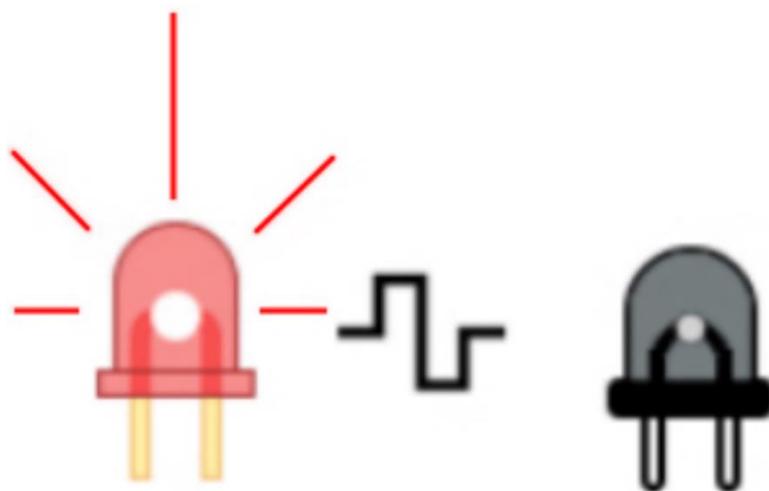


**А.С. Алейник, Е.В. Востриков, С.А. Волковский,
И.Г. Дейнека, В.Е. Стригалева, И.К. Мешковский**

**ОСНОВЫ СХЕМОТЕХНИКИ
ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИХ ЭЛЕКТРОННЫХ
УСТРОЙСТВ**



**Санкт-Петербург
2021**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**А.С. Алейник, Е.В. Востриков, С.А. Волковский,
И.Г. Дейнека, В.Е. Стригалева, И.К. Мешковский**
**ОСНОВЫ СХЕМОТЕХНИКИ
ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИХ ЭЛЕКТРОННЫХ
УСТРОЙСТВ**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ
ИТМО

по направлению подготовки 12.04.05, 16.04.01
в качестве учебно-методического пособия для реализации основных
профессиональных образовательных программ высшего образования
магистратуры

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург
2021

Алейник А.С., Востриков Е.В., Волковский С.А., Дейнека И.Г.,
Стригалева В.Е., Мешковский И.К., Основы схемотехники приемопередающих
электронных устройств – СПб: Университет ИТМО, 2021. – 149 с.

Рецензент(ы):

Смирнова Ирина Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент
(квалификационная категория "ординарный доцент") факультета лазерной
фотоники и оптоэлектроники, Университета ИТМО.

В учебно-методическом пособии представлены теоретические основы построения схем источников тока для работы светодиодов и лазерных диодов в непрерывном, импульсном и высокочастотном режимах работы. Приведены схемы включения фотодиодов с описанием принципа их работы. Также, производится расчет параметров электрических схем источников тока и моделирование в бесплатном симуляторе работы электрических схем LTspice XVII.

Учебно-методическое пособие предназначено для теоретической (Гл. 1 и 2) и практической (Гл. 3) подготовки студентов магистратуры, обучающихся по направлениям подготовки 16.04.01 Техническая физика, 12.04.05 Лазерная техника и лазерные технологии.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2021

© Алейник А.С., Востриков Е.В., Волковский С.А., Дейнека И.Г.,
Стригалева В.Е., Мешковский И.К., 2021

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	5
1 ГЛАВА 1	7
1.1 Схемы токовой накачки в непрерывном режиме	7
1.1.1 Схемы токовой накачки на основе БТ.....	8
1.1.2 Схемы токовой накачки на основе БТ и стабилитрона	20
1.1.3 Схемы токовой накачки на основе ПТ	24
1.1.4 Схемы токовой накачки на основе ПТ и стабилитрона	29
1.1.5 Схемы токовой накачки на основе операционного усилителя.....	35
1.2 Схемы накачки светодиодов и лазерных диодов для переменных входных сигналов.....	42
1.2.1 Схемы токовой накачки на основе БТ.....	42
1.2.2 Схемы токовой накачки на основе ПТ	52
1.2.3 Схемы токовой накачки на основе ОУ.....	58
1.3 Высокочастотные схемы токовой накачки.....	62
1.3.1 Конструкция передающего оптического модуля	62
1.3.2 Схемы токовой накачки в импульсном режиме.....	64
2 ГЛАВА 2	68
2.1 Фоточувствительные элементы	68
2.1.1 Явление фотоэффекта	68
2.1.2 Фоторезистор. Определение, основные характеристики и параметры	70
2.1.3 Фотодиодные элементы.....	74
2.1.3.1 Принцип действия и структура PN-фотодиода.....	74
2.1.3.2 PIN фотодиод.....	76
2.1.3.3 Лавинный фотодиод.....	78
2.1.3.4 Основные параметры и характеристики фотодиода	80
2.1.3.4.1 ВАХ фотодиода	80
2.1.3.4.2 Спектральная чувствительность фотодиода.....	81
2.1.3.4.3 Квантовая эффективность фотодиода	82
2.1.3.5 Режимы работы фотодиода	82
2.1.3.5.1 Фотовольтаический режим.....	82
2.1.3.5.2 Фотодиодный режим.....	83
2.1.3.5.3 Режим короткого замыкания.....	84
2.1.3.6 Схема замещения фотодиода	84
2.1.4 Другие виды полупроводниковых элементов	86

2.1.4.1	Фототранзистор	86
2.2	Схемы включения фотодиода	88
2.2.1	Простейший преобразователь ток-напряжение	88
2.2.1.1	Преобразователь ток-напряжение с резистором.....	88
2.2.2	Трансимпедансный усилитель	92
2.2.2.1	Выбор схемы трансимпедансного усилителя.....	92
2.2.2.2	Подбор операционного усилителя	102
2.2.3	Проблема шумов в схемах трансимпедансного усилителя.....	103
2.2.3.1	Шум Джонсона (тепловой шум).....	103
2.2.3.2	Шум напряжения.....	105
2.2.3.3	Шум тока.....	105
2.2.3.4	Дробовой шум	107
2.2.3.5	Шум низких частот	107
2.2.3.6	Попкорн-шум.....	109
2.2.3.7	Суммирование источников шума	109
3	ГЛАВА 3	112
3.1	Лабораторная работа №1: Делитель напряжения.....	112
3.2	Лабораторная работа №2: Исследование ВАХ полупроводниковых элементов.....	126
3.3	Лабораторная работа №3: Схемы накачки светоизлучающего и лазерного диодов	129
3.4	Лабораторная работа №4: Схемы подключения фотоприемных устройств	135
3.5	Лабораторная работа №5: Приемопередатчик.....	138
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	146
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	147

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время созданы волоконно-оптические линии связи протяженностью более нескольких десятков километров с высокой скоростью передачи информации. Одним из ключевых элементов волоконно-оптической линии связи является приемопередатчик или трансивер. Оптический трансивер – это устройство, которое необходимо для приема и передачи данных по оптоволоконному кабелю. В состав данного устройства входят оптические сборки типа TOSA (transceiver optical sub-assembly) и ROSA (receiver optical sub-assembly) для передачи и приема сигналов. Понимание принципа работы трансивера необходимо для студентов, которые получают образование в области информационных технологий и телекоммуникаций.

В данном учебно-методическом пособии представлены схемотехнические решения по созданию приемных и передающих устройств. В первой главе представлены схемы токовой накачки светодиодов и лазерных диодов. Данная глава построена таким образом, чтобы поэтапно изучать схемотехнические решения. В каждом разделе описываются достоинства и недостатки предложенных решений. Для детального анализа электронных схем предлагается использовать программный пакет LTSpice XVII, который находится в открытом доступе и может быть использован каждым желающим. Также для более качественного освоения материала авторы представили краткое описание по работе с данным программным обеспечением. В конце каждого раздела представлено задание для самостоятельного выполнения, которое позволит проверить уровень знаний студентов. Изучение первой главы позволит создавать простые схемы накачки лазерных диодов и светодиодов с использованием биполярных, полевых транзисторов и операционных усилителей. Данные схемы рассматриваются в непрерывном режиме, а также в режиме переменных входных сигналов. Дополнительно рассматриваются конструкция и схемы управления передающим оптическим модулем.

Вторая глава посвящена приемному модулю, в ней сделан акцент на подробном описании структуры и принципа работы фотоприемного устройства. Первый раздел посвящен явлению фотоэффекта. Студентам предлагается поэтапно ознакомиться с каждым разделом, что позволит изучить разные полупроводниковые устройства, которые работают на данном эффекте. Описание принципа действия и структуры рп- и рип-фотодиодов поможет при дальнейшем изучении параметров и характеристик фотодиода. Помимо описания физических процессов, происходящих в полупроводниковых элементах, анализируются режимы работы и схемы включения фотодиодов. В качестве примеров рассматриваются простейший преобразователь ток-напряжение, схема трансимпедансного усилителя. Должное внимание уделено подбору операционного усилителя, а также вопросам, связанным с шумами. Шум Джонсона (тепловой шум), шум напряжения и тока, дробовой шум, фликкер шум, попкорн-шум – все они влияют на точность детектирования сигнала. Изучение данной главы позволит в полной мере освоить теоретический

материал, посвященный фотоприемным устройствам. Подробный разбор изложенного материала поможет в дальнейших работах, связанных с параметрами и характеристиками фотодиодов. Приобретенные знания позволят собирать простые схемы на основе фотоприемных устройств с расчетом коэффициента преобразования тока в напряжение, подбором соответствующих компонентов и анализом воздействия основных видов шумов на полезный сигнал.

В третьей главе представлены лабораторные работы, которые позволят закрепить полученные знания и использовать их на практике. Первая лабораторная работа проводится в целях подготовки студентов к работе с лабораторным оборудованием. В ней подробно описываются шаги по работе с мультиметром и источником питания. Представлены наглядные примеры того, как проводить измерения и устанавливать заданные значения по току и напряжению. Следующие работы направлены на исследование вольт-амперных характеристик диодов и стабилитронов, создание схем стабилизации тока, а также схем подключения фотоприемных устройств. Заключительной работой является лабораторная работа по созданию приемопередатчика.

Материал пособия основан на лекциях и практических занятиях, проводившихся авторами в течение нескольких лет со студентами и аспирантами Университета ИТМО. Данные принципы создания приемопередатчиков могут быть применимы не только для создания оптических трансиверов, но и для разработки различных оптоэлектронных устройств.

Учебно-методическое пособие является частью дисциплин «Специальные вопросы электроники (оптоэлектронные приборы)», «Основы оптоэлектроники», «Полупроводниковые приборы» (12.04.05 – Лазерная техника и лазерные технологии, 16.04.01 – Техническая физика).

ГЛАВА 1

В данной главе представлены схемы накачки (драйверы) светодиодов и лазерных диодов в непрерывном, импульсном и высокочастотном режимах работы. Описывается принцип их работы, производится расчет токов и напряжений, а также моделирование в бесплатном симуляторе работы электрических схем LTspice XVII.

1.1 Схемы токовой накачки в непрерывном режиме

В данном разделе представлены наиболее распространенные схемы стабилизации тока светодиодов и лазерных диодов в непрерывном режиме работы. Схемы стабилизации тока должны обладать большим выходным сопротивлением, чтобы поддерживать постоянное значение тока при подключении нагрузки. Наиболее распространенным вариантом является использование стабилизаторов тока на основе биполярных (БТ) и полевых транзисторов (ПТ). В качестве примера на рисунке 1.1 представлены выходные характеристики биполярного транзистора в активном режиме в схеме с общим эмиттером.

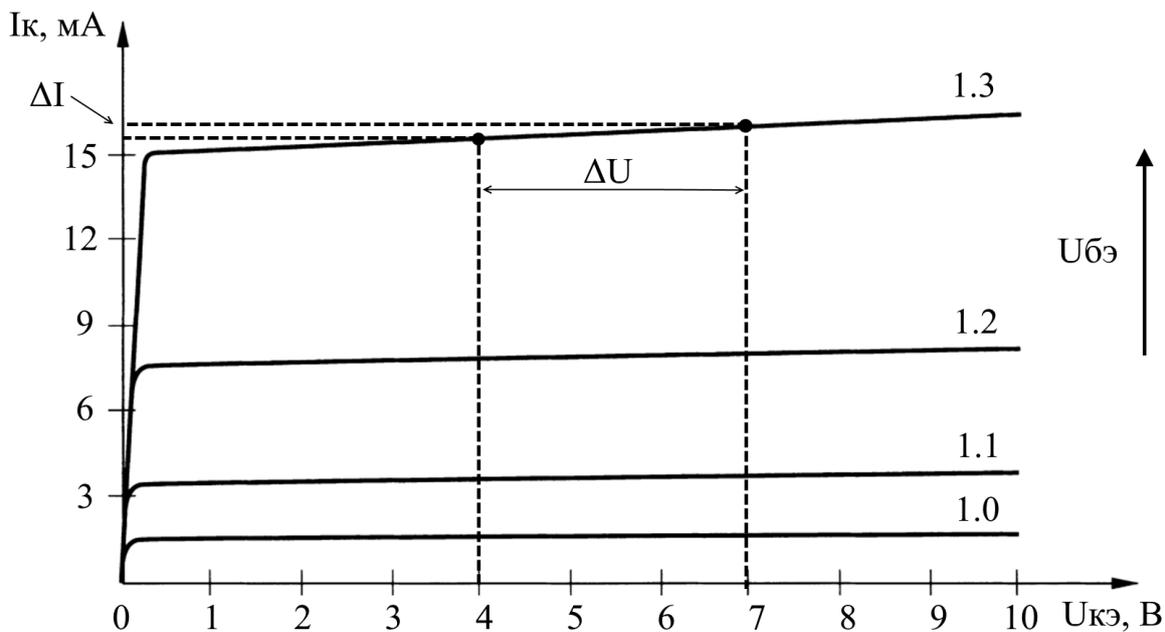


Рисунок 1.1 – Типичная выходная характеристика биполярного транзистора n-типа

На рисунке 1.2 представлена типичная выходная характеристика полевого транзистора с индуцированным каналом n-типа.

Представленные графики позволяют оценить выходное сопротивление схем стабилизации тока на основе биполярных и полевых транзисторов, а также зависимость стабилизируемого тока от изменения напряжения питания. Схемы накачки на основе биполярных и полевых транзисторов способны обеспечить большое выходное сопротивление порядка сотен кОм, а также уменьшить влияние нестабильности источника питания, данные особенности являются

наиболее значимыми при создании схем стабилизации тока на основе биполярных и полевых транзисторов.

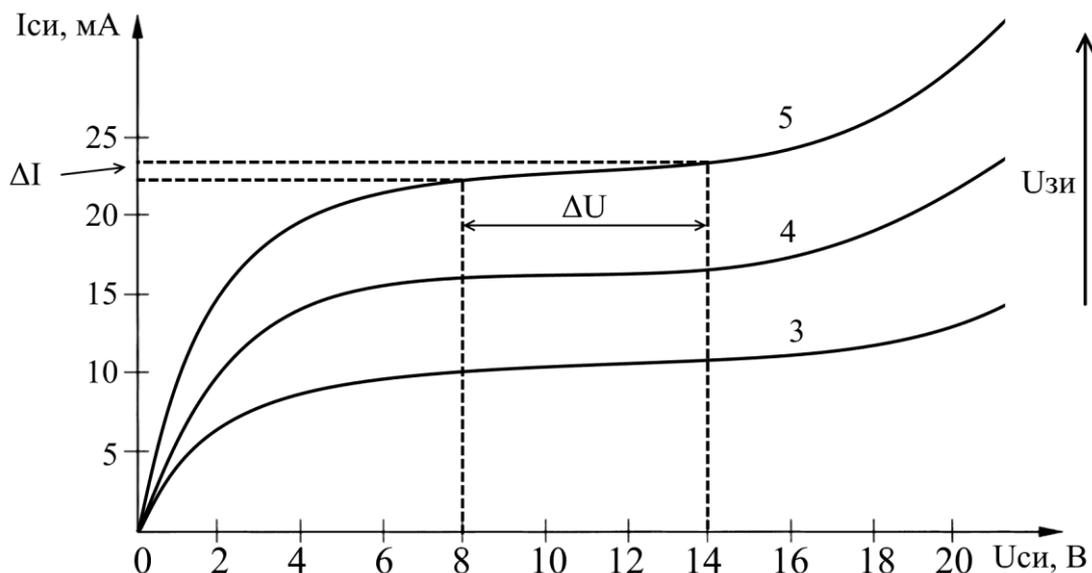


Рисунок 1.2 – Типичная выходная характеристика полевого транзистора с индуцированным каналом n-типа

1.1.1 Схемы токовой накачки на основе БТ

Схемы стабилизации тока лазерного диода или светодиода должны обеспечивать постоянство тока независимо от изменения напряжения питания. На рисунке 1.3 представлена схема стабилизации тока на основе биполярного транзистора.

Светодиод или лазерный диод D подключается в коллекторную цепь n - r - n транзистора VT . В эмиттерную цепь включен резистор R , благодаря которому осуществляется обратная связь по току транзистора. Источник опорного напряжения $U_{он}$ обеспечивает постоянное напряжение на базе транзистора. Напряжение на базе транзистора VT и резистор R задают значение тока, протекающего через светодиод или лазерный диод.

Стабилизация тока нагрузки обеспечивается глубокой отрицательной обратной связью по току, за счет включения в эмиттерную цепь резистора R .

Расчет схемы стабилизации тока на основе биполярного транзистора осуществляется с помощью 2-го закона Кирхгофа. Второй закон Кирхгофа для входного контура схемы накачки представлен формулой (1.1).

$$U_{он} = U_{бэ} + RI_э = U_{бэ} + RI. \quad (1.1)$$

В данной формуле $I_э$ – эмиттерный ток транзистора, который в активном режиме работы незначительно отличается от коллекторного тока или тока

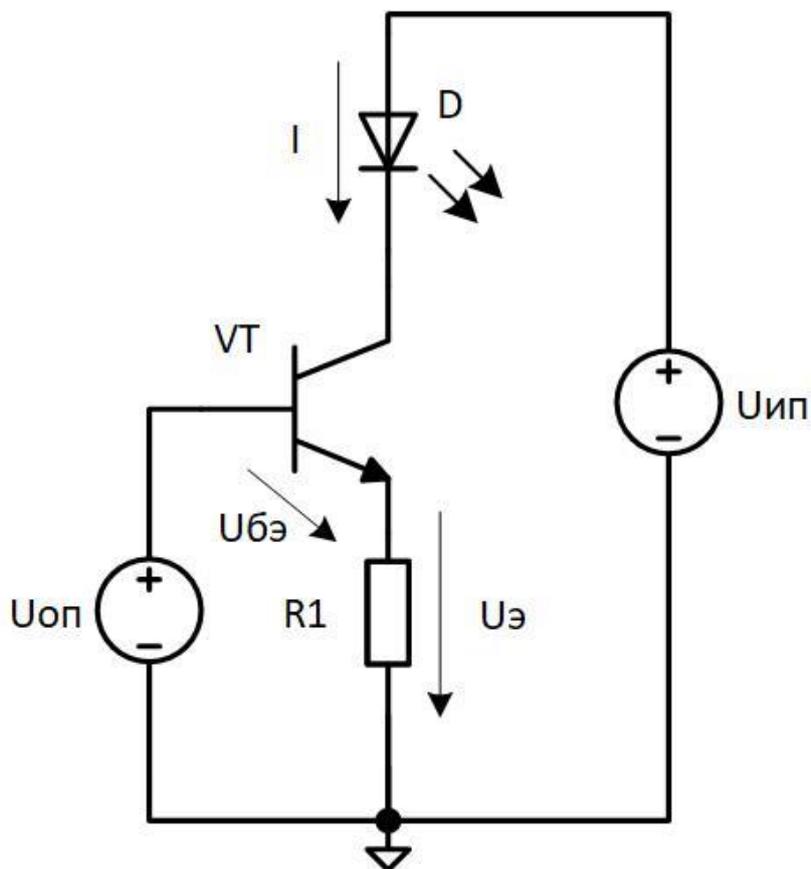


Рисунок 1.3 – Схема источника тока на основе биполярного транзистора VT

нагрузки на величину тока базы (I_b). Таким образом, можно принять $I = I_k = I_э$. Напряжение база-эмиттер ($U_{бэ}$) связано с коллекторным током I передаточной характеристикой транзистора, представленной на рисунке 1.4.

Напряжение база-эмиттер U_o представленной зависимости коллекторного тока от напряжения база-эмиттер $I(U_{бэ})$ незначительно зависит от коллекторного тока и в первом приближении может быть принято постоянным. Для биполярных транзисторов на основе кремния напряжение U_o составляет 0,6 – 0,7 В.

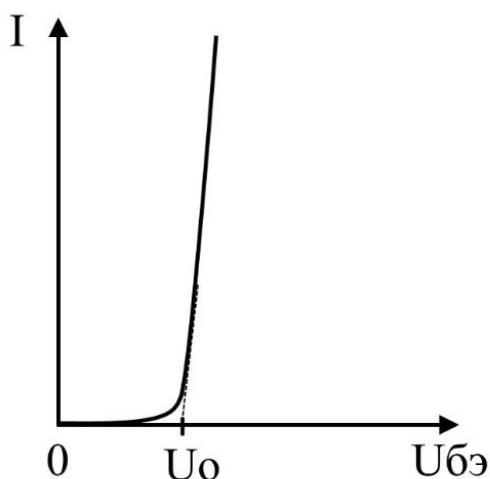


Рисунок 1.4 – Передаточная характеристика n-p-n транзистора

Из формулы (1.1) можно выразить ток накачки I :

$$I = \frac{U_{on} - U_{бэ}}{R} = \frac{U_{on} - 0,6}{R}. \quad (1.2)$$

В результате анализа формулы (1.2) можно сделать вывод, что ток нагрузки не зависит от напряжения источника питания $U_{ин}$, а зависит только от опорного напряжения и резистора R . В качестве нагрузки могут использоваться несколько последовательно подключенных светодиодов (лазерных диодов), что не влияет на значение коллекторного тока.

Рассмотренная схема является источником стабильного тока в случае активного режима работы биполярного транзистора, следовательно, для стабильной работы, необходимо соблюдать условие активного режима работы. Для n-p-n биполярных транзисторов условием активного режима работы является соблюдение неравенства $U_{э} < U_{б} < U_{к}$. В этом режиме напряжение коллектор-эмиттер должно быть не менее $(U_{кэ})_{min} \approx 1В$. Таким образом, напряжение источника питания должно выбираться, исходя из формулы (1.1).

$$U_{ин} \geq n \cdot U_D + RI + (U_{кэ})_{min}, \quad (1.3)$$

где U_D – напряжение на одном светодиоде (лазерном диоде), n – количество светодиодов (лазерных диодов) при установленном значении тока нагрузки I .

Пример 1.1.

На рисунке 1.5 представлена схема стабилизации тока с несколькими последовательно включенными светодиодами. Опорное напряжение равно $U_{on} = 4 В$, данная схема должна обеспечить ток нагрузки $I = 10 мА$. Необходимо рассчитать значение резистора R и минимальное напряжение источника питания.

Для анализа схемы стабилизации тока можно воспользоваться бесплатным симулятором работы электрических схем LTspice XVII. Для начала необходимо кратко ознакомиться с рабочим полем программы. При запуске программы LTspice XVII открывается окно программы. На рисунке 1.6 представлено меню инструментов в верхней части рабочего поля. Для того чтобы приступить к созданию схемы, необходимо создать чистый лист, нажав на символ в панели инструментов с названием «**New Schematic**».

