Оглавление

[1 Введение 2](#_Toc102477556)

[2 Обзор существующих решений 4](#_Toc102477557)

[3 Разработка устройства 7](#_Toc102477558)

[3.1 Разработка структурной схемы 7](#_Toc102477559)

[3.2 Определение требований к проектируемому устройству. 7](#_Toc102477560)

[3.3 Разработка принципиальной схемы 10](#_Toc102477561)

[3.4 Разработка схемы стабилизации тока. 10](#_Toc102477562)

[3.5 Разработка схемы измерения тока фотодиода. 13](#_Toc102477563)

--[3.6 Разработка схемы управления. 13](#_Toc102477564)

[3.7 Разработка общей схемы 14](#_Toc102477565)

[3.8 Трассировка печатной платы 15](#_Toc102477566)

[4 Тестирование устройства 17](#_Toc102477567)

[5 Разработка программного обеспечения для микроконтроллера 21](#_Toc102477568)

[5.1 ПИД регулятор 23](#_Toc102477569)

[5.2 Вычисления с фиксированной точкой 24](#_Toc102477570)

[5.3 Протокол 25](#_Toc102477571)

[6 Разработка программного обеспечения для ПК 27](#_Toc102477572)

# 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.

# Обзор существующих решений

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

При подаче постоянного тока, выходная оптическая мощность лазера изменяется в процессе работы от изменения температуры кристалла, на рисунке 1 представлена зависимость выходной оптической мощности от 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.

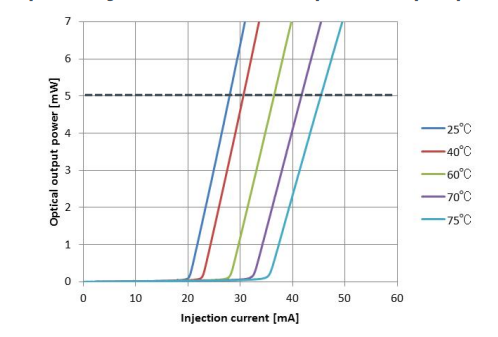


Рисунок 1

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 представлена зависимость выходного тока фотодиода от оптической мощности лазерного диода при различных температурах.

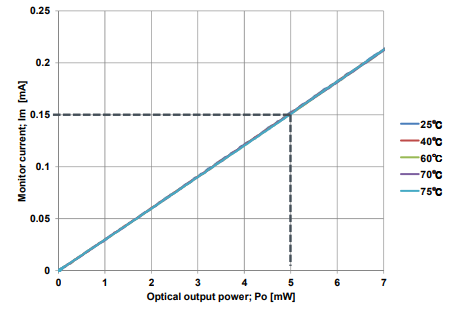


Рисунок 2.

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

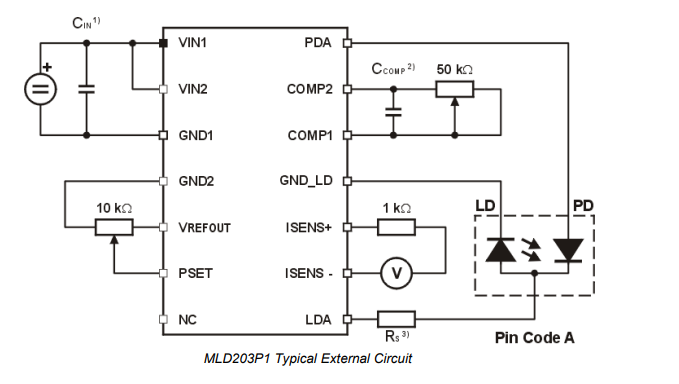


Рисунок 3

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.

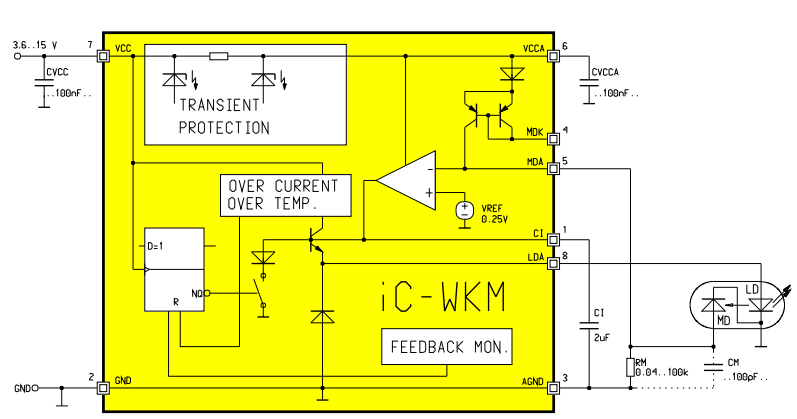


Рисунок 4 – iC-WKM

# Разработка устройства

## Разработка структурной схемы

На основе анализа существующих решений и технического задания, была разработана структурная схема устройства, представленная на рисунке 1.

