

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВЛАДИВОСТОКСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «ВВГУ»)
ИНСТИТУТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И АНАЛИЗА ДАННЫХ
КАФЕДРА ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И СИСТЕМ

ОТЧЁТ
ПО УЧЕБНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ
(ПРОЕКТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ)
ПРАКТИКЕ
ИАПУ ДВО РАН, г. Владивосток

Студент
гр. БИК-23-ИБ1 _____ И.Е. Елисеева

Руководитель
к.ф.-м.н., доцент каф. ИТС _____ И.А. Белоус

Владивосток 2026

Содержание

Введение	3
1 Характеристика деятельности ИАПУ ДВО РАН	4
1.1 Общие сведения о предприятии.....	4
1.2 Организационная структура предприятия.....	5
1.3 Техническое оборудование.....	6
2 Обоснование выбора темы индивидуального задания	8
3 Проведение сбора, обработки и анализа информации.....	13
3.1 Концепция измерительной системы.....	13
3.2 Назначение и принцип работы ФПУ	14
4 Выполнение проектно-конструкторских работ.....	19
4.1 Элементная база ФПУ	19
4.2 Расчет параметров электрической цепи ФПУ	20
4.3 Схемотехническое моделирование ФПУ	23
4.4 Компоновка и трассировка печатной платы	26
5 Выполнение производственно-технологических работ.....	29
5.1 Выбор технологии и этапы изготовления ПП.....	29
5.2 Сборка платы и монтаж компонентов	35
5.3 Испытания блока ФПУ	38
Заключение.....	42
Список использованных источников	43

Введение

Целью учебной технологической (проектно-технологической) практики является закрепление знаний и умений, полученных в процессе теоретического обучения, приобретение студентами опыта в решении реальных профессиональных задач и исследовании актуальных научных проблем, связанных с темой будущей квалификационной работы бакалавра.

Для успешного выполнения работ на практике необходимо решить следующие поставленные задачи:

- выбор и согласование темы индивидуального задания;
- сбор, обработка и анализ нормативной, технической и научной информации с использованием современных информационных технологий;
- выполнение проектно-конструкторских и производственно-технологических работ;
- приобретение практических навыков работы с соответствующими программными и аппаратными средствами.

Место прохождения практики – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (ФГБУН ИАПУ ДВО РАН). Руководитель организации – Ромашко Р. В. Руководитель практики от предприятия – к.ф.-м.н. с.н.с лаборатории 22 Попик А.Ю.

1 Характеристика деятельности ИАПУ ДВО РАН

1.1 Общие сведения о предприятии

Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИАПУ ДВО РАН) является одним из ведущих научно-исследовательских учреждений Дальнего Востока России [1].

Основными направлениями деятельности ИАПУ являются проведение фундаментальных и прикладных исследований в области автоматизации, информационных технологий, искусственного интеллекта, робототехники, телекоммуникационных систем и математического моделирования.

Благодаря системе грантовой поддержки в ИАПУ сформирована благоприятная среда для научно-исследовательской деятельности, охватывающая как студентов и сотрудников, так и проведение сложных экспериментальных работ с разработкой инженерных решений. Результативность этой работы подтверждается ежегодным конкурсом научных проектов среди молодых ученых и аспирантов, а также регулярным освещением в СМИ итогов фундаментальных и прикладных исследований структурных подразделений ИАПУ [1].

Работа на практике велась в Отделе оптоэлектронных методов исследования газообразных и конденсированных сред в Лаборатории физических методов мониторинга природных и техногенных объектов (№22). Заведующий лабораторией – доктор физико-математических наук Вознесенский Сергей Серафимович. В составе лаборатории числится 8 сотрудников, из которых 1 доктор наук и 2 кандидата наук.

Направления научных исследований лаборатории: нано- и микроструктурированные природные и синтетические системы как основа оптических хемосенсоров и устройств оптической обработки информации; системы мониторинга состояния океанических вод на основе анализа индуцированной и естественной биолюминесценции водных микроорганизмов, как природных индикаторов; системы экспресс-анализа состояния водных микроорганизмов, содержания тяжелых металлов, растворенных газов и химических соединений в водных средах.

В период прохождения практики деятельность была связана с выполнением научно-исследовательских и проектно-технологических работ, изучением современных методов обработки информации, использованием специализированного программного обеспечения и технических средств, а также приобретением практических навыков решения прикладных задач в области информационных технологий.

1.2 Организационная структура предприятия

Организационная структура ИАПУ ДВО РАН построена по функциональному принципу и включает шесть структурных подразделений (рисунок 1).

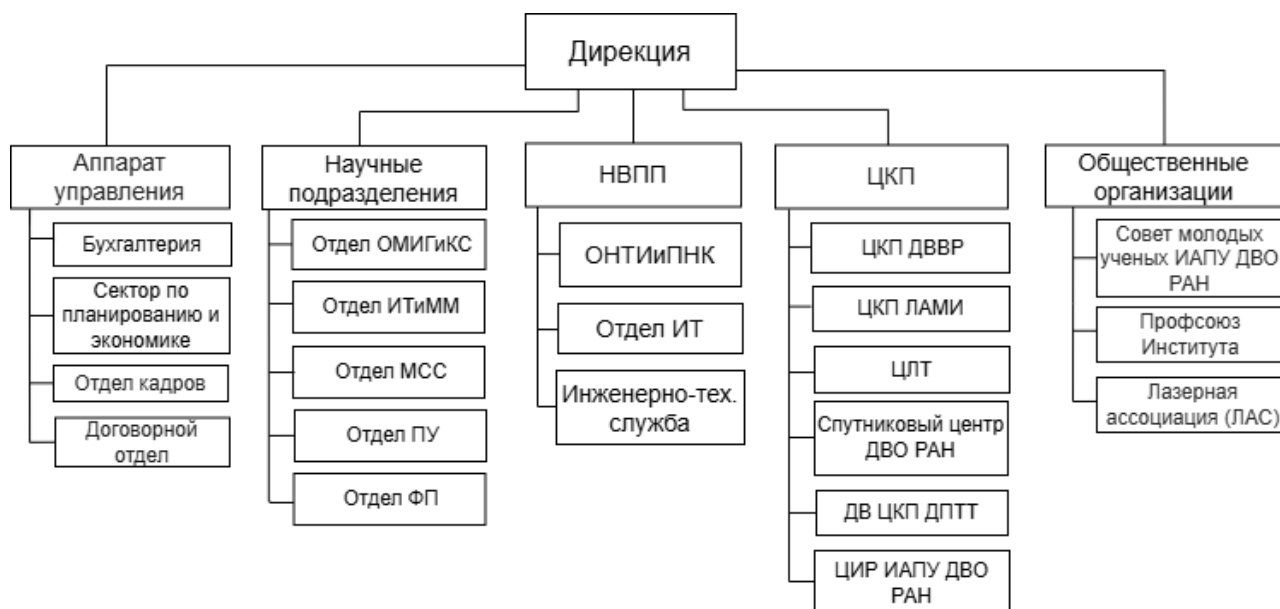


Рисунок 1 – Организационная структура ИАПУ ДВО РАН

Главным подразделением в структурной иерархии является дирекция ИАПУ. В перечень ее основных функций входит: определение перспективных направлений научно-исследовательской и научно-организационной работы ИАПУ, помощь структурным подразделениям в их реализации; планирование научной, научно-организационной, публикационной деятельности; организация и координация отчетности, координация и контроль деятельности структурных подразделений/сотрудников ИАПУ.

Дирекции подчиняются следующие структурные подразделения:

1. Аппарат управления, состоящий из бухгалтерии, сектора по планированию и экономике, отдела кадров и договорного отдела. Данное подразделение координирует работу всей организации, отвечает за распределение ресурсов и контроль результатов.

2. Научные подразделения, состоящие из основных отделов. Их главная цель – проводить исследования и создавать новые технологии. В ИАПУ на сегодня существует пять таких отделов: Отдел оптоэлектронных методов исследования газообразных и конденсированных сред (ОМИГиКС), Отдел информационных технологий и математического моделирования (ИТиММ), Отдел механики сплошных сред (МСС), Отдел проблем управления (ПУ), Отдел физики поверхности (ФП) (рисунок 1).

3. Центры коллективного пользования, которые созданы специально для совместного доступа к дорогостоящему оборудованию. Они позволяют нескольким сотрудникам или разным компаниям проводить исследования и решать производственные задачи без покупки собственных дорогих приборов. ИАПУ имеет в доступе следующие ЦКП: Центр коллективного пользования уникальным аналитическим оборудованием ДВО РАН «Дальневосточный вычислительный ресурс» (ЦКП ДВВР), Центр «Лазерные методы исследования конденсированных сред, биологических объектов и мониторинга окружающей среды» (ЦКП ЛАМИ), Центр лазерных технологий ИАПУ ДВО РАН (ЦЛТ), ЦКП Регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН (Спутниковый центр ДВО РАН), Центр коллективного пользования уникальным аналитическим оборудованием «Дальневосточный центр диагностики поверхности твердых тел» (ДВ ЦКП ДПТТ), Центр инженерных разработок (ЦИР) ИАПУ ДВО РАН.

4. Научно-вспомогательные и производственные подразделения, включающие в себя: Отдел научно-технической информации и подготовки научных кадров (ОНТИиПНК), Отдел информационных технологий (ИТ), а также Инженерно-техническую службу. Это особое структурное звено, которое обеспечивает основную научную деятельность ИАПУ, но само непосредственно фундаментальными исследованиями не занимается. Основная задача данных подразделений – создание условия для работы ученых (рисунок 1).

5. Общественные организации, добровольно созданные сотрудниками ИАПУ в целях защиты их общих интересов. В них входит: Первичная профсоюзная организация ИАПУ ДВО РАН, Совет молодых ученых ИАПУ ДВО РАН и Лазерная ассоциация (ЛАС). Главная цель таких объединений – помогать людям, а также решать социальные, творческие или профессиональные задачи.

1.3 Техническое оборудование

Лаборатория физических методов мониторинга природных и техногенных объектов (№22) оснащена комплексами современного оборудования, позволяющими проводить научные исследования и эксперименты, а также анализировать и хранить полученные результаты.

Данные комплексы включают в себя:

1. Исследовательское и аналитическое оборудование, куда входит: вольтметр универсальный АКИП (рисунок 2а), сканирующий электронный микроскоп (рисунок 2б), рентгеновская система малоуглового и широкоуглового рассеяния, лазерный аналитический комплекс для спектральных исследований конденсированных сред и биологических объектов,

приборный комплекс для исследования объектов методом полного внутреннего отражения, комплекс регистрации и обработки слабых оптических сигналов, промышленный робот, установка для подготовки образцов с системами глубокого охлаждения и намагничивания, флуориметр, УФ-ИК спектрофотометр и др.



Рисунок 2 – Оборудование лаборатории №22:

а – вольтметр универсальный; б – сканирующий электронный микроскоп; в – оптические компоненты

2. Инженерное и технологическое оборудование – источники света (лазеры, светодиоды, лампы), оптические компоненты (линзы и зеркала, светофильтры, поляризаторы, дифракционные решетки) (рисунок 2в), радиокомпоненты и микроконтроллеры для сборки электрических схем, материалы для изготовления печатных плат.

3. Вычислительное оборудование и программное обеспечение включает в себя персональные компьютеры с установленными программами общего и специального назначения (включая CAD/CAE-системы для 3D-моделирования), а также доступ к научной базе данных Web of Science (WoS).

2 Обоснование выбора темы индивидуального задания

В настоящее время перед экологами встает множество задач, связанных с мониторингом водных объектов с целью поддержания экологического состояния и сохранения биоразнообразия. Основой пищевой цепочки в водных экосистемах является фитопланктон (или микроводоросли) – совокупность организмов, выполняющих роль первичного продуцента, т.е. создает органическое вещество из неорганического, используя энергию солнца. Эти организмы являются пищей для зоопланктона, а он, в свою очередь, является пищей для рыб. Вместе с тем массовое размножении некоторых видов микроводорослей и цианобактерий приводит к «цветению» водоемов, сопровождающемуся ухудшением качества воды и выделением токсичных веществ [2]. В связи с этим возникает необходимость своевременного контроля количественного содержания фитопланктона, позволяющего выявлять начальные стадии «цветения» водоемов, оценивать состояние водных экосистем и предотвращать развитие неблагоприятных экологических последствий.