После создания нового листа можно приступить к выбору компонентов схемы и их размещению в рабочей области программы LTspice XVII. Открыть библиотеку компонентов можно нажатием клавиши **F2**, также можно выбрать пиктограмму  (**Component**), расположенную на панели инструментов в верхней части рабочего поля. В появившемся окне необходимо выбрать n-p-n транзистор, для этого в поисковой строке нужно написать краткую форму записи биполярного транзистора n-типа «npn», после чего в рабочем окне выбора компонентов появится его схематическое обозначение (рис. 1.7). После нажатия

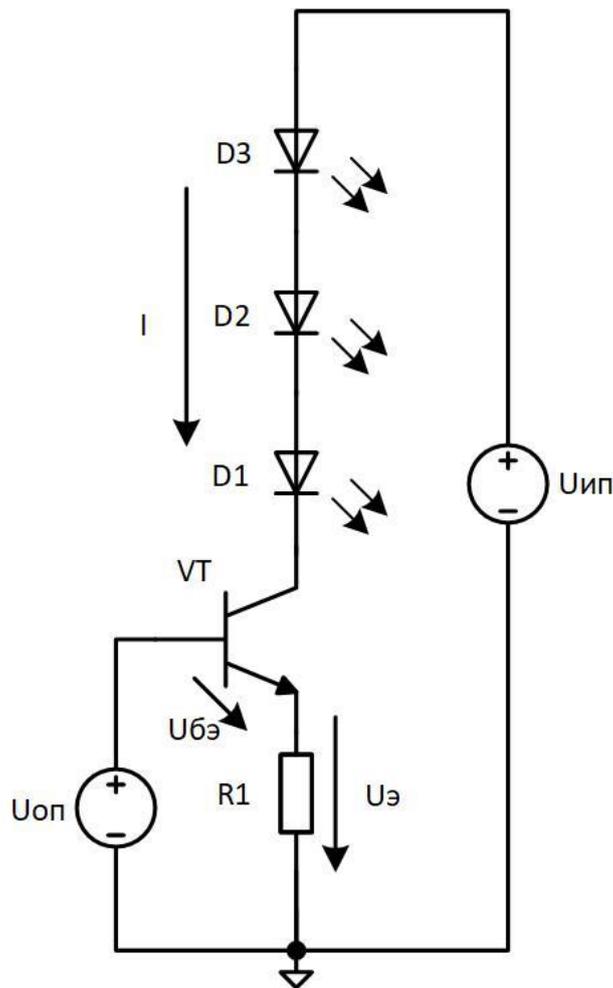


Рисунок 1.5 – Схема стабилизации тока на основе биполярного транзистора с использованием 3 светодиодов

кнопки **ОК** окно закрывается, и на рабочем поле остаётся изображение n-p-n транзистора, связанное с указателем мыши. Перемещая указатель мыши, необходимо установить транзистор в нужное место на рабочем столе. Если



Рисунок 1.6 – Меню инструментов программы LTspice XVII

необходимо развернуть схематическое изображение транзистора на 90° , то на клавиатуре необходимо нажать сочетание клавиш **Ctrl+R**. Для того чтобы отразить элемент по вертикали, необходимо нажать сочетание клавиш **Ctrl+E**. После установки транзистора его положение обязательно должно быть зафиксировано левым щелчком мыши. Выделенный резистор или другой компонент при необходимости могут быть убраны с рабочего стола нажатием клавиши **Delete**. Последней операцией, завершающей установку резистора, является отмена текущей команды, которая реализуется нажатием клавиши **Esc**. При этом пропадает связанное с указателем мыши изображение транзистора.

Остальные компоненты электрической схемы находятся в библиотеке компонентов по буквенным обозначениям, представленным в таблице 1.1. После

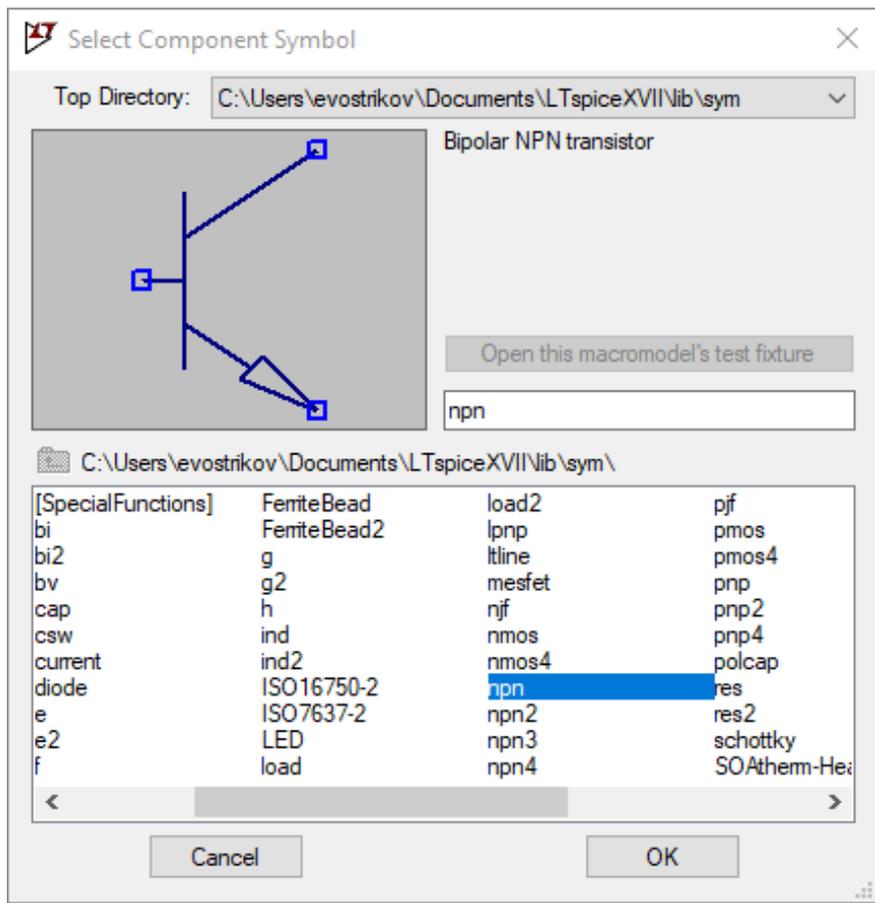


Рисунок 1.7 – Окно библиотеки компонентов программы LTspice XVII

размещения необходимых компонентов в рабочей области программы необходимо соединить их в общую схему, для этого можно воспользоваться клавишей **F3** для выбора инструмента провод (**Wire**). Также данный инструмент можно выбрать на панели инструментов при нажатии на пиктограмму . Результат проделанных действий является схема, представленная на рисунке 1.8.

Программа LTspice XVII содержит большое количество spice моделей, которые могут существенно отличаться по своим параметрам. При расчёте параметров электрической схемы необходимо учитывать отличие в параметрах транзисторов, также необходимо учитывать величину напряжения прямого перехода светодиодов и лазерных диодов (U_D). В процессе моделирования электрических схем в программе LTspice XVII был осуществлен выбор spice моделей для некоторых компонентов электрической схемы. В таблице 1.1 представлены выбранные spice модели с указанием их основных параметров.

Следующим шагом производится выбор spice моделей компонентов электрической схемы, а также указания их значений. Выбор spice моделей осуществляется наведением курсора мыши на символ электронного компонента и нажатием правой кнопки мыши на символ компонента схемы.

При нажатии правой кнопкой мыши на символ n-p-n транзистора появляется окно с параметрами данного компонента. Для того чтобы выбрать

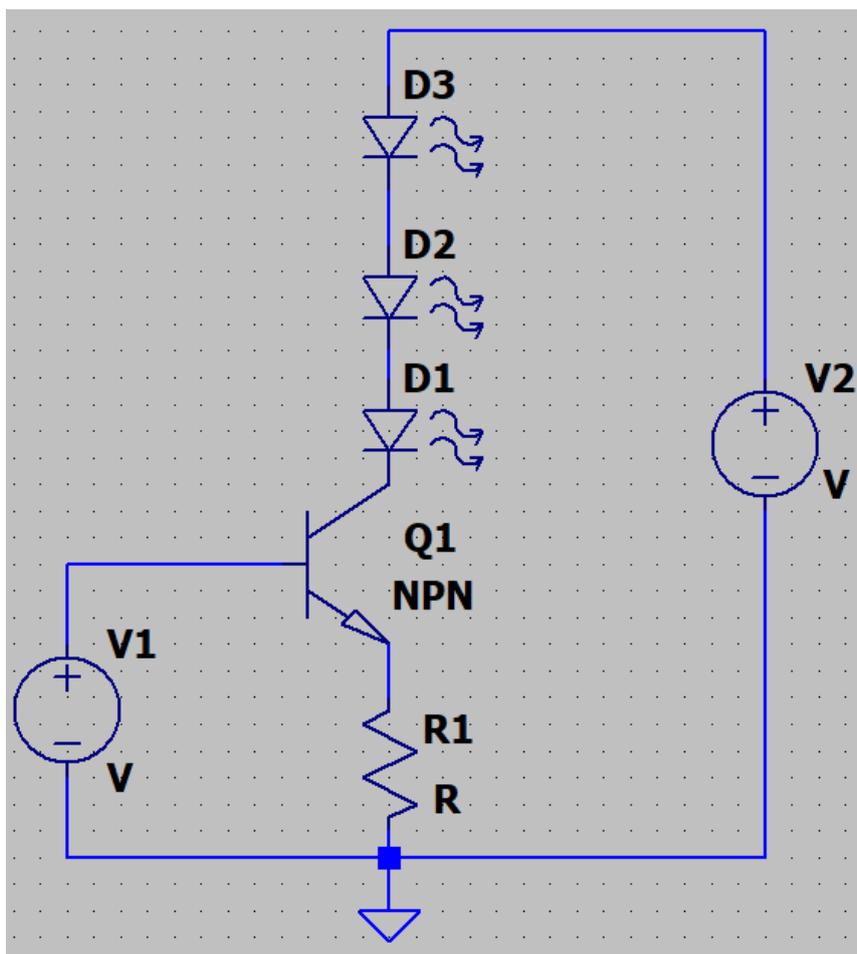


Рисунок 1.8 – Электрическая схема в программе LTspice XVII до использования встроенные spice моделей электронных компонентов и указания их значений

необходимую модель, следует нажать левой кнопкой мыши на кнопку «**Pick New Transistor**», после чего откроется окно со списком spice моделей n-p-n транзистора, в котором нужно выбрать модель, указанную в таблице 1.1. Для данного примера необходимо выбрать spice модель транзистора с названием **ZTX1048A**.

Программа LTspice XVII позволяет добавлять собственные spice модели, которые можно найти на сайте производителей электронных компонентов.

Таблица 1.1. Сведения о компонентах электрической схемы (Пример 1.1)

Компонент	Позиционное обозначение	Название в библиотеке компонентов	Модель	Параметры электронного компонента
Светодиод (3 шт.)	D1 – D3	LED	QTLP690C	$U_D \approx 1,9 \text{ В}$

п-р-п транзистор	Q1	npn	ZTX1048A	$U_{бэ} \approx 0,6 \text{ В}$ $U_{кэ} \approx 1,9 \text{ В}$
Источник опорного напряжения	V1	voltage	—	4 В
Источник питания	V2			?
Резистор	R1	res	—	?

Расчет производится по приведенным ранее формулам. Сопротивление $R1$ выражается из формулы (1.2).

$$R1 = \frac{U_{оп} - 0,6}{I} = 340 \Omega.$$

Напряжение источника питания рассчитывается исходя из формулы (1.3).

$$U_{un} \geq 3 \cdot 1,9 + R1 \cdot I + (U_{кэ})_{\min} = 11 \text{ В},$$

$$U_{un} \geq 11 \text{ В}.$$

После произведенного расчета можно указать значения параметров компонентов схемы. Изменение значения параметра электронного компонента осуществляется нажатием правой кнопкой мыши на схематическое обозначение компонента схемы либо на его текущее численное значение. После добавления компонентов в рабочую область программы LTspice XVII значения параметров компонентов схемы устанавливаются автоматически в буквенном виде. Для того чтобы установить нужное значение параметра компонента, необходимо заменить буквенное значение на числовое. Например, для источника опорного напряжения с позиционным обозначением $V1$ вместо буквенного значения «V» необходимо установить значение «4», согласно таблице 1.1. Аналогичным способом осуществляется настройка параметров других компонентов схемы.

Для запуска симуляции необходимо нажать на пиктограмму , появится окно для выбора режима симуляции. В данном примере необходимо использовать анализ временных процессов (**Transient**), для этого необходимо установить время окончания анализа переходных процессов (**Stop time**), равное одной секунде (рисунок 1.9), после чего нажать кнопку **ОК**.

После нажатия кнопки **ОК** запустится анализ временных процессов в интервале 1 секунда и появится дополнительное окно. Для того чтобы проверить правильность проведенных расчетов, необходимо навести указатель мыши на один из светодиодов до появления символа , при нажатии на который в дополнительном окне появляется зависимость тока от времени (рисунок 1.10).

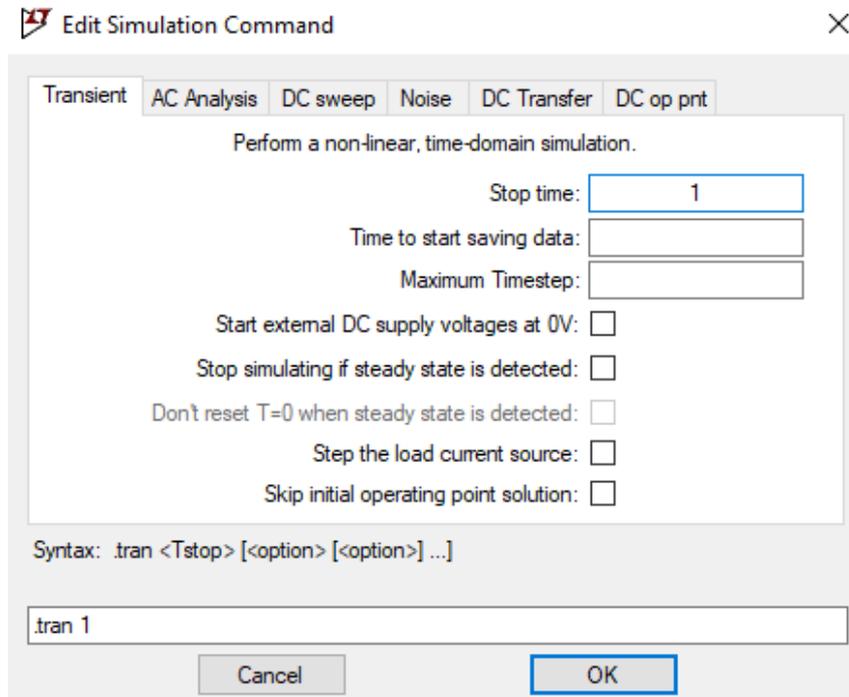
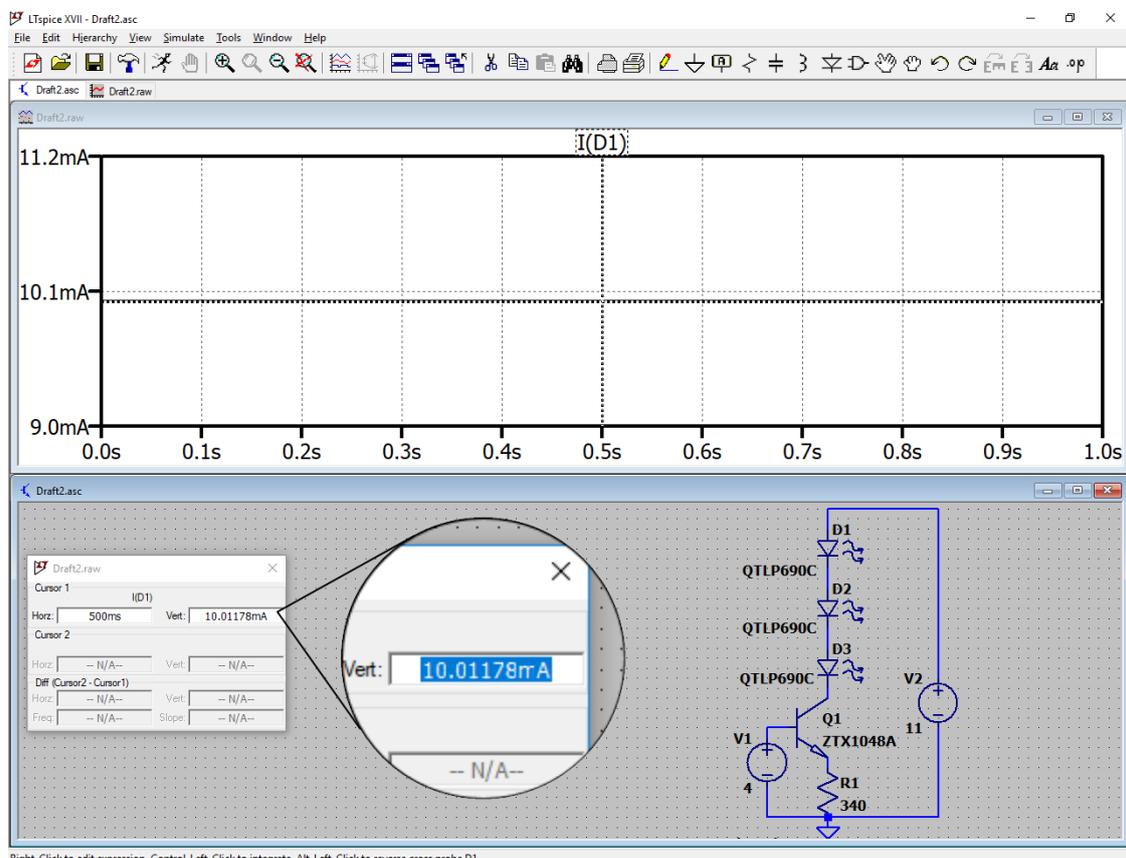


Рисунок 1.9 – Настройки режима анализа программы LTspice XVII

Нажатие левой кнопкой мыши на название графика «**I(D1)**» активирует курсор, с помощью которого можно узнать точное значение тока накачки.



Right-Click to edit expression. Control-Left-Click to integrate. Alt-Left-Click to reverse cross probe D1.

Рисунок 1.10 – Проверка выполненных расчетов с использованием программы LTspice XVII

В результате выполнения данного примера были проведены численные расчеты параметров электрической схемы, а также произведена проверка с использованием программы симуляции электрических схем LTspice XVII, которая подтвердила правильность произведенных расчетов.

Пример 1.2.

В программе симуляции электрических схем LTspice XVII можно провести анализ передаточных характеристик схемы по постоянному току. Необходимо создать электрическую схему, представленную на рисунке 1.3, с параметрами компонентов электрической схемы из таблицы 1.2.

Таблица 1.2. Сведения о компонентах электрической схемы (Пример 1.2)

Компонент	Позиционное обозначение	Название в библиотеке компонентов	Модель	Параметры электронного компонента
Светодиод	D1	LED	QTLP690C	$U_D \approx 1,9 \text{ В}$
n-p-n транзистор	Q1	nnp	ZTX1048A	$U_{бэ} \approx 0,6 \text{ В}$ $U_{кэ} \approx 1,9 \text{ В}$
Источник опорного напряжения	V1	voltage	–	0 – 4 В (шаг 0,5 В)
Источник питания	V2			7,2 В
Резистор	R1	res	–	340 Ом

Затем в строке меню необходимо выбрать **Simulate > Edit Simulation Cmd**, в открывшемся окне открыть вкладку передаточных характеристик по постоянному току (**DC Analysis**) и заполнить поля согласно рисунку 1.11, после чего запустить моделирование.

Для начала необходимо измерить зависимость тока накачки $I(U_{on})$ от величины опорного напряжения. Измерение зависимости тока светодиода $D1$ от опорного напряжения производится после запуска моделирования в режиме анализа передаточных характеристик по постоянному току. После нажатия пиктограммы «**Run**» в верхней части рабочего поля автоматически открывается дополнительное окно. Для того чтобы измерить зависимость тока коллектора от опорного напряжения $I(U_{on})$, необходимо навести курсор мыши на светодиод до появления токового пробника , указывающего на измерение тока, затем нажать на левую кнопку мыши.

Результатом данных действий является построенная зависимости тока

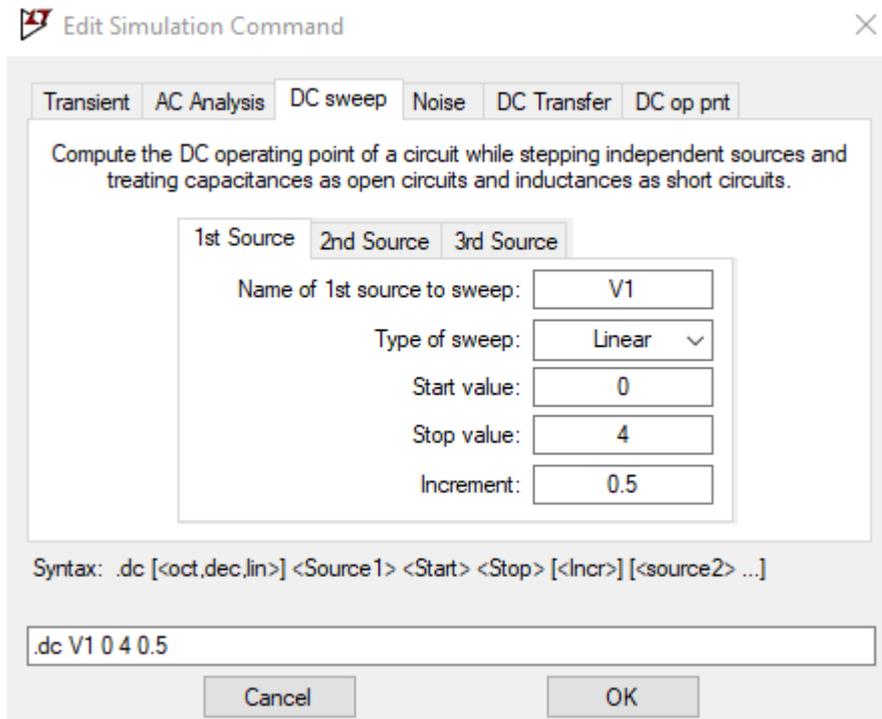


Рисунок 1.11 – Настройка анализа передаточных характеристик по постоянному току в программе LTspice XVII

коллектора от опорного напряжения, представленная на рисунке 1.12. Анализируя данный график, можно сделать вывод о минимальном напряжении опорного источника. Также очевидно, что при превышении порогового напряжения источника опорного напряжения зависимость коллекторного тока приобретает линейный вид.

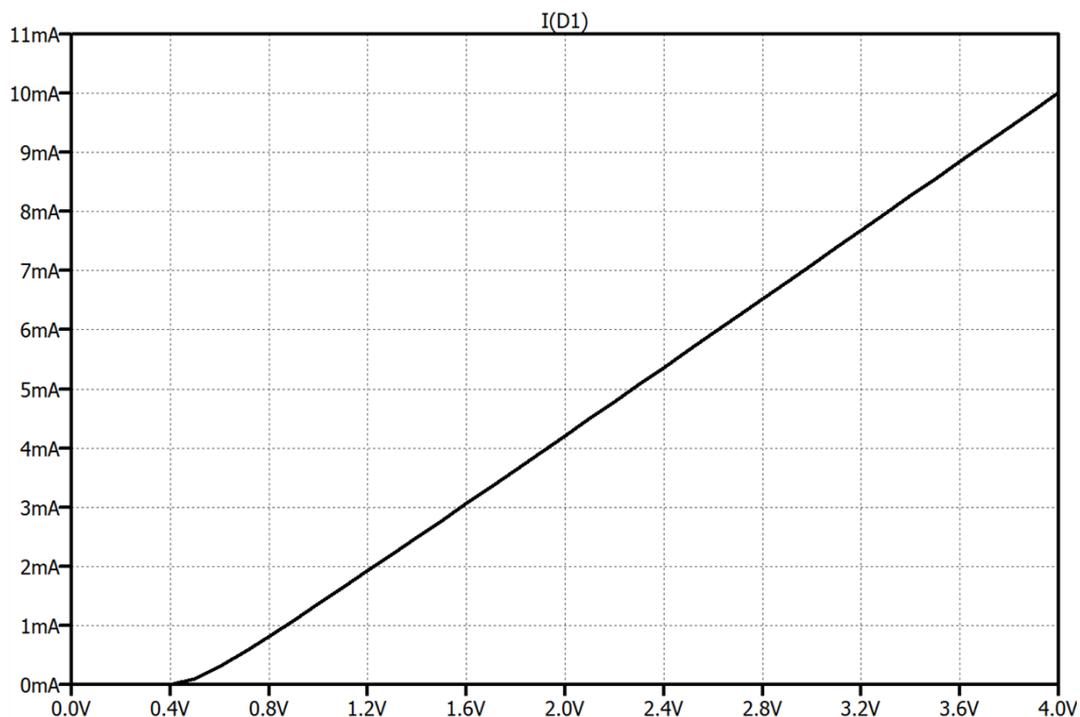


Рисунок 1.12 – Измеренная зависимость коллекторного тока от опорного напряжения $I(U_{on})$

Для измерения напряжения необходимо навести курсор мыши на измеряемую часть электрической цепи до появления красного пробника , измерение падения напряжения на элементе схемы осуществляется удержанием левой кнопки мыши и перемещением курсора мыши в область с другим потенциалом (рис.1.13).