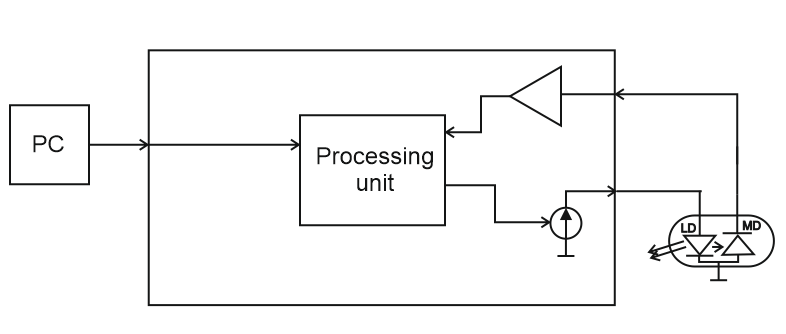


Рисунок 1 – Структурная схема устройства

Структурная схема состоит из: управляемого источника тока, усилителя сигнала с датчика оптической мощности и устройтства 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 DFD лазерного диода, на основе InP, представленных на рисунке 2.1, проектируемый источник питания должен обеспечивать стабилизацию тока в диапазоне от 1 до 200 мА и стабилизацию оптической мощности до 15 мВ.

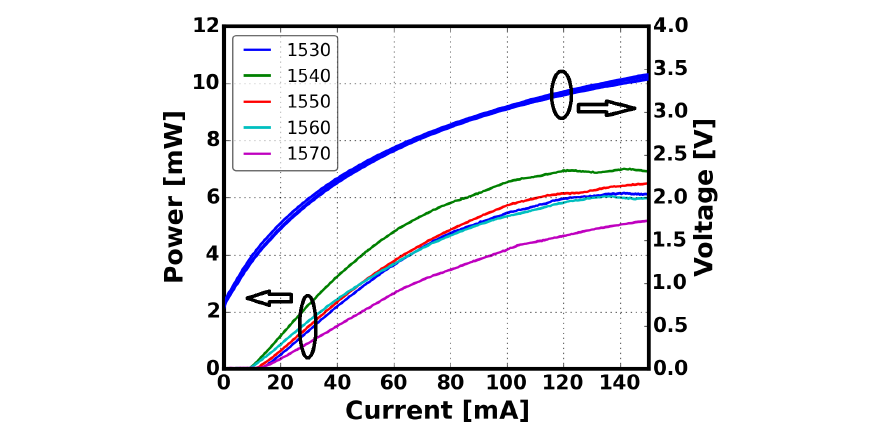


Рисунок 2.1 – Вольт-амперная характеристика лазерного диода

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 2.2. Чувствительность данного фотодиода составляет 0.8 А/Вт, что при оптической мощности 15 мВт, обеспечит выходной ток 12мА, без дополнительного смещения фотодиода.

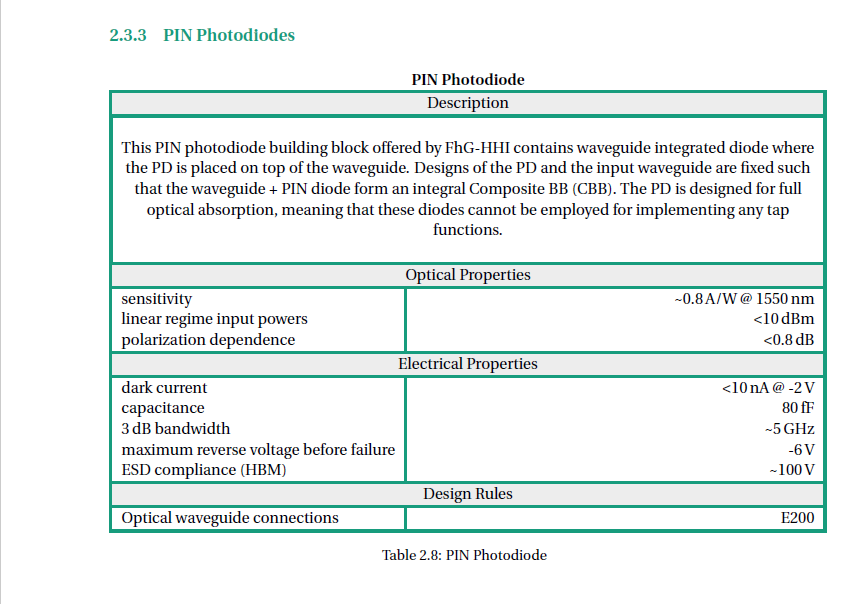


Рисунок 2.2 – Характеристики фотодиода)

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.

