

РАЗРАБОТКА АППАРАТНОЙ ПЛАТФОРМЫ МОДЕМА ДЛЯ СИСТЕМЫ СВЯЗИ ВИДИМЫМ СВЕТОМ

А. Н. СОЛОВЬЕВ,

научный сотрудник отраслевой лаборатории
перспективных инфокоммуникационных технологий

С. И. ПОЛОВЕНЯ,

декан факультета электросвязи, к.т.н., доцент

Белорусская государственная академия связи

В статье предложена структурная схема модема системы связи видимым светом. Определены компоненты принципиальной схемы модема системы связи видимым светом, разработана печатная плата, синтезирована трехмерная модель с элементами готового устройства. Представленная принципиальная схема реализована авторами для проведения исследований и изучения параметров систем связи по видимому свету.

Ключевые слова: видимая световая связь (VLC), Li-Fi, оптическая беспроводная связь (OWC), модем, трансимпедансный усилитель (ТИУ), печатная плата.

Источник финансирования: статья написана в рамках выполнения научно-исследовательской работы «Беспроводная система передачи данных для обеспечения безопасной связи устройств «интернета вещей» на основе технологии Li-Fi» задания «Современные беспроводные системы передачи данных» в составе ГПНИ «Цифровые и космические технологии, безопасность человека, общества и государства 1.5.6» подпрограммы 5.1 «Цифровые технологии и космическая информатика» на 2021–2025 годы.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время с развитием технологий связи и информационных систем появляются все более инновационные методы передачи данных, направленные на повышение скорости и эффективности связи [1]. По мере роста объемов передаваемой информации, увеличения числа подключенных устройств и расширения областей применения беспроводных сетей возникает необходимость в разработке новых эффективных решений для удовлетворения растущих потребностей. В этом контексте системы передачи данных на основе видимого света (Visible Light Communication, VLC) [2], относящиеся к системам оптической беспроводной связи (Optical Wireless Communication, OWC) [3], представляют собой перспективную и многообещающую технологию, привлекающую все больше внимания исследователей и специалистов по всему миру. Развитием этих направлений является технология связи по видимому свету (СВС), или Li-Fi (Light Fidelity). Li-Fi представляет собой метод коммуникации, использующий

видимый свет для передачи данных вместо традиционных радиоволн.

Система передачи информации на основе видимого света основывается на использовании светодиодов (light-emitting diode, LED), которые могут мигать на очень высоких частотах, невидимых человеческому глазу, и в то же время быть распознанными и интерпретированными специальными приемниками. **Этот принцип передачи данных имеет несколько преимуществ перед традиционными методами: более высокую скорость передачи данных, высокую информационную безопасность и невосприимчивость к электромагнитным помехам.**

Необходимо создать и провести испытания модема системы передачи информации на основе Li-Fi для оценки его работоспособности при различных условиях эксплуатации. Определение условий функционирования системы Li-Fi и разработка практических рекомендаций по созданию и развертыванию таких систем играют важную роль в переходе к более эффективным и безопасным методам передачи данных.

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ МОДЕМА

Общая структурная схема приема-передающей системы СВС с доступом к интернету представлена на рисунке 1.

Посредством коммутатора система СВС соединена с интернетом. Выбор коммутатора не влияет на дальнейшее преобразование сигнала, поэтому не будем на нем детально останавливаться.

Далее расположен концентратор с максимальной скоростью передачи в 10 Мбит/с. Этот узел размещен с целью унификации применения различных сетевых коммутаторов и ограничения пропускной способности.

Следующие элементы – два одинаковых модема для дуплексной связи посредством видимого света. Один модем подключен к персональному компьютеру (ПК), второй – к концентратору, что обеспечивает полноценный выход ПК в интернет. Именно эти модемы и являются предметом разработки.

Все остальные элементы структурной схемы, кроме модемов, являются серийными устройствами. Структурная схема модема системы СВС представлена на рисунке 2.