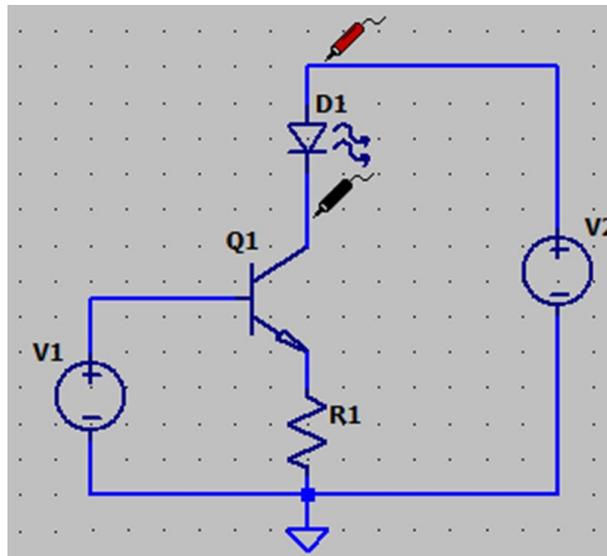


Рисунок 1.13 – Измерение напряжения между двумя точками схемы

На рисунке 1.14 представлена зависимость напряжения на диоде от опорного напряжения $U_D(U_{on})$, по графику видно, что при опорном напряжении $U_{on} = 0$ В на светодиоде падает напряжение порядка 1 В, данное явление связано с обратными токами р-п перехода коллектор-база n-p-n транзистора.

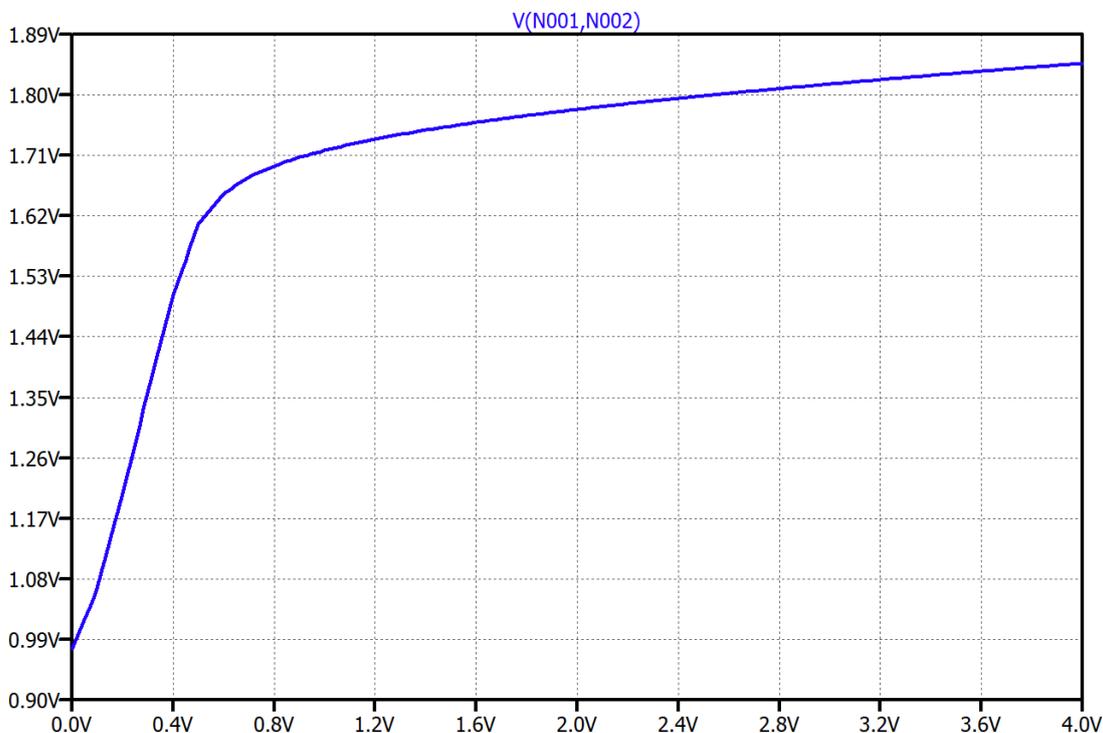


Рисунок 1.14 – Измеренная зависимость падения напряжения на светодиоде от опорного напряжения $I(U_{on})$

В случае $U_{on} = 0 \text{ В}$ переход коллектор-база смещен в обратном направлении, транзистор закрыт, однако через закрытый р-п переход коллектор-база протекают обратные токи порядка 1 нА . При превышении порогового напряжения транзистор открывается, увеличивает значение коллекторного тока, что приводит к увеличению напряжения на светодиоде.

Дальнейшее увеличение опорного напряжения приводит к меньшему приращению напряжения светодиода, что связано с нелинейностью вольт-амперной характеристики (ВАХ) светодиода.

Задание 1.1.

Пример варианта задания представлен в таблице 1.3.

Таблица 1.3. Пример варианта (Задание 1.1)

Компонент	Модель	Параметры электронного компонента
Светодиод ($n = 2$)	QTLP690C	$I = 10 \text{ мА}$
		$U_D \approx 1,9 \text{ В}$
п-р-п транзистор	ZTX1048A	$U_{бэ} \approx 0,6 \text{ В}$ $U_{кэ} \approx 1,9 \text{ В}$
Источник опорного напряжения	—	$U_{on} = 2 \text{ В}$
		$(U_{on})_{min} = 0 \text{ В}$ $(U_{on})_{max} = 3 \text{ В}$ $\Delta U_{on} = 0,5 \text{ В}$
Источник питания	—	$(U_{un})_{min} = ?$
		$(U_{un})_{max} = 12$ $\Delta U_{un} = 0,5 \text{ В}$
Резистор	—	$R = ?$

Согласно выданным вашим преподавателем вариантам заданий:

- Рассчитать сопротивление R и минимальное напряжение источника питания $(U_{un})_{min}$ для схемы стабилизации тока (рисунок 1.3);
- Построить зависимость $I(U_{on})$ при $R=const$, $U_{un}=const$ в диапазоне $(U_{on})_{min} - (U_{on})_{max}$, дискретность изменения ΔU_{on} должен обеспечить снятие 4 – 5 точек характеристики $I(U_{on})$.

- В программе LTspice XVII создать электрическую схему и сравнить характеристику $I(U_{on})$ с рассчитанной, а также, с вольт-амперной характеристикой кремниевого диода.

- Построить зависимость тока светодиода от напряжения источника питания в диапазоне $(U_{un})_{min} - (U_{un})_{max}$ с дискретность измерения ΔU_{un} , указанным в задании. Величину опорного напряжения принять равной $U_{оп} = \frac{(U_{оп})_{min} - (U_{оп})_{max}}{2}$.

1.1.2 Схемы токовой накачки на основе БТ и стабилитрона

Схемы стабилизации тока могут быть созданы без использования дополнительного источника напряжения, для этого необходимо использовать схему с делителем напряжения. Простейшая схема делителя напряжения состоит из двух последовательно включенных резисторов. Также делитель напряжения может быть создан с использованием стабилитрона в качестве стабилизатора напряжения, напряжение пробоя которого равно заданному значению опорного напряжения ($U_{on} = U_{проб}$). Наиболее часто вместо использования источника опорного напряжения применяется схема с использованием стабилитрона V_D и балластного резистора $R1$, который ограничивает ток стабилитрона в его рабочих пределах. На рисунке 1.15 представлена схема стабилизатора тока с использованием стабилитрона $D1$.

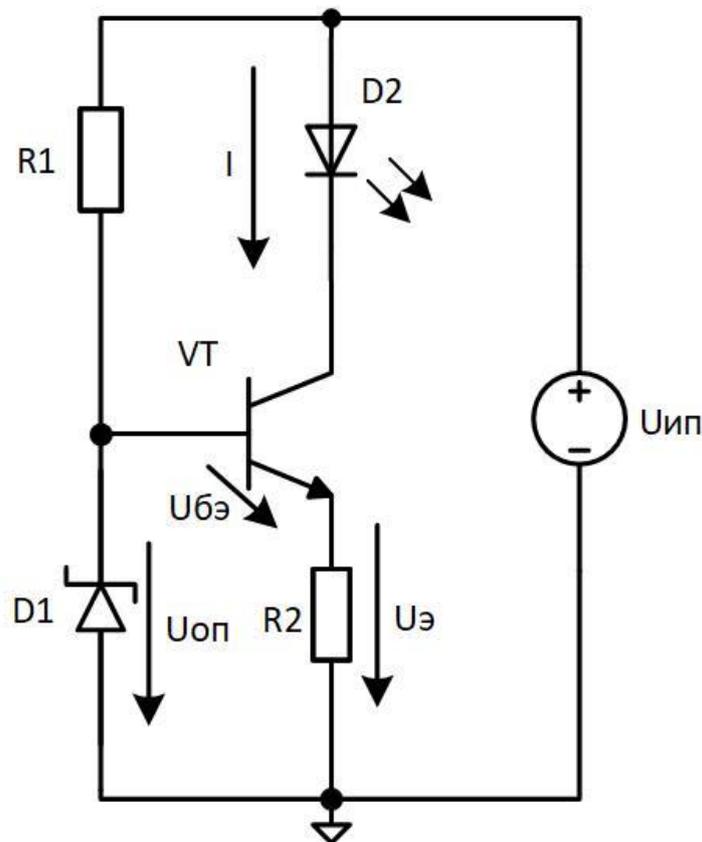


Рисунок 1.15 – Схема источника тока на основе биполярного транзистора VT и стабилитрона $D1$

Расчет сопротивления $R1$ производится с учетом токов базы и стабилитрона. Значение тока через резистор $R1$ должно превышать сумму тока базы транзистора VT ($I_b = I/\beta$), где β – коэффициент усиления транзистора VT по току, и минимального тока стабилитрона $(I_{D1})_{min}$.

$$R1 \leq \frac{U_{ин} - U_{проб}}{(I/\beta) + (I_{D1})_{min}}. \quad (1.4)$$

Например, при напряжении источника питания $U_{ин}=15$ В, напряжении пробоя стабилитрона $U_{проб}=5$ В, токе нагрузки $I=10$ мА, коэффициенте усиления по току транзистора $\beta=100$ и минимальном токе стабилитрона $(I_{D1})_{min}=2$ мА сопротивление $R1=4,7$ кОм.

Пример 1.3.

На рисунке 1.15 представлена схема стабилизации источника тока на основе биполярного транзистора с использованием стабилитрона в качестве источника опорного напряжения. Выбор стабилитрона в библиотеке компонентов программы LTspice XVII осуществляется с помощью ввода буквенного обозначения стабилитрона «zener» в строке поиска окна выбора компонентов. Напряжение пробоя стабилитрона зависит от выбранной spice модели. Для выбора spice модели необходимо нажать правой кнопкой мыши по схематическому обозначению стабилитрона и в появившемся окне нажать на кнопку «**Pick New Diode**». В новом окне представлен список различных типов полупроводниковых диодов, для удобства отображения можно нажать левой кнопкой мыши на название столбца «**Type**» и произвести сортировку по типу диода. В столбце «**Vbrkdn**» расположены значения напряжений пробоя spice моделей стабилитронов. В данном примере была выбрана spice модель с названием **1N750** с напряжением пробоя $U_{проб}=4,7$ В, выбранные параметры электрической схемы представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4. Сведения о компонентах электрической схемы (Пример 1.3)

Компонент	Позиционное обозначение	Название в библиотеке компонентов	Модель	Параметры электронного компонента
Стабилитрон	D1	zener	1N750	$U_{проб}= 4,7$ В
Светодиод	D2	LED	QTLP690C	$U_D \approx 1,9$ В
п-р-п транзистор	Q1	npn	ZTX1048A	$U_{бэ} \approx 0,6$ В $U_{кэ} \approx 1,9$ В
Источник питания	V	voltage		10 В
Резисторы	R1	res	–	1 кОм

	R2			$R_{min} = 340 \text{ Ом}$ $R_{max} = 1 \text{ кОм}$ $\Delta R = 10 \text{ Ом}$
--	----	--	--	---

При анализе схемы стабилизации тока снимается характеристика коллекторного тока от сопротивления в эмиттерной цепи $I(R2)$, опорное напряжение $U_{on}=U_{проб}=const$ и напряжение источника питания $U_{un}=const$. Для того чтобы построить зависимость $I(R2)$, необходимо сначала задать диапазон, в котором изменяется значение сопротивления $R2$, а также шаг, с которым изменяется сопротивление. Нажмите правой кнопкой мыши на схематическое обозначение резистора $R2$, вместо автоматически присвоенного программой LTspice XVII значения «R» введите «{R}». Затем в панели инструментов программы LTspice XVII необходимо выбрать пиктограмму  (**Spice Directive**), в которой можно указать команды для выполнения в процессе симуляции работы электрической схемы. После выбора **Spice Directive** открывается новое окно для ввода команд, введите выражение «**.step param R 340 1k 10**», где **step param** –команда, осуществляющая изменение параметра **R** от минимального значения (**340**) до максимального (**1k**) с заданным шагом (**10**). Результатом проделанных действий является электрическая схема, представленная на рисунке 1.16.

Расчет схемы производится в режиме анализа по постоянному току (**DC Operating Point**). После запуска моделирования необходимо навести курсор мыши на светодиод и нажать левую кнопку мыши при появлении токового щупа.

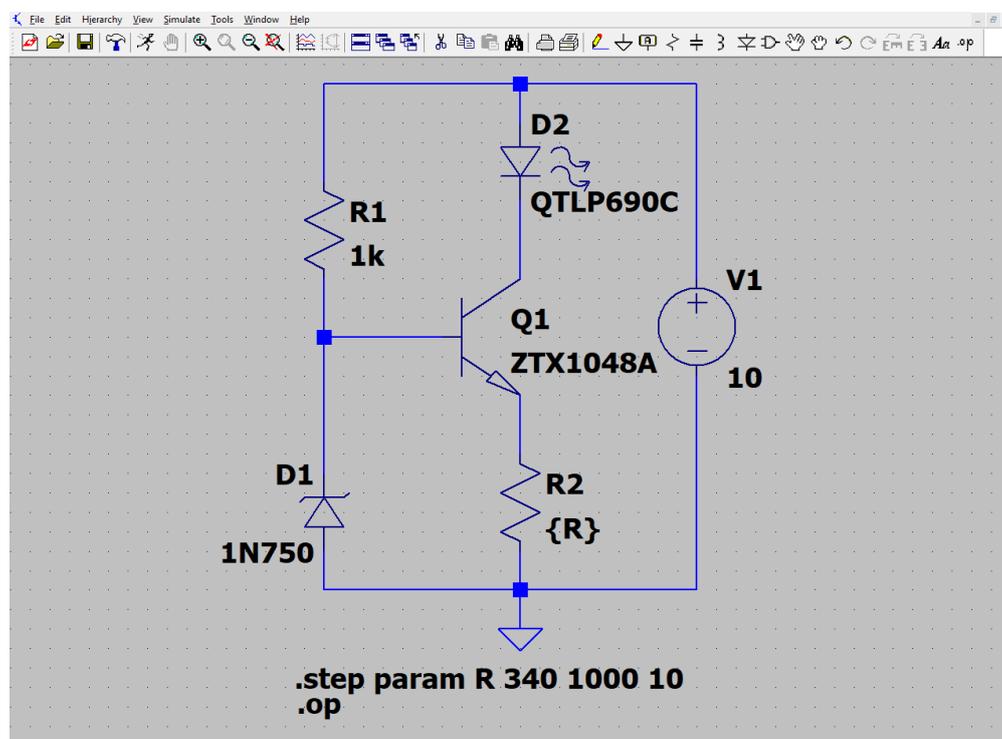


Рисунок 1.16 – Схема стабилизации тока с использованием стабилизатора в программе LTspice XVII

В появившемся окне появится измеренная зависимость $I(R2)$, представленная на рисунке 1.17.

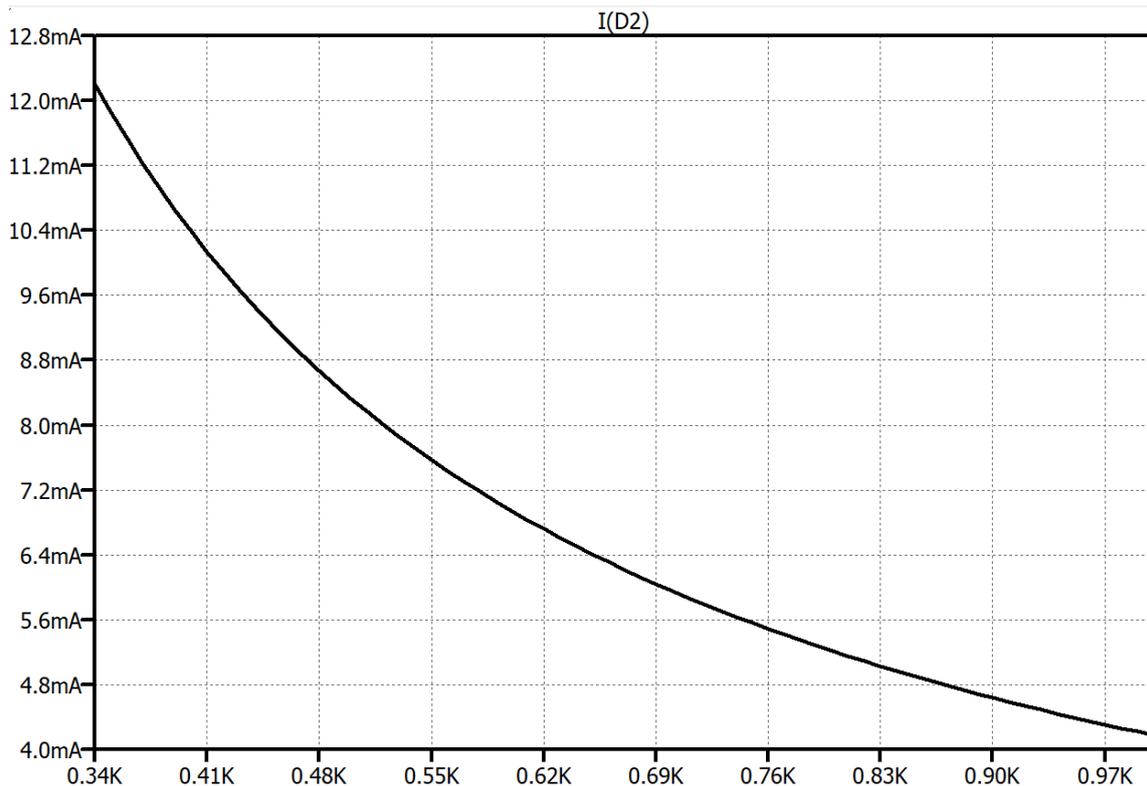


Рисунок 1.17 – Измеренная зависимость тока накачки от сопротивления R2

Задание 1.2.

Пример варианта задания представлен в таблице 1.5.

Таблица 1.5. Пример варианта (Задание 1.2)

Компонент	Модель	Параметры электронного компонента
Стабилитрон	1N750	$U_{проб} = 4,7 \text{ В}$ $I_{min} = 2 \text{ мА}$
Светодиод (n = 2)	QTLP690C	$I = 4 - 16 \text{ мА}$
		$U_D \approx 1,9 \text{ В}$
n-p-n транзистор	ZTX1048A	$U_{бэ} \approx 0,6 \text{ В}$ $U_{кэ} \approx 1,9 \text{ В}$ $\beta = 450$
Источник питания		$U_{ин} = ?$

Резистор	—	$R2 = ?$
		$\Delta R2 = 10 \text{ Ом}$

Согласно выданным вашим преподавателем вариантам заданий:

- Рассчитать значения сопротивлений $R2$, $R1$ и минимальное напряжение источника питания $U_{ин}$ для схемы стабилизации тока (рисунок 1.15);
- Построить зависимость $I(R2)$ при $R1 = \frac{R1_{max} - R1_{min}}{2}$, $U_{оп} = U_{проб}$ в диапазоне $(R2)_{min} - (R2)_{max}$, дискретность изменения $\Delta R2$ должен обеспечить снятие 4 – 5 точек характеристики $I(R2)$.
- В программе LTspice создать электрическую схему и сравнить характеристику $I(R2)$ с рассчитанной.
- Последовательно увеличивая число светодиодов и каждый раз производя измерение тока, снять зависимости $I(n)$, где n — число последовательно включенных светодиодов. Определить число светодиодов, при котором транзистор перестаёт выполнять функцию источника стабильного тока.

1.1.3 Схемы токовой накачки на основе ПТ

Полевые транзисторы обладают несколькими преимуществами по сравнению с биполярными транзисторами. Входное сопротивление полевых транзисторов больше, они потребляют меньший ток и, следовательно, меньшую мощность. Полевые транзисторы менее чувствительны к нестабильности источника питания, дополнительным преимуществом является отсутствие влияния напряжения коллектор-база на коллекторный ток (эффект Эрли). Также температурная стабильность полевых транзисторов лучше, а уровень шумов ниже, чем у биполярных транзисторов, в связи с отсутствием инжекции неосновных носителей заряда. Одна из распространенных схем стабилизации тока для питания светодиодов и лазерных диодов с использованием полевого транзистора представлена на рисунке 1.18.

Принцип работы схемы стабилизации тока на основе полевого транзистора схож с принципом работы схемы на основе биполярного транзистора. Кусочно-линейная аппроксимированная передаточная характеристика МОП-транзистора с индуцированным каналом n-типа представлена на рисунке 1.19.

Дифференциальное сопротивление МОП-транзистора с индуцированным каналом n-типа определяется как тангенс угла наклона передаточной характеристики $tg(\varphi)$. При данной кусочно-линейной аппроксимации ток стока зависит от напряжения затвор-исток линейно.

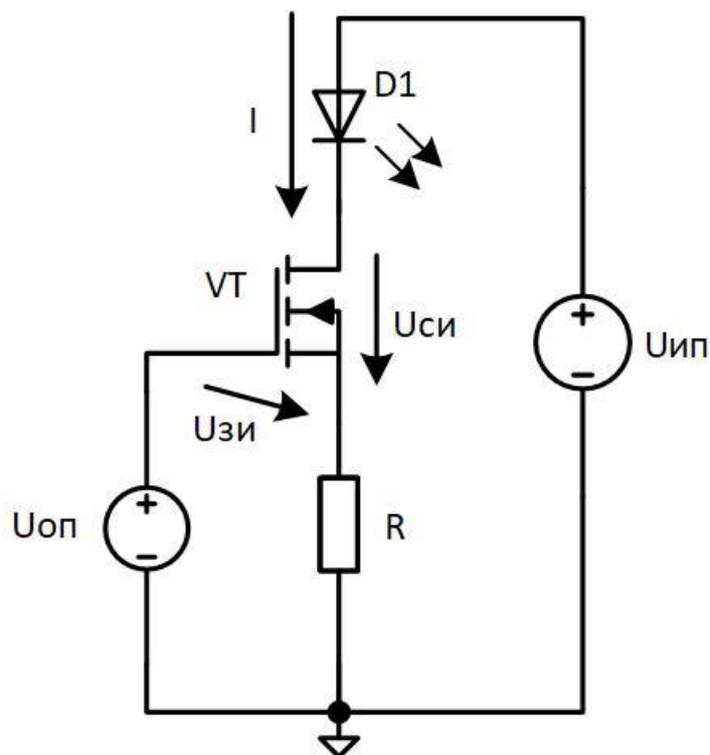


Рисунок 1.18 – Схема стабилизатора тока на основе полевого транзистора

В формуле (1.5) $U_{пор}$ — пороговое напряжение, имеющее у разных типов транзисторов величину в диапазоне 1–4 В; $R_{диф}$ — дифференциальное сопротивление, равное тангенсу угла наклона φ .

$$U_{зи} = U_{пор} + R_{диф}I. \quad (1.5)$$

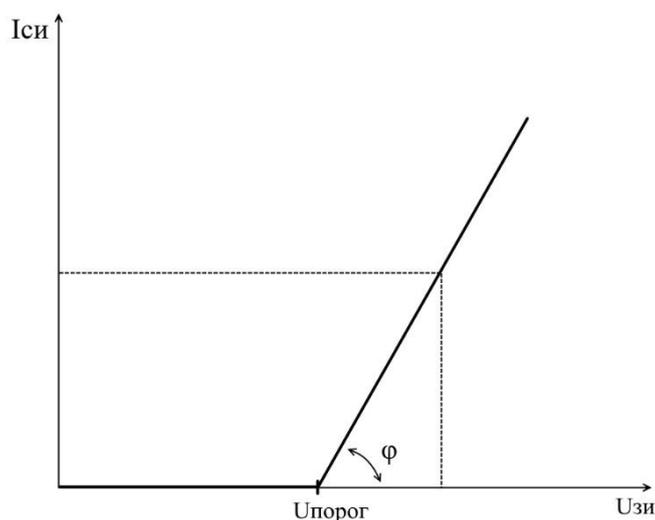


Рисунок 1.19 – Кусочно-линейная аппроксимация передаточной характеристики n-канального МОП-транзистора с индуцированным каналом

Ток накачки ($I = I_{си}$) можно найти с помощью 2-го закона Кирхгофа для входного контура схемы стабилизации тока с учетом формулы (1.5).

$$I = \frac{U_{on} - U_{зи}}{R + R_{диф}}. \quad (1.6)$$

При использовании МОП-транзисторов с большой крутизной передаточной функции дифференциальное сопротивление стремится к нулю ($R_{диф}$), поэтому им можно пренебречь. Таким образом, уравнение (1.5) приобретает вид $U_{зи} = U_{пор}$, тогда ток нагрузки выражается как

$$I = \frac{U_{оп} - U_{пор}}{R}. \quad (1.7)$$

В схеме стабилизации тока на основе МОП-транзистора ток нагрузки можно регулировать так же, как и в схеме на основе биполярного транзистора, изменяя опорное напряжение $U_{он}$ и сопротивление в цепи истока R .