Методы количественного исследования фитопланктона делятся на прямые (классические), позволяющие подсчитать число и биомассу конкретных видов водорослей, и косвенные (экспресс-методы), оценивающие общее обилие фитопланктона по содержанию хлорофилла (зеленого пигмента) и интенсивности флуоресценции.

Прямые методы позволяют определить видовой состав, численность (количество клеток в 1 литре) и биомассу водорослей. К прямым методам относятся седиментационный метод, метод мембранной фильтрации и методы с использованием счетных камер (Утермеля, Бюркера и др.). Все они основаны на непосредственном выделении, микроскопической идентификации и подсчете клеток водорослей [3]. Отличия между методами заключаются преимущественно в способе подготовки пробы: концентрировании осадением, фильтрацией или исследовании фиксированного объема в счетной камере. Прямые методы позволяют определить видовой состав, численность и биомассу фитопланктона и являются наиболее информативными, однако отличаются высокой трудоемкостью и длительностью выполнения анализа.

Косвенные (экспресс-) методы применяются для оперативной оценки биомассы фитопланктона и его пространственного распределения [4]. В отличие от прямых методов, они не позволяют определить видовой состав организмов, однако характеризуются высокой скоростью измерений и возможностью проведения мониторинга в режиме реального времени. К экспресс-методам относятся флуориметрический, спектрофотометрический и цитометрический анализы.

Флуориметрический метод основан на регистрации флуоресценции хлорофилла, позволяя быстро оценить коэффициент поглощения хлорофилла, а, соответственно, и концентрацию фитопланктона в исследуемой среде без длительной пробоподготовки. Полученные результаты служат основой для оценки физиологического состояния фотосинтезирующих организмов и экологического состояния водной среды. Благодаря высокой чувствительности, возможности непрерывных измерений и простоте автоматизации данный метод получил широкое распространение в системах экологического мониторинга [4]. Спектрофотометрический анализ основан на определении концентрации хлорофилла *a* после его экстракции из пробы воды, а проточная цитометрия обеспечивает высокоскоростной анализ отдельных клеток, позволяя одновременно оценивать их размеры и пигментный состав

Отдельную группу составляют спутниковые методы (дистанционное зондирование), основанные на анализе спектральных характеристик отраженного излучения водной поверхности. По данным космических спектрометров оцениваются концентрация хлорофилла и интенсивность цветения воды, что позволяет контролировать пространственное распределение фитопланктона и отслеживать сезонные изменения его биомассы на крупных акваториях. Основным преимуществом спутниковых методов является возможность мониторинга обширных территорий, однако они позволяют оценивать лишь поверхностный слой водоема и требуют последующей верификации контактными измерениями [5].

По итогам обзора существующих методов исследования фитопланктона наиболее информативным при исследовании фитопланктона является флуориметрический метод. Общий принцип определения показателей пробы с помощью данного метода заключается в измерении отклика детектора при заданной длине волны и интенсивности возбуждающего излучения (рисунок 3).

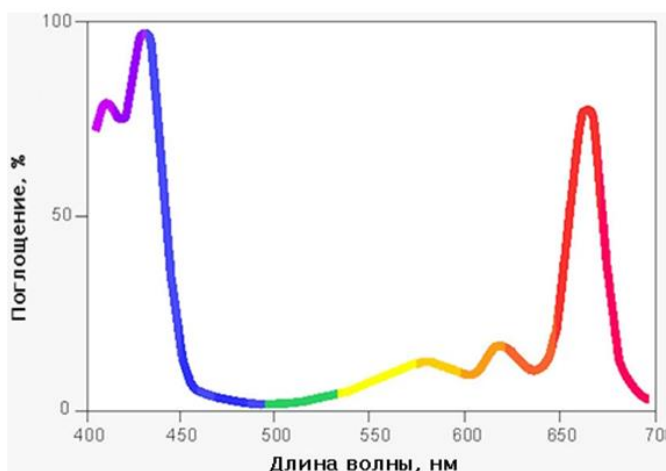


Рисунок 3 – Спектры поглощения и флуоресценции хлорофилла

Флуоресценция – это процесс испускания света возбужденной молекулой хлорофилла. При комнатной температуре и в темноте молекула хлорофилла находится в основном состоянии, т.е. энергия ее соответствует нижнему синглетному уровню (S_0). Поглощение кванта света сопровождается переходом одного из p -электронов на более высокий энергетический уровень. В результате возникает синглетное электронно-возбужденное состояние молекулы. Синглетным называется такое возбужденное состояние, при котором переход электрона на более высокий энергетический уровень не сопровождается изменением знака спина. Если при этом поглощается квант красного света, то электрон переходит на первый синглетный уровень (S_1) с временем жизни 10^{-8} - 10^{-9} с. В случае захвата кванта синего света электрон оказывается на втором синглетном уровне (S_2), а время жизни такого состояния уменьшается до 10^{-12} - 10^{-13} с (рисунок 3). Однако независимо от того, в какое электронно-возбужденное состояние молекула была переведена поглощенным квантом, она, в конечном счете, переходит на низший колебательный подуровень первого синглетного возбужденного состояния (S_1) [6]. Энергия этого состояния может использоваться на осуществление фотохимических процессов, мигрировать от одной молекулы хлорофилла к другой, растрачиваться в виде тепла или флуоресцентного излучения (рисунок 4).

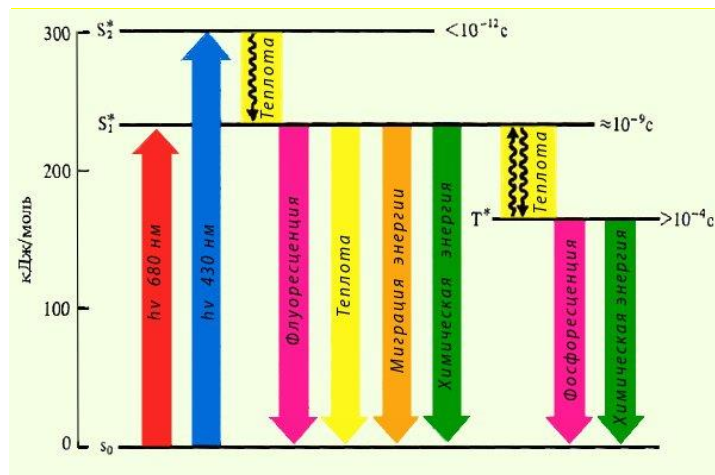


Рисунок 4 – Энергетические состояния молекулы хлорофилла

Таким образом, независимо от длины волны возбуждающего света хлорофилл флуоресцирует только в красной части спектра. Уменьшение энергии кванта, излученного возбужденной молекулой, по сравнению с энергией поглощенного кванта получило название стоксовым сдвигом.

Хлорофилл-*a* является основным светопоглощающим пигментом фитопланктона, который определяет интенсивность флуоресценции и степень поглощения лазерного излучения, соответственно, изменение его концентрации приводит к изменению оптических свойств исследуемой среды, в том числе степени ослабления проходящего через нее лазерного излучения [6]. Тогда коэффициент поглощения среды A может быть определен путем сравнения мощности лазерного излучения до прохождения через образец и после него:

$$A = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{вых}}$ – выходная мощность лазерного излучения;

$P_{\text{вх}}$ – входная мощность лазерного излучения.

Для определения коэффициента поглощения необходимо регистрировать мощность лазерного излучения в опорном канале и после прохождения через исследуемую водную среду. Решение данной задачи требует применения специализированной измерительной системы, обеспечивающей синхронную регистрацию оптических сигналов, их оцифровку и последующую обработку.

Несмотря на существование коммерческих флуориметров, они ориентированы преимущественно на определение концентрации хлорофилла по характеристикам флуоресцентного излучения и не предназначены для непосредственного измерения коэффициента поглощения лазерного излучения в исследуемой среде. В связи с этим возникает необходимость разработки специализированной измерительной системы, основанной на флуоресцентном методе и предназначенной для определения коэффициента поглощения лазерного излучения при его прохождении через среду, содержащую фитопланктон.

Целью данной работы является разработка измерительной системы на основе флуоресцентного метода исследования, обеспечивающей определение коэффициента поглощения лазерного излучения фитопланктоном путем регистрации интенсивности выходного (прошедшего через исследуемую среду) и входного опорного лазерных сигналов.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить теоретические основы построения и функционирования измерительных систем и разработать концепцию измерительной системы.
2. Смоделировать принципиальную схему фотоприемного устройства, выполнить расчет параметров электрической цепи и разработать печатную плату.
3. Провести испытания разработанного устройства на образцах фитопланктона, обработать и проанализировать полученные результаты.

3 Проведение сбора, обработки и анализа информации

3.1 Концепция измерительной системы

Разрабатываемая измерительная система предназначена для регистрации интенсивности лазерного излучения, прошедшего через исследуемую водную среду, и последующего определения коэффициента поглощения. Структурная схема измерительной системы представлена на ниже (рисунок 5).

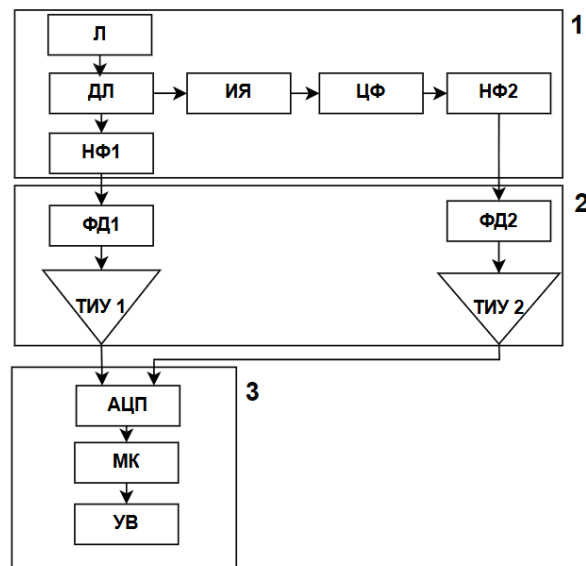


Рисунок 5 – Структурная схема измерительной системы:

Л – лазер; ДЛ – делитель луча; ИЯ – измерительная ячейка; ЦФ – цветной фильтр; НФ – нейтральный фильтр; ФД – фотодиод; ТИУ – трансимпедансный усилитель; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; МК – микроконтроллер; УВ – устройства вывода; 1 – блок генерации и фильтрации излучения; 2 – блок фотоприемного устройства; 3 – блок оцифровки и вывода данных сигнала

В состав измерительной системы входят три функциональных блока – блок генерации и фильтрации излучения, блок фотоприемного устройства, блок оцифровки и вывода данных сигнала (рисунок 5). Настоящая работа будет ограничена практической реализацией блока ФПУ, поскольку детальная разработка блоков 1 и 3 не входит в перечень решаемых задач данной работы. Вышеперечисленные блоки в дальнейшем будут рассматриваться исключительно в теоретическом аспекте, однако при проектировании ФПУ будут учитываться требования по электрической, функциональной и информационной совместимости с указанными блоками.

Каждый оптический канал оканчивается фотоприемным устройством (ФПУ), которое предназначено для преобразования интенсивности падающего оптического излучения в

электрический сигнал, пригодный для последующей цифровой обработки. В состав каждого ФПУ входят: фотодиод; трансимпедансный усилитель; вспомогательные элементы электрической схемы, обеспечивающие питание, смещение и устойчивую работу усилителя.

Фотодиод преобразует энергию падающего излучения в фототок, который невозможно использовать для обработки сигнала из-за небольшой величины, поэтому далее он преобразуется в напряжение с помощью трансимпедансного усилителя (ТИУ), и в результате на выходе каждого ФПУ формируется аналоговый сигнал.

