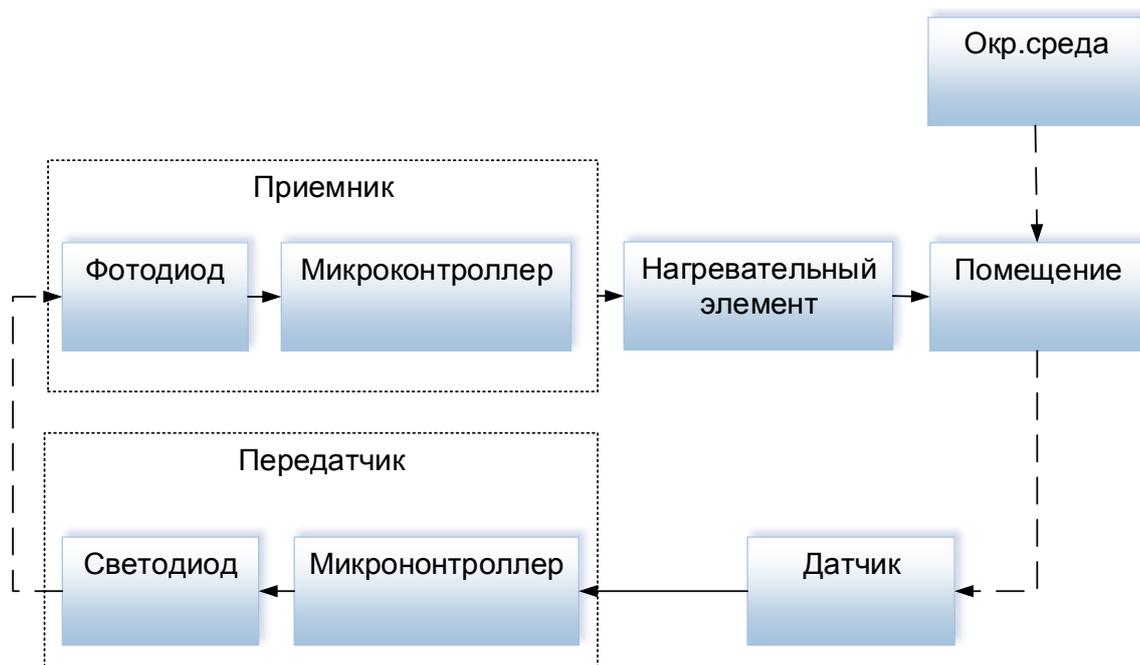


Рисунок 4.7 – Схема системы автоматизированного управления температурой по технологии VLC

Процесс управления заключается в следующем. Датчик измеряет текущую температуру в помещении и передает данные микроконтроллеру, который обрабатывает информацию в соответствии с заданным алгоритмом, т.е. сравнивает текущую температуру с заданной программно. Если температура ниже заданной температуры, то микроконтроллер формирует сигнал и подает его на коммутатор. Коммутатор формирует управляющее напряжение и подает его на светодиодную матрицу, которая начинает передавать импульсы светового излучения в области спектра видимого света.

Приемное устройство находится на расстоянии от светодиодной матрицы, выполняющей дополнительно роль передатчика данных. Фотоприемник, расположенный на принимающем модуле через окружающую среду (воздух) принимает сигналы от светодиода в виде импульсов светового излучения, преобразует их в электрические сигналы и отправляет в микроконтроллер.

Микроконтроллер осуществляет обработку полученной информации и в соответствии с заданным алгоритмом программы подает управляющий сигнал исполнительному механизму, в нашем случае нагревательному элементу.

Для апробации предлагаемого подхода была разработана экспериментальная модель, реализующая систему управления температурой помещения. На рисунке 4.8 представлен внешний вид экспериментальной модели помещения и элементов системы для поддержания заданного температурного режима. В передающем устройстве (1) установлена светодиодная матрица мощностью 3Вт. К передатчику подключен интегральный цифровой датчик температуры DS18B20 (2). Для приема светодиодных импульсов использован фотодиод ФД-К-155 (3). Исполнительный механизм представляет собой нагревательный элемент (4) мощностью 30Вт.

Управление и обработка данных осуществляется микроконтроллерами Atmega 328P, расположенными на отладочной плате Arduino. Модель помещения (5) имеет размеры 80x40x45 сантиметров и представляет собой закрытый короб.