Блок согласования интерфейса Ethernet – представляет собой узел, обеспечивающий согласование входных и выходных параметров системы согласно стандарту IEEE802.3i [4].

Блок коррекции уровня модулирующего сигнала – узел необходим для приведения уровня сигнала, поступающего с блока согласования интерфейса Ethernet, к уровню, необходимому для стабильной работы последующих блоков, так как входящий сигнал является слабوتочным и теряет свои модулирующие характеристики при работе с мощными нагрузками.

Модулятор – узел, выполняющий реализацию зависимости интенсивности светового потока излучающего элемента от входного сигнала информационной последовательности, осуществляющий амплитудно-импульсную модуляцию



Рисунок 1. Структурная схема системы связи видимым светом

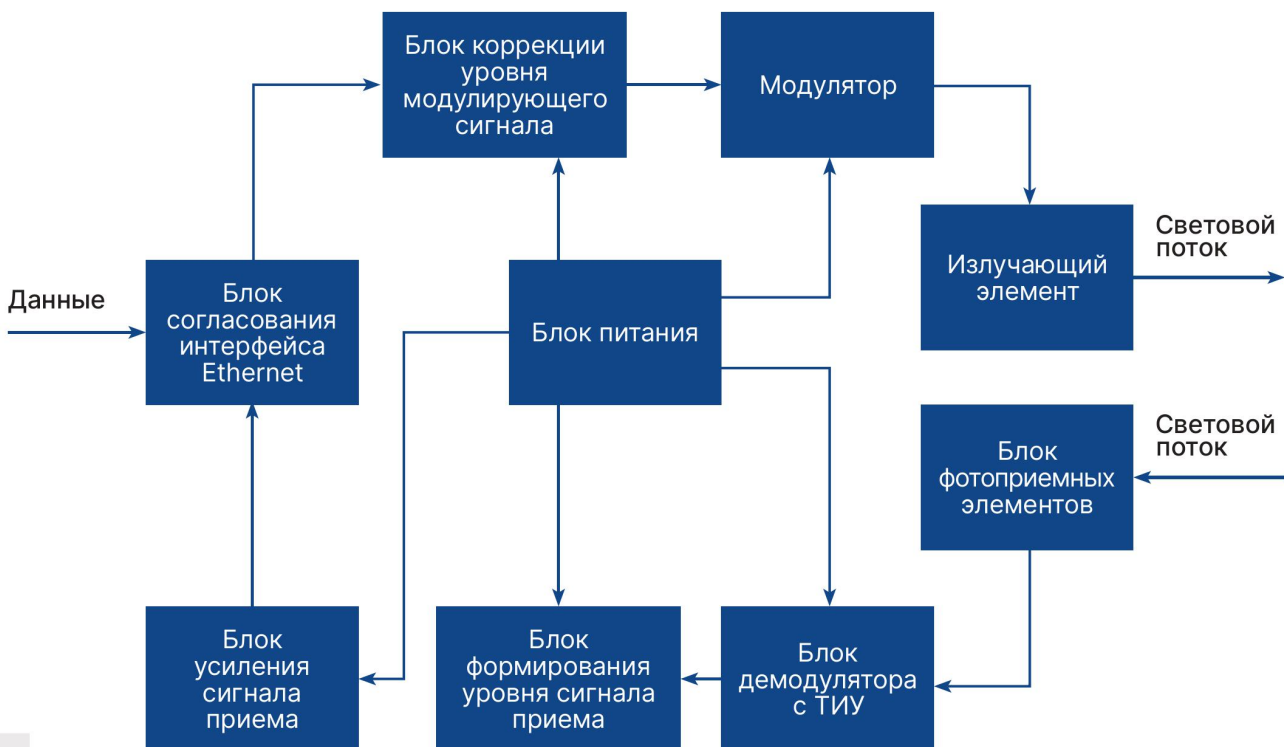


Рисунок 2. Структурная схема двухканальной системы связи по видимому свету

видимого излучения. Основным каскадом блока выступает регулируемый источник тока.