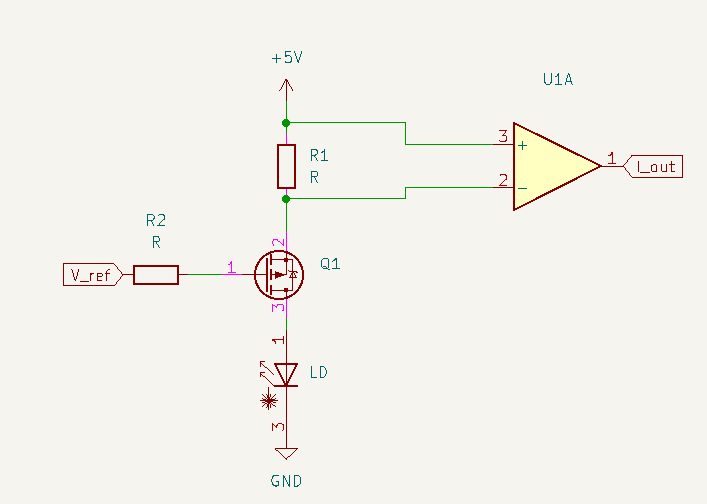


Рисунок 3.1 – Схема стабилизации тока

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*

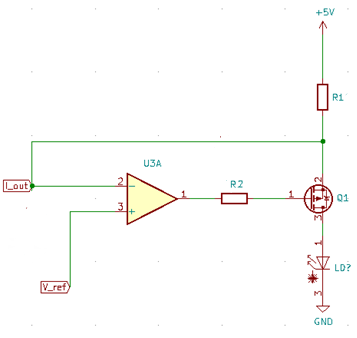


Рисунок 3.2 – Стабилизатор тока с операционным усилителем.

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.