3.2 Назначение и принцип работы ФПУ

Назначением фотоприемного устройства (ФПУ) является преобразование оптического сигнала в электрический для последующей обработки и передачи в блок оцифровки. Функциональная схема устройства приведена на рисунке 6.

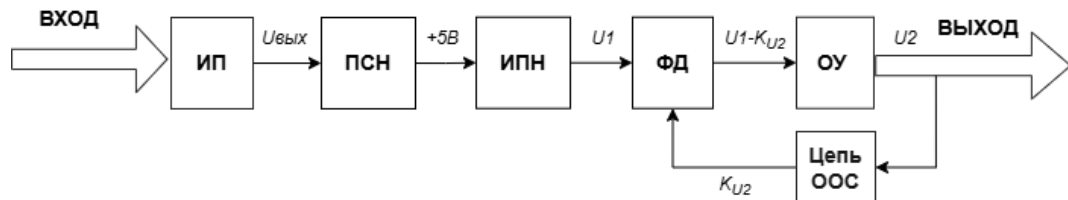


Рисунок 6 – Функциональная схема ФПУ:

ИП – источник питания; ПСН – понижающий стабилизатор напряжения; ИПН – инвертирующий преобразователь напряжения; ФД – фотодиод; ОУ – операционный усилитель; Цепь ООС – цепь отрицательной обратной связи

Принцип работы ФПУ таков: под действием падающего лазерного излучения фотодиод генерирует фототок, величина которого пропорциональна мощности излучения. Сформированный фототок поступает на инвертирующий вход ОУ, где благодаря отрицательной обратной связи преобразуется в выходное напряжение. Коэффициент преобразования определяется сопротивлением резистора, включенного в цепь обратной связи, что позволяет получить выходной сигнал, пропорциональный мощности зарегистрированного лазерного излучения. Полученное аналоговое напряжение передается в блок оцифровки для последующей цифровой обработки.

Точность регистрации интенсивности лазерного излучения зависит не только от характеристик фотодиода, но и от параметров усилительного тракта, схемы питания и элементов, обеспечивающих стабильность работы устройства. Поэтому при разработке ФПУ особое внимание уделяется выбору каждого элемента электрической схемы.

Работа устройства осуществляется следующим образом. Входное напряжение поступает на линейный стабилизатор DA1, формирующий стабилизированное напряжение плюс 5 В для питания трансимпедансного усилителя DA3 и инвертирующего преобразователя DA2. Инвертирующий преобразователь формирует напряжение минус 5 В, необходимое для создания обратного смещения фотодиода VD1. Под действием лазерного излучения (замененного в схеме электрическим источником) фотодиод генерирует фототок, пропорциональный мощности падающего излучения. Полученный фототок преобразуется трансимпедансным услителем в напряжение, которое по коаксиальному кабелю передается на вход аналого-цифрового преобразователя для дальнейшей цифровой обработки (рисунок 7).

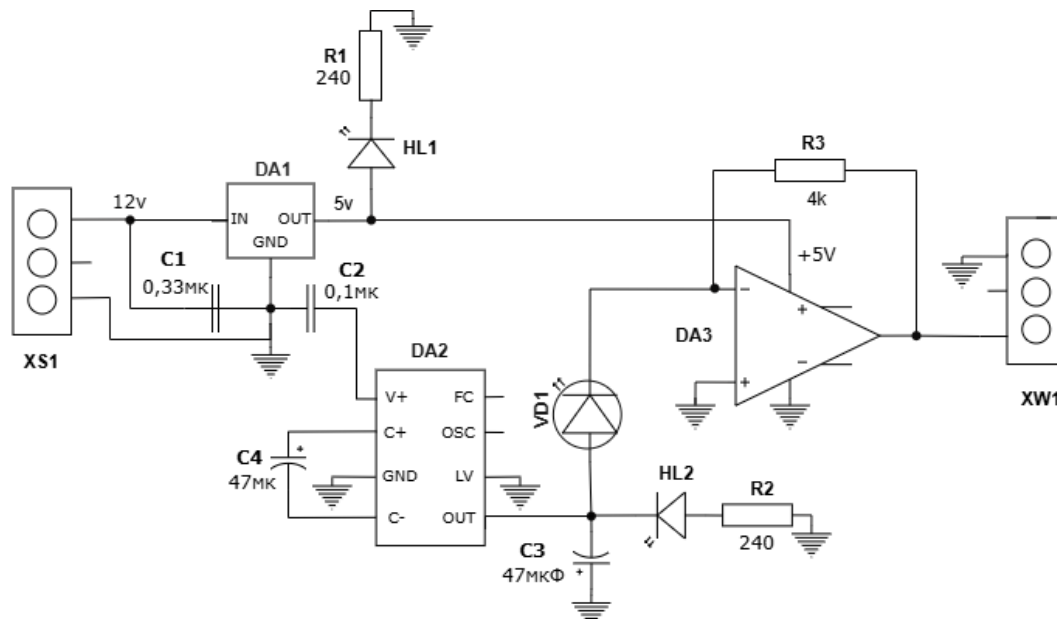


Рисунок 7 – Принципиальная схема ФПУ

Основным чувствительным элементом ФПУ является фотодиод VD1. Фотодиод представляет собой полупроводниковый прибор, работа которого основана на внутреннем фотоэффекте. В разрабатываемом устройстве он функционирует в фотодиодном режиме, при котором к р-п-переходу прикладывается обратное смещение. Такой режим обеспечивает высокое быстродействие, линейную зависимость фототока от мощности падающего излучения и уменьшает влияние емкости р-п-перехода [7].

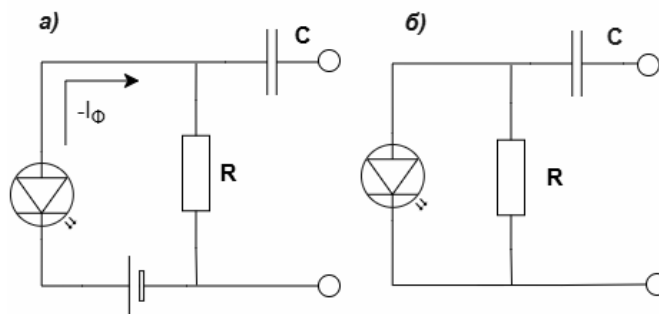


Рисунок 8 – Схема включения ФД:
 а – фотогальванический режим; б – фотодиодный режим

При работе ФД в фотогальваническом режиме в случае освещения п-области в ней образуются новые носители заряда – электроны и дырки (рисунок 8а). Они диффундируют к р-п-переходу, где неосновные носители-дырки – переходят в р-область (обратный ток неосновных носителей), а электроны, для которых диффузионное поле р-п-перехода является запирающим, остаются в п-области [7]. При подключении к контактам фотодиода нагрузки и отсутствии освещения через р-п-переход и нагрузочное сопротивление потечет ток термически генерированных неосновных носителей, называемый темновым током. Освещение дает дополнительный фототок неосновных носителей:

$$I = I_S \left[\exp \left(\frac{eV_R}{kT} \right) - 1 \right] - I_{\Phi} \quad (2)$$

где I – суммарный ток в цепи;

I_S – обратный дырочный ток;

V_R – падение напряжения на нагрузке от протекающего в цепи тока, $V_R = IR_H$;

e – заряд электрона;

k – постоянная Больцмана;

T – абсолютная температура.

Выражение (2) позволяет построить вольт-амперные характеристики (ВАХ) фотогальванического режима. Таким образом, ФД в фотогальваническом режиме непосредственно преобразует энергию света в электрическую (при освещенности 8000 лк фото-ЭДС составляет 0,1 В).

При работе ФД в фотодиодном режиме к нему прикладывают обратное напряжение (рисунок 8б). В этом случае в отсутствии освещения через р-п-переход и сопротивление нагрузки

протекает обратный дырочный ток I_S . При освещении же p-области через p-n-переход и сопротивление нагрузки будет протекать дополнительный дырочный фототок неосновных носителей I_Φ . Суммарный ток в цепи будет складываться из темнового тока и фототока неосновных носителей [7]. Схема включения ФД в фотодиодном режиме приведена на рисунке 8, а экспериментально полученные ВАХ ФД-1 – на рисунке 9.

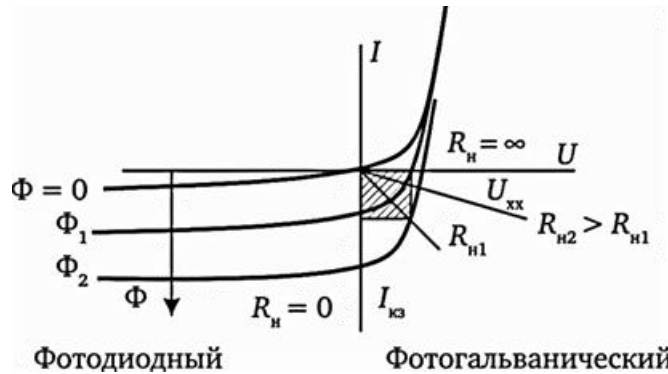


Рисунок 9 – ВАХ фотодиода в фотогальваническом и фотодиодном режиме

Падение напряжения на нагрузке и ФД будет:

$$V_H = I \cdot R_H, \quad V_{ФД} = V_{П} - I \cdot R_H, \quad (3)$$

В разрабатываемой схеме фотодиод VD1 функционирует в фотодиодном режиме, при котором к p-n-переходу приложено обратное смещение. В этом режиме общий ток во внешней цепи определяется суммой постоянного темнового тока I_S и фототока I_Φ , пропорционального падающему потоку излучения. Значение фототока можно рассчитать через токовую чувствительность ФД S_I и падающий поток излучения (суммарная мощность лазерного излучения) P :

$$I_\Phi = S_I \cdot P. \quad (4)$$

Благодаря обратному смещению VD1 работает как управляемый светом источник тока, что позволяет использовать его совместно с трансимпедансным усилителем, преобразующим фототок в напряжение. При этом сопротивление нагрузки R_H (входное сопротивление усилителя) выбирается из условия обеспечения требуемого динамического диапазона, а его максимальное значение ограничивается напряжением питания и максимальным фототоком:

$$R_{н max} = U_{пит} \cdot I_{ф max} + I_S. \quad (5)$$

Для обеспечения работы электронной схемы необходим источник постоянного напряжения. Для стабилизации напряжения питания в разрабатываемой схеме используется линейный стабилизатор DA1, формирующий постоянное напряжение плюс 5 В для питания инвертирующего преобразователя DA2 и трансимпедансного усилителя DA3 (ТИУ). Применение стабилизатора обеспечивает устойчивую работу схемы, а конденсаторы C1 и C2, установленные на его входе и выходе, сглаживают пульсации, подавляют высокочастотные помехи и предотвращают самовозбуждение [8].

ТИУ DA3 преобразует фототок, поступающий на инвертирующий вход операционного усилителя, в выходное напряжение. Благодаря архитектуре rail-to-rail, низкому уровню собственных шумов и малому входному току смещения обеспечивается высокая точность преобразования.

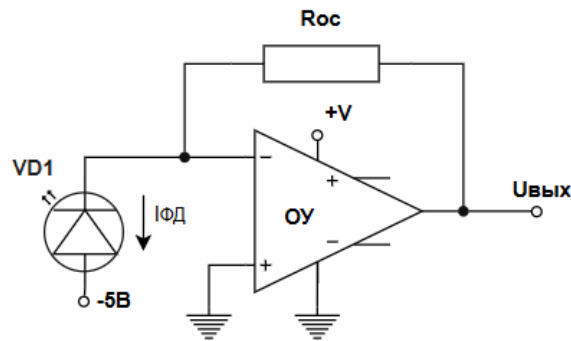


Рисунок 10 – Схема ТИУ с отрицательной обратной связью

Выходные напряжения такого DA3 максимально близки к значениям напряжений питания (разность не превышает 100 мВ)[9]. DA3 допускает однополярное питание напряжением плюс 5 В, что упрощает построение схемы и исключает необходимость во внешнем отрицательном источнике для самого усилителя. Цепь обратной связи (ОС) в этом случае представляет собой единственный резистор R_{OC} , который служит для передачи части выходного сигнала обратно на вход (рисунок 10). Резистор соединен с инвертирующим входом, следовательно, ОС будет отрицательной (ООС). Входное напряжение U_I вызывает протекание входного тока I [9].

