Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования**

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

На правах рукописи

**ТЕМА**

**Модуль питания лазерного диода для работы в оптических системах передачи СВЧ сигнала.**

Магистерская программа

11.04.01 - «Радиоэлектронные устройства передачи информации»

Диссертация на соискание академической степени магистр

Научный руководитель:

Кандидат технических наук

Томск - 2022

**Реферат**

Диссертационная работа состоит из: 97 страниц, 4 разделов, 66 рисунков, 7 таблиц, 56 источников, 5 приложений.

РАДИОФОТОНИКА, ТРАНСИМПЕДАНСНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ, ФОТОДИОД, ЛАЗЕРНЫЙ ДИОД, ИСТОЧНИК ТОКА, ПИД-РЕГУЛЯТОР

Объектом исследования и разработки является Модуль питания лазерного диода Цель работы –разработка и экспериментальное исследование радиофотонного тракта, частью которого является модуль питания.

Перед началом работы был проведён анализ научно-технической литературы, разработан план проектирования микроэлектронных устройств (трансимпедансного усилителя и оптического приёмника в целом).

Для проектирования и электромагнитного анализа приёмника использовался САПР Keysight Advanced Design System (ADS), а также, Cadence для разработки топологии монолитных интегральных схем и дальнейшего анализа. Измерения проводились в 314 отделе ТУСУР СБИ «ЛИКС» (г. Томск). Пояснительная записка оформлена с помощью Microsoft Word 2016. Все рисунки выполнены в Microsoft Visio 2016.

В результате исследований были разработаны и изготовлены микроэлектронные устройства для радиофотонного приёмного тракта, такие как: 1) трансимпедансный усилитель (ТИУ); 2) однокристальный интегральный оптический приёмник. В ходе проектирования был разработан и зарегистрирован ЭКД, получено свидетельство о регистрации топологии ИС для усилителя трансимпеданса.

**Abstract**

Master’s work consist of: 97 pages, 4 sections, 66 pictures, 7 tables, 56 sources, 5 applications.

RADIOPHOTONICS-BASED RADIOLOCATION, TRANSIMPEDANCE AMPLIFIER, PHOTODIODE, TRANSIVER MODULE (TM), MONOLITHIC INTEGRATED CIRCUIT (MIC), SIGE TECHNOLOGY, INTEGRATED OPTICAL RECEIVER, TRANSIMPEDANCE, OPTICAL SIGNAL, REFLECTION COEFFICIENT, OPERATION AMPLIFIER.

The object of research and development is low power single-chip integrated optical receiver for promising interspecific complexes of location, navigation and communication with multichannel phased antenna arrays, based on SiGe BiCMOS technology.

The main goal of this work – modeling, development and experimental research of integrated optical receiver and his main separate parts, one of is transimpedance amplifier.

In the beginning of the work was performed analyze scientific and technical literature, developed plan of designing microelectronic devices (transimpedance amplifier and optical receiver as a whole).

For the design of the PA and electromagnetic analyze, the Keysight Advanced Design System (ADS) was used, and Cadence was used to design the topology of monolithic integrated circuits. The measurements, were taken in 314 department of «LICS», SBI, TUSUR (Tomsk). The explanatory note was prepared using Microsoft Word 2016. All pictures, were performed using Microsoft Visio 2016.

In the process of researches, were developed the microelectronic devices: 1) transimpedance amplifier 2) single-chip integrated optical receiver. During the designing, the electronic design documents was developed and registered, and certificate of registration of the IP topology for the transimpedance amplifier was obtained.

Оглавление

[1 Введение 5](#_Toc102906338)

[2 ТЕОРИЯ 7](#_Toc102906339)

[2.1 Волоконно-оптическая система передачи 7](#_Toc102906340)

[2.2 Полупроводниковые лазеры 8](#_Toc102906341)

[2.3 Влияние температуры 9](#_Toc102906342)

[3 Обзор существующих решений 12](#_Toc102906343)

[4 Разработка устройства 13](#_Toc102906344)

[4.1 Разработка структурной схемы 13](#_Toc102906345)

[4.2 Определение требований к проектируемому устройству. 14](#_Toc102906346)

[4.3 Разработка принципиальной схемы 17](#_Toc102906347)

[4.4 Разработка схемы стабилизации тока. 17](#_Toc102906348)

[4.5 Разработка схемы измерения тока фотодиода. 20](#_Toc102906349)

[4.6 Разработка схемы управления. 21](#_Toc102906350)

[4.7 Разработка общей схемы 22](#_Toc102906351)

[4.8 Трассировка печатной платы 23](#_Toc102906352)

[5 Тестирование схемотехнического решения 25](#_Toc102906353)

[6 Разработка программного обеспечения для микроконтроллера 30](#_Toc102906354)

[6.1 ПИД регулятор 32](#_Toc102906355)

[6.2 Вычисления с фиксированной точкой 33](#_Toc102906356)

[6.3 Протокол 34](#_Toc102906357)

[7 Разработка программного обеспечения для ПК 36](#_Toc102906358)

[8 Тестирование устройства в радиофотоном тракте 38](#_Toc102906359)

# Введение

В настоящее время активно развиваются технологии передачи информации на основе волоконно-оптических систем передачи (ВОСП). Основное преимущество систем ВОСП перед прочей электроникой связано со свойствами оптического волокна, а именно:

1. Низкие потери (менее 0.4 дБ/км) и дисперсия (для СВЧ-сигнала)
2. Сверхширокополосность (ограничена полосой частот современных фотодиодов и электрооптических модуляторов, которая достигает 100 ГГц и выше),
3. Невосприимчивость к электромагнитным помехам
4. Полная гальваническая развязка
5. Механическая гибкость
6. Масса и габариты
7. Срок эксплуатации (больше 25 лет)
8. Рабочие температуры
9. Сигнал может быть передан без регенерации на большие расстояния
10. Оптические системы обеспечивают большее количество каналов чем физические цепи

Применение технологий радиофотоники:

1. Передача с минимальными потерями сигналов спутниковой связи
2. Распределение сигналов на удаленные антенны
3. Линии передачи СВЧ-сигналов внутри крупных объектов
4. Системы радиоэлектронной борьбы (РЭБ)
5. Оптические линии задержки и обработки сигналов
6. Системы калибровки радаров и РЛС
7. Фазированные антенные решетки (ФАР)
8. Широкополосные телекоммуникации

Ключевым элементом любой волоконно-оптической системы передачи информации или ВОД является оптический (чаще всего лазерный) источник излучения. От стабильности его характеристик зависит качество и эффективность ВОСП.

Лазерные модули, представленные на рынке в настоящее время, состоят не только из лазерного диода, но и фотодиода для контроля и поддержания оптической мощности.

Целью данной работы является разработка программируемого источника питания, с двумя режимами работы: поддержание тока, и поддержание оптической мощности, а также с возможность мониторинга и управления параметрами с ПК.

Задачами данной работы являются разработка структурной схемы устройства, разработка принципиальной схемы, разработка алгоритмов и написание программного обеспечения.

# ТЕОРИЯ

## Волоконно-оптическая система передачи

Блок-схема системы для волоконно-оптической линии связи показана на рисунке 2.1. Она состоит из оптического передатчика (Optical Transmitter), оптического приемника (Optical Receiver), оптической среды передачи (Optical Medium). Оптический передатчик состоит из лазерного диода (LD), модуля питания (Driver), и оптического модулятора (Modulator). Модуль питания формирует постоянное смещение, для формирования излучения, будет замодулированно СВЧ-сигналом (RF). Модулированный оптический сигнал распространяется через оптическую среду, в которую обычно входит оптическое волокно, свободное пространство или волновод. Оптический приемник использует фотодетектор для преобразования оптического сигнала в электрический сигнал и усиливает его.

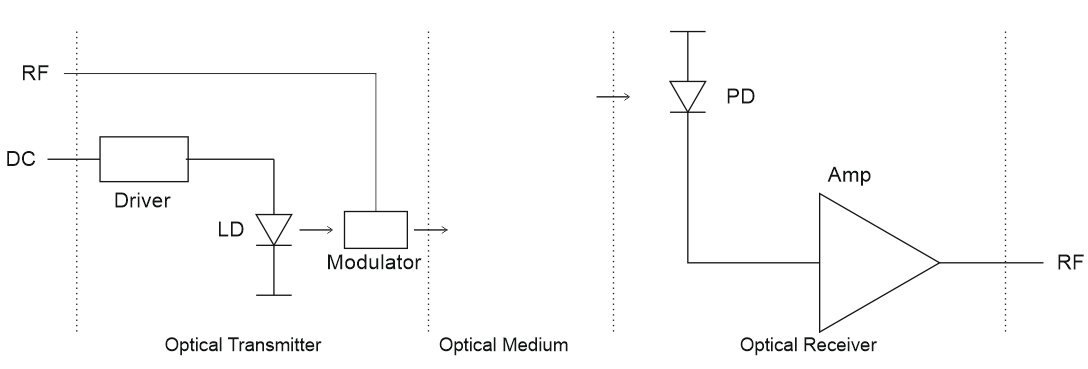


Рисунок 2.1 - Блок-схема системы для оптоэлектронных линий связи

Топология системы, показанная на рисунке 2.1, мало изменилась за последние несколько десятилетий, строение блоков и уровни интеграции изменились. Движимые развитием и доступностью технологий интегральных схем, а также спросом на более высокую производительность, эти изменения привели к появлению новых компонентов. более высокой производительности.