Излучающий элемент – один из ключевых узлов системы, определяющих ее характеристики. Узел преобразует переменный ток, протекающий через элемент, в световой поток. Основные требования, предъявляемые к излучающим элементам – это достаточная мощность излучения, рабочая длина волны, находящаяся в видимом диапазоне и определяемый угол расхождения луча.

Блок фотоприемных элементов – наряду с блоком излучающих элементов также является критическим узлом системы, который определяет ее характеристики. Этот блок преобразует световой поток в переменный ток. Основными параметрами при выборе фотоприемных элементов выступают токовая чувствительность, диапазон спектральной характеристики с максимально достижимым уровнем приема, а также время нарастания и спада.

Блок демодулятора с трансимпедансным усилителем – узел преобразует переменный ток фотоприемного элемента в напряжение. Основным элементом блока выступает трансимпедансный усилитель (ТИУ). Критерии для построения блока – это частотные параметры операционного усилителя (ОУ), определяемые его вольтамперной характеристикой, подходящие для работы с высокой частотой принимаемого сигнала, и низкие собственные шумы.

Блок формирования сигнала приема – узел необходим для приведения уровня сигнала, поступающего с блока демодулятора, к уровню, необходимому для стабильной работы последующих блоков. Представляет собой быстросрабатывающий операционный усилитель, включенный в режиме компаратора, пороговые уровни которого должны четко обеспечивать необходимые логические состояния. Блок должен иметь возможность регулировки опорного напряжения и гистерезиса, что позволит подстраивать режим работы компаратора для исключения ложных срабатываний на шум. Основными характеристиками, влияющими на выбор, являются временные характеристики операционного усилителя.

Блок усиления сигнала приема – узел необходим для приведения уровня сигнала, поступающего с блока формирования уровня сигнала приема, к уровню, необходимому для стабильного взаимодействия с блоком согласования интерфейса Ethernet.

Блок питания – обеспечивает схемы необходимым питанием и защиту от перенапряжения и короткого замыкания. По возможности следует подбирать элементы, работающие от однополярного напряжения питания, из стандартного ряда, крайне желательно питание от напряжения в 5В для возможности подключения к широко распространенному порту USB.

РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ МОДЕМА

После определения необходимых для построения модема системы СВС блоков структурной схемы выбираются комплектующие, которые обеспечат необходимые характеристики и бесперебойный режим работы устройства.

В качестве блока согласования интерфейса Ethernet в соответствии со стандартом IEEE802.3i была выбрана розетка 8P8C (RJ45) со светодиодами и встроенными трансформаторами с монтажом на плату KLS12-TL002-1x1-G/G-1-03 с обвязкой пассивными элементами поверхностного монтажа согласно рекомендациям производителя.

Блок коррекции уровня модулирующего сигнала требует особого подхода, так как поступающий сигнал для передачи является дифференциальным. Имеет смысл использовать в качестве блока коррекции уровня модулирующего сигнала операционный усилитель с дифференциальным входом и выходом и настраиваемой амплитудой выходного сигнала. В качестве подходящего по всем критериям элемента наиболее доступным является AD8131ARZ-REEL7 – экономичный, высокоскоростной, дифференциальный драйвер, обеспечивающий работу на частотах до 400 МГц. Производитель определяет статус продукта как «в производстве» (подходит для новых разработок, но могут существовать и более новые альтернативы) [5].

Ток опорного источника предлагается ограничить 100 мА ввиду достаточности для лабораторных исследований и безопасности мощности излучения. MC33178DR2G – высококачественный, недорогой операционный усилитель, подходящий под критерии. Он обеспечит питающее напряжение и ток для излучающего элемента.

Излучающий элемент – один из ключевых узлов системы, определяющих ее характеристики. Как было сказано ранее, в модеме применим лазерный диод ADL-63301TL, который работает в видимом диапазоне 630–640 нм и излучает 30 мВт, что при среднем КПД лазерных диодов 30 % означает потребление около 100 мА.