Для создания обратного смещения р-п-перехода фотодиода в схеме используется инвертирующий преобразователь, формирующий отрицательное напряжение.

4 Выполнение проектно-конструкторских работ

4.1 Элементная база ФПУ

При разработке фотоприемного устройства использованы электронные компоненты, доступные в лабораторных условиях и соответствующие требованиям, предъявляемым к чувствительности, быстродействию и точности аналогового тракта. Применяемая элементная база обеспечивает реализацию требуемых функциональных узлов схемы без использования дополнительных специализированных устройств.

В качестве светочувствительного элемента используется кремниевый фотодиод S6428-01. Основной характеристикой, определившей его применение, является спектральная чувствительность 0,22 А/Вт с максимумом в области длины волны 460 нм, что соответствует длине волны используемого лазерного источника излучения.

Трансимпедансный усилитель рассчитан на питание напряжением от 2,7 до 5,5 В, что позволяет использовать его без применения дополнительных преобразователей напряжения. Входной ток смещения не превышает 50 пА, благодаря чему влияние собственных токов операционного усилителя на результат измерений становится пренебрежимо малым по сравнению с измеряемым фототоком. Для обеспечения отрицательной обратной связи выбран резистор номиналом 4,72 кОм, поскольку такое значение сопротивления обеспечит требуемый диапазон выходного сопротивления ТИУ.

Выбранный линейный стабилизатор напряжения L7805CV в корпусе TO-220 обеспечивает низкий уровень пульсаций выходного напряжения и обладает достаточным запасом по выходному току – до 1,5 А, тогда как потребление фотоприемного устройства не превышает 100 мА.

В качестве инвертирующего DC/DC-преобразователя был выбран LM2662MX/NOPB в корпусе SOIC-8. Использование данного преобразователя позволяет получать напряжение около минус 5 В при питании схемы от источника плюс 5 В, что соответствует требованиям выбранного режима работы фотодиода.

В качестве индикатора напряжения выбран светодиод SML-LX1206YC-TR желтого цвета с максимальным значением падения напряжения, равным 2,4 В (при протекании прямого тока номиналом 20 мА).

4.2 Расчет параметров электрической цепи ФПУ

Для исправной работы электрической цепи с фотодиодом, принимающем на себя мощное лазерное излучение, необходимо рассчитать максимальный фототок, который можно подать на инвертирующий вход ТИУ. Расчет максимального рабочего фототока выполняется по формуле (4). Для генерации излучения используется лазерный диод с номинальной мощностью 5,5 Вт, а светочувствительность фотодиода, согласно технической документации, составляет 0,22 А/Вт. Подстановка известных значений в формулу позволяет получить значение максимального значения фототока, генерируемого фотодиодом:

$$I_{\phi max} = 0,22 \cdot 5,5 = 1,21 \text{ А.}$$

Однако прямое облучение фотодиода лучом такой мощности недопустимо, поскольку тепловыделение в полупроводниковой структуре может привести к ее разрушению. Для предотвращения этого на оптическом пути перед фотодиодом устанавливается нейтральный светофильтр (ND-фильтр), ослабляющий падающее излучение в тысячу раз. В этом случае эффективная мощность, достигающая фотодиода, снижается до величины порядка 5-5,5 мВт, а соответствующий фототок составляет приблизительно 1-1,2 мА, что соответствует линейному режиму работы ФПУ и не создает риска перегрузки. Такой метод ограничения мощности излучения позволяет одновременно повысить точность измерений за счет высокого отношения сигнал/шум (SNR), расширить динамический диапазон измерений (отношение максимального сигнала, который система может корректно измерить, к минимальному сигналу, который она способна зарегистрировать) и при этом не создать перегрузку на фотодиоде.

Поскольку выходной сигнал трансимпедансного усилителя поступает на вход аналого-цифрового преобразователя, необходимо обеспечить, чтобы максимальное значение выходного напряжения усилителя не превышало допустимый диапазон входных напряжений АЦП. Это позволяет исключить насыщение входного каскада преобразователя и обеспечить корректное измерение сигнала с максимальной точностью.

Для определения максимального выходного напряжения трансимпедансного усилителя необходимо предварительно рассчитать значение максимально возможного фототока, а также его полярность (поскольку фотодиод генерирует ток, который течет из инвертирующего входа операционного усилителя через резистор обратной связи R_{oc}). В расчете принимается, что на

фотодиод падает максимальная мощность лазерного излучения, соответствующая рабочим условиям устройства. Согласно характеристикам ОРА380, его входной ток смещения не превышает 50пА, что значительно меньше фототока и почти не влияет на выходные параметры цепи.

Значение сопротивления ОС ТИУ формируется в зависимости от значения выходного напряжения, которое необходимо получить на выходе усилителя. Максимальное значение выходного напряжения, которое ТИУ может качественно выдать – около 5 В. Однако отклонение выходного напряжения от положительной линии по технической документации составляет 600 мВ, соответственно, выходной положительный сигнал ТИУ составит около 4,4 В. Максимальное значение напряжения, необходимое для питания АЦП также около 5 В. Если выходной сигнал ОУ будет больше максимального сигнала, который может принять на вход АЦП, то может возникнуть клиппирование (ограничение и искажение формы) сигнала. Соответственно, $U_{\text{вых}}$ не должно превышать 4-4,5 В. Для удобства расчетов решено принять оптимальное значение $U_{\text{вых}}$ равным 4 В. По закону Ома выходное напряжение ТИУ напрямую зависит от тока фотодиода, а также сопротивления в цепи ООС, регулируясь этими двумя параметрами цепи. Тогда логично выразить $R_{\text{ОС}}$ через зависимость:

$$U_{\text{вых}} = -I \cdot R_{\text{ОС}},$$

$$R_{\text{ОС}} = U_{\text{вых}} \cdot -I$$

$$R_{\text{ОС}} = 0,001 \cdot 4 = 4 \text{ кОм.}$$

ПП требует разъем для подключения источника питания. Чтобы правильно подобрать разъем платы необходимо учитывать технические и электрические параметры самой платы: максимальный потребляемый ток и напряжение (номинальный ток должен значительно превышать максимальную нагрузку с запасом на тепловыделение; номинальное напряжение должно соответствовать рабочему напряжению системы); габариты самой платы в зависимости от расположения компонентов; сопротивление контактов (низкое сопротивление снижает нагрев и падение напряжения). шаг контактов (расстояние между центрами штырьков) – должен обеспечивать достаточный зазор и свободное пространство для протекающего напряжения; частотный диапазон (для радиочастотных приложений важно соответствие частотным требованиям системы, чтобы избежать затухания сигнала и обеспечить целостность передачи данных).

Значение тока потребления платы зависит от значения допустимой токовой нагрузки

проводников (дорожек), которую можно определить рассчитав или найдя в технической документации значения тока потребления для активных компонентов ПП, а также рабочие токи, протекающие через пассивные элементы в цепях нагрузки (резисторы и светодиоды) и токи утечки (конденсаторы).

Значения токов компонентов для расчета общего тока I_{PCB} :

1. Ток фотодиода = 1 мА;
2. Ток покоя ТИУ = 6,5 мА (согласно технической документации);
3. Общий ток утечки конденсаторов $\approx 28,4$ мА.
4. Общий рабочий ток резисторов схемы ≈ 1 мА.
5. Общий рабочий ток светодиодов SML-LX1206YC-TR = 21,6 мА.
6. Ток потребления стабилизатора (рассчитывается по документации).
7. Ток потребления инвертирующего преобразователя (рассчитывается по документации).

Расчеты целесообразно начать с вычисления тока потребления для ОУ по формуле (6) и данным из технической документации:

$$I_{OY} = (I_{нагр} + I_{покоя}). \quad (6)$$

Получим: $I_{ex} = 1 + 6,5 = 7,5$ мА.

2. Рассчитаем ток инвертора. Инвертор LM2662 формирует отрицательное напряжение минус 5 В для питания операционного усилителя. Расчет тока, потребляемого инвертором от источника плюс 5 В, выполнен с учетом КПД преобразователя ($\eta = 86\%$) и тока покоя ($I_{пок} = 1,3$ мА).

Расчеты произведены по формуле (7):

$$I_{инв} = (I_{нагр} \cdot U_{вых})/(\eta \cdot U_{вх}) + I_{пок}. \quad (7)$$

Так, $I_{инв} = (7,5 \cdot 5)/(0,86 \cdot 5) + 1,3 \approx 10,02$ мА.

3. Далее воспользуемся формулой (8) и данными из технической документации для расчета тока потребления стабилизатора.

$$I_{ст} = I_{нагр} + I_{пок}. \quad (8)$$

Поскольку стабилизатор питает инвертор и ОУ, то ток нагрузки: $I_{нагр} = I_{инв} + I_{ОУ}$
 $= 10,02 + 7,5 = 17,52$ мА. Ток покоя по документации = 6 мА.

Так, $I_{см} = 17,52 + 6 = 23,52$ мА.

4. Формула расчета итогового тока потребления платы с ФПУ:

$$I_{PCB} = I_{ОУ} + I_{инв} + I_{ст} + I_{ут} + I_{раб} \quad (9)$$

Подставим полученные данные в итоговую формулу расчета тока потребления платы (9) и получим: $I_{PCB} = 7,5 + 10,02 + 23,52 + 21,4 + 23,6 \approx 85,22$ мА.

Таким образом, по расчетам выше возможно определить необходимый тип разъема питания, входящий ток которого будет больше тока потребления самой платы как минимум в 1,5 раза (примерно 0,5-1А).

Полученное значение общего тока, потребляемого платой, можно рассчитать требуемую ширину ее дорожек, поскольку ток потребления является одним из главных параметров при проектировании ПП. Ширина дорожек W для будущей ПП определяется следующими параметрами: сила тока в цепи I (А), толщина слоя фольги текстолита S (мкм), температура окружающей среды T_1 и ее повышение T_2 (°C), длина дорожки L (мм). Данные параметры имеют следующие значения:

- $I = 85,22$ мА;
- $S = 35$ мкм;
- $T_1 = 25$ °C;
- $T_2 = 29$ °C;
- $L = 149,4$ мм.

С помощью специального сервиса для расчета ширины дорожек определим их общую длину [10]. Так, требуемая ширина дорожек W для внешнего слоя $\approx 0,00527$ мм.

4.3 Схемотехническое моделирование ФПУ

Для моделирования электронной схемы ФПУ использовалась среда моделирования LTspice. На первом этапе в схему был включен источник постоянного напряжения. Отрицательный вывод источника соединен с общим проводом, а положительный вывод

подключен ко входу стабилизатора напряжения. В качестве стабилизатора напряжения из библиотеки компонентов LTspice была выбрана микросхема LT1085-5, обеспечивающая формирование стабилизированного напряжения питания плюс 5 В. Микросхема имеет три вывода: вход («IN»), выход («OUT») и общий провод («GND»). Вход «IN» соединен с положительным выводом источника питания, вывод «GND» подключен к общему проводу схемы, а на выходе OUT формируется стабилизированное напряжение плюс 5 В. В соответствии с рекомендациями производителя для обеспечения устойчивой работы стабилизатора в схему включены входной и выходной конденсаторы емкостью 0,33 мкФ и 0,2 мкФ соответственно.

Для получения отрицательного напряжения питания ТИУ использован инвертирующий преобразователь напряжения LM2662MX, выбранный из библиотеки LTspice. Данная микросхема преобразует положительное входное напряжение 5 В в отрицательное. Вывод «VIN» преобразователя подключен к выходу стабилизатора LT1085-5, выводы GND и LV соединены с общим проводом. Согласно технической документации для обеспечения стабильной работы преобразователя между выводами «CAP+» и «CAP-», а также на выходе «VOUT» установлены полярные конденсаторы емкостью 47 мкФ (рисунок 11). Сформированное отрицательное напряжение далее используется для питания ФПУ.