## Полупроводниковые лазеры

Основными оптическими источниками в системах связи являются светоизлучающие диоды (LED) или полупроводниковые лазеры. Преимущества лазера по сравнению со светодиодом, такие как его размеры, спектральная область работы, высокая эффективность и высокая скорость работы, привели к значительным улучшениям в высокоскоростных оптических системах связи. На ранних этапах разработки полупроводниковых лазеров наметилась тенденция к оптимизации лазерных структур для улучшения характеристик статической облучения в отношении порогового тока, квантовой эффективности, линейности света по отношению к характеристикам тока, работы при высокой оптической мощности и долговременной надежности. На рисунке 2.2 показана зависимость выходной мощности полупроводникового лазера и светодиода.

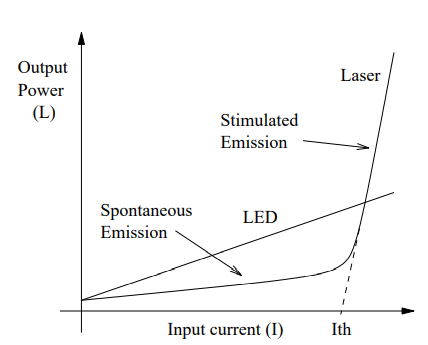


Рисунок 2.2 – Зависимость оптической мощности от входного тока

Если ток меньше порогового значения, Ith, оптическая мощность лазера мала. Когда ток увеличивается выше порогового значения, стимулированное излучение становится доминирующим и лазер начинает работать в линейной области с высокой эффективностью наклона (dL/dI) по сравнению со светодиодом.

## Влияние температуры

Сохранение постоянной оптической мощности лазера, невозможно, если температура устройства изменяется. Зависимость порогового тока генерации *Ith* лазера от температуры, можно описать выражением:

(2.1)

где *I0, K1, Ti* – постоянные для лазеров различных технологии. Например, для DFB лазеров: *I0 =* 1.8мА, *K1=* 3.85мА*, Ti=*40oC.

Влияние температуры на полупроводниковый лазер показано на рисунке 2.3.

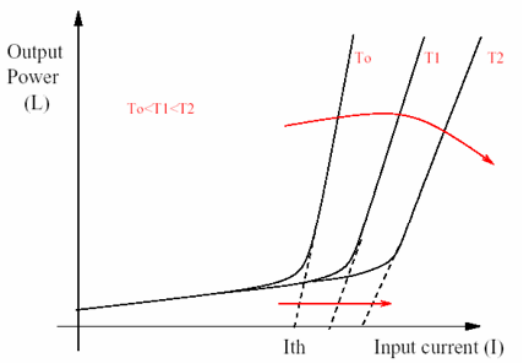


Рисунок 2.3 – Влияние температуры на выходную мощность лазера.

При подаче постоянного тока, выходная оптическая мощность лазера изменяется в процессе работы от изменения температуры кристалла, на рисунке 2.4 представлена зависимость выходной оптической мощности DFB лазера, от входного тока, при различных температурах. При нагреве лазерного диода в следствие длительной работы, при изменении температуры с 250 до 40 оптическая мощность изменяется на 1 мВт, а с 25 до 60 на 5 мВт.

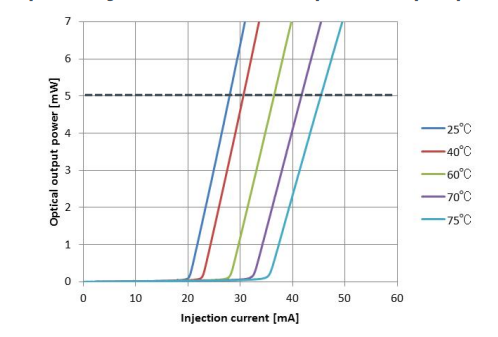


Рисунок 2.4 – Влияние температуры на выходную мощность DFB лазера.

Для компенсации изменения выходной мощности от изменения температуры, лазерные диоды оснащают фотодиодом, для измерения выходной мощности в процессе работы. Выходной ток фотодиода практически не изменяется от изменения температуры, что позволяет использовать в качестве обратной связи в контуре регулирования мощности. На рисунке 2.5 представлена зависимость выходного тока фотодиода от оптической мощности лазерного диода при различных температурах.

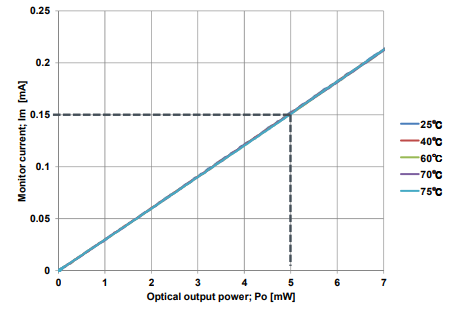


Рисунок 2.5 – Влияние температуры на ток фотодиода.

# Обзор существующих решений

Существует два основных принципа управления питанием лазерных диодов: стабилизация потребляемого тока или стабилизация оптической мощности лазера.

В настоящее время, на рынке представлены следующие решения: Thorlabs MLD203P1, представленная на рисунке 3.

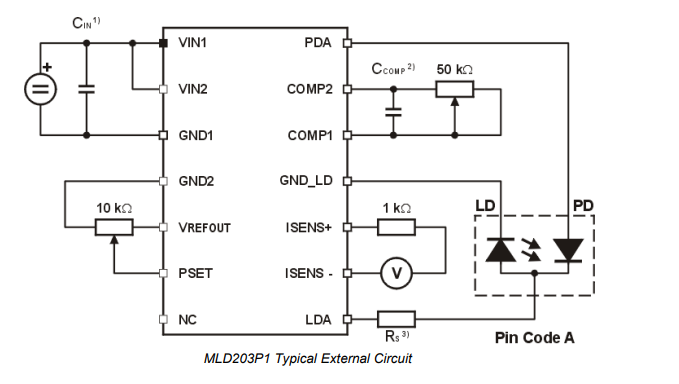


Рисунок 3.1 –

MLD203P1 - высоко-интегрированный, высокоточный драйвер лазерного диода, имеющей небольшие размеры, плавный пуск и зашиту от скачков тока. Данный драйвер обеспечивает ток до 200мА при максимальном напряжении 3В и работает только в режиме стабилизации оптической мощности. Выходная мощность лазера может быть как фиксированная так и регулируемая с помощью потенциометра. Главный минус данного драйвера – отсутствие цифрового интерфейса для считывания параметров работы в реальном времени, а также сложность установки выходной мощности.

Следующее решение, представленное на рынке – микросхема драйвера лазерного диода IC-WKN. Данный модуль обеспечивает работу в непрерывном режиме до 350 мА от одного источника питания от 3,6 до 15 В; плавный пуск после включения питания; регулировка мощности с помощью внешнего резистора, работа в режиме стабилизации мощности. Основным недостатком данного модуля это способ установки выходной мощности через внешнее сопротивление, что делает данный модуль не подходящим решением для настройки и отладки ВОСП, при применении различных лазерных модулей.

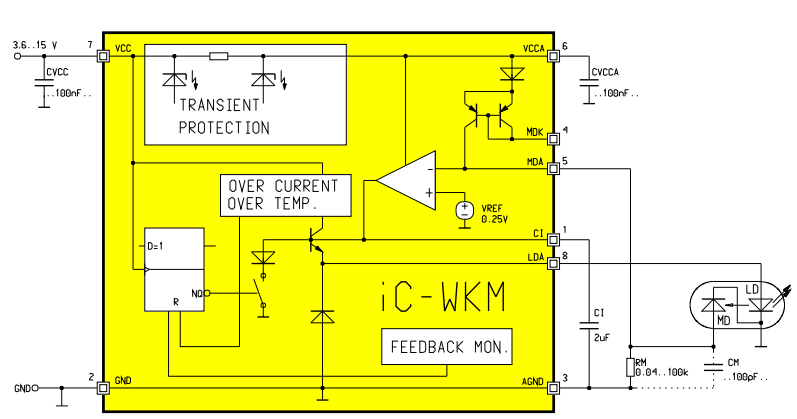


Рисунок 4 – iC-WKM

# Разработка устройства

## Разработка структурной схемы

На основе анализа существующих решений и технического задания, была разработана структурная схема устройства, представленная на рисунке 4.1.