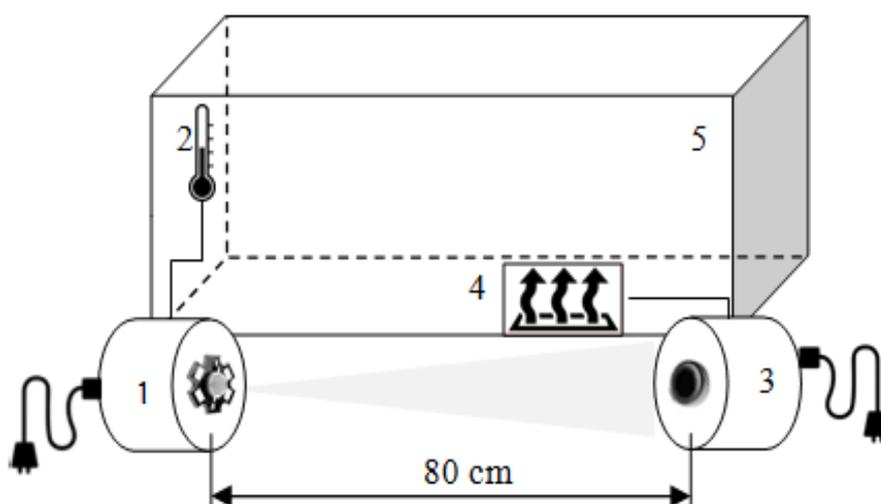


Рисунок 4.8 – Экспериментальная модель

Датчик температуры и нагревательный элемент расположены внутри модели помещения. Устройства передачи и приема данных расположены вне модели для удобства снятия и регистрации показаний. Для проведения эксперимента передатчик расположен на расстоянии 80 см от приемника. Данное расстояние является максимальным для разработанных передатчиков и определено экспериментальным путем. Начальная температура внутри модели помещения t_{i0} составляла 26°C . Нами задана температура t_s равной 28°C , которая устанавливалась вручную с помощью кнопок, расположенных на панели приемника. Диапазон рабочей температуры t_s задавался программно и установлен $\pm 1^{\circ}\text{C}$ от заданного значения. Эксперимент проводился при естественном освещении в помещении.

На рисунке 4.9 показан процесс установки заданной температуры с помощью разработанной системы управления на основе технологии передачи данных посредством светодиодной матрицы освещения. Как видно из графика заданная температура в 28°C была достигнута за 8 минут после включения работы системы управления. Через 2 минуты (т.е. на 10 минуте по графику) датчик температуры считал значение в 29°C и приемо-передающий тракт обработав информацию передал сигнал об отключении нагревательного элемента. После его отключения происходит процесс увеличения температуры примерно еще на $0,7^{\circ}\text{C}$ в течении короткого времени. Это связано с физическими процессами тепломассопереноса. Когда температура опустилась до 27°C система подала сигнал нагревательному элементу о включении. По графику видно, что процесс переходит в устойчивое состояние.

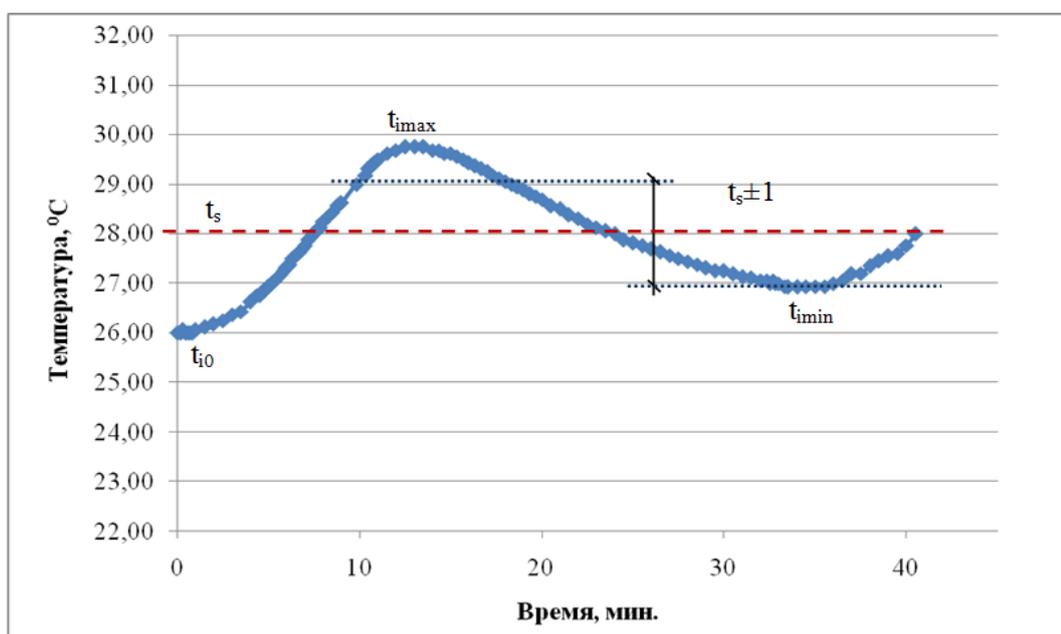


Рисунок 4.9 – Переходной процесс установки заданного значения температуры

Для уменьшения разброса значений температуры и соответственно снижения расхода тепла рекомендуется уменьшить диапазон рабочей температуры. Применение микроконтроллеров в приемо-передающих устройствах позволяет задавать значения с любой точностью в зависимости от параметров исполнительных элементов и функций системы управления.

Необходимо отметить, что реализованная обратная связь имеет на входе регулятора постоянно поступающий сигнал, который пропорционален выходному сигналу на протяжении всего времени. В экспериментальной установке в роли исполнительного механизма выступает обычный электрический нагревательный элемент. Данное устройство позволяет реализовать в системе только жесткое управление с обратной информационной связью. При использовании интеллектуального исполнительного устройства возможен переход к гибкому управлению, что позволит уменьшить отклонения регулируемой величины.

Выводы по четвертому разделу

В данном разделе предложен и описан подход при организации автоматизированной системы управления параметрами жизнеобеспечения в помещении с использованием технологии передачи данных посредством светодиодного освещения. Система управления построена на принципе передачи данных по видимому спектру в одном направлении, что соответствует концепции построения технологии VLC. Учитывая однонаправленность при передаче данных, разработана структурная схема. Помимо прямых параметров регулирования предложено учитывать влияние косвенных показателей. С учетом этого разработаны контуры регулирования.