Поскольку стандартная библиотека LTspice не содержит модели используемого фотодиода, на этапе моделирования он был заменен эквивалентным резистором сопротивлением 5 кОм. Значение сопротивления определено по закону Ома исходя из принятого значения фототока 1 мА и приложенного напряжения 5 В. Такое допущение позволяет выполнить моделирование работы электрической схемы при заданных условиях и оценить корректность функционирования разработанного ФПУ.

На следующем этапе в схему был включен операционный усилитель семейства ОРА, выбранный из библиотеки компонентов LTspice. Операционный усилитель имеет пять основных выводов: инвертирующий вход, неинвертирующий вход, положительный вывод питания, отрицательный вывод питания (общий провод) и выход.

Эквивалент фотодиода подключен к инвертирующему входу операционного усилителя, а неинвертирующий вход соединен с общим проводом. Для питания операционного усилителя используется напряжение плюс 5 В, сформированное ранее стабилизатором напряжения. Для реализации схемы ТИУ между выходом операционного усилителя и его инвертирующим входом включен резистор ОС R_{OC} . На выходе ТИУ дополнительно установлен резистор сопротивлением

10 кОм, выполняющий функцию нагрузочного элемента и обеспечивающий корректный режим моделирования выходной цепи (рисунок 11).

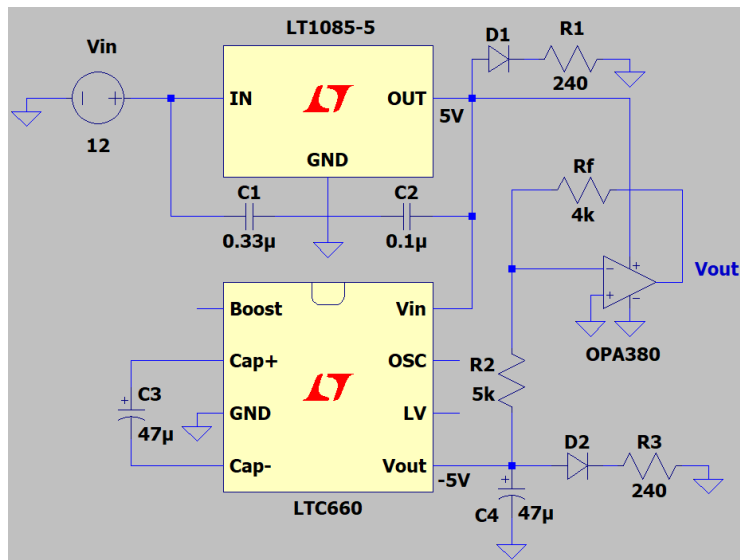


Рисунок 11 – Моделирование электрической цепи фотоприемного устройства

После построения схемы были заданы параметры моделирования. В качестве режима моделирования выбран анализ переходных процессов (Transient Analysis), позволяющий исследовать изменение электрических параметров схемы во времени. Время окончания моделирования установлено равным 20 мс (рисунок 12).

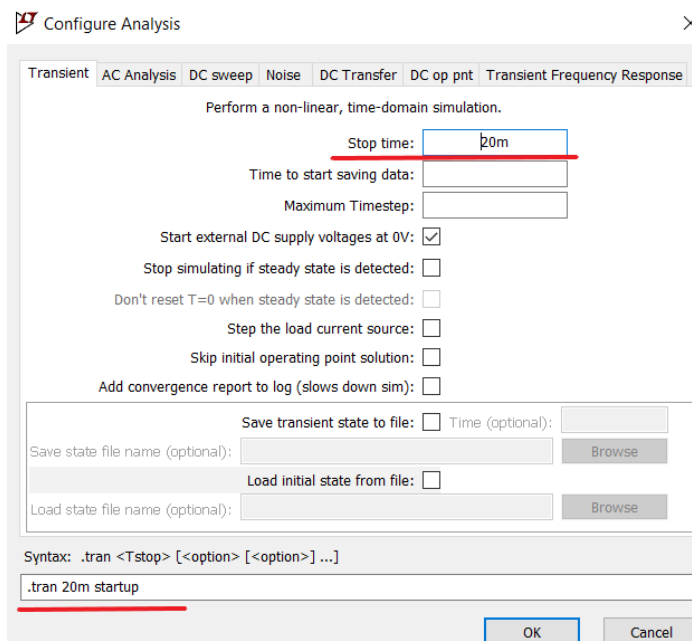


Рисунок 12 – Окно настройки параметров симуляции

После запуска моделирования выполнен контроль напряжений в характерных узлах схемы с использованием измерительных маркеров LTspice. Результаты моделирования показали, что на выходе стабилизатора напряжение составляет плюс 5 В (рисунок 13а), на выходе инвертирующего преобразователя напряжения формируется напряжение минус 5 В (рисунок 13б), а на выходе ТИУ напряжение достигает 4 В (рисунок 13в).

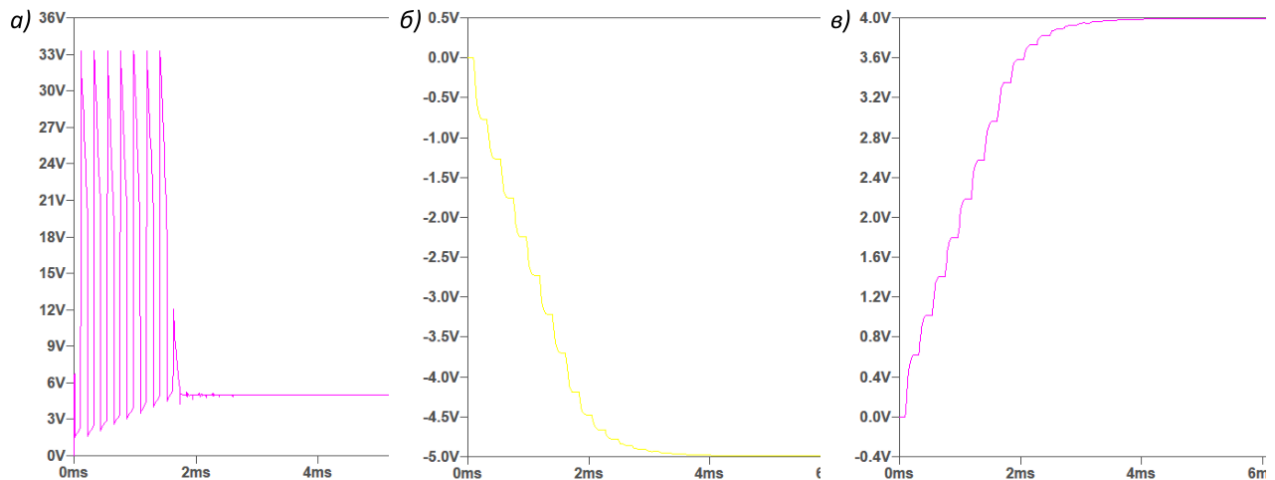


Рисунок 13 – Результаты анализа симуляции:

а – $U_{\text{вых}}$ на выходе стабилизатора = 5В; б – $U_{\text{вых}}$ на выходе инвертора напряжения = минус 5В;
 в – $U_{\text{вых}}$ на выходе ТИУ = 4В

Полученные результаты подтверждают корректность работы разработанной схемы. Значение выходного напряжения трансимпедансного усилителя, полученное в ходе моделирования, совпадает с расчетным значением, что свидетельствует о правильности выбора параметров элементов схемы и корректности выполненных расчетов.

4.4 Компоновка и трассировка печатной платы

Этапы компоновки и трассировки ПП реализованы в комплексная система автоматизированного проектирования (САПР) радиоэлектронных средств – Altium Designer. На начальном этапе моделирования схемы выбираются необходимые компоненты из библиотеки программы. Если производитель не предусматривает использование схемы компонента нужной модели, тогда ставится максимально приближенный к нему аналог или компонент с похожими характеристиками. Стабилизатор L7805CV, который используется и для физической сборки схемы. Таким образом на рабочее поле сборки были установлены следующие компоненты:

- 1) 3-контактный разъем питания
- 2) стабилизатор L7805CV (с конденсаторами);

- 3) инвертирующий преобразователь. LM2662 (с полярными конденсаторами);
- 4) фотодиод S6428-01 заменен резистором на 5 кОм
- 5) ТИУ ОРА380 с питанием 5 В и резистором ОС 4 кОм;
- 6) Светодиоды SML-LX1206YC-TR желтого цвета.

Остается подключить выход операционного усилителя ко входу выходного разъема, как показано на рисунке 14.

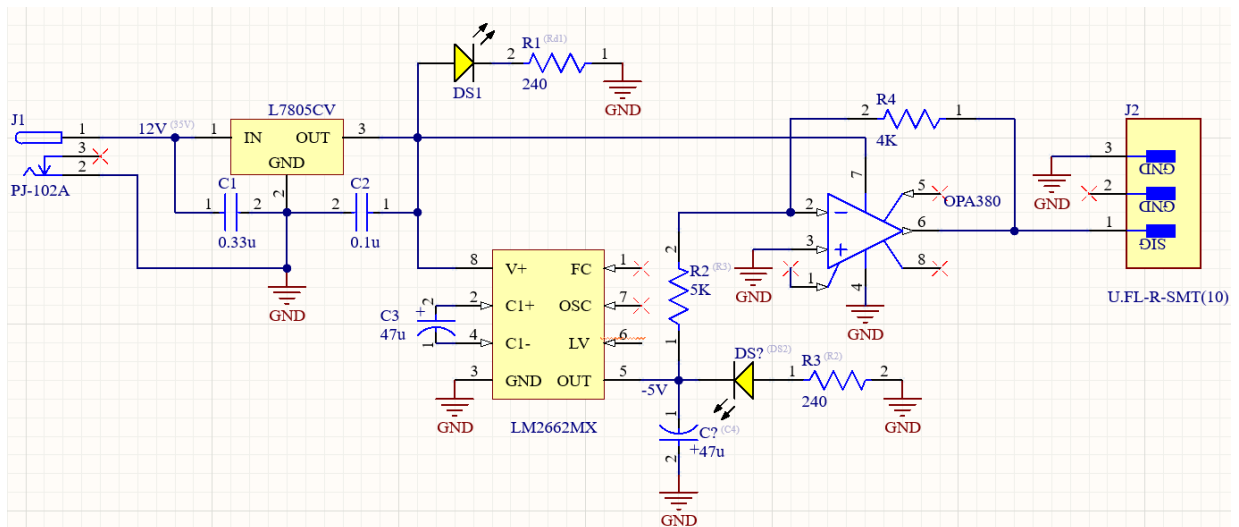


Рисунок 14 – Схема подключения цепи ФПУ

На данном этапе был создан РСВ файл для подключения компонентов на плате. Компоненты цепи перенесены в рабочее поле, теперь необходимо их расположить так, чтобы можно было легко произвести трассировку платы (рисунок 14).

Трассировка – это процесс прокладки дорожек и переходных отверстий на плате для соединения выводов компонентов. Редактор РСВ упрощает эту задачу, предоставляя продвинутые инструменты интерактивной трассировки. Эти инструменты помогают максимально повысить эффективность и гибкость трассировки интуитивным способом, включая подсказки курсора при прокладке дорожек, трассировку соединения одним щелчком, «проталкивание» препятствий и автоматическое следование существующим соединениям. Перед трассировкой необходимо учесть электрические характеристики цепи, расстояние между ее компонентами и размеры посадочного места во избежание ошибок.