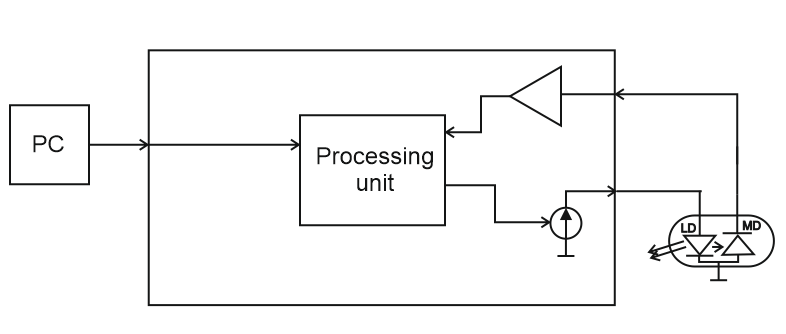


Рисунок 4.1 – Структурная схема устройства

Структурная схема состоит из: управляемого источника тока, усилителя сигнала с датчика оптической мощности и устройства управления, которое обеспечивает управление источником тока, анализом сигнала с датчика мощности, приемом команд с персонального компьютера.

## Определение требований к проектируемому устройству.

Устройство питания лазерного диода, должно обеспечивать два режима: стабилизацию выходного тока и стабилизацию выходной мощности.

Пределы выходного тока, были определены на основе вольт-амперной характеристики DFB лазерного диода, на основе InP, представленных на рисунке 4.2, проектируемый источник питания должен обеспечивать стабилизацию тока в диапазоне от 1 до 200 мА и стабилизацию оптической мощности до 15 мВ.

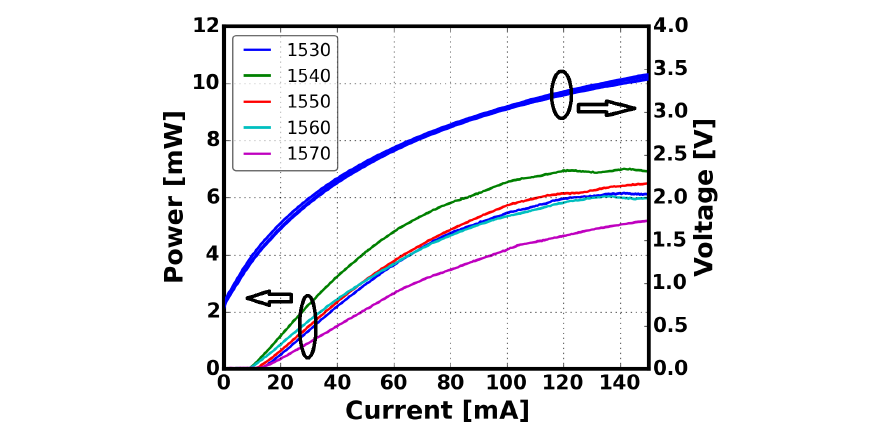


Рисунок 4.2 – Вольт-амперная характеристика лазерного диода

Для проведения экспериментов, требуется обеспечить программное управление с возможностью выбора режима стабилизации, определение уставки по току и по мощности, определение параметров плавного старта диода, мониторинг выходного тока и оптической мощности в реальном времени.

В качестве датчика оптической мощности будет использован PIN-фотодиод, характеристики которого представлены на рисунке 4.3. Чувствительность данного фотодиода составляет 0.8 А/Вт, что при оптической мощности 15 мВт, обеспечит выходной ток 12мА, без дополнительного смещения фотодиода.

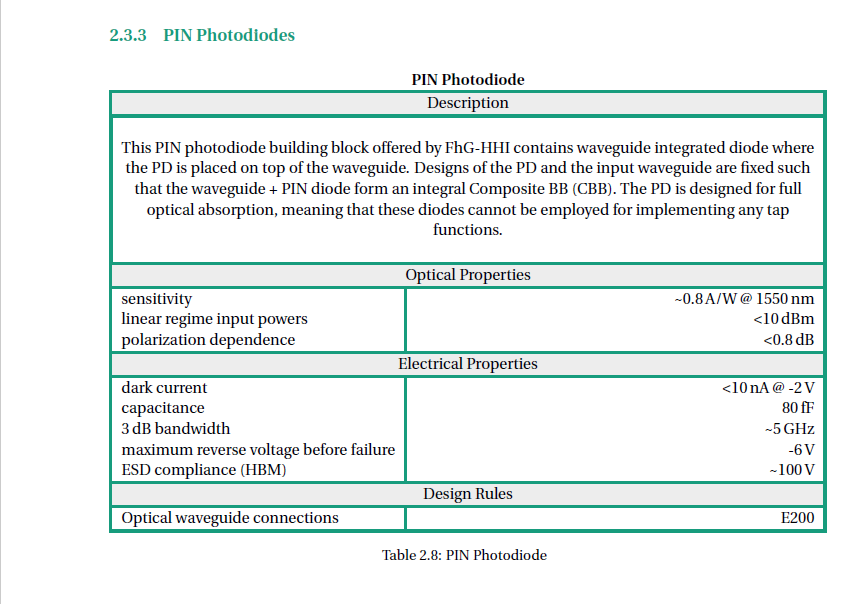


Рисунок 4.3 – Характеристики фотодиода

Необходимо предусмотреть возможность подключения модулей, объединяющих лазерный и фотодиод в одном корпусе. В таких модулях, чаще всего, анод лазерного диода и катод фотодиода подключаются к общему проводу. Поэтому источник тока необходимо проектировать с учетом того, что нагрузка подключается одним выводом к общему проводу.

## Разработка принципиальной схемы

Источник питания лазерного диода, можно разбить на следующие устройства: устройство стабилизации тока, включающее в себя источник тока, и схему измерения тока; устройство измерения тока лазерного диода; устройство управления и связи с ПК.

## Разработка схемы стабилизации тока.

На основе требований, представленных в пункте 2, были рассмотрены следующие схемы источников токов.

Источник тока на основе полевого транзистора, схема которого представлена на рисунке 3.1. В качестве элемента регулирования тока, выступает полевой транзистор, на затвор которого подается управляющее напряжение. Измерение выходного тока происходит с шунта R1, и дифференциального усилителя U1. Данная схема имеет ряд недостатков: стабилизация тока в данном режиме, полностью будет происходить на устройстве управления: установка опорного напряжения V\_ref, и отслеживание выходного тока, что будет накладывать определенные требования к быстродействию ЦАП и АЦП устройства управления.

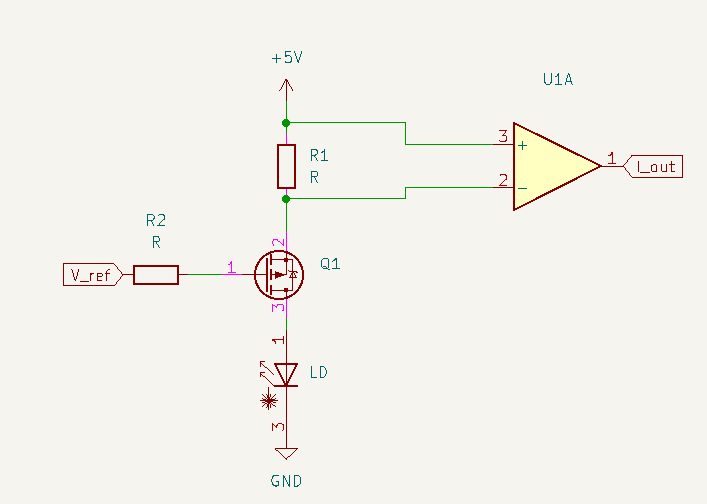


Рисунок 3.1 – Схема стабилизации тока

Следующая рассмотренная схема, представляет собой источник тока на полевом транзисторе, с операционным усилителем, охваченным отрицательной обратной связью. В данной схеме, за стабилизацию тока, отвечает операционный усилитель, а не устройство управление, это позволит упростить разработку программного обеспечения и снизить требования к устройству управления. Выходной ток данного стабилизатор определяется выражением: *I=* (5В – *V\_ref)/R1*

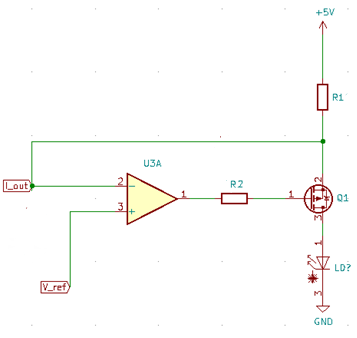


Рисунок 3.2 – Стабилизатор тока с операционным усилителем.