С целью апробации предложенного подхода собран экспериментальный стенд. Представлена система управления температурой в помещении с функцией передачи управляющих сигналов по оптической беспроводной технологии посредством видимого света. Для передачи данных использовался белый светодиод мощностью 3Вт, который одновременно выполнял функцию освещения. При двойном использовании светодиода качество светового потока не снизилось. Разработанная система управления обеспечивает передачу значений текущей температуры воздуха с достаточной скоростью и точностью до 0,01 градусов, а также поддержание заданного температурного режима в помещении.

Проведенные экспериментальные исследования показали возможность реализации предлагаемого подхода для регулирования физических процессов в системах управления жизнеобеспечения, а также возможность перехода к беспроводному управлению технологическими процессами.

Существующая искусственная световая инфраструктуры может стать платформой для организации интеллектуальной системы управления параметрами без вложения больших финансовых средств. Предлагаемая система управления может быть использована в помещениях, в которых искусственный свет необходим постоянно или длительное время. Например, в сельскохозяйственной отрасли в теплицах и птицефабриках, в производственных комплексах, в складских помещениях.

Таким образом, нами подтверждено третье научное положение, заявленное в диссертационной работе – светодиодная система освещения с функцией передачи данных по оптическому каналу в автоматизированной системе управления параметрами жизнеобеспечения.

Результаты исследований, приведенные в данном разделе, были доложены автором на международных конференциях и опубликованы в [97, с.24; 98, с.23; 99, с.5; 100, с.5] [105, 106].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие основные результаты.

1) Проведен анализ современного состояния беспроводных технологии передачи данных, в ходе которого выделены особенности и проблемы:

– при построении автоматизированных систем управления техническими процессами наблюдается тенденция использования беспроводных технологии связи, которые используют для передачи данных радиоволны. Существуют проблемы связанные с загруженностью радиочастотных диапазонов и растущим спросом беспроводной связи. Развитие технологий на основе оптической связи смогут разгрузить радиодиапазон и решить часть существующих проблем;

– для внутренней связи с малым радиусом действий перспективной выделена технология передачи данных посредством видимого света. Однако, исследования в основном ведутся в направлении передачи информации между пользователями как дополнение к существующим технологиям для организации локальных сетей. Использование передачи данных по видимому свету в автоматизированных системах управления не освещены в научных публикациях.

– технология VLC использует для передачи данных существующую светодиодную инфраструктуру. Дополнительно к основной функции освещения источники света должны передавать данные. Необходимым является сохранение функциональности освещения без мерцания и изменения цвета из-за модуляции интенсивности оптической мощности светодиода. Двойная функциональность ставит задачи исследования методов модуляции.

2) Проведен теоретический расчет спектральной плотности мощности для импульсных методов модуляции PPM, PAM в частности OOK в оптической системе. Установлено что разновидности схем амплитудной импульсной модуляции могут обеспечивать эффективность использования полосы пропускания в 2 раза больше, а также увеличение энергоэффективности в 2 раза. В результате для реализации задач выбрана модуляция поднесущей со схемой цифровой обработки сигнала OOK.

3) Разработана имитационная модель приемо-передающего устройства по беспроводной оптической сети. Для моделирования схемы передачи беспроводной сети использован блок аддитивного белого гауссовского шума. Блок модулятора построен на схеме модуляции OOK с линейным кодированием NRZ. Получены идентичные формы входного и выходного сигналов с задержкой во времени. Произведен расчет вероятности битовой ошибки от отношения энергии бита к спектральной плотности мощности шума, который составил 10^{-4} на 9,8дБ.

4) Разработаны новые схемотехнические решения передатчика и приемника. Проведена оптимизация параметров приемо-передающих модулей устройства. В результате получена стабильная передача посылки импульсов с идентичными формами отправленного и принятого сигнала, что говорит о надежной и стабильной работе приемо-передающих модулей устройства.

5) Разработано программное обеспечение для микроконтроллеров ATmega328P и ATmega2560 приемо-передающих модулей устройства. Организация физического кодирования информации осуществлялась с использованием интерфейса UART. Установленная экспериментально скорость в 9600 бод позволила модулировать световые импульсы без мерцания, воспринимаемые человеческим глазом.

6) Собрана экспериментальная установка приемо-передающего устройства. При передаче данных осуществляется модуляция и наложение информации на световой поток, излучаемый светодиодом. Получена устойчивая передача данных с помощью белого светодиода мощностью 3 Вт на расстояние 80см. Результаты экспериментальных исследований показали возможность использования разработанного приемо-передающего устройства при построении беспроводных систем управления, работающих по технологии VLC.

7) Предложен подход организации автоматизированной системы управления параметрами жизнеобеспечения в помещении с использованием технологии передачи данных посредством светодиодного освещения. Учитывая однонаправленность технологии VLC при передаче данных, помимо прямых параметров регулирования предложено учитывать влияние косвенных показателей.