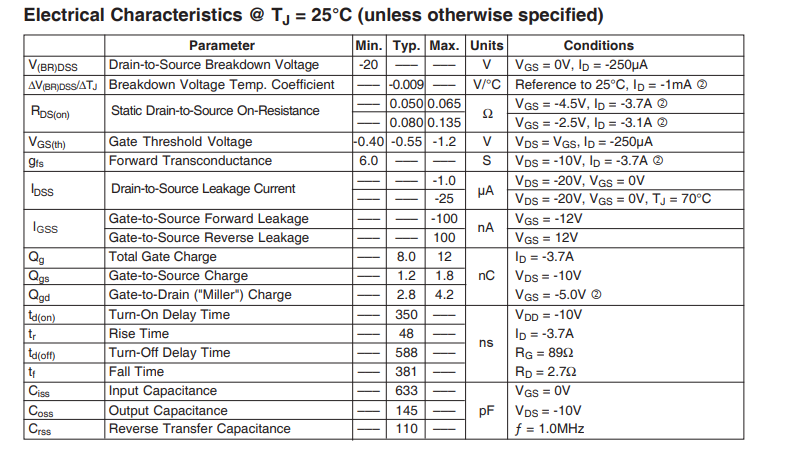


Рисунок 3.3 – Характеристики транзистора IRLML6402

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

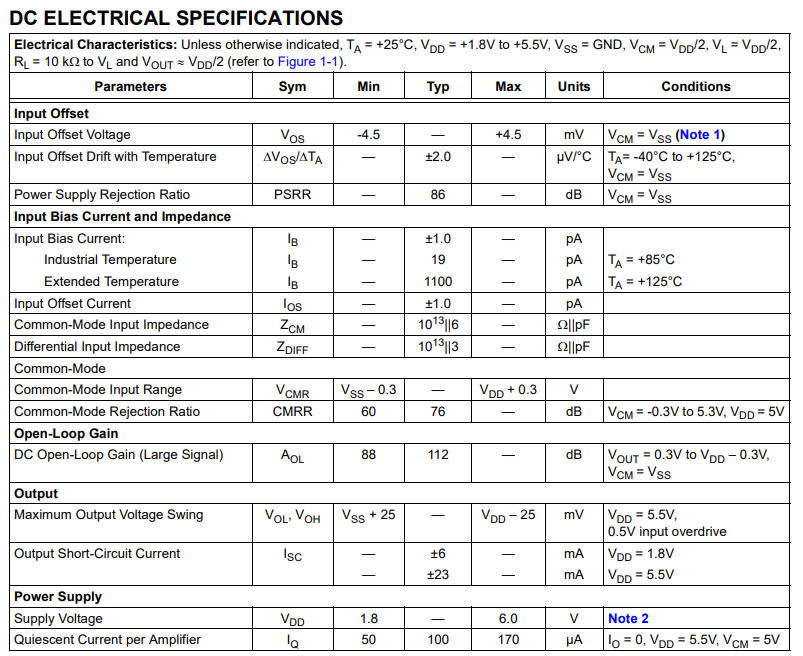
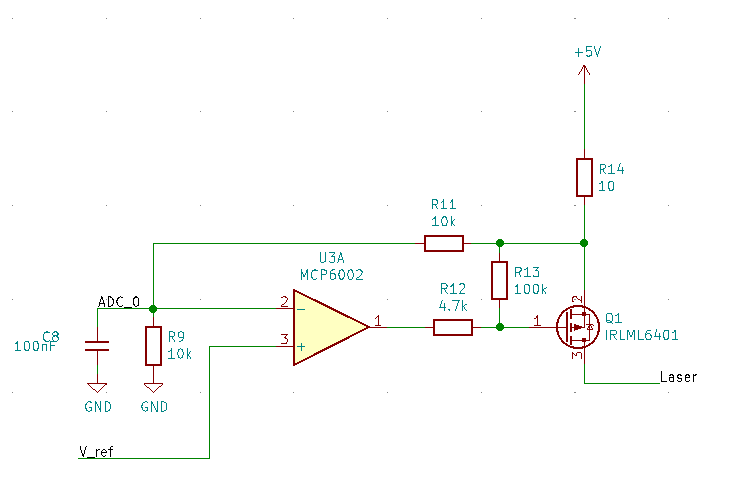


Рисунок 3.4 – Характеристики операционного усилителя MCP6002

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.

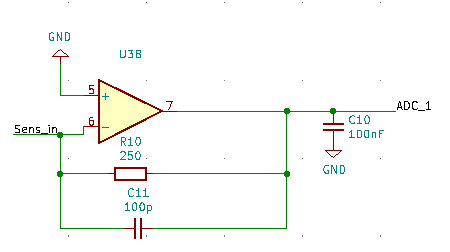


Рисунок 3.6 – Схема трансимпедансного усилителя

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.

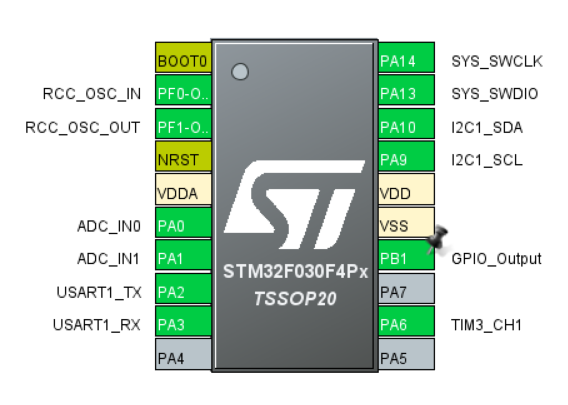


Рисунок 3.7 – Микроконтроллер STM32F030F4P.