Для реализации данного решения был выбран полевой транзистор IRLML6402, характеристики которого представлены на рисунке 3.3. Данный транзистор имеет низкое сопротивление канала, низкое пороговое напряжение открытия, а также транзистор выполнен в маленьком корпусе SOT-23.

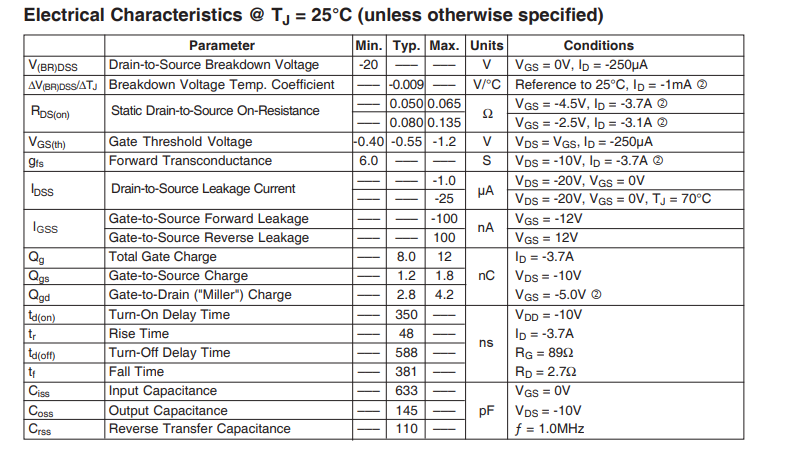


Рисунок 3.3 – Характеристики транзистора IRLML6402

В качестве операционного усилителя была выбрана микросхема MCP6002, характеристики которого представлены на рисунке 3.4.

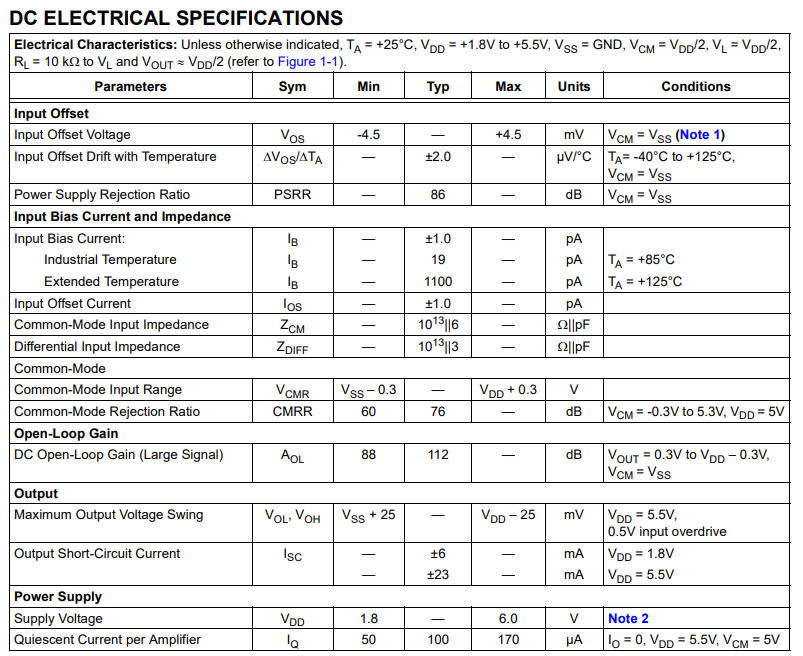
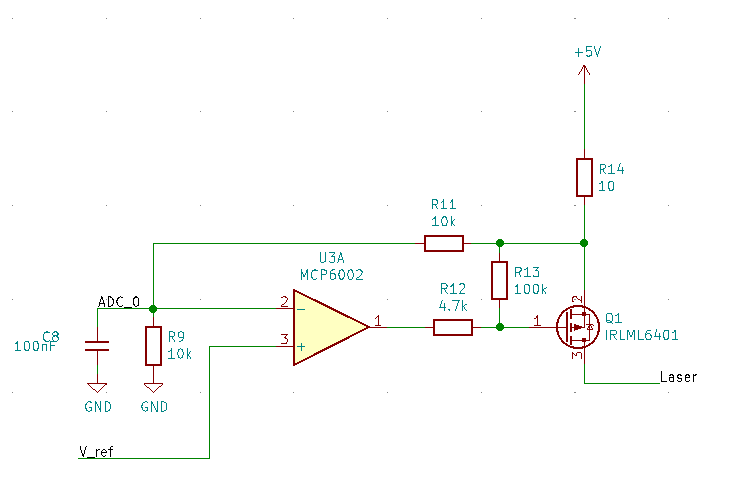


Рисунок 3.4 – Характеристики операционного усилителя MCP6002

Данный операционный усилитель может работать от однополярного источника питания, с напряжением от 1.8В до 6В. Выходы Rali-to-Rail, что обозначает, что напряжение на выходе может достигать напряжение питания. Итоговая схема стабилизатора тока представлена на рисунке 3.5.

  
Рисунок 3.5 – Схема стабилизатора тока

В данную схему был добавлен делитель напряжения, состоящий из резисторов R11 и R9. Выходной ток данной схемы определяется выражением *I=* (5В – 2*V\_ref)/R14.* Напряжение, для оцифровки текущего значения тока, будет измеряться с инвертирующего входа операционного усилителя, и определятся выражением *UADC=(5В-R14‧I)/2.*

## Разработка схемы измерения тока фотодиода.

Для измерения тока фотодиода, необходимо реализовать трансимпедансный усилитель. Данная схема преобразует малый входной ток, в выходное напряжение, которое в дальнейшем можно оцифровать при помощи АЦП. Схема трансимпедансного усилителя, приведена на рисунке 3.6.

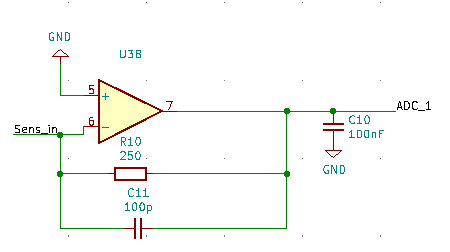


Рисунок 3.6 – Схема трансимпедансного усилителя

Схема, изображенная на рисунке 3.6, представляет собой преобразователь тока в напряжение, и обладает низким выходным сопротивлением. Выходное напряжение определяется выражением: *Uout=-Iphoto‧R10.* Таким образом, при максимальном значении тока в 12мА, выходное напряжение данного каскада составляет 3В.

## Разработка схемы управления.

В качестве основного управляющего узла будет выступать микроконтроллер, который должен выполнять следующие функции:

задание опорного напряжения для источника тока

измерение выходного тока

измерение тока фотодиода

стабилизация оптической мощности, на основе тока фотодиода

связь с ПК для настройки и мониторинга выходных параметров.

К микроконтроллеру выдвигаются следующие требования:

наличие аппаратных интерфейсов UART и I2C для связи с ПК

наличие встроенного АЦП, для оцифровки напряжений

возможность использовать свободно-распространяемые средства разработки и отладки, для задания опорного напряжение может быть использован или ШИМ. ЦАП

В качестве микроконтроллера был выбран STM32F030F4P6, в корпусе TSSOP20, представленного на рисунке 3.7. Данный микроконтроллер обладает интерфейсами UART, I2C, встроенным 12 разрядным многоканальным АЦП, несколькими аппаратными 32х разрядными таймерами, для генерации ШИМ.

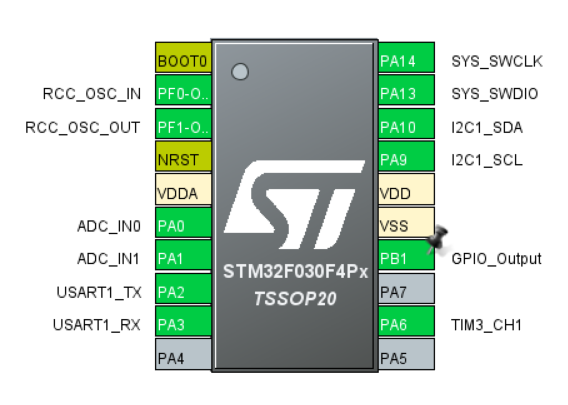


Рисунок 3.7 – Микроконтроллер STM32F030F4P.

Для реализации управляющего напряжения, был использован RC фильтра, который преобразовывает ШИМ в постоянное напряжение. RC-цепь представлена на рисунке 3.8

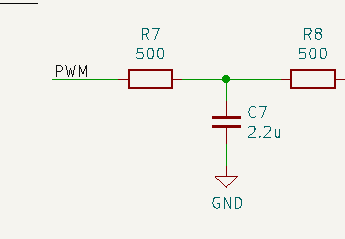


Рисунок 3.7 – RC-фильтр

## Разработка общей схемы

Общая схема, представленная на рисунке 3.8, включает в себя:

* трансимпедансный усилитель
* стабилизатор тока
* стабилизатор напряжения питания, для питания микроконтроллера
* микроконтроллер
* разъем для программирования и отладки
* выходы UART, I2C и разъем подключения лазерного модуля.