8) Собран экспериментальный стенд автоматизированной системы управления температурой в помещении с функцией передачи управляющих сигналов по оптической беспроводной технологии посредством видимого света. Для передачи данных использовался белый светодиод мощностью 3 Вт, который одновременно выполнял функцию освещения. При двойном использовании светодиода качество светового потока не снизилось. Разработанная система управления обеспечивает передачу значений текущей температуры воздуха с точностью до 0,01 градусов, а также поддержание заданного температурного режима в помещении.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Государственная Программа «Цифровой Казахстан». Постановление Правительства Республики Казахстан № 827 от 12.12.2017г. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P1700000827>. 20.02.2022
- 2 «Об утверждении перечня приоритетных видов деятельности в области информационно-коммуникационных технологий и критериев собственного производства». Приказ Министра цифрового развития, оборонной и аэрокосмической промышленности Республики Казахстан № 37/НҚ от 11.04.2019г. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1900018523> 20.02.2022
- 3 Tariq F., Khandaker M.R.A., Wong K.-K., Imran M.A., Bennis M., Debbah M. A Speculative Study on 6G. // IEEE Wireless Communications. – 2020. – Vol. 27(4) – P.118 –125.
- 4 Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2017–2022. White Paper, 2019, P.33
- 5 Мировой опыт и перспективы развития промышленного интернета вещей в России. <https://center2m.ru/> 15.12.2021
- 6 Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016–2021 White Paper, 2017.
- 7 Internet of Things, IoT, M2M world market. <http://tadviser.com/index.php>.
- 8 Frenzel L. Understanding solutions for the crowded electromagnetic frequency spectrum. <https://www.electronicdesign.com>. 15.12.2021
- 9 Swain F. Our hunger for wireless data is threatening to crash our communication networks - but there are ways to avoid disaster. <https://www.bbc.com/future/article>. 15.12.2021
- 10 Cisco Annual Internet Report (2018–2023). White Paper. 2020, P. 35
- 11 Использование волн видимого света для широкополосной связи. Отчет МСЭ-R. Женева, 2019. https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2422-2018-PDF-R.pdf. 15.12.2021
- 12 Teli S.R., Zvanovec S., Ghassemlooy Z. Optical Internet of Things within 5G: Applications and Challenges // IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System. – Bali, Indonesia, 2018.
- 13 Ghassemlooy Z., Zvanovec S., Khalighi A., Popoola O., Perez J. Optical wireless communication systems // Optik. – 2017. – Vol.151. – P. 1-6.
- 14 Chowdhury M., Hossain M., Islam A., Jang Y. A Comparative Survey of Optical Wireless Technologies: Architectures and Applications // IEEE Access. – 2017. – Vol. 6. – P. 9819–9840.
- 15 Karunatilaka D., Zafar F., Kalavally V., Parthiban R. LED based indoor visible light communications: state of the art // IEEE Communication Surveys & Tutorials. – 2015. – Vol. 17, №. 3. – P. 1649–1678.
- 16 Chowdhury M., Shahjalal Md., Hasan M., Jang Y. The role of optical wireless communication technologies in 5G/6G and IoT Solutions: Prospects, Directions, and Challenges // Applied Sciences. – 2019. – Vol. 9(20), №. 4367.

- 17 Alsulami O., Hussein A.T., Alresheedi M.T., Elmirghani J. Optical wireless communication systems, a survey. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1812/1812.11544.pdf>. 15.12.2021
- 18 Организация транспортной сети с использованием системы FSO. <https://studbooks.net/2087949/>. 15.12.2021
- 19 [http://artolink.com/page/products/free space optics](http://artolink.com/page/products/free_space_optics) Artolink 30Gbps/ 15.12.2021
- 20 Kuppusamy P., Muthuraj S., Gopinath S. Survey and challenges of Li-Fi with comparison of Wi-Fi // International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking. – Chennai, India, 2016. – P. 896–899.
- 21 Kaushal H., Kaddoum G. Optical communication in space: Challenges and mitigation techniques // IEEE Commun. Surv. Tutor. – 2016. – Vol. 33(99). – P. 57–96.
- 22 Singh R., Sharma D. Performance Evaluation of Free-Space Optical Communication using Linear Polarization Shift Keying Modulation // International Journal of Enhanced Research in Management & Computer Applications. – 2016. – Vol. 5, Issue 12. – P. 30-35.
- 23 Ghassemlooy Z., Alves N.L., Zvanovec S. and Khalighi A.M. Visible Light Communications: Theory and Applications // CRC Press, 2017.
- 24 H. Haas, J. Elmirghani, I. White. Optical wireless communication // Royal Society. – 2020. – Vol. 378, Issue 2169.
- 25 Karunatilaka D., Zafar F., Kalavally V., Parthiban R. // LED based indoor visible light communications: state of the art, IEEE Communication Surveys & Tutorials. – 2015. – Vol. 17, № 3. –P. 1649-1678.
- 26 Khalid M., Cossu G., Corsini R., Choudhury P., Ciaramella E. 1-Gb/s transmission over a phosphorescent white LED by using rate adaptive discrete multitone modulation // IEEE Photon. J. – 2012. – Vol. 4, № 5. – P. 1465–1473.
- 27 Azhar, Tran T., O'Brien D. A Gigabit/s indoor wireless transmission using MIMO-OFDM visible-light communications // IEEE Photon. Technol. Lett. – 2013. –Vol. 25, № 2. – P. 171–174.
- 28 Ricardo X.G. Ferreira, Enyuan Xie, Jonathan J. D. Mc Kendry, et al. High Bandwidth GaN-Based Micro-LEDs for Multi-Gb/s Visible Light Communications // IEEE Photonics Technology Letters. – 2016. – Vol. 28(19).
- 29 O'Brien D., Rajbhandari S., Chun H. Transmitter and receiver technologies for optical wireless // Royal Society. –2020. – Vol. 378, Issue 2169.
- 30 H. Haas: Wireless data from every light bulb, TED Global, Edinburgh, July 2011.
- 31 Difference between Li-Fi and Wi-Fi. <http://www.rfwireless-world.com/Terminology/LiFi-vs-WiFi.html>.
- 32 Boubezari R., Minh L.H., Ghassemlooy Z. and Bouridane A. Smartphone camera based visible light communication // Journal of Lightwave Technology. – 2016. – Vol. 34, № 17. – P. 4121–4127.
- 33 Saeed N.R, Guo S., Park K.H., Al-Naffouri T.Y., Alouini M.S. Optical Camera Communications: Survey, Use Cases, Challenges, and Future Trends // Physical Communication. – 2019. – Vol. 37.