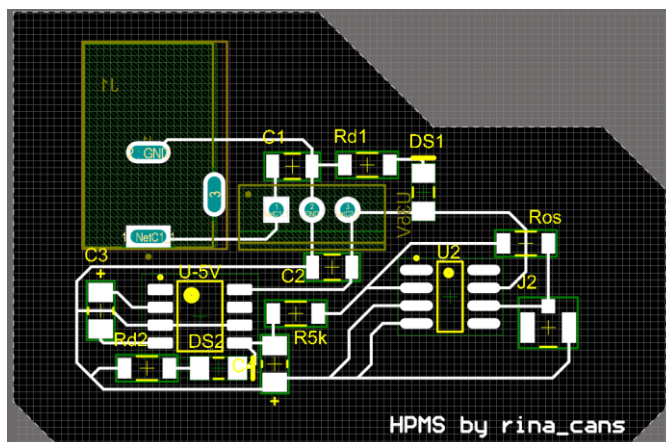


Рисунок 15 – Трассировка платы (2D-формат)

Как видно на рисунке 15, трассировка осуществлялась между компонентами максимально близко для экономии места, при этом с соблюдением ограничений проекта (расстояние между надписью и компонентом, размеры посадочного места и т.д.).

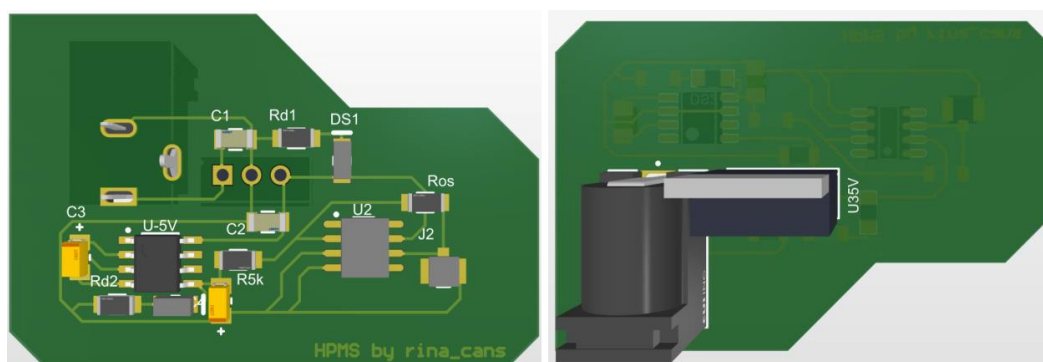


Рисунок 16 – Представление платы в 3D-формате

Модель печатной платы была переведена в 3D-вид для визуализации и оценки совместимости компонентов ПП (рисунок 16). Трехмерный формат позволяет найти ошибки компоновки, которые невозможно увидеть на 2D-чертеже.

5 Выполнение производственно-технологических работ

5.1 Выбор технологии и этапы изготовления ПП

Для создания проводящего рисунка печатной платы был создан фотошаблон. Фотошаблон (ФС) представляет собой физический эталон, на котором в высоком разрешении зафиксировано изображение одного из слоев будущей платы (проводящего, защитного или маркировочного). Он используется при фотолитографическом переносе рисунка на фольгированный диэлектрик и определяет геометрические параметры будущих проводников, контактных площадок и других элементов печатного монтажа.

Качество получаемой печатной платы во многом определяется параметрами проводящего рисунка, основными из которых являются ширина проводников, размеры контактных площадок и диаметр переходных отверстий. Современные тенденции развития печатных плат направлены на уменьшение ширины проводников и размеров межслойных переходов, что позволяет повысить плотность монтажа, увеличить количество электрических соединений и использовать компоненты поверхностного монтажа без увеличения габаритов устройства.

5.1.1 Изготовление фотошаблона

Перед началом изготовления печатной платы по разработанной РСВ-модели был подготовлен рабочий негативный ФС, предназначенный для последующего переноса проводящего рисунка на поверхность заготовки (рисунок 17а). Рабочий ФС представляет собой высокоточный носитель информации, содержащий изображение проводящего слоя печатной платы.

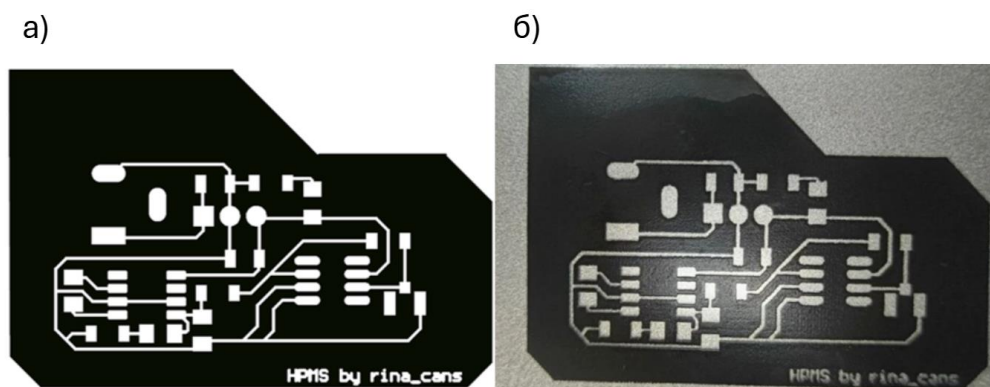


Рисунок 17 – Негативный фотошаблон проводящего рисунка печатной платы:
а – макет фотошаблона в Altium Designer; б – печатный вариант фотошаблона

Процесс создания ФС реализован в Altium Designer. Сначала необходимо настроить нужные слои ПП, которые будут изображены на итоговом ФС – механический слой, слой припоя

и мультислой, остальные слои должны быть скрыты в 2д-виде платы. Для эффекта негатива на механическом слое создается сплошная область. Далее необходимо перейти на вкладку настроек проекта и в окне набора выходных данных (OutJob) установить цвета видимых слоев. После проверки рисунка ФШ можно сгенерировать pdf-файл с ФШ. Готовая копия ФШ, представленная на рисунке 176 имеет ширину проводника, равную 0,25 мм и расстояние между проводниками, равное 0,3 мм, что, согласно требованиям ГОСТ Р 53429-2009, соответствует 3 классу точности ФШ [12]. После создания макета ФШ в системе проектирования был распечатан физический экземпляр ФШ на полиэфирной пленке.

На гляцевую поверхность отпечатанной пленки ФШ с расстояния 20-25 см был нанесен спрей-уплотнитель, который воздействует на тонер, образуя изображение, повышая его насыщенность. До момента использования ФШ хранился в условиях, исключающих воздействие светового излучения, что предотвращает паразитное засвечивание фоторезиста (ФР) и обеспечивает сохранение качества изображения.

5.1.2 Получение поверхности заготовки субтрактивным методом

Перед переносом проводящего рисунка поверхность фольгированного стеклотекстолита была отполирована алмазной пастой (с зернистостью абразива – 3/2 мкм) до получения равномерного металлического блеска, что позволило удалить поверхностные загрязнения, продукты окисления и мелкие неровности, обеспечив хорошее прилегание ФР к поверхности заготовки (рисунок 18).

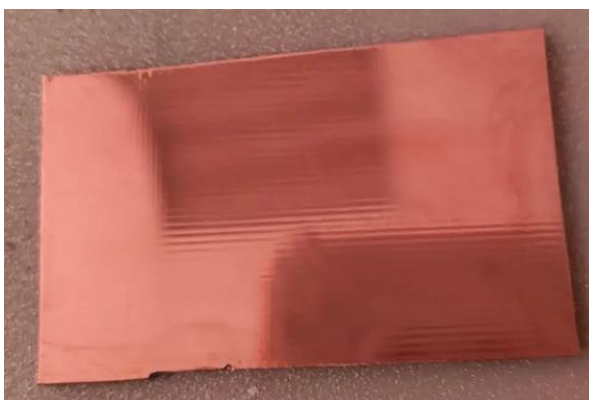


Рисунок 18 – Подготовка поверхности фольгированного стеклотекстолита

После полировки поверхность очищается и обезжиривается ацетоном. Далее на заготовку был нанесен сухой пленочный фоторезист (СПФ), представляющий собой светочувствительный полимерный материал, изменяющий свои свойства под воздействием ультрафиолетового излучения. Использование сухого ФР обеспечивает высокую разрешающую способность

фотолитографического процесса, стойкость к воздействию травильных растворов и получение проводников малой ширины [12].

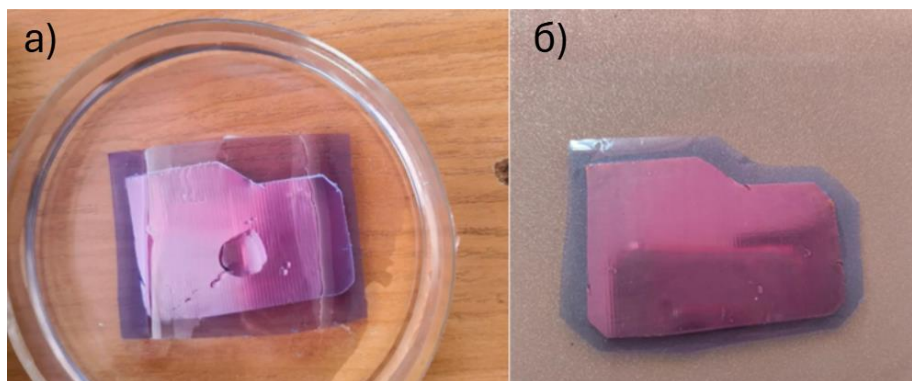


Рисунок 19 – Процесс заготовки поверхности платы:
а – наклеивание фоторезиста на поверхность текстолита; б – ламинирование пленки фоторезиста

Для обеспечения плотного прилегания пленки к поверхности текстолита заготовка с нанесенным фоторезистом была пропущена через ламинатор, где под действием температуры и давления произошло надежное закрепление (запаивание) пленочного материала на медной фольге (рисунок 19б).

5.1.3 Перенос рисунка фотошблона на заготовку печатной платы. Экспонирование

Основой выбранной субтрактивной технологии является фотолитографический перенос рисунка проводников с ФШ на поверхность заготовки печатной платы. Фотолитография представляет собой процесс контактного копирования изображения с ФШ на слой светочувствительного материала (фоторезиста), нанесенного на фольгированный диэлектрик. Метод характеризуется высокой разрешающей способностью и позволяет получать проводники и зазоры между ними шириной от 0,04 до 0,1 мм, что соответствует требованиям к изготовлению современных печатных плат [12].

После ламинирования ФШ совмещается с поверхностью заготовки, покрытой ФР, для повышения стойкости защитного изображения, после чего ФШ накрывается кварцевым стеклом и проводится ультрафиолетовое экспонирование при помощи рабочего ФШ (рисунок 20). В процессе экспонирования на поверхности заготовки формируется защитная маска, определяющая конфигурацию будущих проводящих дорожек и контактных площадок печатной платы [13]. Полученная защитная маска используется на последующих этапах изготовления для химического травления медной фольги, при котором удаляются незащищенные участки меди и формируется проводящий рисунок печатной платы.



Рисунок 20 – Процесс экспонирования ПП через фотошаблон (контактное экспонирование) УФ-светодиодом

Основным требованием к выполнению операции экспонирования является получение необходимой степени задубленности и полимеризации, гарантирующей воспроизведение четкого изображения элементов рисунка схемы при проявлении (рисунок 20). После экспонирования производится выдержка 20-30 минут в темном месте для завершения фотополимеризации.

После завершения процесса экспонирования рисунок защитного рельефа фоторезиста необходимо проявить. Проявление осуществляется при избирательном растворении неэкспонированных участков фоторезиста. Нерастворенные участки фоторезиста используются в качестве защитной фотомаски при травлении меди с пробельных мест

Для экспонированной заготовки ПП используется технология водно-щелочного проявления ФР, которая производится в слабых (1-5 процентных) щелочных растворах. Сухие пленочные фоторезисты водно-щелочного проявления очень чувствительны к перепроявлению, при котором происходит дополнительное химическое воздействие раствора проявления, приводящее к частичному разрушению фоторезиста. Поэтому для операции проявления устанавливаются ограничения по времени проявления СПФ. В качестве проявляющей щелочной среды выбран раствор кальцинированной соды (карбонат натрия, Na_2CO_3). Этот слабощелочной раствор удаляет незасвеченные участки фоторезиста, открывая медь для последующего травления (рисунок 21а).