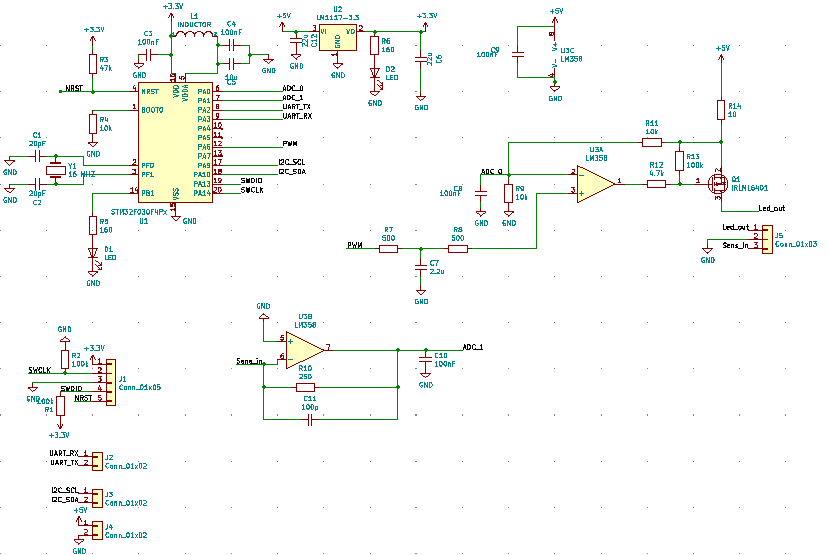


Рисунок 3.8 – Общая схема устройства

## Трассировка печатной платы

Для сборки и тестирования устройства, была разработана однослойная печатная плата, представленная на рисунке 4.1

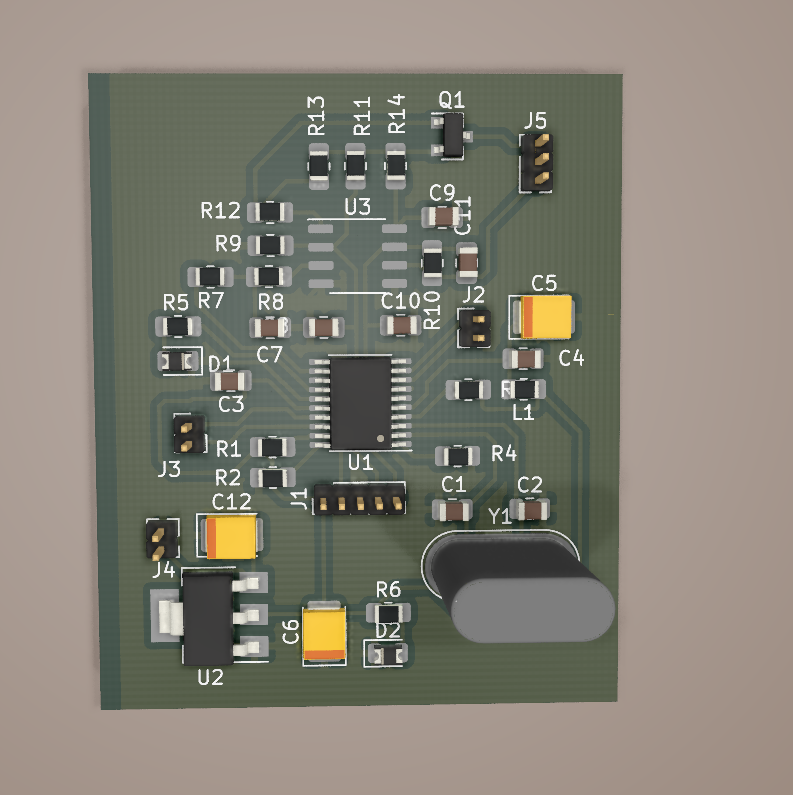


Рисунок 3.9 – Печатная плата устройства

Размеры устройства составляют: длина 45мм., ширина 35мм. Для уменьшения размеров можно разработать многослойную печатную плату, что уменьшит размеры, но сделает невозможным изготовление без применения специализированного оборудования.

# Тестирование схемотехнического решения

В процессе тестирования устройства были обнаружены следующие недостатки схемотехнических решений.

При включении питания, полевой транзистор был открыт, и в нагрузку отдавался максимальный ток, так как управляющее напряжение не успевало принять требуемое значение, и операционный усилитель не закрывал транзистор.



Рисунок 4.1 – Осциллограмма процесса включения, зеленый – управляющее напряжение, фиолетовый – напряжение на нагрузке

Для решения данной проблемы в схему был добавлен полевой транзистор, затвор которого был подключен к микроконтроллеру, и подтянут к питанию, таким образом, в момент подачи питания, полевой транзистор был закрыт, а момент открытие транзистора может быть настроен в ПО микроконтроллера. Для минимизации потерь, был выбран транзистор с низким сопротивлением открытого канала. Модифицированная схема источника тока представлена на рисунке 4.2.

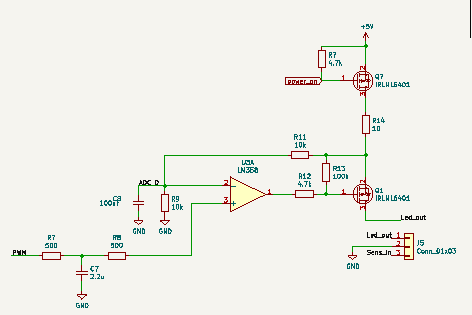


Рисунок 4.2 – Модифицированная схема

В результате модификации схемы, открытие выхода происходит только через 100мс после подачи питания, результат представлен на рисунке 4.3.



Рисунок 4.3 - Осциллограмма процесса включения, зеленый – напряжение питания, фиолетовый – напряжение на нагрузке

Следующая проблема – высокий уровень пульсаций напряжения на нагрузке, который был вызван пульсациями управляющего напряжения источника тока, уровень пульсация составлял 300мВ на нагрузке 25Ом, осциллограмма которых представлена на рисунке 4.4.



Рисунок 4.4 – Осциллограмма напряжения на нагрузке

В схему был добавлен конденсатор, на вход операционного усилителя, модифицированная схема представлена на рисунке \*. После добавления конденсатора, уровень пульсация составил 3мВ на нагрузке 25Ом, осциллограмма представлена на рисунке 4.5