- 34 Jang M.J. IEEE 802.15 WPAN 15.7 Amendment – Optical camera communications Study Group (SG 7a), 2016.
- 35 Le N., Jang M.J. Performance evaluation of MIMO optical camera communications based rolling shutter image sensor // in Eighth Int'l. Conf. Ubiquitous and Future Networks, Vienna, Austria, 2016.
- 36 Bodrenko A.I. Method of organizing OCC wireless computer network. <http://vixra.org/pdf/1612.0046v1.pdf>.
- 37 Cahyadi A.W., Kim H.Y., Chung H.Y. Mobile phone camera based indoor visible light communications with rotation compensation // IEEE Photonics Journal. – 2016. – vol. 8, № 2, P. 1-8.
- 38 Teli S., Anugrah A.W., Chung H.Y. High-speed optical camera V2V communications using selective capture // Photonic Network Communications. – 2018. – P. 1–7.
- 39 Григорьева С.В., Алимханова А.Ж., Дмитриева Т.С., Елеусизова К.А. Оптический интернет вещей // Вестник ВКТУ. – 2020. – №2(88). – С. 104-108.
- 40 Liu X., Wei X., Guo L., Liu Y., Song Q., Jamalipour A. Turning the Signal Interference into Benefits: Towards Indoor Self-powered Visible Light Communication for IoT Devices in Industrial Radio-hostile Environments // IEEE Access, 2019.
- 41 Sun G., Liu Y., Yang M., Wang A., Liang S., Zhang Y. Coverage optimization of VLC in smart homes based on improved cuckoo search algorithm // Computer Networks. – 2017. – P. 63–78.
- 42 Rithuan M. Indoor Navigation System for Vision Impairment People through Visible Light Communications // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2020.
- 43 Patil D., Shah K., Patadia U., Sheth N., Solanki R., Singh A. Swarm Robots in a Closed Loop Visual Odometry System by Using Visible Light Communication // Advances in Signal Processing and Intelligent Recognition Systems. – 2017. – P. 201–212.
- 44 Ding W., Yang F., Yang H., Wang J., Wang X., Zhang X., Song J. A hybrid power line and visible light communication system for indoor hospital applications // Computers in Industry. – 2015. – P. 170–178.
- 45 Abdaoui R., Zhang X., Xu F. Potentiality of a bi-directional system based on 60GHz and VLC technologies for e-health applications // IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband (ICUWB) – 2016.
- 46 Boubakri W., Abdallah W., Boudriga N. A light-based communication architecture for smart city applications // 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). – 2015.
- 47 Cailean A.-M., Dimian M. Current Challenges for Visible Light Communications Usage in Vehicle Applications: A Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2017. – Vol. 19(4). – P. 2681–2703.
- 48 Masini B.M., Bazzi A., Zanella A. Vehicular Visible Light Networks for Urban Mobile Crowd Sensing // Sensors. – 2018. – Vol. 18(4), 1177.
- 49 Corbellini G., Aksit K., Schmid S., Mangold S., Gross T. Connecting networks of toys and smartphones with visible light communication // IEEE Communications Magazine. – 2014. – 52(7). – P.72–78.