Напряжение источника питания $U_{ин}$ необходимо выбирать исходя из количества светодиодов (лазерных диодов), напряжения опорного источника $U_{он}$, порогового напряжения МОП-транзистора $U_{пор}$, его сопротивления канала, а также максимального тока стабилизации:

$$U_{ин} \geq (R + R_{кан})I + n \cdot U_{лд}. \quad (1.8)$$

В данной формуле $R_{кан}$ – сопротивление канала МОП- транзистора, $U_{лд}$ – напряжение на одном светодиоде (лазерном диоде), n – количество светодиодов (лазерных диодов), R – сопротивление в цепи истока, $U_{пор}$ – пороговое напряжение МОП-транзистора, $U_{он}$ – опорное напряжение, I – ток через светодиод (лазерный диод).

Пример 1.4.

В программе симуляции работы электрических схем LTspice XVII была создана схема, представленная на рисунке 1.20. На данном рисунке представлена схема стабилизации тока с МОП-транзистором, у которой в качестве нагрузки используются два светодиода $D1$, $D2$, в качестве spice модели МОП-транзистора использовалась модель **B5H114** n-типа с сопротивлением канала в открытом состоянии $R_{кан} \approx 500$ мОм. В данном примере необходимо обеспечить ток нагрузки, равный $I = 10$ мА, величина падения напряжения на одном светодиоде при данном токе $U_D \approx 1,9$ В. Необходимо определить сопротивление резистора $R1$ и минимальное напряжение источника питания. Все необходимые сведения о компонентах электрической схемы представлены в таблице 1.6.

В данном примере необходимо запустить LTspice XVII в режиме анализа переходных процессов (**Transient**) и указать время окончания симуляции $t_{stop} = 1$ с.

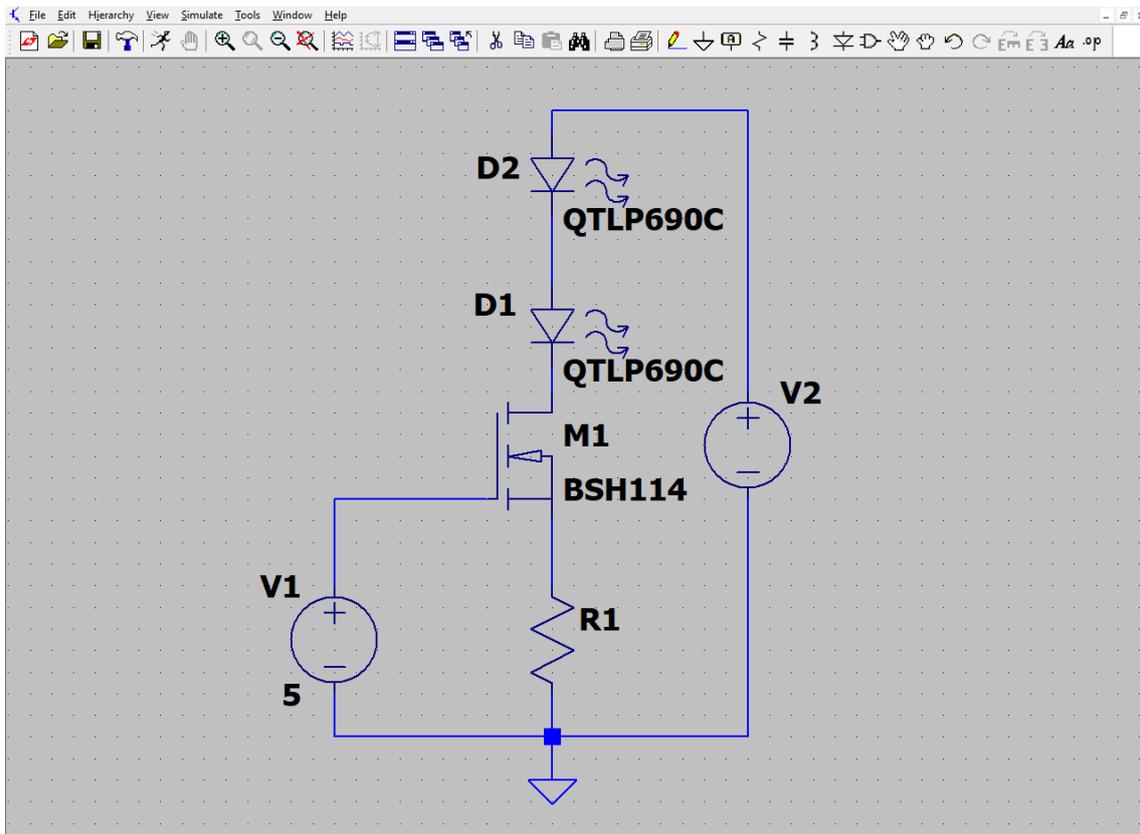


Рисунок 1.20 – Схема стабилизации тока двух светодиодов на основе полевого транзистора n-типа

В данном примере используется МОП-транзистор с большой крутизной передаточной функции, в связи с этим можно пренебречь $R_{\text{диф}} \approx 0$. Тогда для вычисления тока нагрузки формула (1.7) приобретает вид

$$R = \frac{U_{\text{оп}} - U_{\text{пор}}}{I} = \frac{5 - 2,9}{0,01} = 190\Omega.$$

Таблица 1.6. Сведения о компонентах электрической схемы (Пример 1.4.)

Компонент	Позиционное обозначение	Название в библиотеке компоненто в	Модель	Параметры электронного компонента
Светодиод (2 шт.)	D1 – D2	LED	QTLP690C	$I = 10 \text{ мА}$
				$U_D \approx 1,9 \text{ В}$
МОП-транзистор с индуцированным каналом n-типа	M1	nmos	B5H114	$U_{\text{пор}} \approx 2,9 \text{ В}$ $R_{\text{кан}} \approx 500 \text{ мОм}$

Источник опорного напряжения	V1	voltage	–	5 В
Источник питания	V2			?
Резистор	R1	res	–	?

$$U_{un} = 2U_D + (R + R_{кан})I = 3,8 + 0,01 \cdot 190,5 \approx 5,9В. \quad (1.9)$$

Задание 1.3.

Пример варианта задания представлен в таблице 1.7.

Таблица 1.7. Пример варианта (Задание 1.3)

Компонент	Модель	Параметры электронного компонента
Светодиод (n = 2)	QTLP690C	$I = 4 - 16 \text{ мА}$
		$U_D \approx 1,9 \text{ В}$
МОП-транзистор с индуцированным каналом n-типа	B5H114	$U_{пор} \approx 2,9 \text{ В}$ $R_{кан} \approx 500 \text{ мОм}$
Источник опорного напряжения	–	$U_{оп} = 5 \text{ В}$
Источник питания	–	$(U_{un})_{min} = ?$ $(U_{un})_{min} = 17 \text{ В}$ $\Delta U_{un} = 1 \text{ В}$
Резистор	–	$R = ?$

Согласно выданным вашим преподавателем вариантам заданий:

- Рассчитать сопротивление R и минимальное напряжение источника питания $(U_{un})_{min}$ для схемы стабилизации тока (рисунок 1.18);
- Построить зависимость $I(R)$ при $U_{оп} = 5В$ в диапазоне $(R)_{min} - (R)_{max}$, дискрет изменения ΔR должен обеспечить снятие 4 – 5 точек характеристики $I(R)$.

- В программе LTspice создать электрическую схему и сравнить характеристику $I(R)$ с рассчитанной.

- Построить зависимость тока светодиода от напряжения источника питания в диапазоне $(U_{un})_{min} - (U_{un})_{max}$ с дискретом измерения ΔU_{un} , указанным в задании. Величину опорного напряжения принять равной $U_{оп} = 5В$.

1.1.4 Схемы токовой накачки на основе ПТ и стабилитрона

В схемах стабилизации тока на полевом транзисторе можно использовать стабилитрон с напряжением пробоя, равным опорному напряжению $U_{он} = U_{проб}$, в качестве стабилизатора напряжения так же, как и в схеме стабилизатора на основе биполярного транзистора (рисунок 1.5). На рисунке 1.21 представлена схема стабилизатора тока на основе ПТ и стабилитрона.

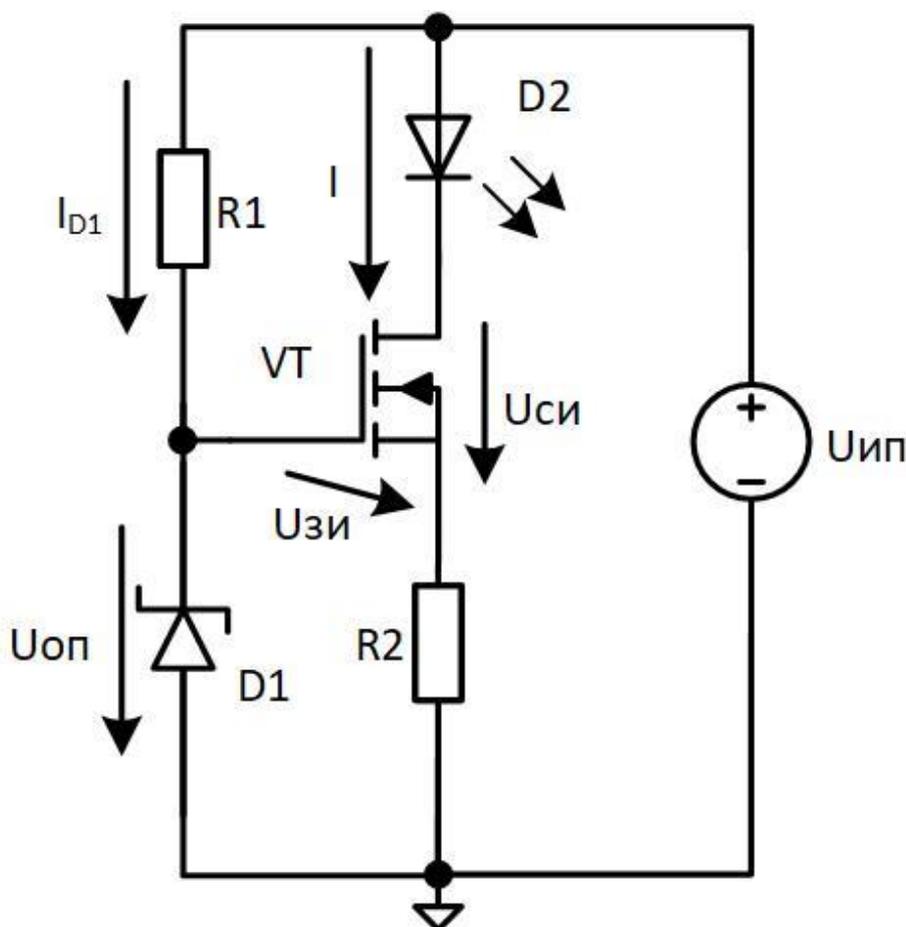


Рисунок 1.21 – Схема стабилизации тока на основе полевого транзистора с использованием стабилитрона

Сопротивление $R1$ необходимо подбирать с учетом тока стабилитрона (I_{D1}), который может составлять около 2 – 3 мА. Сопротивление $R1$ рассчитывается по формуле

$$R1 = \frac{U_{ип} - U_{проб}}{I_{D1}}. \quad (1.10)$$

Пример 1.5.

На рисунке 1.22 представлена схема, созданная в программе LTspice XVII. В качестве стабилитрона используется spice модель **BZX84C6V2L** с напряжением пробоя $U_{проб} = 6,2 \text{ В}$. Ток накачки в данной конфигурации электрической схемы составляет $I = 16 \text{ мА}$. В таблице 1.8 представлены параметры созданной схемы.

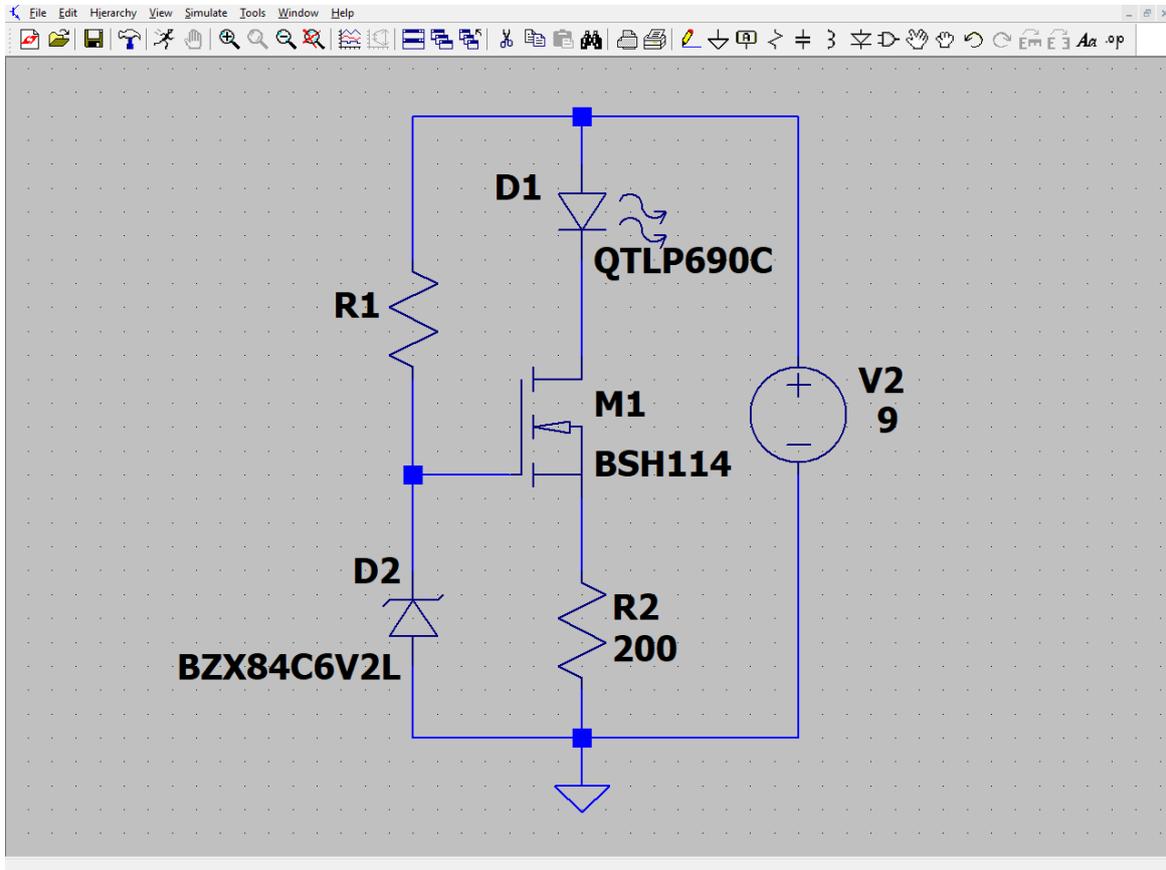


Рисунок 1.22 – Схема стабилизации тока с использованием МОП - транзистора и стабилитрона

Для расчёта сопротивления $R1$ необходимо воспользоваться формулой (1.10), тогда

$$R_1 = \frac{U_{ин} - U_{проб}}{I_{D1}} = \frac{9 - 6,2}{0,001} = 2,8k\Omega.$$

Таблица 1.8. Сведения о компонентах электрической схемы (Пример 1.5)

Компонент	Позиционное обозначение	Название в библиотеке компонентов	Модель	Параметры электронного компонента
Стабилитрон	D2	zener	BZX84C6V2L	$U_{on} = U_{проб} = 6,2 \text{ В}$ $(I_{D2})_{min} = 1 \text{ мА}$

Светодиод	D1	LED	QTLP690C	$I = 15,5 \text{ мА}$
				$U_D \approx 1,9 \text{ В}$
МОП-транзистор с индуцированным каналом n-типа	M1	nmos	BSH114	$U_{пор} \approx 2,9 \text{ В}$ $R_{кан} \approx 500 \text{ мОм}$
Источник питания	V1	voltage	—	9 В
Резистор	R1	res	—	?
	R2			$R2 = 200 \text{ Ом}$

Для проверки правильности расчетов было произведено моделирование переходных процессов в интервале 1 с. На рисунке 1.23 представлен график тока стабилитрона от времени, что подтверждает правильность проделанных расчетов.

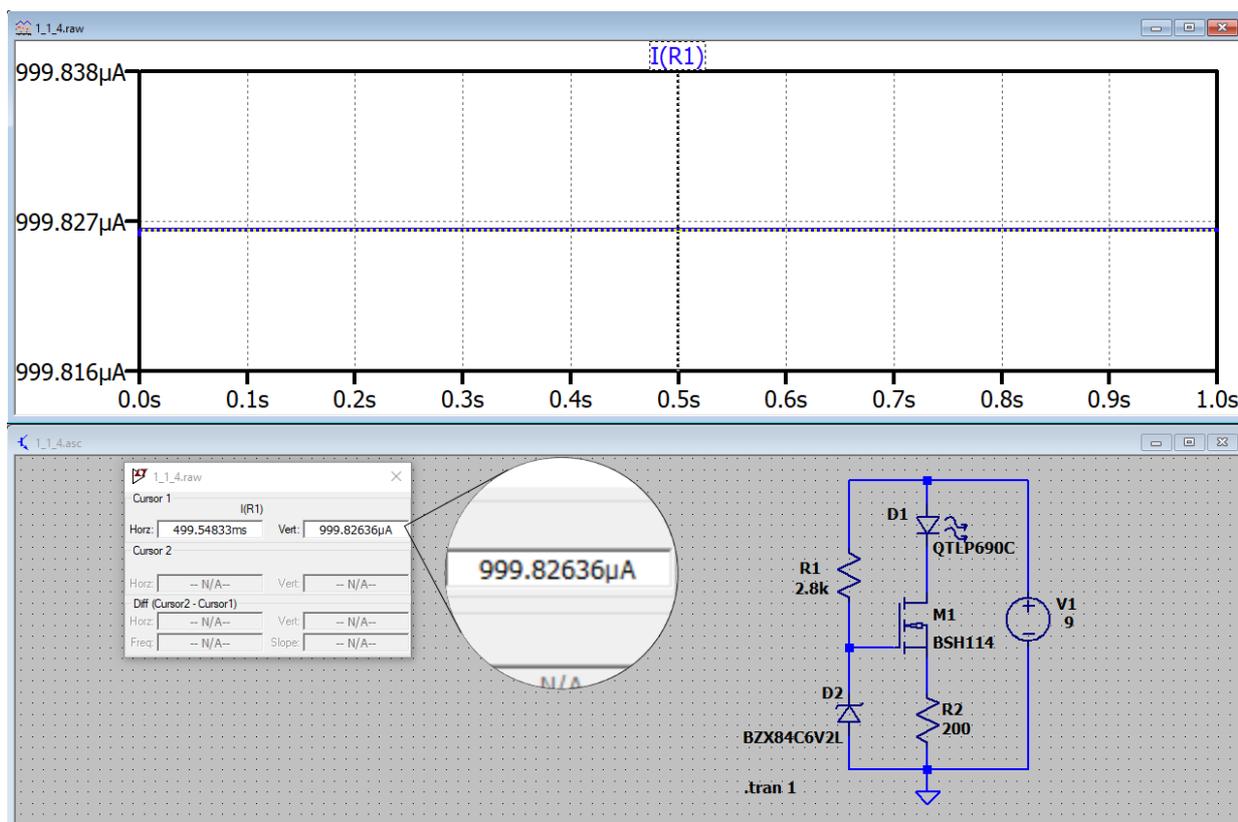


Рисунок 1.23 – Измеренная зависимость тока стабилитрона $D2$ от времени

Пример 1.6.

Условие: схема накачки, показанная на рисунке 1.22, должна обеспечить изменение тока нагрузки в диапазоне $50 - 100 \text{ мА}$. Сведения о компонентах

электрической схемы представлены в таблице 1.8. Необходимо определить диапазон изменения сопротивления $R2$ в цепи истока транзистора, обеспечивающий изменение тока нагрузки в заданном диапазоне $I=0,05—0,1$ А, найти величину сопротивления $R1$ из условия ограничения тока через стабилитрон на уровне $(I_{D2})_{min}=1$ мА.

Решение:

В схеме на рисунке 1.22 $U_{on}=6,2$ В. Найдём величину сопротивления $R2$ в цепи истока транзистора, соответствующего минимальному значению тока $I_{min}=0,05$ А.

$$R2_{max} = \frac{U_{оп} - U_{пор}}{I_{min}} = \frac{6,2 - 2,9}{0,05} = 66\Omega.$$

Определим величину сопротивления $R2_{min}$, соответствующего максимальному значению тока $I_{max}=0,1$ А.

$$R2_{min} = \frac{U_{оп} - U_{пор}}{I_{min}} = \frac{6,2 - 2,9}{0,1} = 33\Omega.$$

Рассчитаем величину сопротивления $R1$, ограничивающего ток через стабилитрон на уровне $(I_D)_{min}=1$ мА:

$$R1 = \frac{U_{шт} - U_{проб}}{I_{D1}} = \frac{9 - 6,2}{1 \cdot 10^{-3}} = 2,8k\Omega.$$

Если напряжение источника питания является стабилизированным, то при экспериментальном исследовании зависимости тока накачки I от опорного напряжения U_{on} можно использовать схему, показанную на рисунке 1.24.

Опорное напряжение U_{on} снимается с движка потенциометра R и подаётся на затвор транзистора. В нижнем положении движка потенциометра $(U_{on})_{min}=0$, а в верхнем положении $(U_{on})_{max} = \frac{R}{R + R1} U_{шт}$ должно соответствовать максимальному току накачки I_{max} .

Суммарное сопротивление $R + R1$ выбирается таким, чтобы замыкающийся в этой цепи ток составил несколько миллиампер.

Пример 1.7.