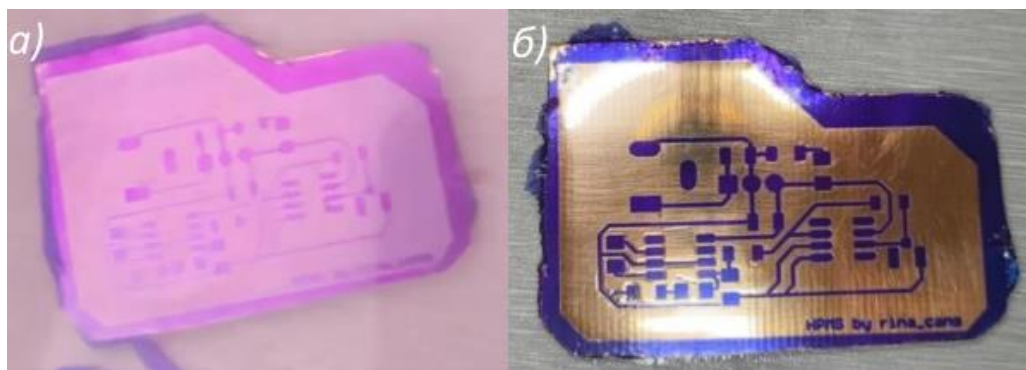


Рисунок 21 – Поверхность платы после: а – проявления изображения; б – промывания

Для качественного проявления рисунка ФР следует соблюдать требования к приготовлению водно-щелочного раствора: концентрация должна составлять примерно 1 чайную ложку соды на 1 литр воды; рекомендуется установить температуру раствора около 30-33 °С; процесс выдержки заготовки в растворе, как правило, не превышает нескольких минут до четкого появления рисунка.

После проявления платы в щелочном растворе заготовка промывается под проточной водой, и в результате на поверхности остается четкое изображение контактных дорожек и площадок с защитной пленкой из ФР (рисунок 21б).

5.1.4 Травление меди с пробельных мест фотошаблона

Травление представляет собой сложный окислительно-восстановительный процесс, который применяют для формирования проводящего рисунка ПП путем удаления меди с не защищенных травильным резистом участков. Это одна из основных операций изготовления ПП, так как на ней происходит формирование рисунка печатных элементов (проводников, контактных площадок и пр.), точность выполнения которых влияет на электрические характеристики ПП [12]. Для удаления незащищенной фоторезистом меди используется водный раствор хлорного железа (FeCl_3), который вступает в химическую реакцию с медью (рисунок 22). Способ приготовления раствора заключается в спешивании 1 части хлорного железа с 3 частями воды (пропорция FeCl_3 и H_2O – 1:3).

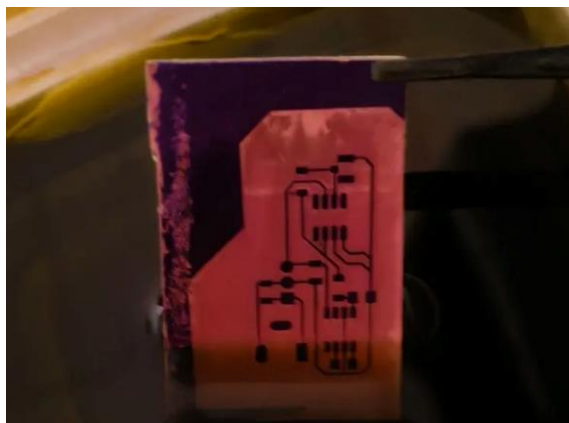


Рисунок 22 – Процесс травления меди с пробельных мест

Процесс травления меди длится от 5 до 60 минут (время зависит от температуры раствора, его концентрации, толщины медной фольги и степени загрязнения раствора). Для ускорения процесса раствор периодически перемешивают. После удаления меди плата тщательно промывается проточной водой и получается четкое изображение проводящего рисунка.

5.1.5 Удаление фоторезиста и наложение паяльной маски

После травления на плате остается защитный слой фоторезиста, который нужно удалить. Для этого используется свежеприготовленный раствор едкого натра (NaOH) в пропорции 7 граммов на 1 литр воды при температуре 20°C - 25°C . Во время удаления фоторезиста плата помещается в раствор, в результате чего защитный слой размягчается и отслаивается. После удаления остатков фоторезиста поверхность заготовки ПП снова промывается под проточной водой и высушивается (рисунок 23).

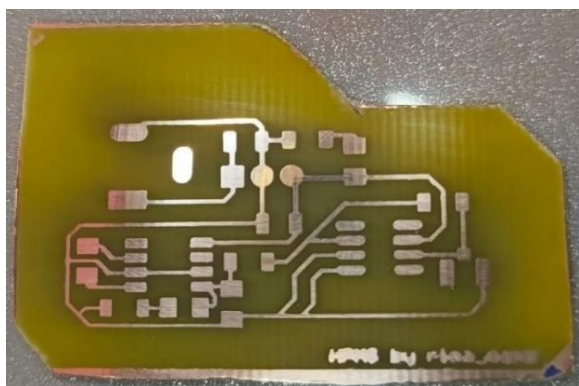


Рисунок 23 – Результат травления меди после промывания поверхности заготовки

После завершения травления медной фольги на поверхность заготовки ПП наносится однокомпонентная зеленая паяльная маска с УФ-отверждением, которая представляет собой тонкий защитный слой из полимерного материала. Маска избирательно закрывает на плате все

участки, кроме тех, где должны быть паяные соединения (контактные площадки для компонентов), что заметно упрощает и автоматизирует процесс пайки.



Рисунок 24 – Поверхность платы на стадии: а – покрытия паяльной маской; б – термической сушки паяльной маски; в – светового дубления

Существует несколько типов паяльной маски. В данном случае используется однокомпонентная жидкая маска, равномерно наносимая на поверхность ПП (рисунок 24а). Далее необходимо высушивать маску при помощи теплового воздействия, пока состав не затвердеет (рисунок 24б).

После тепловой сушки поверхность платы подвергается УФ-облучению для окончательной полимеризации маски, после чего все контактные дорожки очищаются от ее случайного налипания. Готовый результат заготовки платы с паяльной маской представлен на рисунке 24в.

5.2 Сборка платы и монтаж компонентов

Монтаж радиокомпонентов начинается с тщательной очистки платы от пыли, жира и оксидов. Далее производится установка компонентов на плату в зависимости от типа монтажа. В первую очередь на плату технологией ТНТ монтируется разъем питания, поскольку он вывод на плату входное напряжение источника питания. Выводы разъемов вставляются в соответствующие отверстия, после чего производится пайка паяльником с нижней стороны платы. Пайка выполняется оловянным припоем с флюсом, предотвращающим окисление контактов. Следующим этапом устанавливается стабилизатор напряжения (рисунок 25).

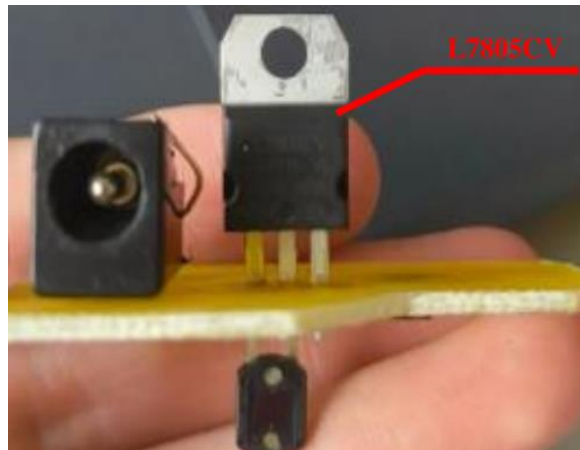


Рисунок 25 – Пример монтажа ТНТ-компонентов

L7805CV требует надежного механического крепления, поэтому контакты необходимо хорошо прогреть паяльником. Выводы вставляются в отверстия, и после пайки обязательно проверяется отсутствие перегрева.

Поверхностный монтаж выполняется после установки ТНТ-компонентов, чтобы избежать повреждения мелких элементов при переворачивании платы. На контактные площадки наносится флюс. Для удобства с помощью пинцета размещаются SMD-компоненты в порядке значимости или объема. Поэтому первыми фиксируются и припаиваются ТИУ с инвертирующим преобразователем методом диагональной фиксации: сначала припаивается два диагонально противоположных вывода для надежного крепления чипа, после чего паяются остальные выводы. Поскольку они имеют одинаковый типоразмер корпуса, то и пайка осуществляется идентично – припаивание восьми выводов к контактам платы.

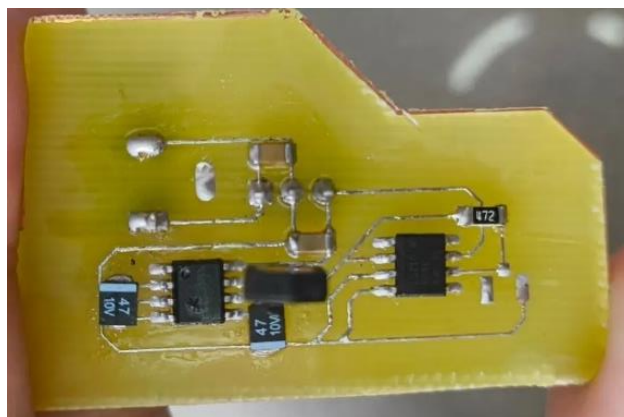


Рисунок 26 – Пример SMT-монтажа и лужения дорожек

Затем к площадкам стабилизатора и преобразователя припаиваются конденсаторы C_1 и C_2 , C_3 и C_4 соответственно (рисунок 26). Для компонентов с малым числом выводов используется

метод фиксации одного вывода: на одну площадку наносится припой, компонент устанавливается пинцетом, а паяльником расплавляется припой на площадке, чтобы закрепить один вывод. Полярные конденсаторы паяются с соблюдением маркировки «плюс» на корпусе, чтобы избежать обратной полярности и разрушения элемента. Далее к плате крепятся компоненты, меньшие по размеру – резисторы, диоды и неполярные конденсаторы имеют стандартные корпуса 1206. Они размещаются на площадках и припаиваются тем же методом, что и конденсаторы.

Фотодиод устанавливается в соответствии с полярностью. Его выводы монтируются непосредственно на поверхность платы, а после пайки необходимо проверить отсутствие замыканий между анодом и катодом, так как токи фотодиода крайне малы и даже незначительная утечка может исказить результат измерения. Стоит уточнить, что фотодиод также монтируется техникой SMT, однако его типоразмер не предусматривает характерного сгиба выводов. Также необходимо залить припоем контактные дорожки, как показано на рисунке 26.

После завершения монтажа обеих групп компонентов выполняется визуальный контроль качества пайки, проверяется отсутствие затеков припоя между соседними выводами и правильность установки полярных элементов. Также при помощи мультиметра измеряется значение постоянного напряжения на нескольких участках цепи для сравнения с расчетными значениями.

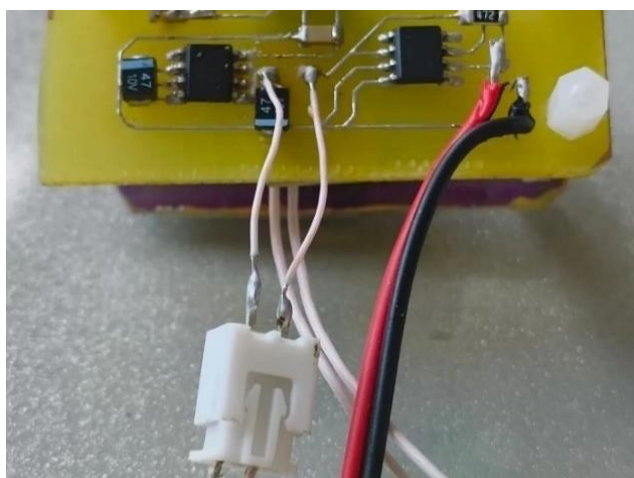


Рисунок 27 – Монтаж коаксиального провода

Далее производится монтаж коаксиального провода. Предварительно провод был подготовлен: снята изоляция, провод скручен в два пучка, которые залудили. Один из пучков припаян к выводу трансимпедансного усилителя ($U_{вых}$), второй – к общему проводу (рисунок 27).