- 50 Rehman S.U., Ullah S., Chong P., Yongchareon S. Visible Light Communication: A System Perspective-Overview and Challenges // *Sensors*. – 2019. – Vol. 19(5), № 1153.
- 51 Matheus L., Vieira A., Luiz F.M., Vieira M., Gnawali O. Visible Light Communication: Concepts, Applications and Challenges // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. – 2019. – Vol. 21, № 4. – P. 3204–3237.
- 52 Kumar S.A., Akash L., Deenadyalan J. Visible Light Communication. *International Journal of Science and Research*, 2018, Vol. 7, № 5, P. 715–720.
- 53 Soh M.Y., Xian Ng.W, Zou Q., Lee D., Teo T.H., Seng Yeo K. Real-Time Audio Transmission Using Visible Light Communication // *TENCON 2018 –2018 IEEE Region 10 Conference, Jeju, Korea*. – 2018. – P. 2223–2226.
- 54 He Y., Ding L., Gong Y., Wang Y. Real-time Audio & Video Transmission System Based on Visible Light Communication // *Optics and Photonics Journal*. – 2013. –Vol. 3. – P. 153–157.
- 55 Grobe L., Paraskevopoulos A., Hilt J., Schulz D., Lassak F., Hartlieb F. High-Speed Visible Light Communication Systems // *IEEE Communications Magazine*. – 2013. – Vol. 51, № 12. – P. 60–66.
- 56 Baklanov A., Grigoryeva S., Alimkhanova A., Grigoryev E., Sayun V. Audio Transmission System Using White LEDs // *2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Tomsk, Russia, 18–20 апреля 2019*.
- 57 Бакланов А.Е., Григорьева С.В., Алимханова А.Ж., Алибеккызы К., Дмитриева Т.С. Организация передачи символьных данных с помощью белых осветительных светодиодов // *Вестник ВКТУ*. – 2020. – №3(89). – С. 65-69.
- 58 Tsonev D., Chun H., Rajbhandari S., McKendry J. J. D., Videv S., Gu E., Haji M., Watson S., Kelly A., Faulkner G., Dawson M. D., Haas H., O'Brien D. A 3-Gb/s single-LED OFDM-based wireless VLC link using a gallium nitride μ LED // *IEEE Photon. Technol. Lett.* – 2014. – Vol. 26, №7. –P. 637–640.
- 59 Raed Mesleh, Hany Elgala, Harald Haas. LED Nonlinearity Mitigation Techniques in Optical Wireless OFDM Communication Systems // *J. Opt. Commun.* – 2012. – №4. – P. 865-875.
- 60 Chvojka P., Zvanovec S., Werfli Kh., Haigh P. A., Ghassemlooy Z. Variable M-Cap for bandlimited Visible Light Communications // *IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops 2017), Paris France, 21-25 May 2017*, P. 1-5.
- 61 Nawawi N.B.M., Anuar M.S., Junita M.N., Abdulla S.R. Performance evaluation of VLC system using new modulation approach // *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. – 2019. – Vol. 8, № 2. – P. 630-636.
- 62 Zeng L., O'Brien D.C., Le-Minh H., Faulkner G.E., Lee K., Jung D., Oh Y., Won E.T. High data rate multiple input multiple output (MIMO) optical wireless communications using white LED lighting // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. – 2009. – Vol. 27. – P. 1654-1662.
- 63 Sridhar Rajagopal, Sang-Kyu Lim et. al. IEEE 802.15.7 VLC Samsung/ETRI, October, 2009 IEEE P802.15-09-0733-00-0007

- 64 Vipul D., Atul K. Performance analysis of L-PPM modulated NLOS-VLC system with perfect and imperfect CSI // *Journal of optics*. – 2020. – №23.
- 65 Parayangat, Ijyas M., Abbas V., Loukil M., Algahtani H., Kessentini A., Wase A., Abdul. A Novel Non-DC Biased Intensity Modulated Indoor MIMO-VLC System Using Walsh Precoder // *Wireless Communications and Mobile Computing*. – 2020. – P. 1-9.
- 66 Vucic J., Kottke C., Nerreter S., Langer K.-D., Walewski J. W. 513Mbit/s visible light communications link based on DMT-modulation of a white LED // *J. Lightw. Technol.* – 2010. – Vol. 28, № 24. – P. 3512–3518.
- 67 Minh H. Le, O'Brien D., Faulkner G., Zeng L., Lee K., Jung D., Oh Y., Won E. 100-Mb/s NRZ visible light communications using a postequalized white LED // *IEEE Photon. Technol. Lett.* – 2009. – Vol. 21, № 15. – P. 1063–1065.
- 68 Григорьева С.В., Алимханова А.Ж., Дмитриева Т.С., Елеусизова К.А. Оптический интернет вещей // *Вестник ВКТУ*. – 2020. – №2(88). – С. 104-108.
- 69 Grigoriev E.A., Baklanov A.E., Grigorieva S.V., Alimkhanova A.Zh., Sayun V.M. A New Approach to Physical Encoding in VLC Data Transmission Technology // *21th International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*. – 2020, Novosibirsk 29.06–03.07.2020.
- 70 Kahn J.M., Barry J.R. Wireless infrared communications, *Proceedings of IEEE*. – 2007. – №85. – P. 265–298.
- 71 Gliese U., Nielsen T.N., Norskov S., Stubkjaer K.E. Multifunctional fiber-optic microwave links based on remote heterodyne detection // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2008. – №46. – P. 458–468.
- 72 Wilson B., Ghassemlooy Z. Pulse time modulation techniques for optical fibre communications", Chapter 3, *Analogue Optical Fibre Communication*, IEE, 2005. – P. 89–117.
- 73 Pozar D.M. *Microwave and RF Wireless Systems*, New Jersey: John Wiley, 2001.
- 74 O'Farrell T., Wong K.K. Complementary sequence inverse keying for indoor wireless infrared channels // *Electronics Letters*. – 2004. – №40. – P. 257–259.
- 75 Wong K.K., O'Farrell T., Kiatweerasakul M. The performance of optical wireless OOK, 2-PPM and spread spectrum under the effects of multipath dispersion and artificial light interference // *International Journal of Communication Systems*. – 2010. – №13. – P. 551–557.
- 76 Wilson B., Ghassemlooy Z. Optical PWM data link for high quality analogue and video signals // *Journal of Physics E: Scientific Instrument*. – 2007. – №18. – P. 841–845.
- 77 Aldibbiat N.M., Ghassemlooy Z., McLaughlin R. Dual header pulse interval modulation for dispersive indoor optical wireless communication systems // *IEE Proceedings-Circuits, Devices and Systems*. – 2012. – №149. – P.187–192.
- 78 Proakis J.G. *Digital Communications*, New York: McGraw-Hill, 2004.
- 79 Couch L.W. *Digital and Analog Communication Systems*, 6th ed New Jersey: Prentice Hall, 2011.