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

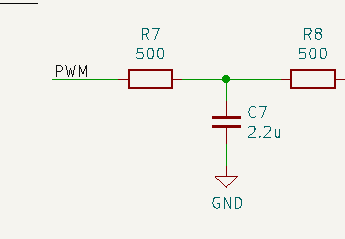


Рисунок 3.7 – RC-фильтр

## 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.

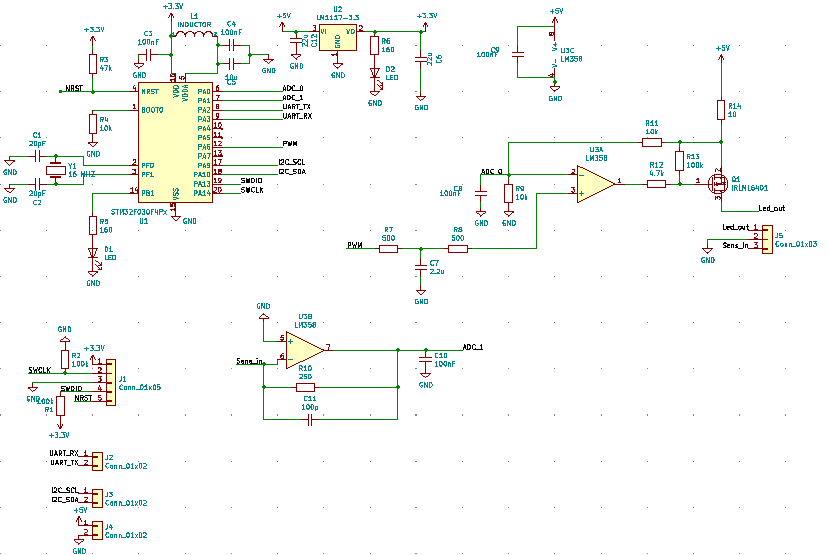


Рисунок 3.8 – Общая схема устройства

## Трассировка печатной платы

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

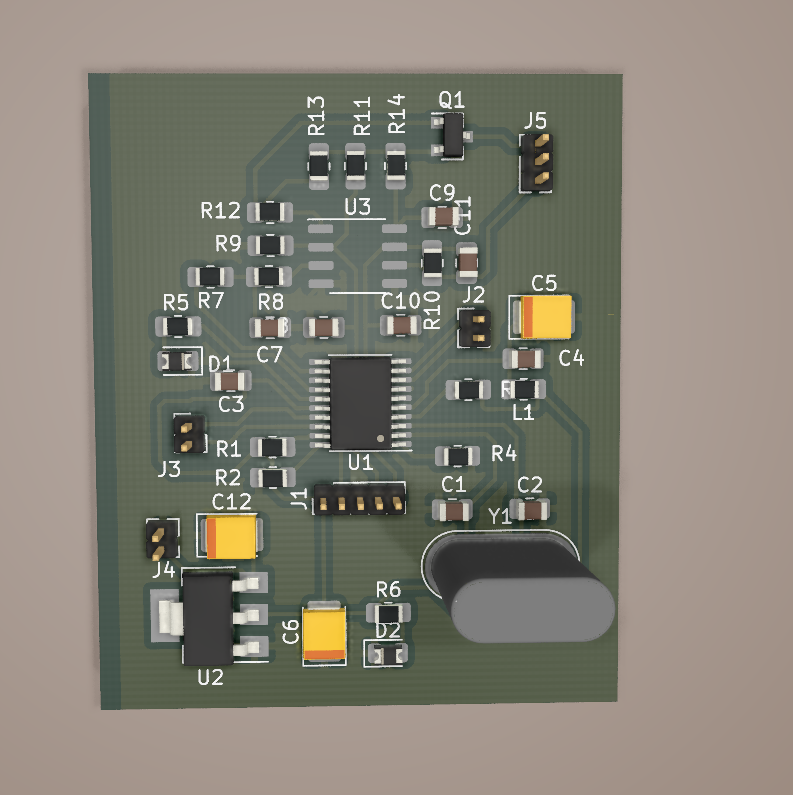


Рисунок 3.9 – Печатная плата устройства

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.

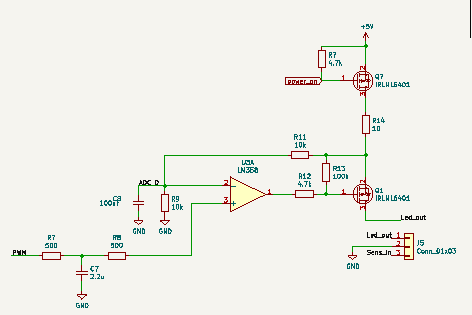


Рисунок 4.2 – Модифицированная схема

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, осцилограмма 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