Блок фотоприемных элементов – в качестве фотоприемного элемента применим ФД-263. Этот фотодиод предназначен для работы в качестве приемника и датчика излучения в составе оптоэлектронной аппаратуры. ФД-263 очень хорошо зарекомендовал себя на предыдущем этапе разработки, и его характеристики подходят по всем параметрам.

Блок демодулятора с ТИУ – для того, чтобы не упустить малейшие изменения светового потока, в качестве ТИУ был выбран ОУ ОРА6951DBVR. Этот ОУ работает на частоте до 1,7 ГГц и выполнен по схеме с токовой обратной связью, а в качестве предварительного усилителя токового сигнала применим высокочастотный полевой транзистор BF862.

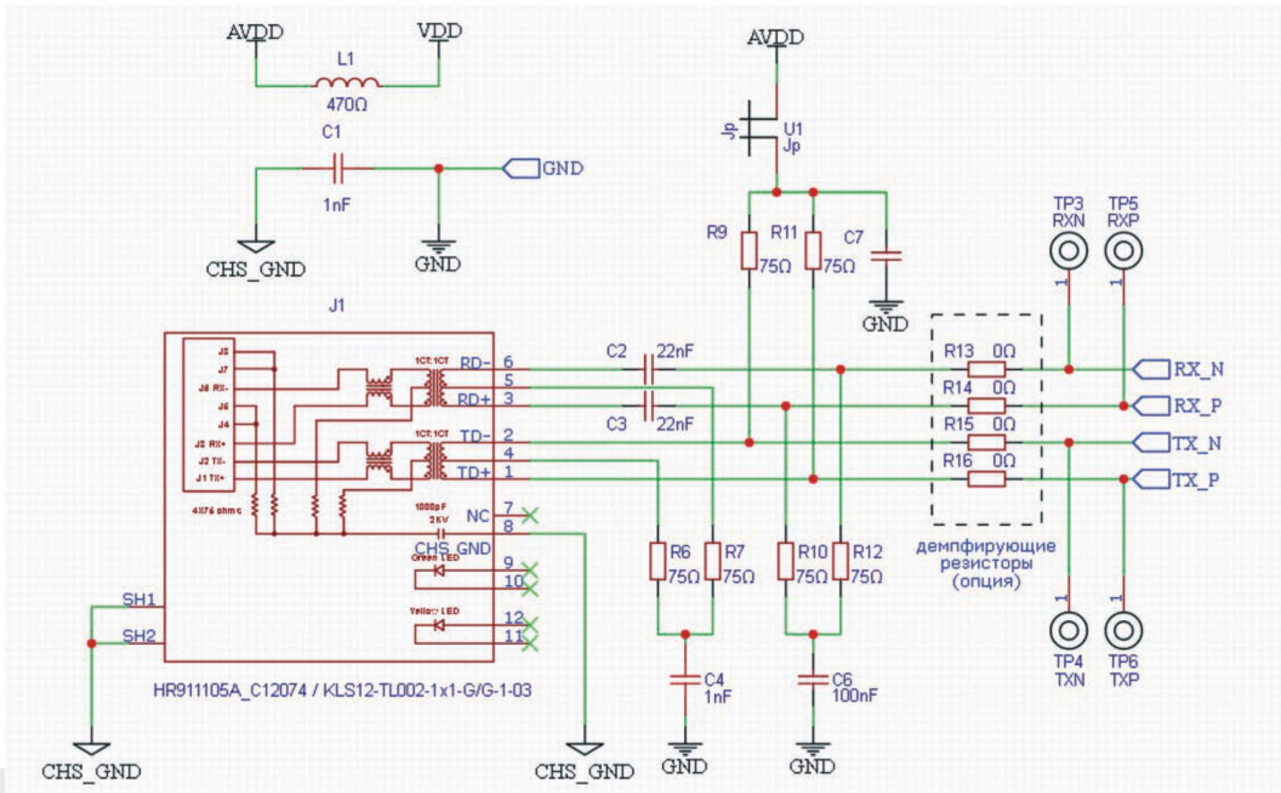


Рисунок 3. Принципиальная схема блока согласования интерфейса модема CVC

Блок формирования сигнала приема – для получения демодулированного информационного сигнала из принятого светового потока применен быстродействующий прецизионный компаратор MAX913ESA+.