- 80 Zwillinger D. Differential PPM has a higher throughput than PPM for the band-limited and average-power-limited optical channel // *IEEE Transactions on Information Theory*. – 2008. – №34. – P.1269–1273.
- 81 Shiu D., Kahn J.M. Differential pulse position modulation for power-efficient optical communication // *IEEE Transactions on Communication*. – 2009. – №47. – P. 1201–1210.
- 82 Sibley M. J. N. Dicode pulse-position modulation: A novel coding scheme for opticalfibre communications // *IEE Proceedings-Optoelectronics*. – 2013. – №150. – P.125–131.
- 83 Lee G., Schroeder G. Optical pulse position modulation with multiple positions perpulsewidth // *IEEE Transactions on Communications*. – 2007. – №25. – P. 360–364.
- 84 Lueftner T., Kroepl C., Huemer M., Hausner J, Hagelauer R., Weigel R. Edgeposition modulation for high-speed wireless infrared communications // *IEEE Proceedings Optoelectronics*. – 2013. – №150. – P. 427–437.
- 85 Sethakaset U., Gulliver T.A. Differential amplitude pulse-position modulation for indoor wireless optical communications // *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*. – 2015. – P. 3-11.
- 86 Barry J. R. *Wireless Infrared Communications*, Boston: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- 87 Green R. J., Joshi H, Higgins M.D., Leeson M.S. Recent developments in indoor optical wireless systems // *IET Communications*. – 2018. № 2. – P. 3-10.
- 88 Hirt W., Hassner M., Heise N. IrDA-VFIR(16 Mbits/s): Modulation code and system design // *IEEE Personal Communications*. – 2011. –№8. – P. 58–71.
- 89 Béchadergue B. *Visible Light Range-Finding and Communication Using the Automotive LED Lighting*.
- 90 Islim M. S., Haas H., "Modulation techniques for LiFi", *ZTE Commun*, vol. 14, no. 2, P. 29–40, 2016.
- 91 *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*, Geneva, Switzerland: World Meteorological Organisation, 2006.
- 92 Memon A., Umrani A.W., Unar M.A., Shah Wajiha, Chowdhry B.S. Spectral Amplitude Coding Optical CDMA: Performance Analysis on Free Space Optical Channel // *International Journal of Engineering & Technology*. – 2018. – №7. – P. 31–33.
- 93 Greenwood D. P. Bandwidth specification for adaptive optics systems // *Journal of Optical Socety of America*. – 2007. – № 67. – P. 390–393.
- 94 Rajbhandari S., Ghassemlooy Z., Perez J., Minh H. Le, Ijaz M., Leitgeb E., Kandusand G., Kvicera V. On the study of the FSO link performance under controlled turbulence and fog atmospheric conditions // *Proceedings of the 2011 11th International Conference on Telecommunications (ConTEL)*, 2011, P. 223–226.
- 95 Khan M.S., Grabner M., Muhammad S.S., Awan M.S. Empirical Relations for Optical Attenuation Prediction from Liquid Water Content of Fog. // *Radioengineering*. – 2012.
- 96 I D Association, *Serial Infrared Physical Layer Specification*, Version 14, 2001.

97 Grigoryeva S., Baklanov A., Alimkhanova A., Dmitriev A., Györök Gy.. Usage of Light-Emitting Diode Lighting and Visible Light Communication Technology for Temperature Control // Acta Polytechnica Hungarica. Budapest. – 2021. – Vol.18, Issue Number 4. – P.7–24.

98 Бакланов А.Е., Григорьева С.В., Алимханова А.Ж., Дмитриев А.К. Система управления температурой внутри помещения, основанная на технологии связи по видимому свету // Научный вестник НГТУ. – 2020. – №2-3(79). – С.7–24.

99 Grigoryeva S., Alimkhanova A., Batalova M. Research of indoor temperature data transmission using visible light communication technology // Journal of Physics: Conference Serie. 2021. – № 1843.

100 Grigoryeva S., Baklanov A., Alimkhanova A. Organization of an Automated Heat Modes Control System through LED Lighting // 2020 International Scientific Conference “FarEastCon”/ Far Eastern Federal University (FEFU), October 2020.

101 Сайт FLProg. <https://flprog.ru/> 15.12.2021

102 Свод правил СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение».

103 Дмитриев А.К., Бакланов А.Е., Саюн В.М., Бакланова О.Е., Григорьева С.В., Алимханова А.Ж. Система обеспечения равномерного освещения с использованием веб-камеры // Научный вестник НГТУ. – 2019. – № 2(75). – С.7–20.

104 ГОСТР 51317.4.17–2000. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к пульсациям напряжения электропитания постоянного тока. Требования и методы испытаний. 15.12.2021

105 Grigoryeva S., Alimkhanova A., Grigoryev E., Gyorok G. Experimental Setup of Data Transmission via Visible Light in a Temperature Control System // 2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 13–15 May 2021, Kazan, Russia.