В схеме накачки, представленной на рисунке 1.24, используются три последовательно соединённых лазерных диодов, работающих в непрерывном режиме. Схема должна обеспечить максимальную величину тока накачки $I_{max}=0,1$ А. Напряжение на одном лазерном диоде при токе $0,1$ А составляет $1,9$ В,

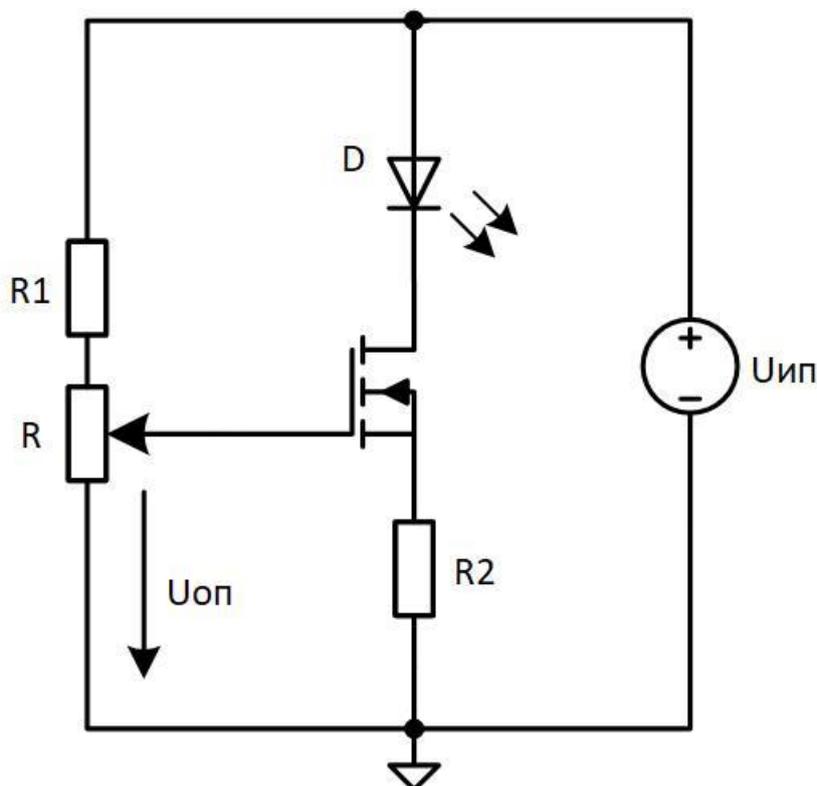


Рисунок 1.24 – Схема стабилизации тока на основе полевого транзистора с использованием подстроечного резистора

пороговое напряжение транзистора $U_{пор}=2,9$ В, сопротивление канала $R_{кан} = 0,5$ Ом. Максимальное опорное напряжение $(U_{оп})_{max} = 7$ В.

Найти величину сопротивления $R2$ в цепи истока транзистора, обеспечивающего максимальный ток нагрузки $I_{max}=0,1$ А. При найденном значении $R2$ определить величину опорного напряжения, при котором ток накачки составит $I=0,05$ А. Как следует изменить сопротивление $R2$, чтобы при максимальном опорном напряжении $(U_{оп})_{max}=7$ В ток накачки составил $I=0,05$ А? Определить минимальную величину напряжения источника питания. Рассчитать величины сопротивлений R и $R1$ из условия, что ток $I_{R1}=2$ мА.

Решение:

Найдём величину сопротивления $R2$, обеспечивающего максимальный ток накачки $I_{max}=0,1$ А

$$R2 = \frac{(U_{оп})_{max} - U_{пор}}{I_{max}} = \frac{7 - 2,9}{0,1} = 41 \Omega.$$

Рассчитаем величину опорного напряжения, соответствующего току $I=0,05$ А:

$$U_{оп} = U_{пор} + R2 \cdot I = 2,9 + 41 \cdot 0,05 = 4,95 \text{ В}.$$

Определим величину сопротивления R_2 , обеспечивающего ток $I=0,05 \text{ A}$ при $(U_{оп})_{max}$:

$$R_2 = \frac{(U_{оп})_{max} - U_{пор}}{I} = \frac{7 - 2,9}{0,05} = 82 \Omega.$$

Найдём минимальную величину напряжения источника питания:

$$U_{ин} \geq 3 \cdot U_D + (U_{оп})_{max} - U_{пор} + R_{кан} \cdot I_{max} = 3 \cdot 1,9 + 7 - 2,9 + 0,5 \cdot 0,1 \approx 9,85 \text{ В}.$$

Примем напряжение источника питания $U_{ин}=9,9 \text{ В}$. Рассчитаем величины сопротивлений R и $R1$.

$$R = \frac{(U_{оп})_{max}}{I_R} = \frac{7}{0,002} = 3,5 \text{ k}\Omega,$$

$$R1 = \frac{U_{ин} - (U_{оп})_{max}}{I_R} = \frac{9,9 - 7}{0,002} = 1,45 \text{ k}\Omega.$$

Задание 1.4.

Пример варианта задания представлен в таблице 1.9.

Таблица 1.9. Пример варианта (Задание 1.4)

Компонент	Модель	Параметры электронного компонента
Стабилитрон	BZX84C6V2L	$U_{проб} = 6,2 \text{ В}$ $I_{min} = 1 \text{ мА}$
Светодиод (n = 2)	QTLP690C	$I = 4 - 16 \text{ мА}$
		$U_D \approx 1,9 \text{ В}$
МОП-транзистор с индуцированным каналом n-типа	BSH114	$U_{пор} \approx 2,9 \text{ В}$ $R_{кан} \approx 500 \text{ мОм}$
Источник питания	—	$(U_{ин})_{min} = ?$
Резистор	—	$R1 = ?$
		$R2 = ?$

		$(R2)_{min} = 100 \text{ Ом}$ $(R2)_{max} = 5 \text{ кОм}$ $\Delta R2 = 100 \text{ Ом}$
--	--	---

Согласно выданным вашим преподавателем вариантам заданий:

- Рассчитайте сопротивление $R2$, $R1$ и минимальное напряжение источника питания $(U_{ин})_{min}$ для схемы стабилизации тока (рисунок 1.21);
- Построить зависимость $I(R2)$ при $R1 = \frac{R1_{max} - R1_{min}}{2}$, $U_{ин} > (U_{ин})_{min}$ в диапазоне $(R2)_{min} - (R2)_{max}$, дискретность изменения $\Delta R2$ должен обеспечить снятие 4 – 5 точек характеристики $I(R2)$.
- В программе LTspice XVII создать электрическую схему и сравнить характеристику $I(R2)$ с рассчитанной.
- Последовательно увеличивая число светодиодов и каждый раз производя измерение тока, снять зависимости $I(n)$, где n — число последовательно включенных светодиодов. Определить число светодиодов, при котором транзистор перестаёт выполнять функцию источника стабильного тока.

1.1.5 Схемы токовой накачки на основе операционного усилителя

Операционные усилители (ОУ) являются универсальными устройствами, с помощью которых можно построить множество электронных узлов. Наиболее простой схемой стабилизации тока является электрическая схема, представленная на рисунке 1.25. В данном случае операционный усилитель используется в схеме с отрицательной обратной связью.

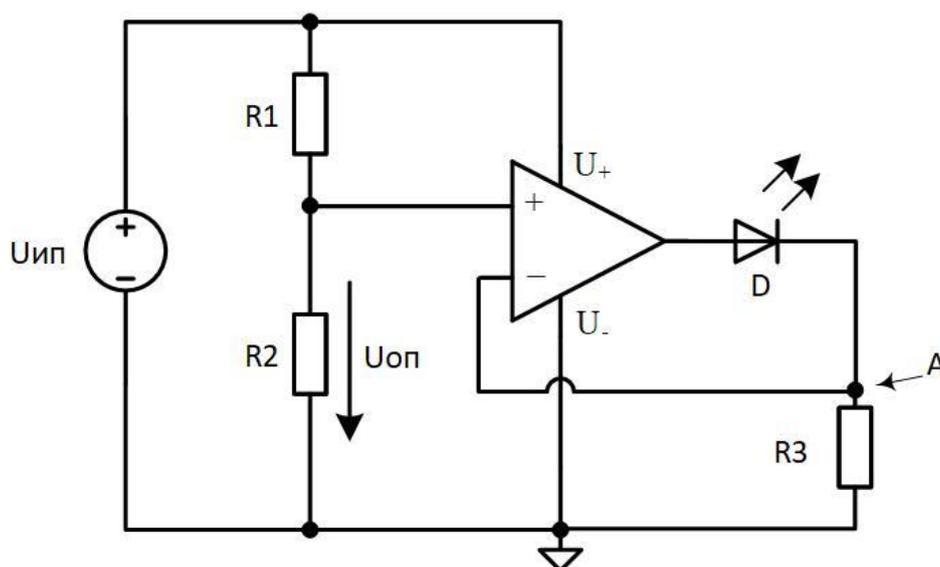


Рисунок 1.25 – Схема токовой накачки на основе операционного усилителя

Напряжение на выходе операционного усилителя будет изменяться таким образом, чтобы напряжение на резисторе R_3 точке «А» было эквивалентно опорному напряжению U_{on} , которое создано с помощью простейшего резистивного делителя напряжения. Ток нагрузки будет определяться значением опорного напряжения и сопротивления резистора R_3 :

$$I = \frac{U_{on}}{R_3}. \quad (1.11)$$

Одним из недостатков данной схемы является зависимость тока нагрузки от опорного напряжения. При увеличении опорного напряжения операционный усилитель, который работает в схеме с отрицательной обратной связью, будет увеличивать напряжение на своем выходе, чтобы увеличить напряжение в точке «А» и компенсировать разность напряжений между неинвертирующим и инвертирующим входами, тем самым увеличится ток нагрузки. Аналогичным образом происходит уменьшение тока накачки при уменьшении значения опорного напряжения.

Таким образом, важным параметром схемы, представленной на рисунке 1.25, является стабильность источника опорного напряжения, которую можно увеличить при использовании стабилитрона с напряжением пробоя, равным требуемому опорному напряжению. На рисунке 1.26 представлена схема накачки с использованием стабилитрона.

При использовании стабилитрона в качестве источника опорного напряжения необходимо правильно рассчитать сопротивление резистора R_1 , значение которого вычисляется по формуле (1.10). При ошибке в расчете сопротивления R_1 и использовании резистора с большим сопротивлением напряжение на стабилитроне может быть больше требуемого значения, в связи с чем опорное напряжение также будет больше, следовательно, ток нагрузки увеличится, что может стать причиной выхода из строя светодиода (лазерного диода) из-за превышения допустимого значения тока.

В обратном случае, при использовании сопротивления R_1 с меньшим значением, необходимо убедиться, что значение тока через стабилитрон не превышает его максимального значения, которое указано в документации. Также необходимо убедиться, что ток через стабилитрон будет находиться в рабочих пределах при изменении напряжения питания.

Следующим недостатком использования операционных усилителей в качестве стабилизаторов тока является ограниченный максимально возможный ток на выходе операционного усилителя, который для большинства устройств данного типа составляет около сотни миллиампер. Однако данный недостаток можно устранить, если использовать биполярный или полевой транзисторы. Вычисление тока накачки также производится по формуле (1.11).

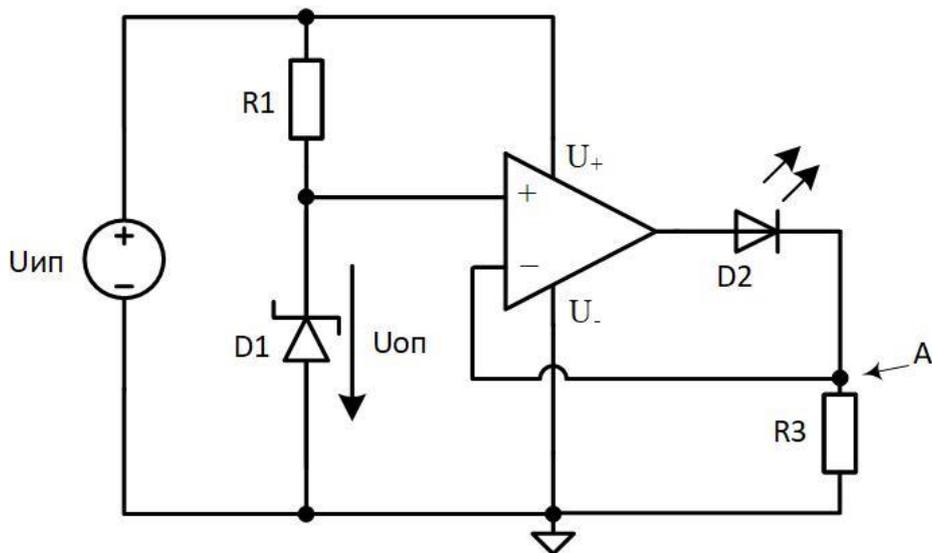


Рисунок 1.26 – Схема стабилизации тока на основе операционного усилителя и стабилитрона в качестве источника опорного напряжения

На рисунке 1.27 (а) представлена схема с использованием биполярного транзистора, на рисунке 1.27 (б) представлена схема с использованием полевого транзистора. Для данных схем необходимо использовать стабильный источник опорного напряжения. Также при расчете схемы на большие токи необходимо правильно подбирать биполярные и полевые транзисторы, учитывая их максимальные токи.

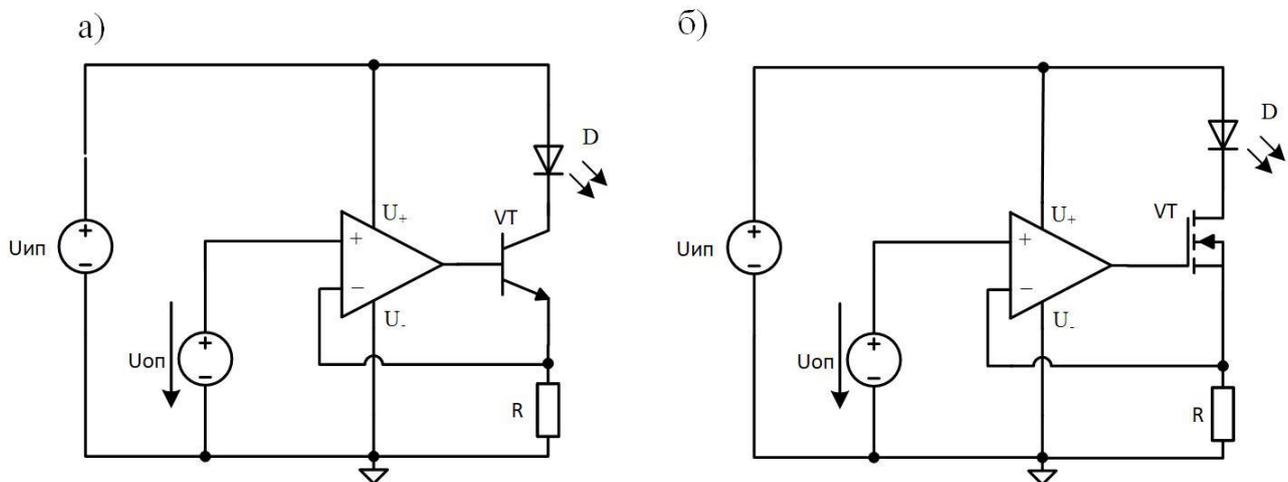


Рисунок 1.27 – Схема стабилизатора тока с использованием операционного усилителя и биполярного транзистора (а); схема стабилизатора тока с использованием операционного усилителя и полевого транзистора (б)

Стабилизаторы тока на основе операционных усилителей являются наиболее оптимальным вариантом, так как лишены недостатков стабилизаторов тока на основе биполярных и полевых транзисторов. Температурная стабильность операционных усилителей лучше, они обладают меньшей зависимостью от нестабильности источника питания, также минимальное опорное напряжение за счет наличия отрицательной обратной связи не зависит

от порогового напряжения транзисторов и может быть выбрано в более широких пределах.

Пример 1.8.

Для моделирование электрической схемы, представленной на рисунке 1.27, необходимо добавить операционный усилитель из библиотеки компонентов. В программе LTspice XVII есть несколько моделей операционных усилителей, которые обладают идеальными характеристиками «орамп», «орамп2», «UniversalOpamp2». Также можно использовать существующие модели в папке Opamps или добавить собственную spice модель, которую можно найти на сайте производителей электронных компонентов. В каталоге компонентов необходимо выбрать операционный усилитель с названием AD822. В таблице 1.10 представлены сведения о выбранных компонентах электрической схемы. На рисунке 1.28 представлена схема стабилизатора тока с операционным усилителем и биполярным транзистором.

Таблица 1.10. Сведения о компонентах электрической схемы (Пример 1.8)

Компонент	Позиционное обозначение	Название в библиотеке компонентов	Модель	Параметры электронного компонента
Светодиод	D1	LED	QTLP690C	$I = 20 \text{ мА}$
				$U_D \approx 1,9 \text{ В}$
Операционный усилитель	U1	AD822	AD822	$5 \text{ В} < U_{num} < 30 \text{ В}$
n-p-n транзистор	Q1	npn	ZTX1048A	$U_{бэ} \approx 0,6 \text{ В}$ $U_{кэ} \approx 1,9 \text{ В}$ $\beta = 450$
Источник питания	V1	voltage	–	$U_{un} = 10 \text{ В}$
Опорное напряжение	V2			$U_{on} = 1 \text{ В}$
Резистор	R1	res	–	?

На неинвертирующий вход операционного усилителя **AD822** подается опорное напряжение, которое в данном примере равно $U_{on} = 1 \text{ В}$, операционный усилитель в схеме с отрицательной обратной связью выставляет на своем выходе такое напряжение, чтобы обеспечить равенство напряжений на инвертирующем и неинвертирующем входах. Таким образом, напряжение в точке «А» на рисунке 1.28 будет эквивалентно напряжению на неинвертирующем входе, следовательно, равно опорному напряжению. Для расчета сопротивления $R1$ необходимо воспользоваться формулой (1.11), в таком случае значение сопротивления $R1$ равно

$$R1 = \frac{U_{on}}{I} = \frac{1}{0,02} = 50\Omega.$$

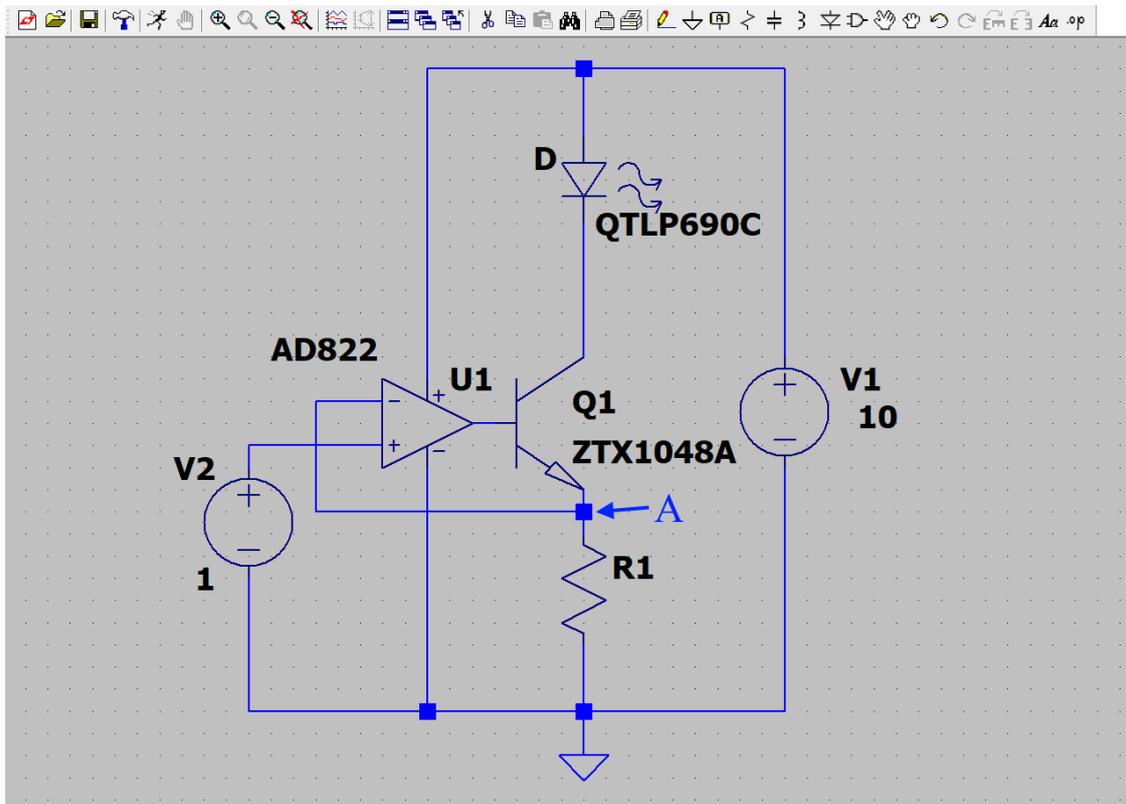


Рисунок 1.28 – Схема стабилизатора тока с использованием операционного усилителя и биполярного транзистора

Для построения зависимости тока накачки от источника опорного напряжения необходимо произвести анализ схемы в режиме анализа передаточных характеристик по постоянному току (**DC Analysis**). Необходимо установить минимальное и максимальное напряжения, а также указать шаг изменения напряжения опорного источника V2. Альтернативным способом установки режима анализа передаточных характеристик по постоянному току является выбор пиктограммы  и ввод команды «**.dc V2 0 1 0.01**», где .dc – выбор режима анализа схемы, V2 – источник напряжения, 0 – минимальное напряжение источника V2, 1 – максимальное напряжение источника V2, 0.01 – шаг, с которым изменяется напряжение. На рисунке 1.29 представлена зависимость тока светодиода (лазерного диода) от напряжения источника опорного напряжения V2.

Анализируя представленный график, можно сделать вывод, что ток накачки имеет линейную зависимость от напряжения источника опорного напряжения, данная особенность является преимуществом использования операционных усилителей в схемах стабилизации тока. При напряжениях источника опорного напряжения менее 0,6 В транзистор находится в активном режиме работы, через нагрузку в коллекторной цепи протекает ток, чего не

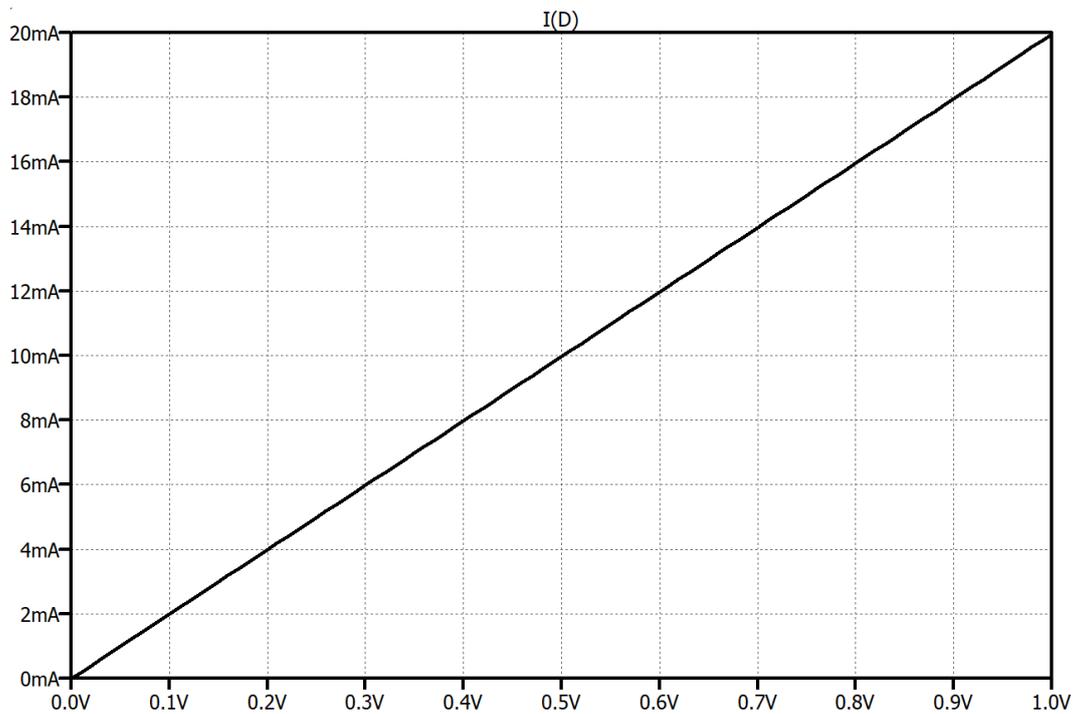


Рисунок 1.29 – Зависимость тока светодиода (лазерного диода) от напряжения источника опорного напряжения $V2$

происходит при использовании схемы на основе биполярного транзистора, в которой необходимо увеличить напряжение источника опорного напряжения более 0,6 В согласно его вольт-амперной характеристике.