Блок усиления сигнала приема – для усиления полученного с компаратора сигнала добавлен выходной усилительный каскад, построенный на ОУ AD8042ARZ. Этот операционный усилитель с размахом выходного сигнала, равным напряжению питания, имеет полосу пропускания в 160 МГц.

В качестве блока питания используется любой подходящий промышленный блок питания либо выходное питание разъема USB ПК и коммутатора ввиду небольшого тока потребления схемы модема.

Принципиальная схема блока согласования интерфейса модема CVC представлена рисунке 3.

Принципиальная схема блока коррекции уровня модулирующего сигнала и модулятора модема CVC представлена рисунке 4.

Принципиальная схема блока демодулятора с формирователем и усилителем принятого сигнала модема CVC представлена рисунке 5.

Для питания схемы используется источник с напряжением 5В постоянного тока. Питание осуществляется через разъем DC1, питающее напряжение с которого поступает на разъем CN2, который коммутирует питание посредством подключенного к нему внешнего переключателя.

После внешнего переключателя, который позволяет включать и выключать устройство, установлен предохранитель F1, который в паре с супрессором D1 обеспечивают защиту схемы от перенапряжения и короткого замыкания.

Для ввода и вывода информационного сигнала служит разъем J1, который для защиты от электростатического напряжения и повышения защиты от помех на линии должен быть исполнен со встроенными трансформаторами, и корпус разъема должен быть развязан с общим проводом модема. Для контроля входящего и исходящего дифференциальных сигналов предназначены контрольные точки TP3–TP6.

Для передачи информации модулируется интенсивность светового потока излучающего элемента (лазерного светодиода, светодиода), подключенного к разъему CN3 информационным сигналом. Для обеспечения необходимого режима работы используется микросхема операционного усилителя U6, включенного по схеме интегрирующего усилителя с ООС. Основной функцией этого узла является обеспечение оптимального режима питания излучающего элемента, очищенного от помех. С помощью резистивного делителя R22, R23 подбирается минимальное опорное напряжение начала излучения светодиода (лазерного диода), которое контролируется в точке TP11. Оно должно совпадать с напряжением TP16. Резисторы