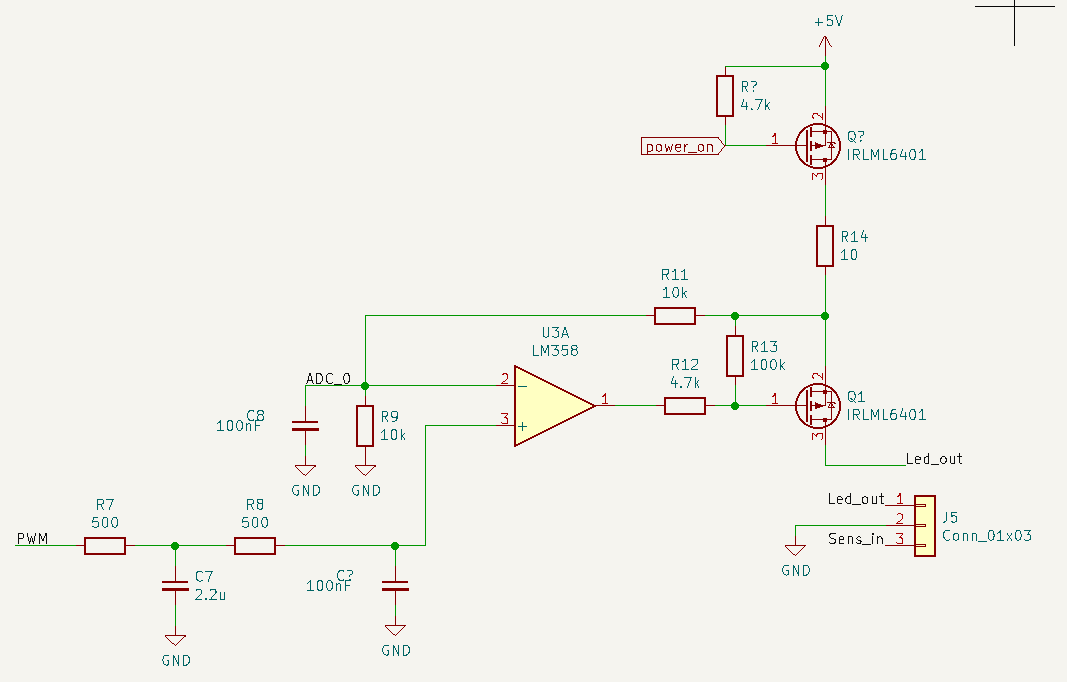


Рисунок 4.6 - Схема с добавление конденсатора

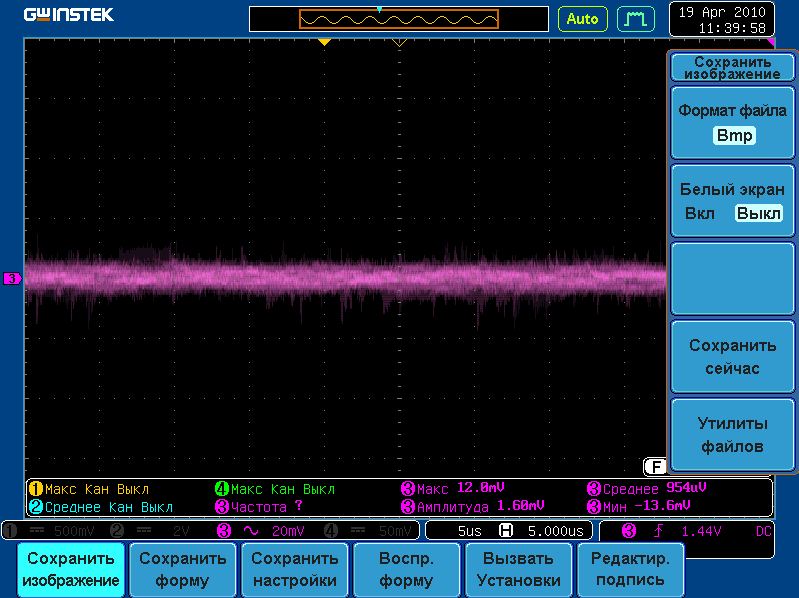


Рисунок 4.6 – Осциллограмма напряжения на нагрузке после добавления конденсатора

В таблице представлено результаты тестирования устройства, при различных значениях уставки на ток. Исследование проводилось на нагрузке 25Ом.

Таблица \* ПЕРЕСНЯТЬ

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Задание на ток | Реальный ток | Измеренный ток АЦП | Погрешность задания тока % | Погрешность измерения тока % |
| 1,00 | 2,00 | 3,00 | 50,00 | -50,00 |
| 5,00 | 6,40 | 7,00 | 21,88 | -9,37 |
| 10,00 | 10,0 | 11,00 | 0,00 | -10,00 |
| 15,00 | 15,60 | 17,00 | 3,85 | -8,97 |
| 20,00 | 19,20 | 21,00 | -4,17 | -9,38 |
| 30,00 | 28,40 | 31,00 | -5,63 | -9,15 |
| 40,00 | 38,40 | 41,00 | -4,17 | -6,77 |
| 60,00 | 59,40 | 59,00 | -1,01 | 0,67 |
| 80,00 | 78,30 | 80,00 | -2,17 | -2,17 |
| 100,00 | 98,40 | 98,00 | -1,63 | 0,41 |
| 120,00 | 117,60 | 116,00 | -2,04 | 1,36 |

Было проедено тестирование устройства питания, с различными сопротивлениями нагрузки. Результаты тестирования представлены на рисунке 4.7.

Рисунок 4.7 – Вольт-амперная характеристика устройства

# Разработка программного обеспечения для микроконтроллера

Для работы устройства требуется реализовать соответствующее встраиваемое программное обеспечение, которое должно сконфигурировать внутренние узлы микроконтроллера, выполнять измерение и расчет выходного тока и тока фотодиода.

Для экономии места, для тактирования микроконтроллера, было решено отказаться от установки внешнего кварца. Тактирование осуществлялось со внутреннего генератора, частота работы ядра составила 32МГц.

Интерфейс UART, используемый для связи с ПК, был настроен на скорость 9600 бод, и использованием прерывания на прием.

Таймер, используемый для генерирования ШИМ, был настроен на частоту 10КГц, что позволяло изменять скважность от 0 % до 100% с шагом 0,03%, это позволяло изменять ток с шагом в 0,2 мА.

АЦП был настроен в режиме DMA. В данном режиме, контроллер DMA, автоматически считывает данные из регистра АЦП, и перемещает их в указанную ячейку памяти, после чего запускает новое преобразование. По окончанию измерения указанных каналов, контроллер DMA генерирует прерывание об окончании преобразования.

Алгоритм работы программы, представлен на рисунке 5.1

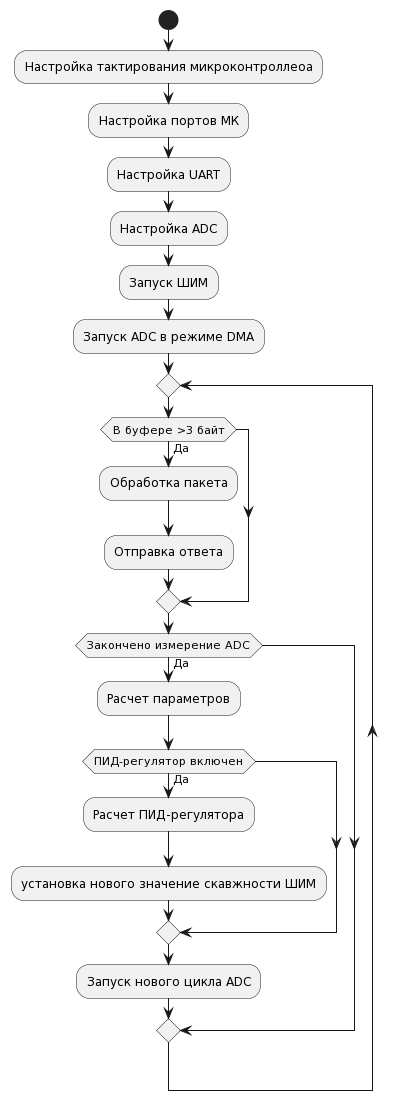


Рисунок 5.1 - Алгоритм работы программы

## ПИД регулятор

Для регулирования выходного тока с учетом тока фотодиода, в качестве обратной связи, был реализован пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор.

Пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД) – автоматического алгоритм поддержания в заданном интервале одной или нескольких величин. Такие алгоритмы универсальны, при помощи ПИД-регуляторов реализуются различные законы регулирования.

Алгоритм учитывает фактическую величину, заданное значение или уставку, разность значений и скорость изменения контролируемых характеристик. ПИД регулятор позволяет быстро возвращать регулируемый параметр в допустимый интервал, точно удерживать величину и быстро реагировать на возмущающие воздействия, блок схема алгоритма ПИД регулятора представлена на рисунке \*

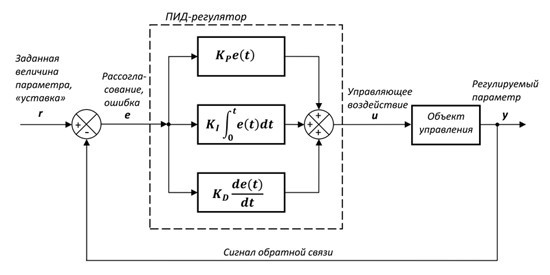


Рисунок \* - Алгоритм ПИД регулятора

Выход ПИД регулятора, или управляющее воздействие, складывается из суммы трех составляющих регулятора: пропорциональной, интегральной и дифференциальной. Разность между сигналом обратной связи и заданной величиной называют ошибкой регулирования. Пропорциональная составляющая формируется из ошибки регулирования, умноженной на пропорциональный коэффициент регулятора *Kп.* Регуляторы, которые используют только пропорциональную составляющею, называются П-регуляторами, и имеют ограниченную точность, и постоянную статическую ошибку регулирования. Для устранения данной ошибки вводится интегральная составляющая, которая пропорциональна интегралу ошибки регулирования по времени и интегрального коэффициента регулятора *Ки*. Интегральная составляющая, накапливает статическую ошибку, и вносит соответствующий вклад в управляющий сигнал. Регуляторы использующие пропорциональную и интегральную составляющие называется ПИ-регуляторами. Такие регуляторы имеют низкое быстродействие, так как при высоком значении интегрального коэффициента объект регулирование не будет успевать за изменением управляющего воздействие и система перейдет в колебательный режим. Для увеличения быстродействия системы вводится дифференциальная составляющая, которая пропорциональна скорости изменения ошибки регулирования и дифференциального коэффициента регулятора Kд.

## Вычисления с фиксированной точкой

Число с фиксированной точкой — формат представления вещественного числа в памяти ЭВМ в виде целого числа. В котором целой и вещественной части отводится фиксированное количество разрядов. Вычисления с использование фиксированной точкой перед плавающей имеют следующие преимущества:

а Скорость вычисления, особенно на платформах без аппаратного вычислителя с плавающей точкой.