На рисунке 1.30 (а) представлена схема стабилизатора тока с использованием

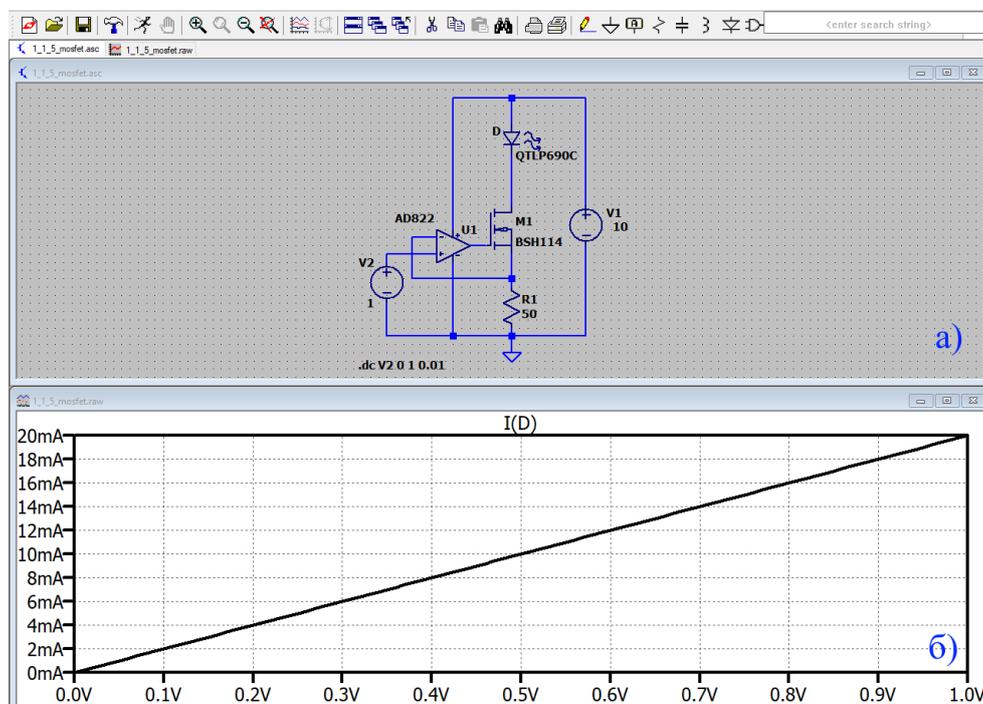


Рисунок 1.30 – Схема стабилизатора тока с использованием операционного усилителя и МОП-транзистора с индуцированным каналом n-типа (а); зависимость тока стабилизации от напряжения источника опорного напряжения (б)

операционного усилителя и полевого транзистора, на рисунке 1.30 (б) представлен график зависимости тока светодиода от напряжения источника опорного напряжения. На рисунке 1.30 (б) представлена зависимость тока светодиода от напряжения источника опорного напряжения, которая является линейной. В схеме стабилизации тока на основе полевого транзистора необходимо увеличивать напряжение источника опорного напряжения до значения $U_{on} > U_{порог}$.

В стабилизаторах на основе операционных усилителей напряжение источника опорного напряжения может быть как меньше порогового напряжения полевого транзистора с изолированным затвором, так и менее напряжения база-эмиттер, что является одним из преимуществ использования операционных усилителей.

Задание 1.5.

Пример варианта задания представлен в таблице 1.11.

Таблица 1.11. Пример варианта (Задание 1.5)

Компонент	Модель	Параметры электронного компонента
Светодиод (n = 2)	QTLP690C	$I = 15 - 25 \text{ мА}$
		$U_D \approx 1,9 \text{ В}$
МОП-транзистор с индуцированным каналом n-типа	B5H114	$U_{пор} \approx 2,9 \text{ В}$ $R_{кан} \approx 500 \text{ МОм}$
Операционный усилитель	AD822	$5 \text{ В} < U_{um} < 30 \text{ В}$
Источник опорного напряжения	—	$U_{on} = 1 \text{ В}$
		$(U_{on})_{min} = 0 \text{ В}$ $(U_{on})_{max} = 2 \text{ В}$ $\Delta U_{on} = 0,05 \text{ В}$
Источник питания	—	$U_{un} = 10 \text{ В}$
		$(U_{un})_{min} = ?$ $(U_{un})_{max} = 12$ $\Delta U_{un} = 0,5 \text{ В}$

Согласно выданным вашим преподавателем вариантам заданий:

- Рассчитать сопротивление R для схемы стабилизации тока и минимальное напряжение источника питания $(U_{un})_{min}$ (рисунок 1.27 (б));
- Построить зависимость $I(U_{on})$ в диапазоне $(U_{on})_{min} - (U_{on})_{max}$, дискретность изменения ΔU_{on} должен обеспечить снятие 4 – 5 точек характеристики $I(U_{on})$.
- В программе LTspice XVII создать электрическую схему и сравнить характеристику $I(U_{on})$ с рассчитанной.
- Построить зависимость $I(U_{un})$ в диапазоне $(U_{un})_{min} - (U_{un})_{max}$, дискрет изменения ΔU_{un} указан в задании.

1.2 Схемы накачки светодиодов и лазерных диодов для переменных входных сигналов

Главной характеристикой светодиодов и лазерных диодов является зависимость оптической мощности от протекающего через них тока. Схемы стабилизаторов тока позволяют поддерживать данный параметр длительное время, тем самым стабилизировать оптическую мощность светодиодов или лазерных диодов. В некоторых случаях ток через светодиод (лазерный диод) имеет не только постоянную, но и переменную составляющую. В таких схемах в качестве источника опорного напряжения используется источник переменного сигнала. Схемы накачки для переменных входных сигналах получили широкое распространение в системах связи для создания информационного сигнала и дальнейшей передачи по линии связи. В данном разделе представлены схемы накачки светодиодов для переменных входных сигналов с описанием принципа работы, расчетом параметров электрической цепи и моделированием в бесплатном симуляторе работы электрических схем LTspice XVII.

1.2.1 Схемы токовой накачки на основе БТ

Для передачи информационных сигналов по линии связи ток через светодиод должен иметь переменную составляющую. На рисунке 1.31 представлен наиболее простой вариант с использованием биполярного транзистора и источника переменных сигналов. При использовании схемы на основе биполярного транзистора переменный источник сигналов должен обладать смещением по постоянному напряжению, так как при напряжении источника переменных сигналов менее напряжения база-эмиттер ($U_{бэ}$) транзистор работает в режиме отсечки, другими словами, находится в закрытом состоянии. При использовании источника переменных сигналов без наличия постоянной составляющей ток через светодиод будет протекать только при положительных полупериодах входного сигнала. Также при положительных полупериодах часть напряжения падает на переходе база-эмиттер, что является недопустимым при малых входных сигналах. Зависимость тока светодиода от времени ($t_{stop} = 10 \text{ мс}$) при синусоидальном сигнале частотой 1 кГц и амплитуде

$U_{max} = 1 В$ источника опорного сигнала представлена на рисунке 1.32, значение сопротивления $R = 100 Ом$.

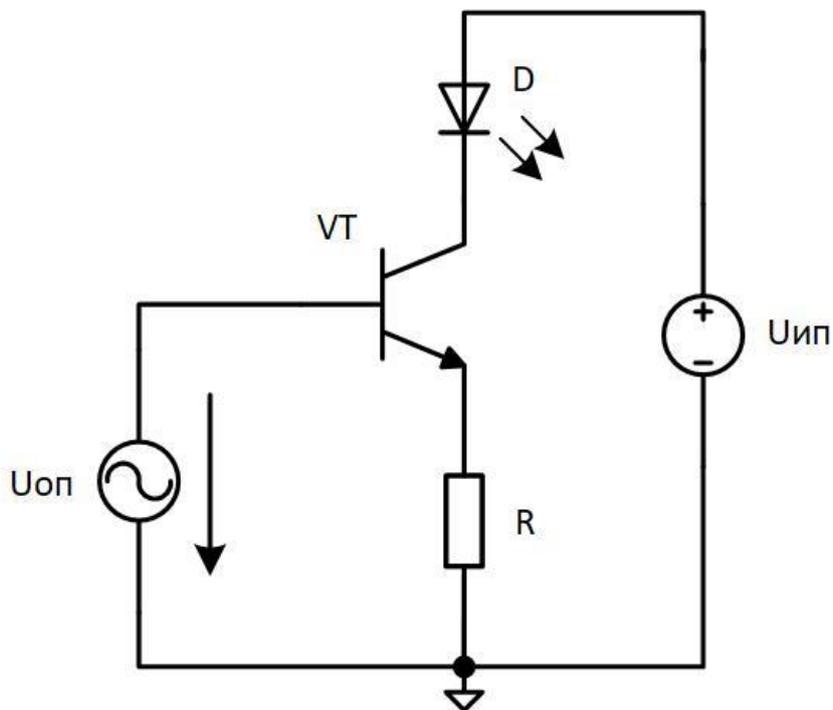


Рисунок 1.31 – Схема токовой накачки при использовании источника переменных сигналов

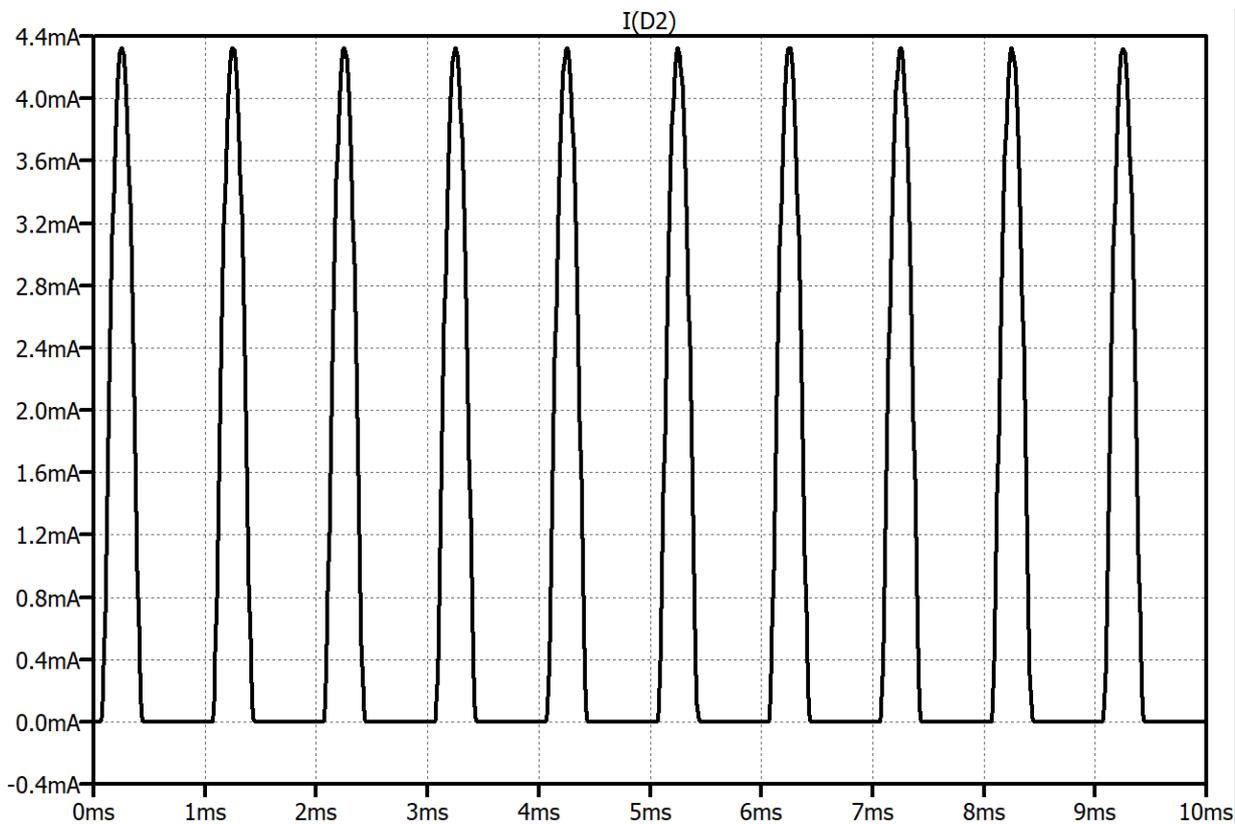


Рисунок 1.32 – Зависимость тока светодиода от времени $I(t)$ при использовании источника переменных сигналов без напряжения смещения

При использовании источника переменных сигналов с напряжением смещения необходимо выполнять условие

$$U_{offset} > U_{\bar{\sigma}\bar{\alpha}} + U_{max}, \quad (1.12)$$

где U_{offset} – минимальное напряжение смещения источника переменных сигналов. В случае использования синусоидального сигнала с амплитудой $U_{max} = 1 \text{ В}$ значение напряжения смещения должно быть больше $U_{offset} > 1,6 \text{ В}$. Тем не менее, в большинстве случаев такие схемы не применяются, и смещение входного сигнала создается с использованием пассивных компонентов. На рисунке 1.33 представлена схема накачки светодиода при использовании переменного входного сигнала и смещения базы транзистора. В такой схеме ток через светодиод будет иметь не только постоянную, но и переменную составляющую:

$$i = I_{max} \sin(\omega t), \quad (1.13)$$

тогда ток через светодиод выражается с помощью формулы (1.14).

$$I = I_0 + I_{max} \sin(\omega t), \quad (1.14)$$

где I_{max} – амплитуда переменной составляющей тока.

Согласно формуле (1.14), опорное напряжение также должно включать в себя постоянную $(U_{on})_0$ и переменную составляющие (u_{on}) :

$$U_{on} = (U_{on})_0 + u_{on}. \quad (1.15)$$

В формуле (1.15) постоянная составляющая $(U_{on})_0$ и переменная составляющие (u_{on}) выражаются с помощью формул (1.16) и (1.17):

$$(U_{on})_0 = U_{\bar{\sigma}\bar{\alpha}} + RI_0, \quad (1.16)$$

$$u_{on} = R \cdot I_{max} \sin(\omega t). \quad (1.17)$$

Усилительный каскад, представленной на рисунке 1.33 создан с использованием биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером и отрицательной обратной связью по току.

На входе усилительного каскада с помощью резистивного делителя $R1$ и $R2$ и конденсатора C осуществляется смещение входного сигнала. В отсутствии переменного входного сигнала ($U_{on}=0$) конденсатор C заряжается до постоянного напряжения $(U_{on})_0$, значение которого определяется резистивным делителем $R1$ и $R2$. Для максимального динамического диапазона значение постоянного напряжения $(U_{on})_0$ выбирается в середине линейного участка ВАХ.

Опорное напряжение для входного контура выражается по формуле (1.15).

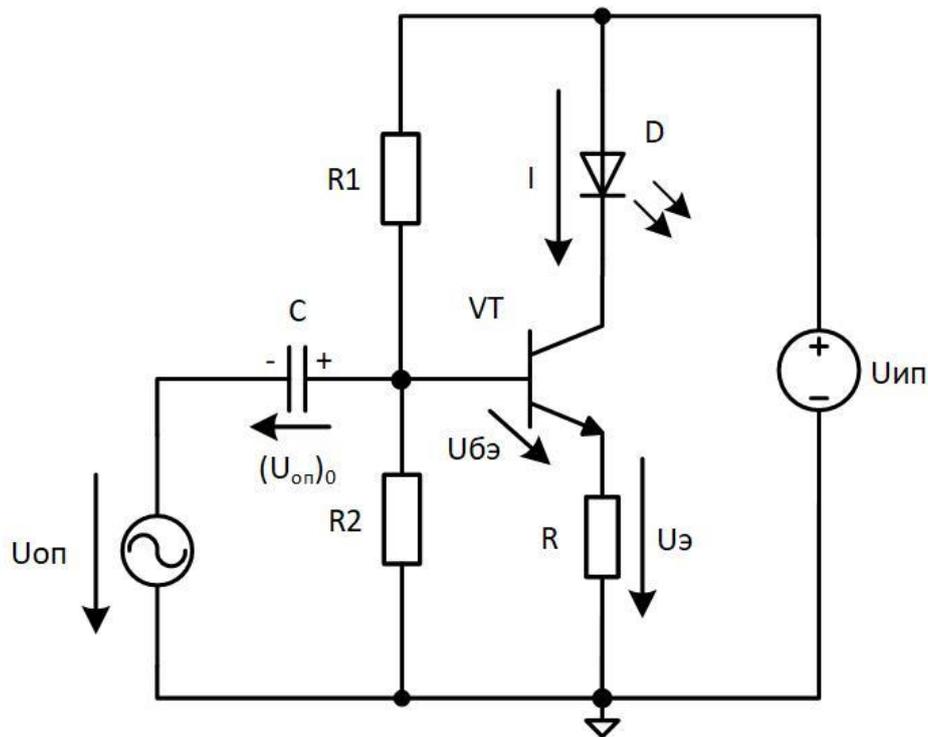


Рисунок 1.33 – Схема накачки светодиода при использовании переменного входного сигнала с напряжением смещения базы транзистора

Для расчёта схемы будем считать, что постоянная I_0 и переменная $i = I_m \sin(\omega t)$ составляющие тока накачки определены.

Значение постоянной составляющей опорного напряжения изменяется в диапазоне $(U_{он})_0 = 2-5$ В. Значение сопротивления R в эмиттерной цепи выражается как

$$R = \frac{(U_{он})_0 - U_{БЭ}}{I_0}. \quad (1.18)$$

Переменная составляющая тока накачки выражается как

$$u_{он} = R \cdot I_{max} \sin(\omega t). \quad (1.19)$$

Минимальное напряжение источника питания определяется нестрогим неравенством

$$U_{ин} \geq U_D + (U_{КЭ})_{min} + (I_0 + I_{max})R. \quad (1.20)$$

Выразим ток, который протекает через резистивный делитель $R1$ и $R2$, считая его на порядок больше максимального тока базы:

$$I_1 = 10 \cdot \frac{(I_0 + I_{max})}{\beta}, \quad (1.21)$$

где I_{max} – амплитудное значение переменной составляющей тока накачки, β – коэффициент усиления по току биполярного транзистора.

Затем рассчитаем значения сопротивлений резистивного делителя $R1$ и $R2$. Сопротивление $R1$ выражается как

$$R_1 = \frac{U_{ин} - (U_{оп})_0}{I_1}. \quad (1.22)$$

Значение сопротивления $R2$ рассчитывается как

$$R_2 = \frac{(U_{оп})_0}{I_1}. \quad (1.23)$$

Следующим шагом определим входное сопротивление схемы, которое рассчитывается как

$$R_{вх} \approx R_1 \parallel R_2 \parallel (\beta \cdot R). \quad (1.24)$$

В данной формуле $\beta \cdot R$ – входное сопротивление усилительного каскада с отрицательной обратной связью по току без учёта схемы смещения с резистивным делителем и конденсатором C .

Также ёмкость C с входным сопротивлением схемы $R_{вх}$ образуют фильтр высоких частот на входе схемы накачки. Формула для расчета ёмкости входного конденсатора представлена ниже:

$$C > \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R_{вх}}. \quad (1.25)$$

Пример 1.9.

Для проверки правильности проведенных расчётов создадим модель электрической схемы, представленной на рисунке 1.33, в программе LTspice XVII и проанализируем параметры электрической цепи в разных режимах работы.

Для того чтобы создать представленную ранее схему, необходимо добавить несколько новых компонентов. Конденсатор добавляется выбором пиктограммы  в меню инструментов или в окне выбора компонентов при вводе названия конденсатора «**cap**». Источник сигналов также выбирается в окне выбора компонентов при вводе его буквенного обозначения «**signal**». На рисунке 1.34 представлено окно, в котором осуществляется настройка его параметров.

Настройка сигналов осуществляется нажатием правой кнопкой мыши на схематическое обозначение источника сигналов.

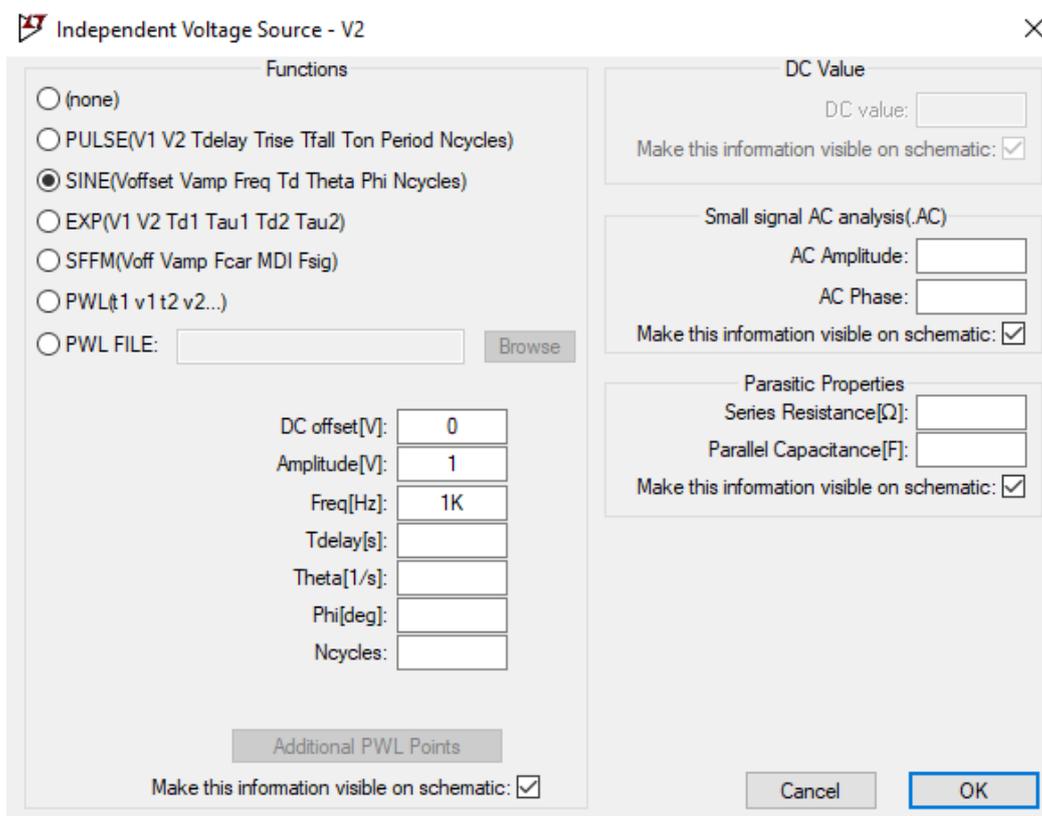


Рисунок 1.34 – Настройка параметров источника сигналов в программе LTspice XVII

При выборе компонента источника сигналов автоматически устанавливаются параметры переменного сигнала. По умолчанию устанавливается синусоидальный сигнал с частотой 1 кГц и амплитудой 1 В . Сведения о компонентах электрической схемы, необходимые для моделирования, представлены в таблице 1.12.

Таблица 1.12. Сведения о компонентах электрической схемы (Пример 1.9)

Компонент	Позиционное обозначение	Название в библиотеке компонентов	Модель	Параметры электронного компонента
Светодиоды (n=1)	D1	LED	QTLP690C	$I = 20 \cdot 10^{-3} + 5 \cdot 10^3 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 10^3 \cdot t)$
				$U_D \approx 1,9 \text{ В}$
n-p-n транзистор	Q1	npn	ZTX1048A	$U_{бэ} \approx 0,6 \text{ В}$ $U_{кэ} \approx 1,9 \text{ В}$ $\beta = 450$

Источник питания	V1	voltage	–	$U_{un} = ?$
Опорное напряжение	V2			$U_{on} = 5 + \sin(2 \cdot \pi \cdot 10^3 \cdot t)$
Резисторы	R	res	–	$R = ?$
	R1			$R1 = ?$
	R2			$R2 = ?$
Конденсатор	C1	cap	–	$C1 = ?$

Необходимо обеспечить ток накачки с постоянной составляющей $I_0 = 20 \text{ mA}$ и переменной составляющей $i = 5 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 10^3 \cdot t)$. Значение постоянного напряжения $(U_{on})_0 = 5 \text{ V}$, значение переменной составляющей определяется как $u_{on} = \sin(2 \cdot \pi \cdot 10^3 \cdot t)$.