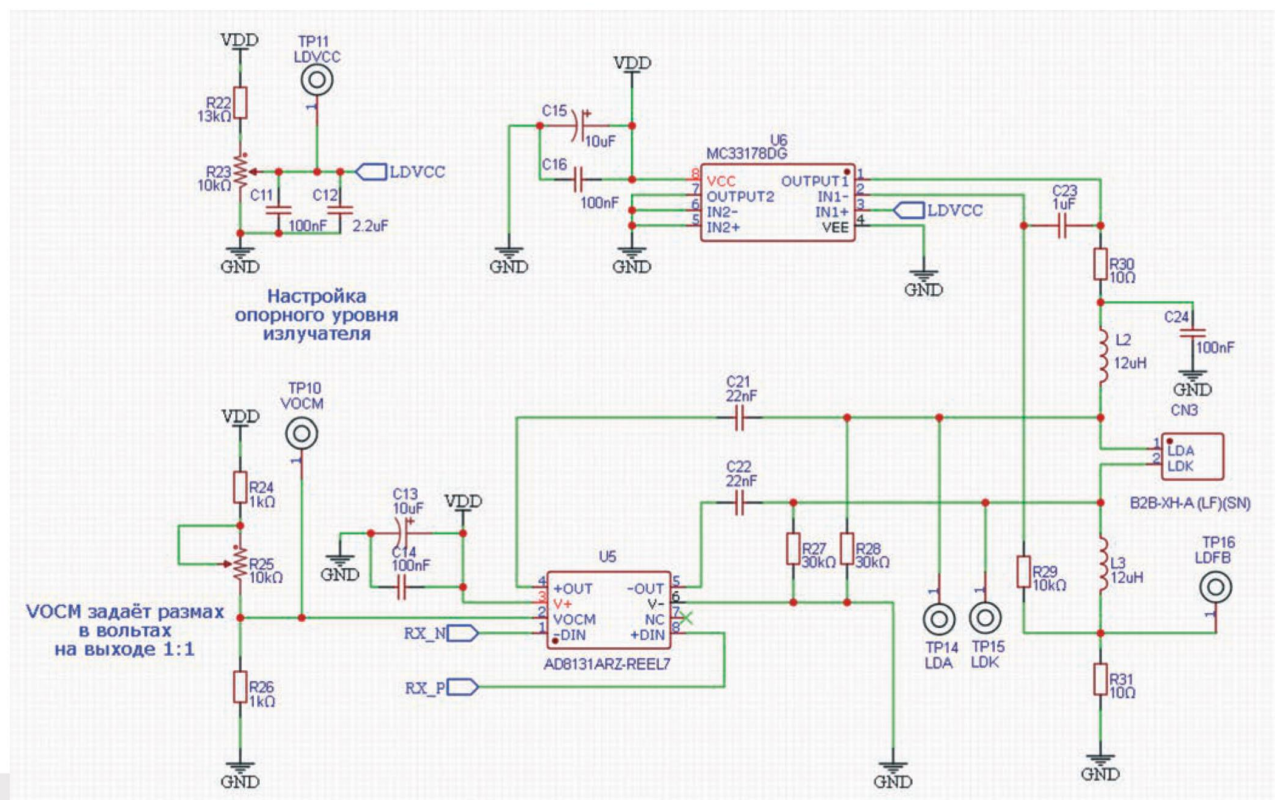


Рисунок 4. Принципиальная схема блока коррекции уровня модулирующего сигнала и модулятора модема CBC

R30 и R31 являются токоограничительными и служат для предотвращения повреждения излучающего элемента. Катушки L2, L3 фильтруют постоянную составляющую опорного напряжения от высокочастотных помех, ту же функцию выполняют фильтрующие конденсаторы C15 и C16, включенные по цепи питания микросхемы U6.

Дифференциальные сигналы RX_P, RX_N представляют собой сигналы, полученные от источника данных. Они поступают на микросхему U5, которая является высокоскоростным операционным усилителем с дифференциальным входом и выходом и служит для усиления информационного сигнала, полученного с разъема Ethernet. Информационный сигнал является слабوتочным и способен модулировать только маломощные источники излучения. Для этого и применен дифференциальный усилитель, который формирует модулирующее напряжение вольтодобавки к опорному напряжению, сформированному предыдущим ОУ U6. Важным элементом настройки для микросхемы является делитель, построенный на резисторах R24 – R26. Напряжение, поступающее на 2-й вывод микросхемы U5, напрямую влияет на размах амплитуды выходного сигнала. Таким образом, с помощью данного узла можно изменять напряжение вольтодобавки в пределах

0,4 – 2,5 В, подстраивая схему под характеристики излучающего элемента. Для контроля, задающего амплитуду напряжения, выведена контрольная точка TP10. После формирования дифференциального напряжения вольтодобавки оно очищается от постоянной составляющей разделительными конденсаторами C21 и C22 и начинает модулировать напряжение на светодиоде в соответствии с входными сигналами. Для контроля модулирующего напряжения на схеме предусмотрены контрольные точки TP14, TP15.

Приемная сторона модема системы CBC работает следующим образом – модулированный световой поток поступает на фотодиод (ФД), который подключается на 1 и 3-й контакты разъема CN1. Модулированный световой поток преобразуется в токовый сигнал. На ФД подается рабочее напряжение питания через токоограничительный резистор R1, который служит для защиты ФД от протекания тока короткого замыкания (КЗ) при возникновении эффекта пробоя ФД при очень интенсивном излучении передатчика.