б Алгоритмически контролируемый диапазон значений переменных.

в Возможность контролировать сложность вычислений путем понижения точности при разработке алгоритма.

г Переносимость алгоритмов.

Так как в выбранном контроллере отсутствует математический модуль операций с плавающей запятой, было принято решение использовать вычисления с фиксированной точкой.

Числа с фиксированной точкой обозначаются нотацией Qm.n, определенная Texas Instruments, состоит из буквы Q, за которой следует пара чисел m и n, где m - количество бит, используемых для целой части значения, а n - количество бит для записи дробной части и один бит для записи знака числа.

Например, спецификация Q3.12 описывает знаковое число с фиксированной точкой с 16 битами в целом, включающими бит знака, три бита для целой части и 12 битов, которые описывают дробную часть.

В частности, когда n равно нулю, числа являются просто целыми числами. Если m равно нулю, все биты, кроме бита знака, являются дробными битами; тогда диапазон хранимого числа составляет от -1.0 (включительно) до +1 (не включительно). Для обозначения беззнакового двоичного формата с фиксированной точкой к Q может быть приписана буква U.

Разрешение (разница между двумя последовательными значениями) формата Qm.n или UQm.n всегда равно 2-n. Диапазон представляемых значений зависит от используемой нотации: Например, число формата Q14.1 требует 16 бит, имеет разрешение 2-1 = 0,5, а представляемые значения находятся в диапазоне от -214 = -16384,0 до +214 - 2-1 = +16383,5.

В данном проекте для представления вещественных чисел используется формат представления числа формата Q15.16. Таким образом, для целой части используется 15 бит, для дробной – 16 бит. Разрешение составляет 2-160,0000152.

## Протокол

Для общения с ПК по последовательной шине UART, был реализован протокол общения, каждый пакет состоял из трех байт: номер команды, младший байт аргумента, старший байт аргумента. Описание протокола представлено в таблице \*

Таблица \* - Описание протокола

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Описание команды | Название команды | Номер команды | Аргумент |
| Команда проверки связи | Init | 1 | Всегда 1 |
| Получение значения 1 канала АЦП | GET\_ADC\_1 | 2 | Значение 1 канала АЦП в мВ |
| Получение значения 2 канала АЦП | GET\_ADC\_2 | 3 | Значение 2 канала АЦП в мВ |
| Получение скважности | GET\_PWM\_C | 4 | Скважность ШИМ |
| Получение измеренного тока | GET\_CURRENT | 5 | Ток в мА |
| Установка тока | SET\_CURRENT | 6 | Ток в мА |
| Установка уставки ПИД | SET\_PID\_POINT | 7 | Ток фотодиода в мкА\*10 |
| Получить уставку ПИД | GET\_PID\_POINT | 8 | Ток фотодиода в мкА\*10 |
|  | GET\_PID\_ERROR | 9 | Ошибка регулирования |
| Получить выход ПИД | GET\_PID\_OUTPUT | 10 | Выход ПИД регулятора |
| Установить Кп | SET\_KP | 11 | Пропроциональный коэффициент ПИД |
| Установить Кд | SET\_KD | 12 | Дифференциальный коэффициент ПИД |
| Установить Ки | SET\_KI | 13 | Интегральный коэффициент ПИД |
| Включить/Выключить ПИД регулятор | SET\_PID\_ENABLE | 14 | Разрешение работы регулятора. 1 – Пид регулятор работает, 0 – не рабоатет. |

# Разработка программного обеспечения для ПК

Для тестирования, отладки и использование драйвера было реализовано прикладное программное обеспечение, которое позволят отправлять команда на драйвер с ПК, а также визуализировать значения.

Разработанное ПО имеет две вкладки. Первая вкладка, представленная на рисунке 6.1 – позволяет подключится к устройству и отправлять команды. На данной вкладке отображаются принятые и отправленные команды

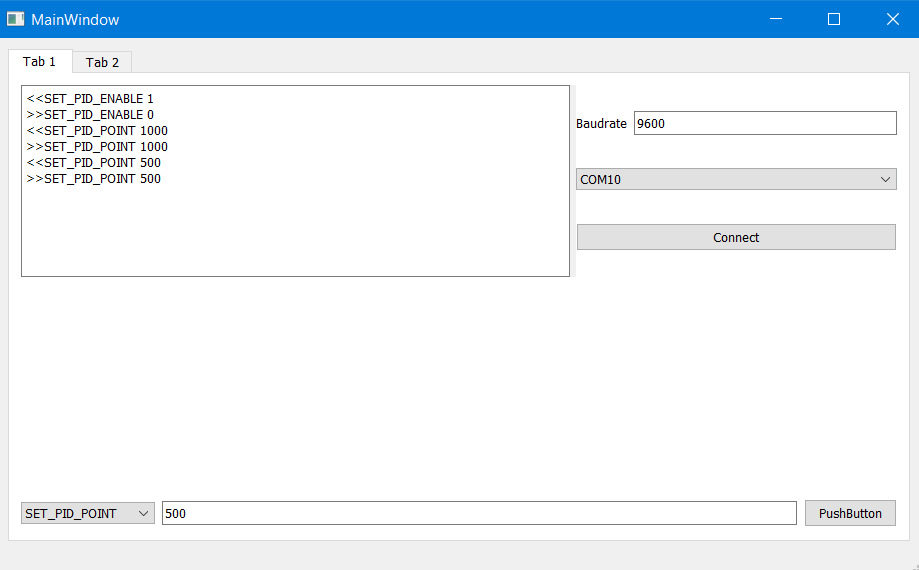


Рисунок 6.1 – Окно управления устройством

Вторая вкладка позволяет циклически отправлять команды и визуализировать возвращаемое значение на графике. Скриншот окна построения графика представлена на рисунке 6.2

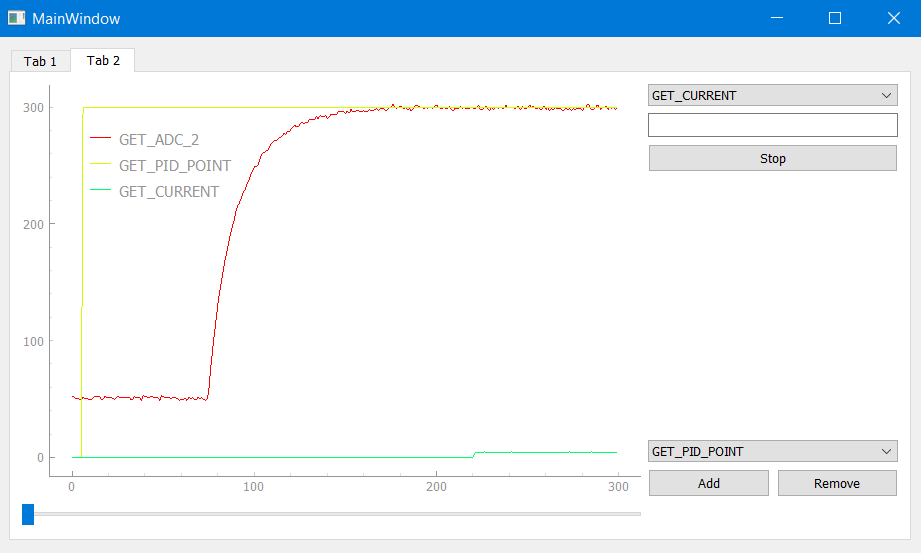


Рисунок 6.2 – Окно управления устройством

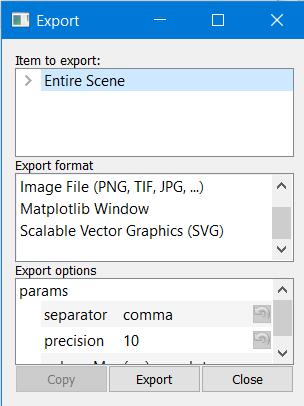


Рисунок 6.3 – Окно экспорта данных

# Тестирование устройства в радиофотоном тракте

Для проведения тестирования в радиофотонном тракте, был использован лазерный модуль AVANEX A1915LMM, представленный на рисунке 7.1. Данный модуль, содержит лазер DFB 3SPGroup, специально разработанный для приложений с аналоговой прямой модуляцией. Модуль поставляется в высокочастотном корпусе с РЧ-разъемом для стадии прототипирования. В состав модуля входят: лазерный диод, фотодиод, элемент Пельте и прецизионный термистор.