Сначала определим значение сопротивления R эмиттерной отрицательной обратной связи, для этого воспользуемся формулой (1.18), в результате расчета значение сопротивления R равно

$$R = \frac{5 - 0,6}{20 \cdot 10^{-3}} = 220 \Omega.$$

Затем необходимо определить минимальное напряжения источника питания по формуле (1.20). С учетом падения напряжения на светодиоде, напряжения коллектор-эмиттер и падения напряжения на резисторе эмиттерной обратной связи R минимальное значение напряжения источника питания выражается нестрогим неравенством:

$$U_{un} \geq 1,9 + 1,9 + (20 \cdot 10^{-3} + 5 \cdot 10^{-3}) \cdot 220,$$

$$U_{un} \geq 9,3 \text{ V}.$$

Рассчитаем ток через резистор R1. По формуле (1.21) необходимо обеспечить, чтобы ток через данный резистор был на порядок больше тока базы. Это необходимо для того, чтобы поддерживать постоянный уровень напряжения $(U_{on})_0$, так как в процессе работы схемы стабилизации тока из-за наличия

отрицательной обратной связи по току ток базы будет меняться. Таким образом, ток через резистор R_1 выражается как

$$I_1 = 10 \cdot \frac{(20 \cdot 10^{-3} + 5 \cdot 10^{-3})}{450} \approx 0,6 \text{ мА}.$$

Далее необходимо произвести расчёт сопротивления R_1 . По формуле (1.22) сопротивление R_1 равно

$$R_1 = \frac{9,3 - 5}{0,6 \cdot 10^{-3}} \approx 7,1 \text{ к}\Omega.$$

Значение R_2 резистивного делителя напряжения рассчитывается по формуле (1.23), тогда сопротивление R_2 равно

$$R_2 = \frac{5}{0,6 \cdot 10^{-3}} \approx 8,3 \text{ к}\Omega.$$

Входное сопротивление рассчитывается по формуле (1.24), для данного примера $R_{\text{вх}}$ равно

$$R_{\text{вх}} \approx 7,1 \text{ к} \parallel 8,3 \text{ к} \parallel (450 \cdot 220) \approx 3,68 \text{ к}.$$

Необходимым действием является расчёт значения ёмкости конденсатора C , так как конденсатор C и входное сопротивление $R_{\text{вх}}$ представляют из себя фильтр высоких частот. Неправильный расчёт ёмкости конденсатора C может привести к тому, что на вход схемы накачки светодиода может поступать сигнал с меньшим значением амплитуды. В худшем случае сигнал $U_{\text{оп}}$ будет полностью подавлен входным RC – фильтром. Расчет значения ёмкости конденсатора производится по формуле (1.25), тогда

$$C > \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10^3 \cdot 3,68 \cdot 10^3},$$

$$C > 44 \text{ нФ}.$$

При частоте входного сигнала 1 кГц и ёмкости конденсатора 44 нФ входной сигнал будет подавлен на 3 дБ , в связи с этим необходимо увеличить значение разделительного конденсатора. В данном примере значение конденсатора принято равным $C = 0,5 \text{ мкФ}$. Результатом проделанной работы является схема, представленная на рисунке 1.35.

Необходимо запустить моделирование в режиме анализа переходных процессов (**Transient**). Время окончания моделирования необходимо выбирать в зависимости от частоты входного сигнала. В данном случае используется переменный сигнал с частотой 1 кГц , период которого составляет 1 мс , можно

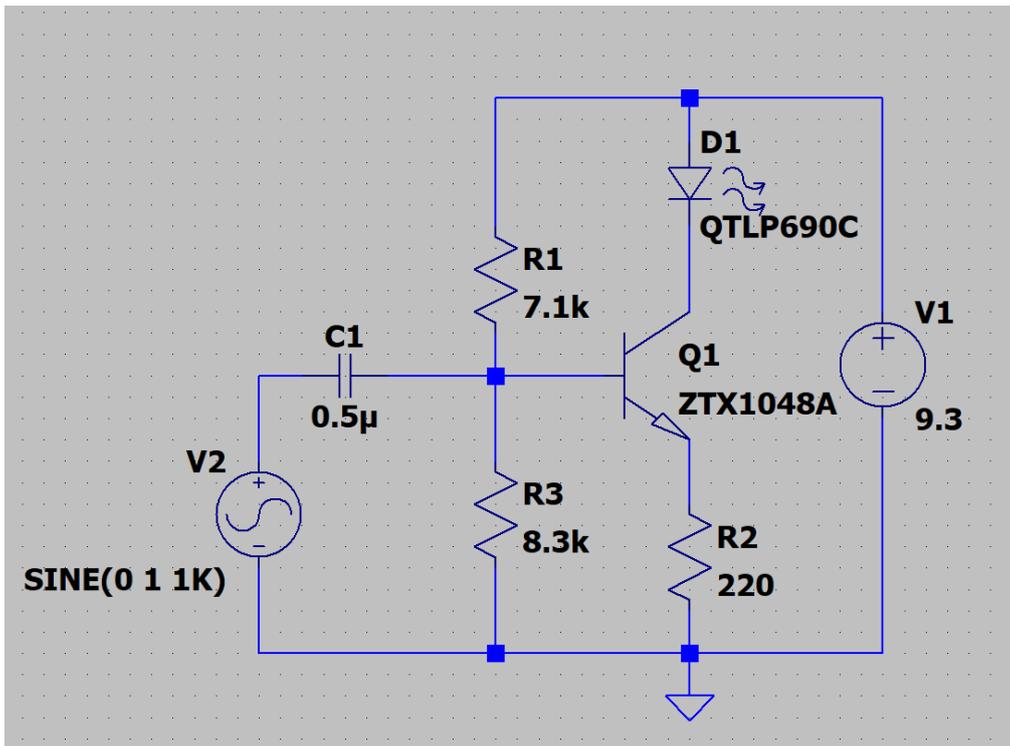


Рисунок 1.35 –Схема накачки светодиода при использовании переменного входного сигнала со смещением напряжения базы транзистора, созданная в программе LTspice XVII

рассмотреть 10 периодов сигнала, в связи с этим время моделирования было выбрано *10 мс*.

Необходимо проверить правильность проведенных вычислений, на рисунке 1.36 представлен график зависимости тока накачки от времени $I(t)$.

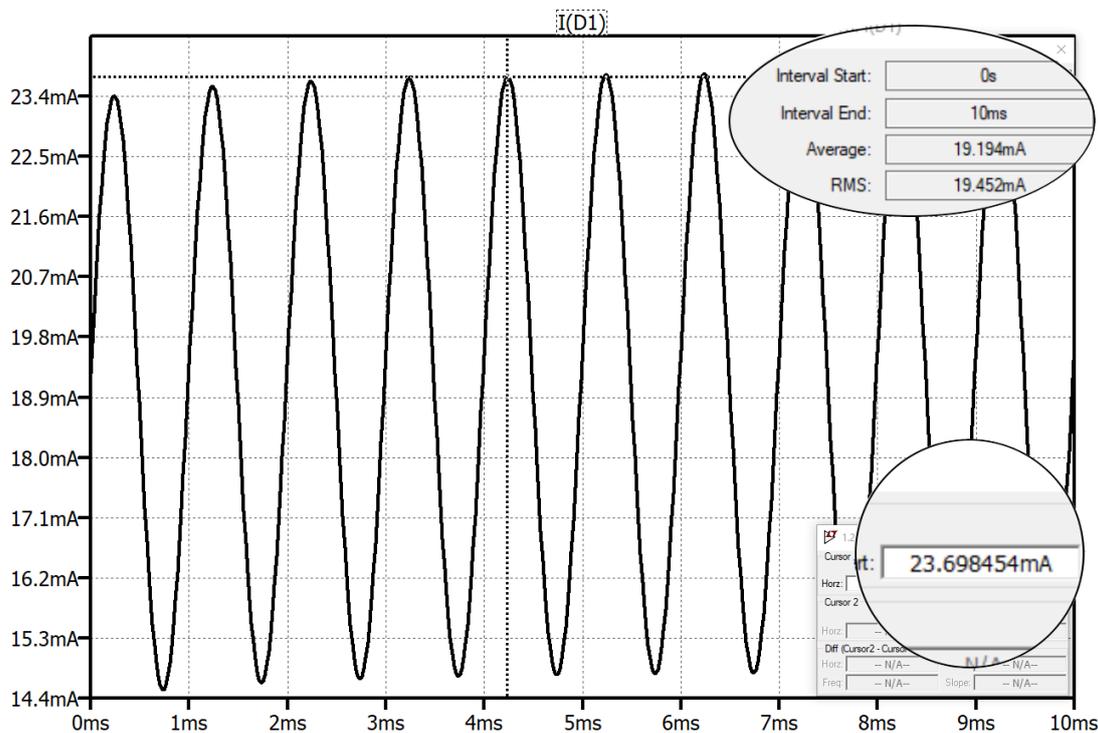


Рисунок 1.36 –Зависимость тока накачки от времени в программе LTspice XVII

Также на графике представлено дополнительное окно, в котором указаны необходимые параметры представленной зависимости, например, время начала моделирования, время окончания моделирования, среднее значение и действующее значение тока.

Для оценки правильности вычислений необходимо среднее значение тока. Расчётное значение постоянной составляющей $I_0 = 20 \text{ мА}$, среднее значение тока равно примерно $19,2 \text{ мА}$. Амплитудное значение без учета смещения равно $I_{max} \approx 23,7 - 19,2 \approx 4,5 \text{ мА}$. Измеренное значение постоянной составляющей опорного напряжения $(U_{on})_0 \approx 4,8 \text{ В}$.

Измеренные значения токов и напряжений близки к расчётным значениям. Погрешность измеренных параметров электрической цепи может быть связана с округлением в процессе произведения расчётов, а также с неточными значениями напряжений база-эмиттер, коллектор-эмиттер, которые отличаются в зависимости от модели транзистора и тока базы. Тем не менее данный пример достаточно точно описывает принцип работы электрической схемы, а также подтверждает правильность осуществленных расчётов.

Задание 1.6.

Пример варианта задания представлен в таблице 1.13.

Таблица 1.13. Пример варианта (Задание 1.6)

Компонент	Модель	Параметры электронного компонента
Светодиод (n = 2)	QTLP690C	$I = 8 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^3 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 10^4 \cdot t)$
		$U_D \approx 1,9 \text{ В}$
n-p-n транзистор	ZTX1048A	$U_{\sigma\sigma} \approx 0,6 \text{ В}$ $U_{кэ} \approx 1,9 \text{ В}$ $\beta = 450$
Источник опорного напряжения	—	$(U_{on})_0 = 3 \text{ В}$
Источник питания		$(U_{un})_{max} = 15 \text{ В}$ $\Delta U_{un} = 1 \text{ В}$
		$(U_{un})_{min} = ?$
Резисторы	R	$R = ?$
	R1	$R1 = ?$
	R2	$R2 = ?$
Конденсатор	C	$CI = ?$

Согласно выданным вашим преподавателем вариантам заданий:

- Рассчитать схему стабилизации тока, представленную на рисунке 1.33;
- Построить зависимость $I(U_{un})$ в диапазоне $(U_{un})_{min} - (U_{un})_{max}$, дискретность изменения ΔU_{un} указан в задании.

1.2.2 Схемы токовой накачки на основе ПТ

Также в схеме токовой накачки для переменных входных сигналов используются полевые транзисторы (рисунок 1.37).

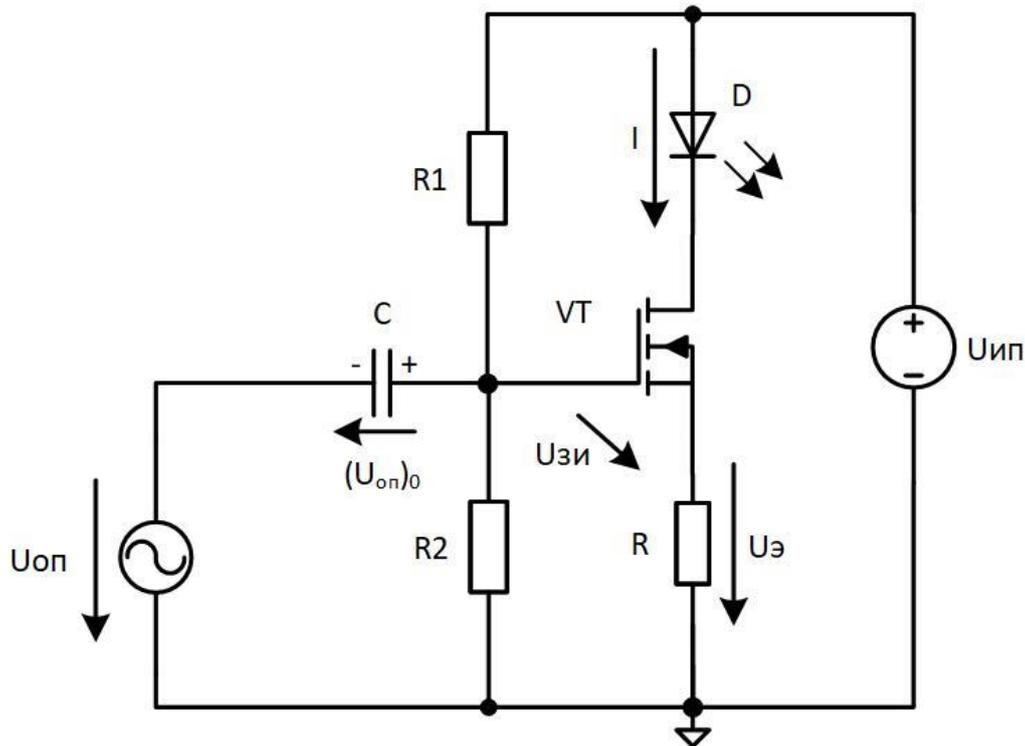


Рисунок 1.37 – Схема токовой накачки для переменных входных сигналов на основе ПТ

Принцип работы представленной схемы аналогичен принципу работы схемы токовой накачки с биполярным транзистором. Для расчёта схемы будем считать, что постоянная I_0 и переменная $i = I_m \sin(\omega t)$ составляющие входного тока накачки определены.

В связи с тем, что пороговое напряжение полевого транзистора больше, чем биполярного, при расчете схемы, представленной на рисунке 1.37, примем постоянную составляющую опорного напряжения равной удвоенному значению порогового напряжения полевого транзистора с изолированным каналом $(U_{оп})_0 = 2U_{пор}$, тогда величина сопротивления R рассчитывается по формуле (1.26):

$$R = \frac{(U_{оп})_0 - U_{пор}}{I_0} = \frac{U_{пор}}{I_0}. \quad (1.26)$$

Переменная составляющая опорного напряжения выражается по формуле (1.17), тогда минимальное напряжение источника питания

$$U_{ин} \geq (R + R_{кан})(I_0 + I_{max}) + U_D. \quad (1.27)$$

Сопротивление канала полевого транзистора с изолированным затвором зависит от величины поперечного электрического поля, создаваемого напряжением на затворе, таким образом, ток затвора практически равен нулю. Тогда ток, протекающий через резисторы $R1$ и $R2$, может быть выбран произвольно, например, единицы миллиампер. Сопротивления $R1$ и $R2$ рассчитываются по тем же формулам, что и для схемы с биполярным транзистором (1.22) и (1.23).

Очередным отличием от схемы с биполярным транзистором является значение входного сопротивления, которое зависит от значений $R1$ и $R2$ и рассчитывается по формуле:

$$R_{вх} = R_1 \parallel R_2. \quad (1.28)$$

Ёмкость конденсатора, который образует с входным сопротивлением фильтр высоких частот, определяется по формуле (1.25).

Пример 1.10.

В данном примере необходимо осуществить расчёт и моделирование схемы токовой накачки для переменных входных сигналов на основе полевого транзистора. Драйвер светодиода должен обеспечить ток с постоянной составляющей $I_0 = 20 \text{ мА}$ и переменной составляющей $i = 0,01 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 100 \cdot t)$. Пороговое напряжение транзистора составляет $U_{пор} \approx 2,9 \text{ В}$, сопротивление канала транзистора $R_{кан} \approx 500 \text{ мОм}$. Сведения о компонентах электрической схемы, необходимые для моделирования, представлены в таблице 1.14.

Таблица 1.14. Сведения о компонентах электрической схемы (Пример 1.10)

Компонент	Позиционное обозначение	Название в библиотеке компонентов	Модель	Параметры электронного компонента
Светодиоды (n=1)	D1	LED	QTLP690C	$I = 0,02 + 0,01 \cdot \sin(628t)$
				$U_D \approx 1,9 \text{ В}$
МОП транзистор с индуцированным каналом n-типа	M1	nmos	B5H114	$U_{пор} \approx 2,9 \text{ В}$ $R_{кан} \approx 500 \text{ мОм}$
Источник питания	V1	voltage	—	$U_{ин} = ?$

Опорное напряжение	V2			$U_{on} = ?$
Резисторы	R	res	–	$R = ?$
	R1			$R1 = ?$
	R2			$R2 = ?$
Конденсатор	C1	cap	–	$C1 = ?$

Примем постоянную составляющую источника опорного напряжения равную удвоенному пороговому напряжению МОП-транзистора, тогда

$$(U_{on})_0 = 2U_{пор} = 5,8 \text{ В.}$$

Следующим шагом произведем расчет сопротивления R по формуле (1.26), тогда

$$R = \frac{(U_{on})_0 - U_{пор}}{I_0} = \frac{5,8 - 2,9}{0,02} = 145 \Omega.$$

Переменная составляющая опорного напряжения выражается как

$$u_{on} = RI_{max} \sin(\omega \cdot t) = 145 \cdot 0,01 \sin(2 \cdot \pi \cdot 100t) = 1,45 \sin(2 \cdot \pi \cdot 100t).$$

Минимальное напряжения источника питания выражается нестрогим неравенством:

$$U_{ин} \geq (R + R_{кан})(I_0 + I_{max}) + U_D = (145 + 0,5) \cdot (0,02 + 0,01) + 1,9,$$

$$U_{ин} \geq 6,27 \text{ В.}$$

Примем напряжение источника питания равным $U_{ин} = 7 \text{ В}$.

Сопротивление R1 и R2 рассчитываются по формулам (1.22) и (1.23). Так как ширина канала полевого транзистора управляется электрическим полем и, следовательно, ток затвора практически равен нулю, ток через сопротивления R1 и R2 можно принять любым. Примем ток через сопротивления R1 и R2 равным 1 мА.

$$R1 = \frac{U_{ин} - (U_{on})_0}{I_1} = \frac{7 - 5,8}{0,001} = 1,2 \text{ к}\Omega,$$

$$R2 = \frac{(U_{on})_0}{I_1} = \frac{5,8}{0,001} = 5,8 \text{ к}\Omega.$$

Значение ёмкости входного конденсатора C рассчитывается по формуле (1.25). Для текущих параметров схемы выразим ёмкость входного конденсатора:

$$C > \frac{1}{\omega R_{\text{вх}}} = \frac{R_1 + R_2}{\omega \cdot R_1 \cdot R_2} = \frac{1200 + 5800}{2 \cdot \pi \cdot 100 \cdot 1200 \cdot 5800},$$

$$C > 1,6 \text{ мкФ}.$$

Так как при рассчитанном значении ёмкости разделительного конденсатора C сигнал будет подавляться на 3 дБ , то примем ёмкость конденсатора на порядок больше, например, 50 мкФ . На рисунке 1.38 представлена модель электрической схемы.

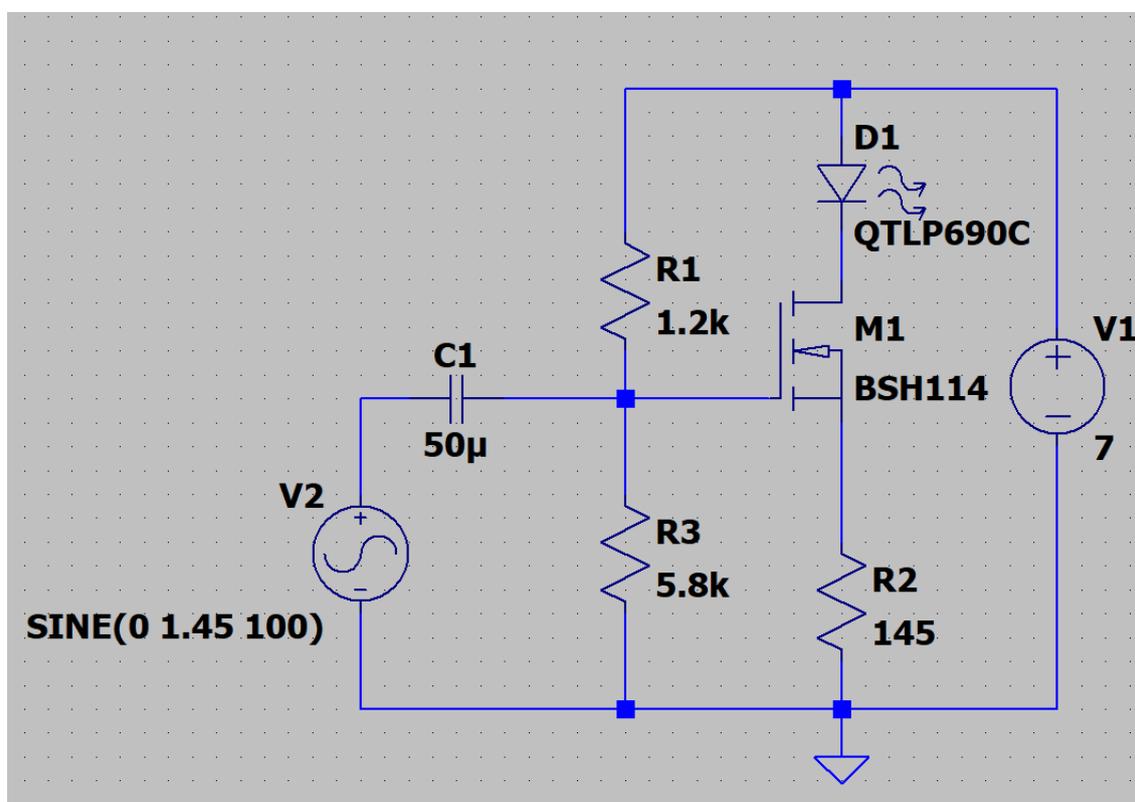


Рисунок 1.38 – Схема драйвера светодиода на основе полевого транзистора с изолированным затвором n-типа, созданная в программе LTspice XVII

В качестве источника опорного напряжения используется генератор сигналов, настройки которого представлены на рисунке 1.39.

Для проверки произведенных расчётов запустим моделирование электрической схемы в режиме анализа переходных процессов (**Transient**).

Время моделирования выбирается согласно частоте входного сигнала. В данном примере используется сигнал с частотой 100 Гц , период которого равен 10 мс , для того чтобы построить график десяти периодов входного сигнала установим время моделирования 100 мс . На рисунке 1.40 представлен график

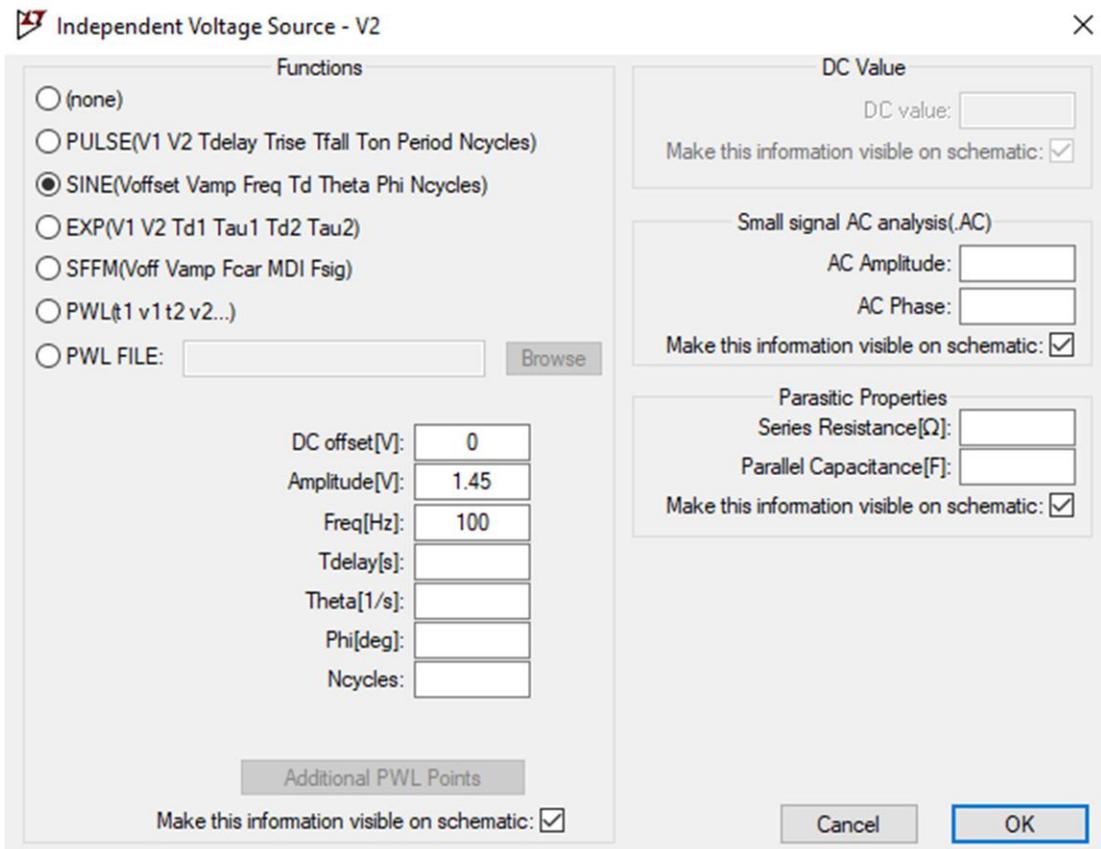


Рисунок 1.39 – Настройки генератора сигналов в программе LTspice XVII.