Для обработки модулированного токового сигнала собран узел трансимпедансного усилителя на транзисторе Q1 и ОУ U2. Транзистор позволяет усилить слаботочный сигнал ФД по току, а ОУ – по напряжению. Необходимый уровень усиления задается с помощью резистора R17.

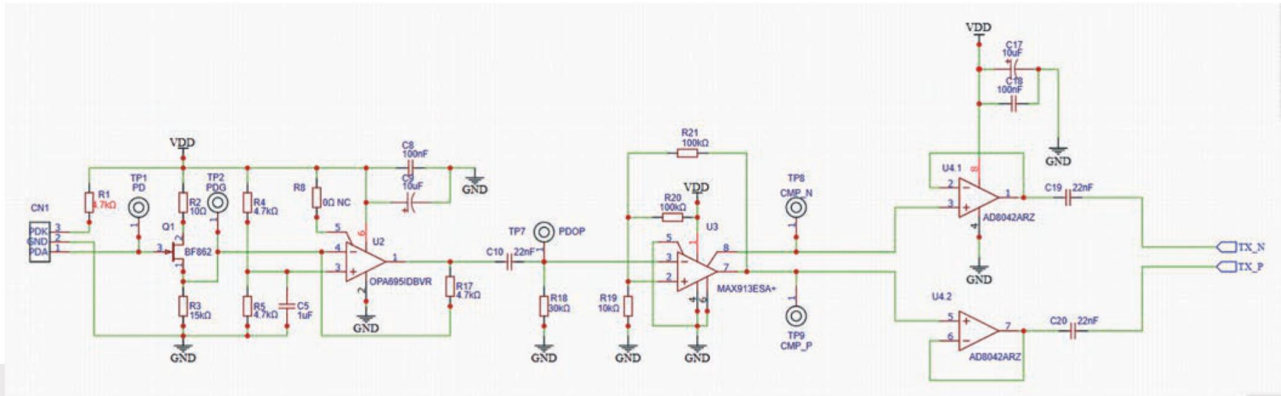


Рисунок 5. Принципиальная схема блока демодулятора с формирователем и усилителем принятого сигнала модема CBC

Для формирования полного сигнала на ОУ сформирована искусственная средняя точка на резистивном делителе R4, R5 с добавлением конденсатора C5 для уменьшения возможных пульсаций. Конденсаторы C8, C9 служат для фильтрации питания ОУ U2.

Усиленный сигнал через разделительный конденсатор C10 поступает на инвертирующий вход быстродействующего компаратора U3. Для контроля усиленного сигнала служит точка TP7. Компаратор включен по схеме, позволяющей ввести гистерезис. Это необходимо для точной настройки режима работы ввиду разброса характеристик входного сигнала. Режим работы компаратора с гистерезисом задается с помощью резисторов R19 – R21. Резисторы рассчитываются исходя из характеристик примененного ФД. Компаратор имеет дифференциальный выход, и информационный сигнал можно контролировать на точках TP8, TP9.

Микросхема U4 – сдвоенный операционный усилитель, служит для усиления дифференциального информационного сигнала по току. Сигнал с выхода U4 через разделительные конденсаторы C19, C20 поступает на контакты разъема TX_P, TX_N и после встроенных в разъем трансформаторов поступает в сеть Ethernet, обеспечивая таким образом передачу потребителю информации, принятой по световому каналу от источника.

На рисунке 6 представлена трехмерная модель готового устройства.

Разработанная аппаратная часть **обеспечивает эффективную передачу данных через связь видимым светом, что открывает новые перспективы для современных коммуникационных технологий.** В дальнейшем развитии проекта следует уделить внимание оптимизации и расширению функциональных возможностей модема системы CBC для повышения его производительности.