Рисунок 7.1 – Лазерный модуль AVANEX A1915LMM

В ходе тестирования, был проеден следующий эксперимент, разработанный драйвер лазерного модуля, был подключен к лазерному модулю, дополнительно ток контролировался внешним амперметром. Оптический выход модуля, был подключен к измерителю оптической мощности Joinwit JW3208C. Схема проведения эксперимента представлена на рисунке 7.2. Методика проведения эксперимента заключается в изменении тока лазерного диода и измерение оптической мощности и тока фотодиода. Эксперимент проводился при комнатной температуре 200C. Результатом эксперимента являются: зависимость оптической мощности от тока лазерного диода и зависимость тока фотодиода.

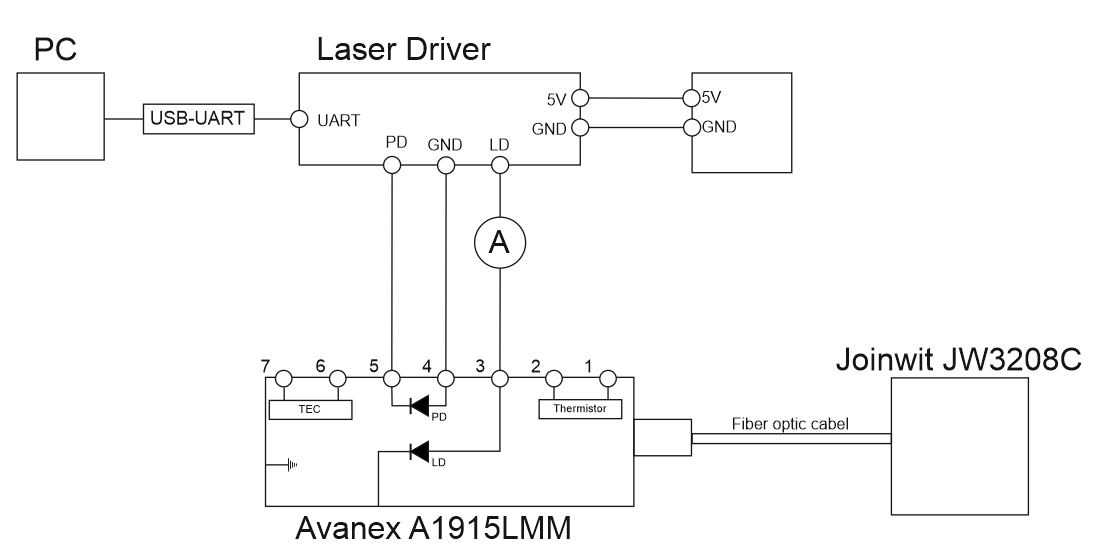


Рисунок 7.2 – Схема проведения эксперимента

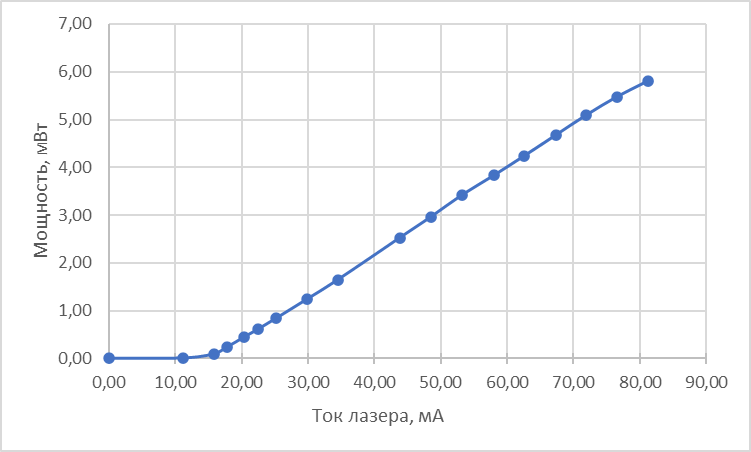


Рисунок 7.3 – Зависимость мощности лазера от потребляемого тока

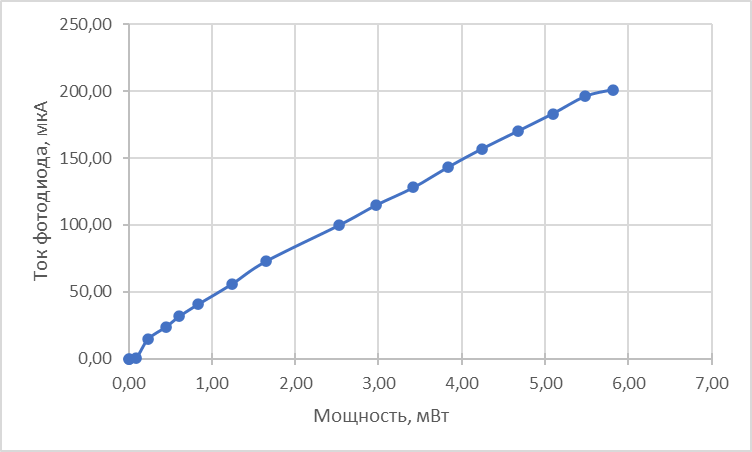


Рисунок 7.4 – Зависимость тока лазерного диода от оптической мощности

Для проведения следующего эксперимента, цель которого, провести исследования влияния температуры, на режимы работы лазера, был использован ТЕС-контроллер Thorlabs TTC001, представленный на рисунке 7.5. Данный контроллер позволяет изменять температуру, используя модуль Пельте и терморезистор, установленные в корпусе лазерного модуля. Схема проведения эксперимента представлена на рисунке 7.6.



Рисунок 7.5 Thorlabs TTC001

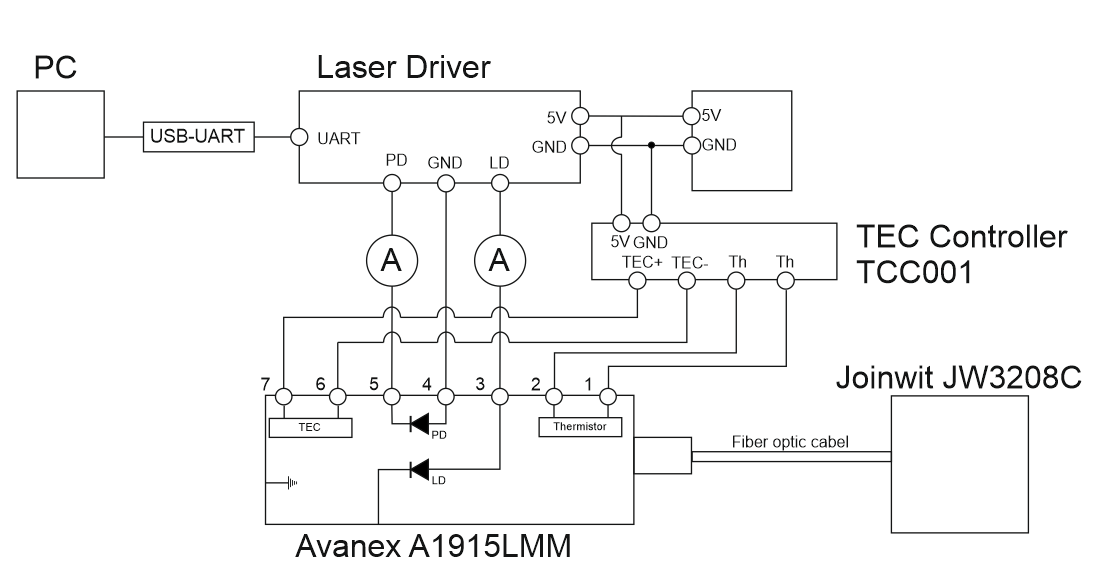


Рисунок 7.6 – Схема проведения эксперимента

Первая часть эксперимента заключается в изменении температуры, при фиксированном токе лазерного диода. Результаты эксперимента представлены на рисунке 7.7. На основе полученных данных, можно сделать вывод, оптическая мощность лазерного диода, падает с ростом температуры, по линейному закону.

Рисунок 7.7 – Зависимость мощности лазерного излучения, при фиксированном токе лазера

Вторая часть эксперимента заключается в стабилизации, с использованием в качестве обратной связи, ток фотодиода. Результаты эксперимента представлены на рисунке 7.8. Изменение тока, от нагрева лазерного диода, в режиме стабилизации тока лазера, составляет 2мВт, а в режиме стабилизации с использованием обратной связи составляет 1мВт.

Рисунок 7.8 – Зависимость мощности от температуры, в режиме стабилизации тока и стабилизации мощности.

На рисунке 7.9 представлена временная диаграмма, тока фотодиода и тока лазерного диода. Источник питания был настроен на удержания тока фотодиода, равного 70мА. В момент t=100мс, был подан ток, на модуль Пельте, что привело к резкому изменению температуры, при этом, ток лазерного фотодиода падает, соответственно алгоритм ПИД регулятора, поднимает ток лазерного диода, чтобы удержать значение тока фотодиода.

Рисунок 7.9 – Временная диаграмма регулирования