106 Grigoryeva S., Alimkhanova A., Grigoryev E., Gyorok G. Integration of the Data Transmission Function into Light-Emitting Diode Lighting Systems // 2021 IEEE Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT), 15–16 May 2021, Yekaterinburg, Russia

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акты внедрения

ISTOCK CHEMI

г. Астана, Абылай Хана 5/3 офис 249
БИН 160140021502
Тел +7 702 282 8817

Акт

Внедрения диссертационной работы Алимхановой А.Ж
«Система автоматизированного управления жизнеобеспечения с
использованием технологии VLC»

Мы, представители ТОО «ISTOCK CHEMI», настоящим актом подтверждаем, что результаты диссертационной работы А.Ж. Алимхановой на тему «Система автоматизированного управления жизнеобеспечения с использованием технологии VLC» внедрены в лабораторий химических исследований ТОО «ISTOCK CHEMI»

Данная технология позволяет предотвратить влияние электромагнитных излучений на электронные приборы и на организм человека, так как построена на передаче данных по светодиодному освещению, тем самым удовлетворяет потребностям данной лаборатории.

В результате полученных экспериментальных данных разработанная в диссертации автоматизированная система управления жизнеобеспечения с передачей данных по видимому свету внедрена в лабораторный комплекс ТОО «ISTOCK CHEMI», для поддержания комфортных условий труда в помещениях лаборатории.

Директор
ТОО «ISTOCK CHEMI»



Мусин А.



Тел: 8 777 021 75 05, 8 705 123 13 02 E-mail: b.f.group@bk.ru

РК, Алматинская обл., Карасайский р-н., г. Каскелен ул. ТӘУЕЛСІЗДІГІНЕ 10 ЖЫЛ (10 лет Независимости РК), дом 48, ТД «Гульбану» офис 2 (второй этаж)

От 30.12.2021 г.

Исх.№2430

Акт

Внедрения диссертационной работы Алимхановой А.Ж

«Система автоматизированного управления жизнеобеспечения с использованием технологии VLC»

Настоящий акт составлен на основании проведенных натурных исследований автоматизированной системы управления жизнеобеспечением с передачей данных по технологии VLC (Visible Light Communication) в лабораторном комплексе ТОО «BFGGroup». Данная технология позволяет предотвратить влияние электромагнитных излучений на электронные приборы и на организм человека, так как построена на передаче данных по светодиодному освещению, чем самым удовлетворяет потребностям данной лаборатории.

В результате полученных экспериментальных данных разработанная в диссертации автоматизированная система управления жизнеобеспечения с передачей данных по видимому свету внедрена в лабораторный комплекс ТОО «BFGGroup», для поддержания комфортных условий труда в помещениях лаборатории.

Директор ТОО «BFGGroup»

Мамонова Ю.В.



БИН 160940012423 РНН 090500247466

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
НЕКОММЕРЧЕСКОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ВОСТОЧНО-КАЗАХСТАНСКИЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени Д. СЕРИКБАЕВА»

 <p>СОГЛАСОВАНО Проректор по научно-инновационной деятельности и цифровизации <u>Денисова Н.Ф.</u> «<u>06.11</u> 20<u>21</u> г.</p>	 <p>УТВЕРЖДАЮ Проректор по академической деятельности <u>Конурбаева Ж.Т.</u> «<u>30.11</u> 20<u>21</u> г.</p>
--	---

АКТ о внедрении научно-исследовательской работы (этапа) в учебный процесс

Комиссия Восточно-Казахстанского технического университета им. Д. Серикбаева в составе: председатель: Конурбаева Ж.Т. - проректор по академической деятельности, члены: декан Школы информационных технологии и интеллектуальных систем Демина И.А., руководитель Образовательной программы Баталова М.Е.

составили настоящий акт о том, что в 2021/2022 учебном году на образовательной программе 5В071900 «Радиотехника, электроника и телекоммуникация» внедрены результаты научно-исследовательской работы ст.преподавателя Алимхановой А.Ж. (уч. степень и звание, должность, Ф.И.О.) на тему: «Система автоматизированного управления жизнеобеспечения с использованием технологии VLC»

№ п/п	Форма внедрения (наименование нового курса, спецкурса, раздела лекций, лаб. Работы, установки, учебные пособия и т. П.); курс, специальность	Объем внедрения (количество работ, лекционных часов)	Краткое содержание внедренной работы
1	Результаты НИР <u>«Система автоматизированного управления жизнеобеспечения с использованием технологии VLC»</u> внедрены в курс <u>«Технология беспроводной связи»</u> (кол-во кредитов) (бакалавриата) <u>4</u> курса по специальности <u>Радиотехника, электроника и телекоммуникация (шифр и название)</u>	Лекции <u>« 2 »</u> – кол-во час. Лабораторная работа <u>« 4 »</u> - кол-во часов	Ознакомление с комплексом приемопередающего устройства по технологии VLC. Изучение OOK-NRZ модулятора по передаче данных по световому потоку с получением вольт-амперных характеристик.

Материалы к настоящему акту рассмотрены на заседании НТС Школы информационных технологии и интеллектуальных систем (протокол № 2 от 19.11 2021 г.)

Члены комиссии:

Декан Школы информационных технологии и интеллектуальных систем

Демина И.А.

Руководитель Образовательной программы 5В071900 «Радиотехника, электроника и телекоммуникация» Баталова М.Е.