5.3 Испытания блока ФПУ

Для оценки работоспособности разработанной схемы, подтверждения соответствия ее электрических характеристик расчетным значениям, а также выявления возможных недостатков были проведены контрольные испытания.

Первый этап испытаний заключается в измерении напряжения на различных участках схемы: входное напряжение платы ($U_{вх}$), выходное напряжения стабилизатора ($U_{ст\ вых}$), выходное напряжение инвертора ($U_{инв\ вых}$), а также выходное фоновое напряжение ОУ ($U_{ОУ\ вых}$). Измеренные значения напряжения на каждом выбранном участке цепи сравниваются с теоретическим (расчетными) значениями, что дает возможность проверить, правильно ли работают компоненты платы, а также найти неисправности в схеме устройства. Результаты испытания представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение расчетных и измеренных значений напряжения цепи блока ФПУ

Параметр	$U_{расч}, В$	$U_{изм}, В$
$U_{вх}$	9-24 В	12,24
$U_{ст\ вых}$	5	4,99
$U_{инв\ вых}$	-5	-5
$U_{ОУ\ вых}(фон)$	0	36мВ

Согласно таблице 1 измеренные значения напряжения в цепях схемы согласуются с расчетными значениями с точностью до 99,8 процентов. Это свидетельствует о том, что фактические значения U обеспечивают стабильную исправную работу схемы на всех участках цепи.

На втором этапе были проведены измерения выходного напряжения ОУ при различных значениях мощности засветки фотодиода с целью определения линейного диапазона зависимости $P(U_{вых})$. Для этого был определен верхний предел рабочего напряжения ОУ, при котором происходит насыщение усилителя, и линейная зависимость перестает соблюдаться. В качестве экспериментального диапазона мощности лазера были выбраны значения от 1 мВт до 170 мВт с шагом 10 мВ, так как именно в этом диапазоне можно отследить ограничение $U_{ОУ\ вых}$.

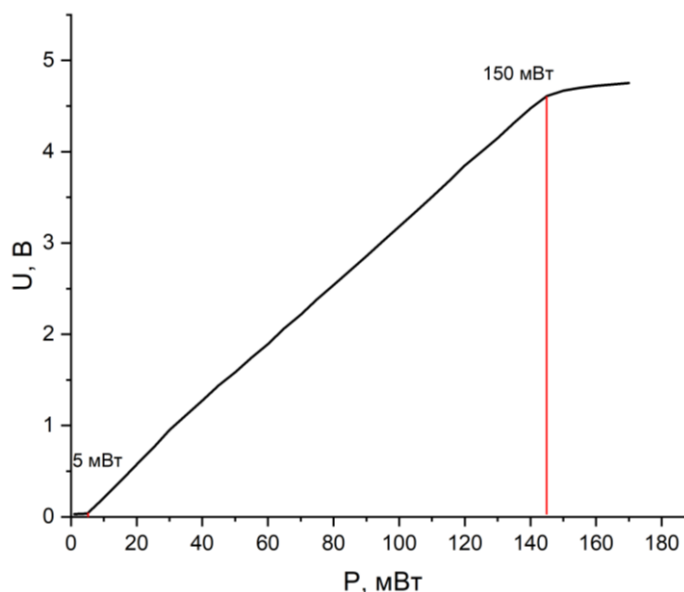


Рисунок 28 – График зависимости выходного напряжения ОУ от мощности лазера

График на рисунке 28 демонстрирует, что зависимость выходного напряжения ОУ от мощности лазера линейна в диапазоне от 5 до 140 мВт. По достижении предельного значения мощности в 145 мВт напряжение изменяется нелинейно и становится равным 4,75 В. Это доказывает, что разработанная схема с ОУ может выдавать максимальное стабильное напряжение, равное 4,75-4,8 В (при сопротивлении ООС, равном 4,7 кОм), при превышении которого достигается насыщение тока фотодиода. Оптимальная работа ОУ в такой схеме обеспечивается ограничением максимального выходного напряжения примерно на 5 процентов (около 4,4 В), что является номинальным выходным значением напряжения для ОРА380).

На третьем этапе при помощи двух ФД производилась оценка стабильности параметров схемы ФПУ, от которых зависит точность измерений устройства. Поскольку блок генерации излучения содержал светофильтры и оптический делитель, то расстояние между приемником и источником оптического излучения стало больше. Соответственно рабочий диапазон мощности был увеличен до 360 мВт. Фотодиоды на входе и выходе блока регистрировали уровень мощности оптического сигнала, и с помощью мультиметра преобразованное выходное напряжение ОУ измерялось. Полученные данные были исследованы с помощью статистического анализа выбросов, в ходе которого было рассчитано среднее значение выборки, а также статистическое (стандартное) отклонение для обоих ФД. Для удобства измерений был рассчитан коэффициент поглощения α лазерного излучения водной средой. Предварительно для анализа было рассчитано среднее арифметическое значение выборки ($\bar{x}$).

Стандартное отклонение s выражается как:

$$s = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{x})^2}, \quad (10)$$

где x_i – каждое отдельное значение выборки;

$\tilde{x}$ – среднее арифметическое всех значений;

$x_i - \tilde{x}$ – отклонение каждого значения от среднего;

$(x_i - \tilde{x})^2$ – квадрат отклонения;

Σ – сумма всех квадратов отклонений;

n – общее количество значений в наборе данных.

Стандартное отклонение рассчитывалось по формуле (10) для трех выборок измерений α при разных уровнях мощности в диапазоне от 1 до 360 мВт, что позволило оценить степень разбросов значений коэффициента в рабочем диапазоне, а также оценить погрешность измерений фотоприемника. Так, при значении мощности в 200 мВт происходит отклонение значения α в меньшую сторону от среднего значения $\tilde{x}$, а при 270 мВт – в большую (рисунок 29).

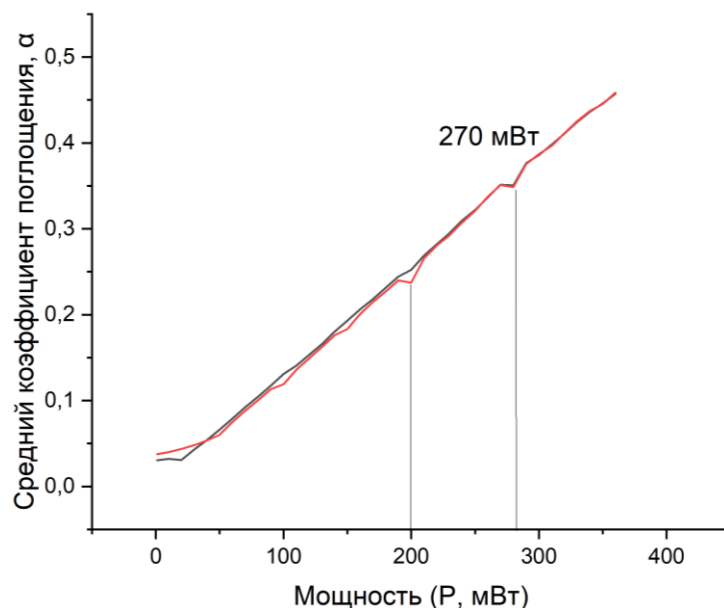


Рисунок 29 – Зависимость стандартного отклонения средних значений α от мощности лазера для ФД_{вх} (красный график) и ФД_{вых} (черный график)

Для выходного ФД при значениях мощности 200 и 300 мВт также происходят отклонения значения α в меньшую и в большую сторону от $\tilde{x}$, соответственно (рисунок 29). Расчет среднего

стандартного отклонения позволил определить, что степень разбросов у обоих графиков пренебрежимо мала.

$$D = s^2. \quad (11)$$

Чтобы количественно оценить уровень погрешности измерений, по формуле (11) было рассчитано среднее значение дисперсии (D_{cp}). Установлено, что средние значения коэффициента поглощения для входного и выходного фотодиодов составляют $2,38 \cdot 10^{-1}$ и $2,4 \cdot 10^{-1}$ соответственно, тогда как дисперсия этих данных равна $2,99 \cdot 10^{-5}$ и $4,85 \cdot 10^{-6}$ соответственно.

Полученные статистические данные подтверждают, что разброс значений коэффициента поглощения α в исследуемом диапазоне мощностей (от 1 до 360 мВт) является пренебрежимо малым по сравнению с самой измеряемой величиной, что свидетельствует о стабильности работы ФПУ. Таким образом, разработанная схема ФПУ обеспечивает достаточную точность измерений в заданном рабочем диапазоне ОУ.

Заключение

В процессе прохождения учебной технологической (проектно-технологической) практики была достигнута ее основная цель – закрепление знаний и практических навыков, полученных в ходе теоретического обучения, приобретение опыта решения реальных профессиональных задач и исследования актуальных научно-технических проблем, связанных с темой выпускной квалификационной работы.

В ходе практики были закреплены навыки научно-исследовательской деятельности, расчета электрических цепей, проектирования, компоновки и трассировки печатных плат. Освоены методы разработки и оформления конструкторской документации, чтения и составления электрических схем, работы в системах автоматизированного проектирования и средах программирования, а также поиска и анализа научно-технической литературы. Получен практический опыт проектирования и монтажа радиоэлектронных устройств, работы с контрольно-измерительным оборудованием, аппаратными средствами и оптическими приборами.

Результаты выполненной работы, принятые технические решения и итоги проведенных исследований представлены в пояснительной записке к проектной разработке.

Список использованных источников

1. ФГБУН ИАПУ ДВО РАН: [сайт]. – URL: <https://www.iacp.dvo.ru/> (дата обращения: 18.06.2026).
2. Коновалова Н.В., Могильникова Т.А. Токсичный фитопланктон и содержание биотоксинов в тканях гребешка // *Фундаментальные исследования*. – 2006. – № 9. – С. 100-103.
3. Лях А.М., Суворов А.М., Брянцева Ю.В. Обзор методов количественного учета фитопланктона // *Изд-во Морского Гидрофизического Института НАН Украины*. – 2001. – С. 425-430.
4. Zadereev E.S. et al. Comparison of Rapid Methods Used to Determine the Concentration, Size Structure and Species Composition of Algae // *J. Sib. Fed. Univ. Biol.* 2021. Vol. 14, № 1. P. 5-27.
5. Виноградов М.Е., Гительзон И.И., Левин Л.А. Современные методы количественной оценки распределения морского планктона. Москва: Наука, 1983. – 278 с.
6. Светочувствительные пигменты клетки: [сайт]. – URL: http://bono-esse.ru/blizzard/A/Cella/pigment_cell.html (дата обращения: 25.06.2026).
7. Ишанин Г.Г., Панков Э.Д. Источники и приемники излучения: Учебное пособие для студентов оптических специальностей вузов. СПб: Политехника, 1991. – 240 с.
8. Стабилизатор напряжения: [сайт]. – URL: https://ru.ruwiki.ru/wiki/Стабилизатор_напряжения (дата обращения: 28.06.2026).
9. Картер Б., Манчини Р. Операционные усилители для всех. – 2016. – 526 с.
10. Онлайн-калькулятор расчета ширины дорожки печатной платы: [сайт]. – URL: <https://voltiq.ru/services/> (дата обращения: 03.07.2026).
11. ГОСТ Р 53429-2009 «Платы печатные. Основные параметры конструкции» Национальный стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 ноября 2009 г. № 519-ст: введен впервые: дата введения 2009-11-07 / разработан ОАО «ЦНИТИ «Техномаш». – Москва: Стандартинформ, 2009. – 11 с.
12. Брусницына Л.А., Степановских Е.И. Технология изготовления печатных плат: учебное пособие. – 2015. – 200 с.
13. Пирогова Е.В. Проектирование и технология печатных плат: Учебник. Москва: ФОРУМ- ИНФРА-М .– 2005. – 560 с.