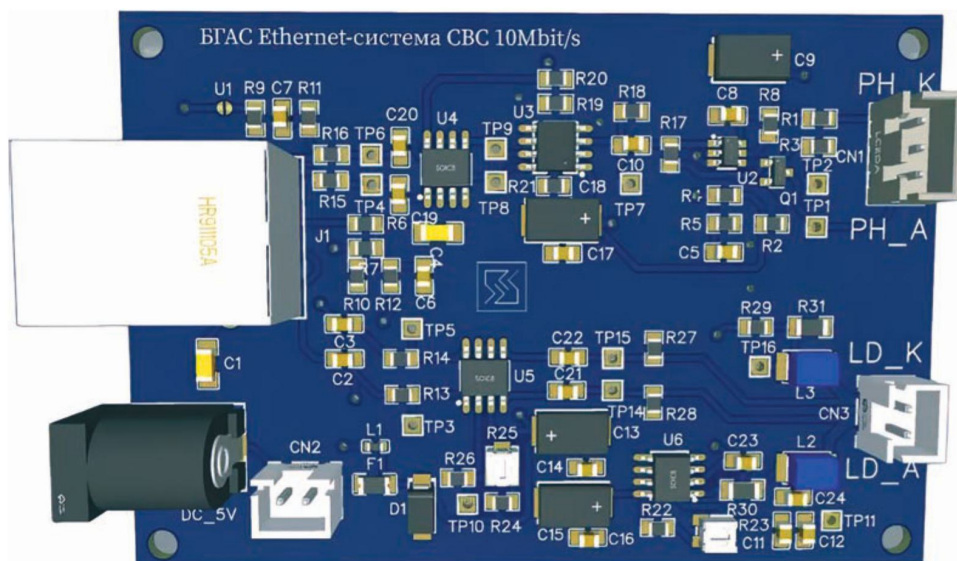


Рисунок 6. Трехмерная модель печатной платы с элементами системы CBC

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлена разработка аппаратной части модема для системы связи видимым светом, ориентированная на аналоговую реализацию без использования микроконтроллеров. Основное внимание уделено проектированию ключевых компонентов системы, включая диодный передатчик с эффективным драйвером, высокочувствительный фотоприемник на базе PIN-диода, трансимпедансный усилитель и схемы аналоговой модуляции сигналов. Особенностью предложенного решения является тщательная оптимизация аналогового тракта, обеспечивающая устойчивую работу системы в условиях

переменного внешнего освещения и электромагнитных помех.

Полученные результаты открывают перспективы для создания энергоэффективных систем оптической беспроводной связи, которые могут найти применение в условиях, где использование традиционных радиочастотных технологий ограничено или нежелательно. Дальнейшее развитие работы видится в совершенствовании аналоговых узлов для поддержки более сложных видов модуляции, а также в интеграции предложенных решений с цифровыми системами обработки сигналов для повышения общей производительности системы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Соловьев, А. Н. Структурный синтез систем передачи информации видимым светом / А. Н. Соловьев, С. И. Половня, А. Ф. Корнеева // *Вестник связи*. – 2023. – № 5. – С. 50–55.
2. Mukherjee, Mrinmoyee. (2017). Visible Light Communication-A Survey of Potential Research Challenges and Advancements. 10.1109/ICECCT.2017.8117843.
3. Ghassemloo, Z., Popoola, W., & Rajbhandari, S. (2017). Optical wireless communications: System and channel modelling with MATLAB. In *Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB* (pp. 1–514). CRC Press. – URL: <https://doi.org/10.1201/b12687> (дата обращения: 22.05.2025).
4. Официальный сайт стандартов IEEE. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/802.3i/1068/> (дата обращения: 27.05.2025).
5. Официальный сайт производителя Analog Devices. – URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8131.pdf> (дата обращения: 02.05.2025).

A block diagram of a visible light communication modem has been proposed. The components of the modem's circuit schematic have been defined, a printed circuit board has been developed, and a three-dimensional model incorporating elements of the finished device has been synthesized. The presented circuit design has been physically implemented by the authors to conduct research and study the parameters of visible light communication systems.

Keywords: visible light communication (VLC), Li-Fi, optical wireless communication (OWC), modem, transimpedance amplifier (TIA), printed circuit board.

Статья поступила в редакцию 24.07.2025.