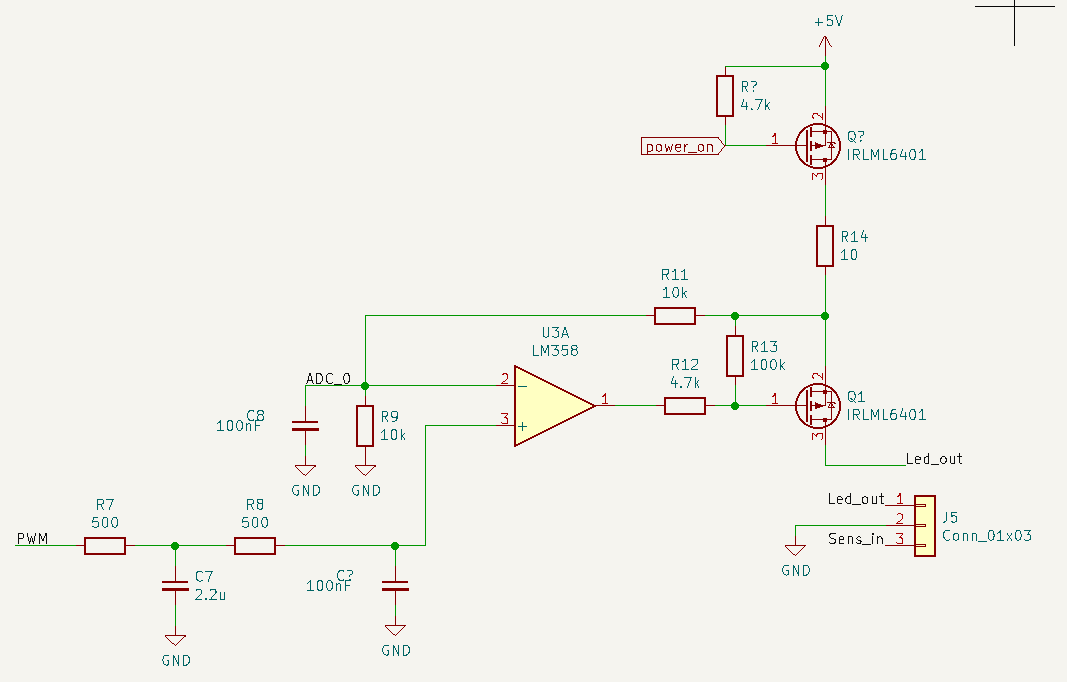


Рисунок 4.6 - Схема с добавление конденсатора

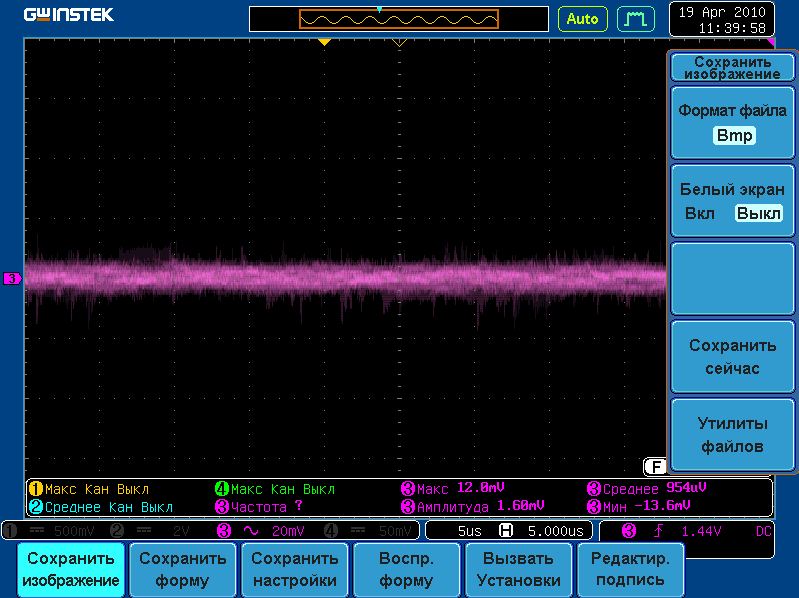


Рисунок 4.6 – Осциллограмма напряжения на нагрузке после добавления конденсатора

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 |

# 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

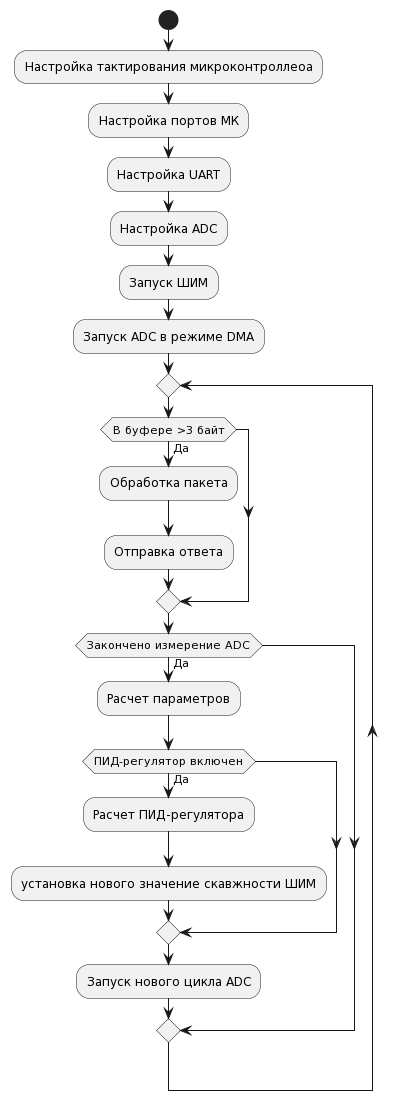


Рисунок 5.1 - Алгоритм работы программы

## 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 \*

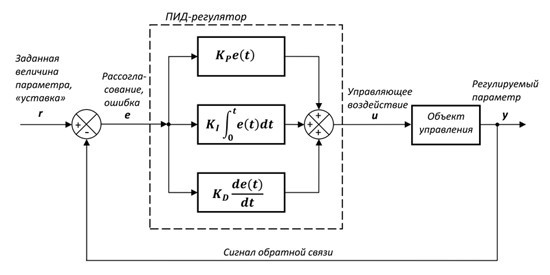


Рисунок \* - Алгоритм ПИД регулятора

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 плавающей точкой.

## 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 |
| Получить ошибку ПИД | 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

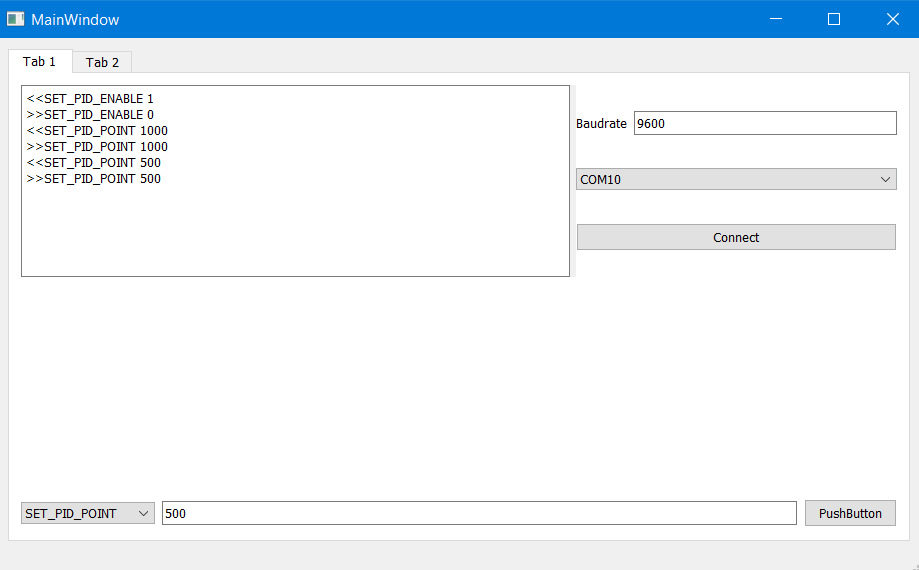


Рисунок 6.1 – Окно управления устройством

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

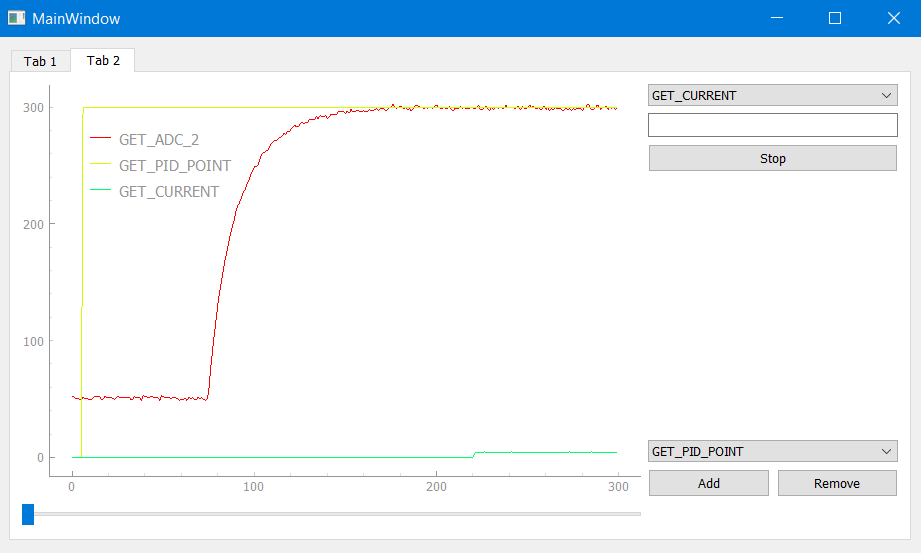


Рисунок 6.2 – Окно управления устройством

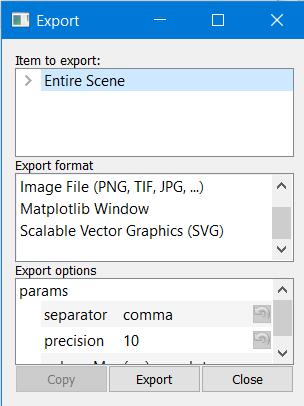


Рисунок 6.3 – Окно экспорта данных

# 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. Результатом эксперимента являются: зависимость оптической мощности от тока лазерного диода и зависимость тока фотодиода.

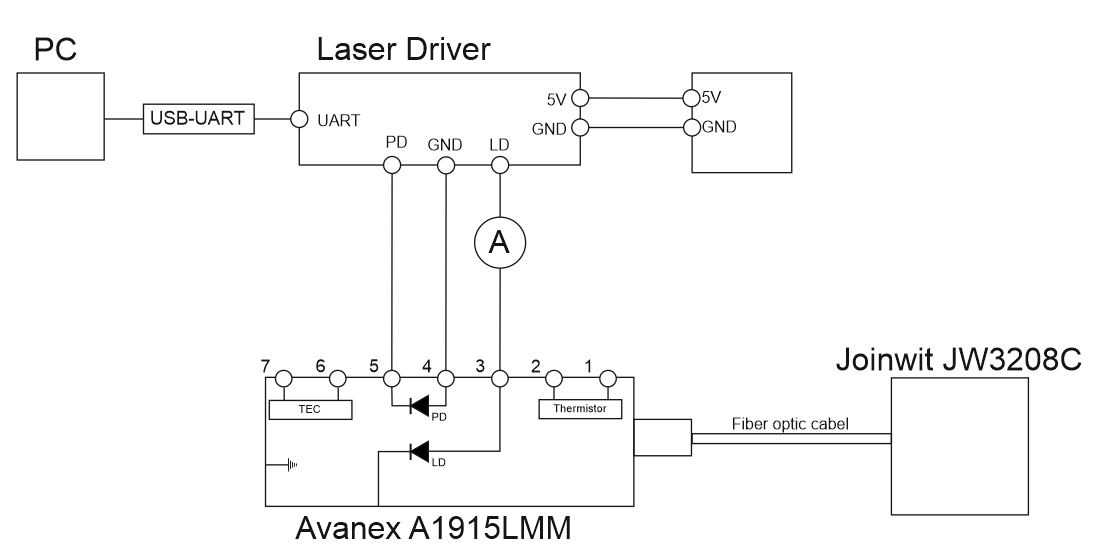


Рисунок 7.2 – Схема проведения эксперимента

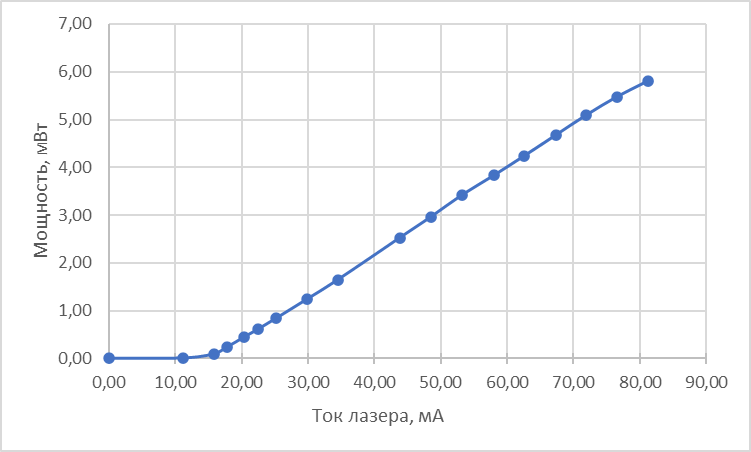


Рисунок 7.3 – Зависимость мощности лазера от потребляемого тока

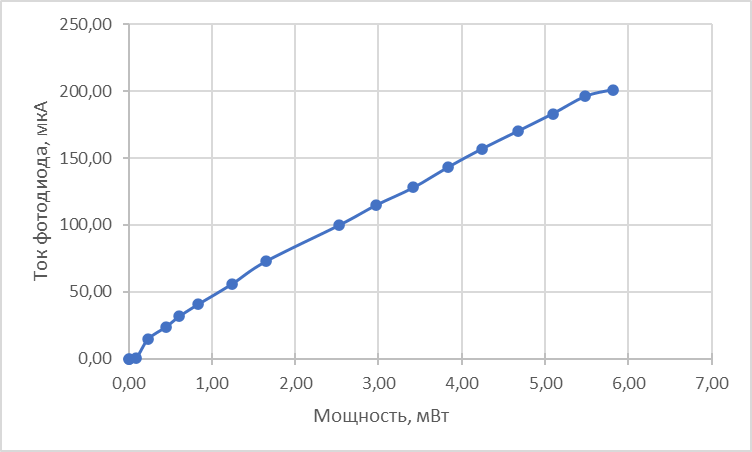


Рисунок 7.4 – Зависимость тока лазерного диода от оптической мощности