тока накачки от времени. Дополнительно указано среднее значение тока, которое должно соответствовать постоянной составляющей тока накачки, также представлено максимальное значение тока накачки.

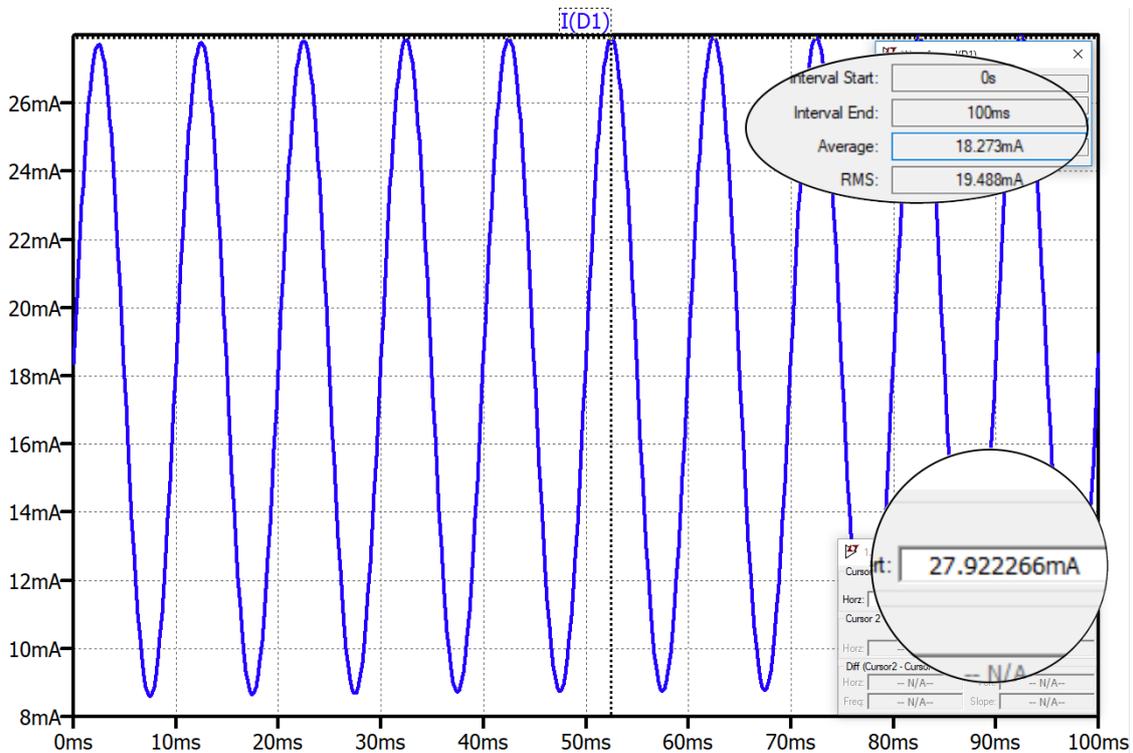


Рисунок 1.40 – Зависимость тока накачки от времени, созданная в программе LTspice XVII

Среднее значение тока накачки составляет примерно $I_0 \approx 18,3 \text{ мА}$, максимальное значение тока примерно равно $I_{max} \approx 28 \text{ мА}$, данные значения близки к расчётным. Отличие измеренных значений от расчётных может быть связано с округлением промежуточных значений, а также с округлением значения порогового напряжения, которое отличается в зависимости от модели транзистора. Тем не менее, данный пример достаточно точно описывает принцип работы электрической схемы, а также подтверждает правильность произведенных расчётов.

Задание 1.7.

Пример варианта задания представлен в таблице 1.15

Таблица 1.15. Пример варианта (Задание 1.7)

Компонент	Модель	Параметры электронного компонента
Светодиод ($n = 2$)	QTLP690C	$I = 8 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^3 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 10^4 \cdot t)$
		$U_D \approx 1,9 \text{ В}$
МОП-транзистор с индуцированным каналом n-типа	BSH114	$U_{пор} \approx 2,9 \text{ В}$ $R_{кан} \approx 500 \text{ мОм}$
Источник опорного напряжения	–	$(U_{он})_0 = 3 \text{ В}$
Источник питания		$(U_{un})_{max} = 15 \text{ В}$ $\Delta U_{un} = 1 \text{ В}$
		$(U_{un})_{min} = ?$
Резисторы	R	$R = ?$
	R1	$R1 = ?$
	R2	$R2 = ?$
Конденсатор	C	$CI = ?$

Согласно выданным вашим преподавателем вариантам заданий:

- Рассчитать схему стабилизации тока, представленную на рисунке 1.37;
- Построить зависимость $I(U_{un})$ в диапазоне $(U_{un})_{min} - (U_{un})_{max}$, дискрет изменения ΔU_{un} указан в задании.

1.2.3 Схемы токовой накачки на основе ОУ

При создании схемы драйвера светодиода для переменных входных сигналов можно использовать операционный усилитель с биполярным питанием (рисунок 1.41).

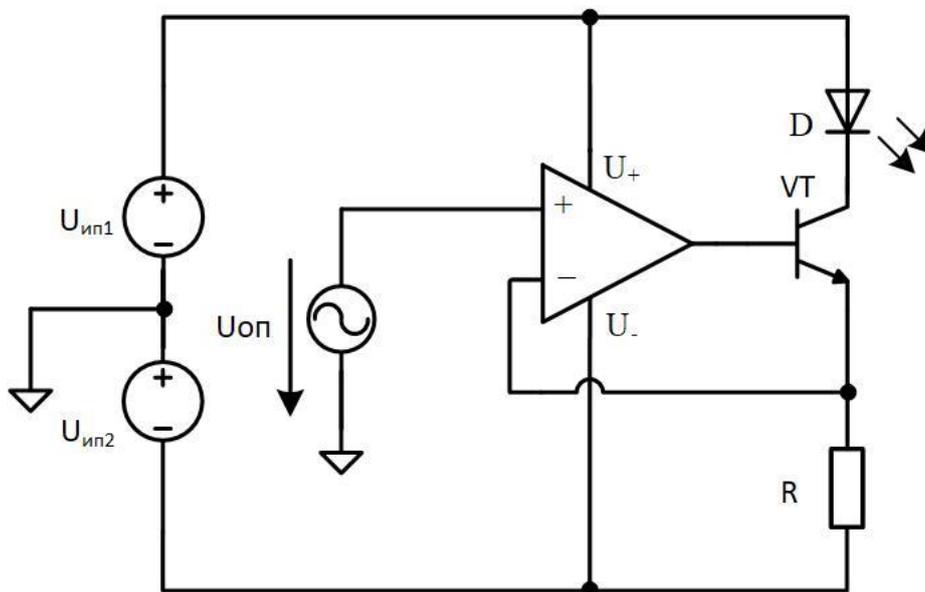


Рисунок 1.41 – Схема драйвера светодиода (лазерного диода) с использованием операционного усилителя с биполярным питанием

Схема драйвера светодиода на основе операционного усилителя с униполярным питанием без схемы смещения, как на рисунке 1.27, не позволяет использовать опорный источник сигналов без постоянной составляющей. Однако использованием операционного усилителя с биполярным питанием позволяет использовать опорный источник с переменной составляющей в достаточно широком диапазоне входных напряжений. Также можно использовать схему смещения на основе резистивного делителя и разделительного конденсатора, данная схема представлена на рисунке 1.42.

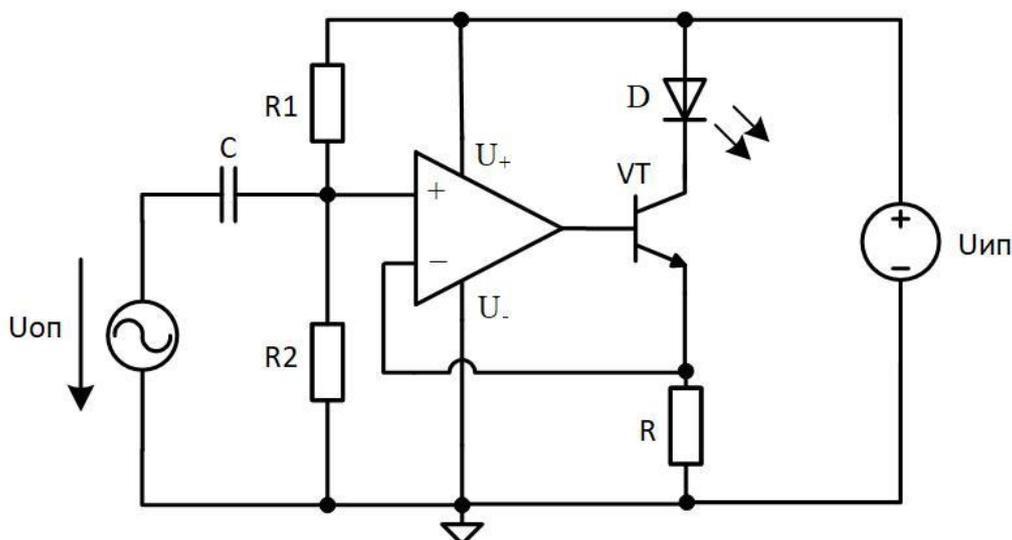


Рисунок 1.42 – Схема драйвера светодиода (лазерного диода) с использованием операционного усилителя с униполярным питанием и схемой смещения

Расчёт драйвера светодиода с использованием операционного усилителя со смещением рабочей точки и униполярным питанием производится по формулам, представленным ранее.

Пример 1.11.

На рисунке 1.43 представлена схема драйвера светодиода с использованием операционного усилителя.

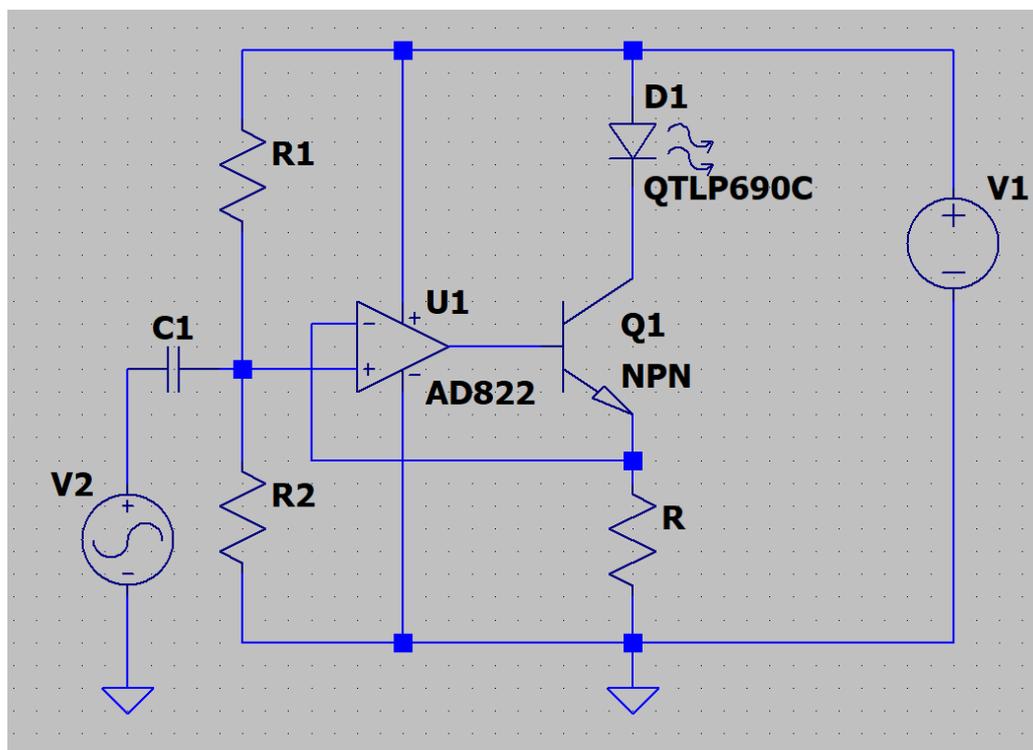


Рисунок 1.43 – Схема драйвера светодиода на основе операционного усилителя, созданная в программе LTspice XVII

В данном примере необходимо найти минимальное напряжение источника питания, значение сопротивлений R, R1, R2, а также значение ёмкости разделительного конденсатора C1. Сведения о компонентах электрической схемы представлены в таблице 1.16.

Таблица 1.16. Сведения о компонентах электрической схемы (Пример 1.11)

Компонент	Позиционное обозначение	Название в библиотеке компонентов	Модель	Параметры электронного компонента
Светодиод	D1	LED	QTLP690C	$I_0 = 5 \text{ mA}$
				$I_{max} = 0,001 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 10^3 \cdot t)$
				$U_D \approx 1,9 \text{ B}$
Операционный усилитель	U1	AD822	AD822	$5 \text{ B} < U_{num} < 30 \text{ B}$
n-p-n транзистор	Q1	npn	ZTX1048A	$U_{\delta\delta} \approx 0,6 \text{ B}$ $U_{кэ} \approx 1,9 \text{ B}$

				$\beta = 450$
Источник питания	V1	voltage	-	$(U_{un})_{min} = ?$
Опорное напряжение	V2			$(U_{on})_0 = 5 \text{ В}$ $(u_{on}) = ?$
Резистор	R	res	-	$R = ?$
	R1			$R1 = ?$
	R2			$R2 = ?$
Конденсатор	C1	cap	-	$C1 = ?$

Рассчитаем значение сопротивления R :

$$R = \frac{(U_{on})_0}{I_0} = \frac{5}{0,005} = 1k\Omega.$$

Переменная составляющая опорного напряжения выражается как

$$u_{on} = RI_{max} \sin(\omega \cdot t) = 1000 \cdot 0,001 \sin(2 \cdot \pi \cdot 1000t) = \sin(2 \cdot \pi \cdot 1000t).$$

Минимальное напряжение источника питания выражается нестрогим неравенством:

$$U_{un} \geq R \cdot (I_0 + I_{max}) + U_{кэ} + U_D = 1000 \cdot (0,005 + 0,001) + 1,9 + 1,9,$$

$$U_{un} \geq 9,8 \text{ В}.$$

Примем напряжение источника питания равным $U_{un} = 10 \text{ В}$.

В связи с тем, что входной ток операционного усилителя практически равен нулю, значения сопротивлений $R1$ и $R2$ можно принять любыми. Примем ток через сопротивления $R1$ и $R2$ равным 1 мА , тогда сопротивления $R1$ и $R2$ равны

$$R1 = \frac{U_{un} - (U_{оп})_0}{I_1} = \frac{10 - 5}{0,001} = 5k\Omega,$$

$$R2 = \frac{(U_{оп})_0}{I_1} = \frac{5}{0,001} = 5k\Omega.$$

Значение ёмкости входного конденсатора $C1$ рассчитывается по формуле (1.25). Для текущих параметров схемы выразим ёмкость входного конденсатора:

$$C1 > \frac{1}{\omega R_{\text{ex}}} = \frac{R_1 + R_2}{\omega \cdot R_1 \cdot R_2} = \frac{5000 + 5000}{2 \cdot \pi \cdot 1000 \cdot 5000 \cdot 5000},$$

$$C1 > 64 \text{ нФ}.$$

Значение ёмкости разделительного конденсатора было выбрано 0,5 мкФ.

Необходимо запустить моделирование в режиме анализа переходных процессов (**Transient**). Время моделирования устанавливается 10 мс.

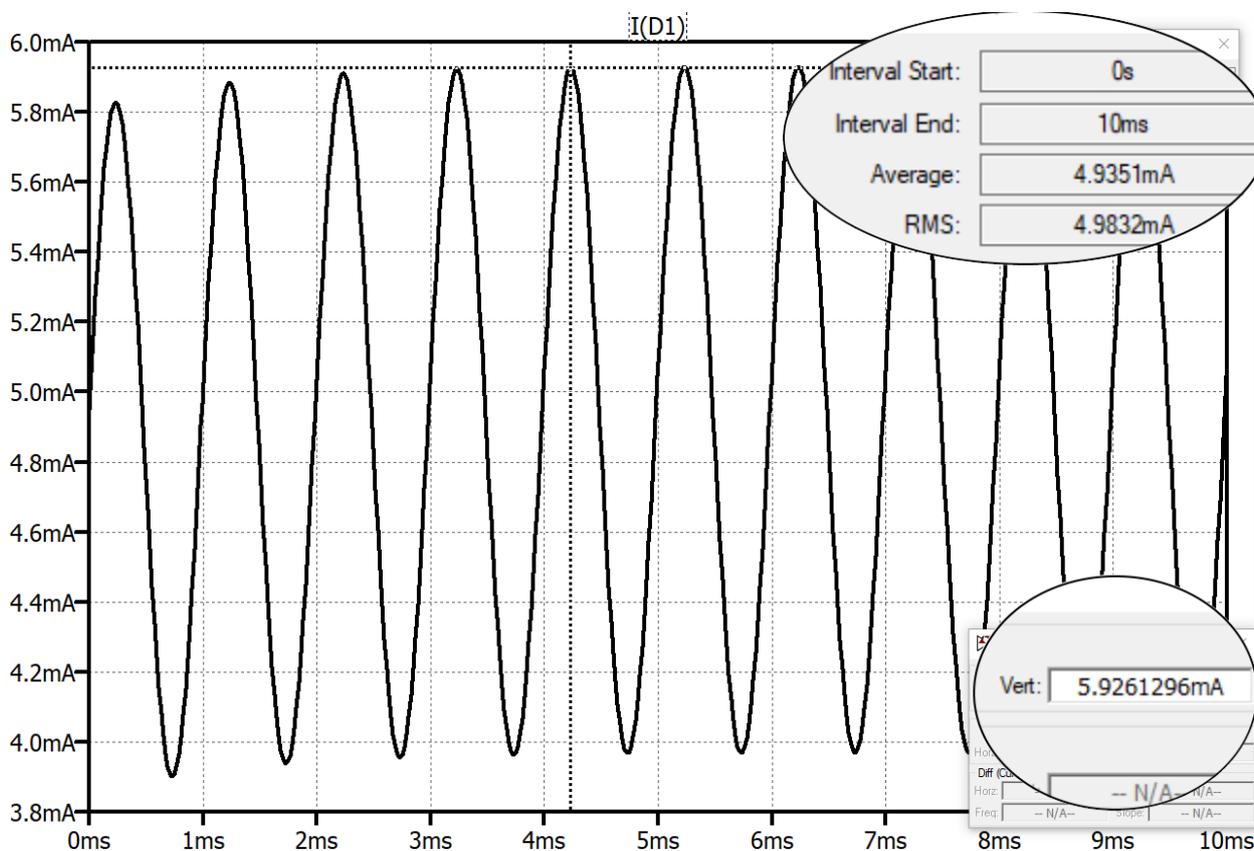


Рисунок 1.44 – Зависимость тока накачки от времени, созданная в программе LTspice XVII

Также на данном графике представлено среднее значение тока, которое составляет около $I_0 \approx 4,9 \text{ mA}$ и амплитудное значение тока, которое составляет около 1 mA . Полученные значения близки к расчётным, что подтверждает правильность проведенных вычислений.

Задание 1.8.

Пример варианта задания представлен в таблице 1.17.

Таблица 1.17. Пример варианта (Задание 1.8)

Компонент	Модель	Параметры электронного компонента
Светодиод (n = 2)	QTLP690C	$I = 4 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^3 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 10^4 \cdot t)$
		$U_D \approx 1,9 \text{ В}$
n-p-n транзистор	ZTX1048A	$U_{бэ} \approx 0,6 \text{ В}$ $U_{кэ} \approx 1,9 \text{ В}$
Операционный усилитель	AD822	$5 \text{ В} < U_{num} < 30 \text{ В}$
Источник опорного напряжения	–	$(U_{on})_0 = 6 \text{ В}$
Источник питания		$(U_{un})_{max} = 12 \text{ В}$ $\Delta U_{un} = 1 \text{ В}$
		$(U_{un})_{min} = ?$
Резисторы	R	$R = ?$
	R1	$R1 = ?$
	R2	$R2 = ?$
Конденсатор	C	$C1 = ?$

Согласно выданным вашим преподавателем вариантам заданий:

- Рассчитать схему стабилизации тока, представленную на рисунке 1.42;
- Построить зависимость $I(U_{un})$ в диапазоне $(U_{un})_{min} - (U_{un})_{max}$, дискретность изменения ΔU_{un} указан в задании.

1.3 Высокочастотные схемы токовой накачки

1.3.1 Конструкция передающего оптического модуля

В волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) в качестве источника оптического излучения используются передающие оптические модули (ПОМы), которые помимо светодиода (лазерного диода) обладают дополнительными электронными компонентами (фотодиод, элемент Пельтье, датчик температуры) для стабилизации температуры светодиода (лазерного диода), а также для осуществления обратной связи по оптической мощности. Дополнительно в оптическом передающем модуле расположена система линз, которая

обеспечивает эффективный ввод оптического излучения светодиода (лазерного диода) в оптоволокну. На рисунке 1.45 (а) представлено схематическое изображение ПОМ, на рисунке 1.45 (б) представлена функциональная схема ПОМ.

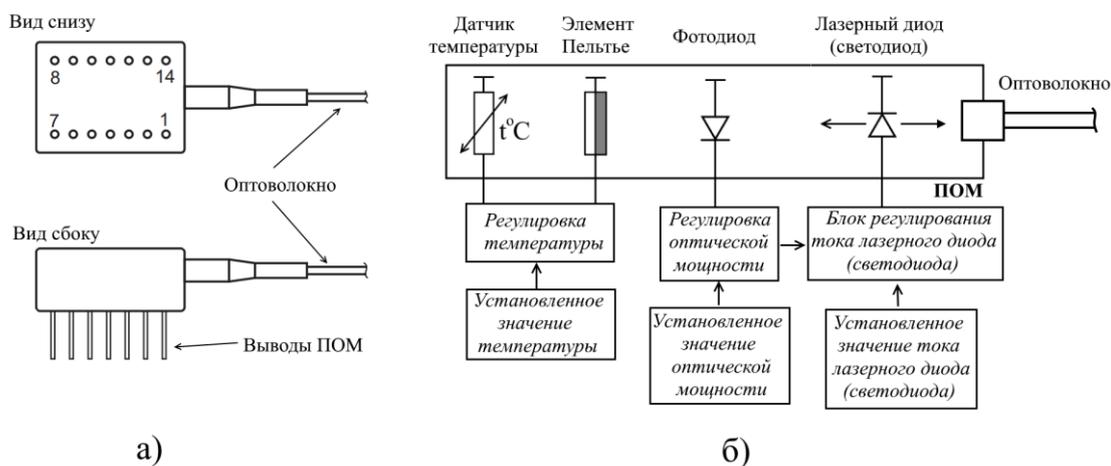


Рисунок 1.45 – Схематическое изображение ПОМ (а), функциональная схема ПОМ (б)

Более подробно конструкция и структура ПОМ представлены на рисунке 1.46.

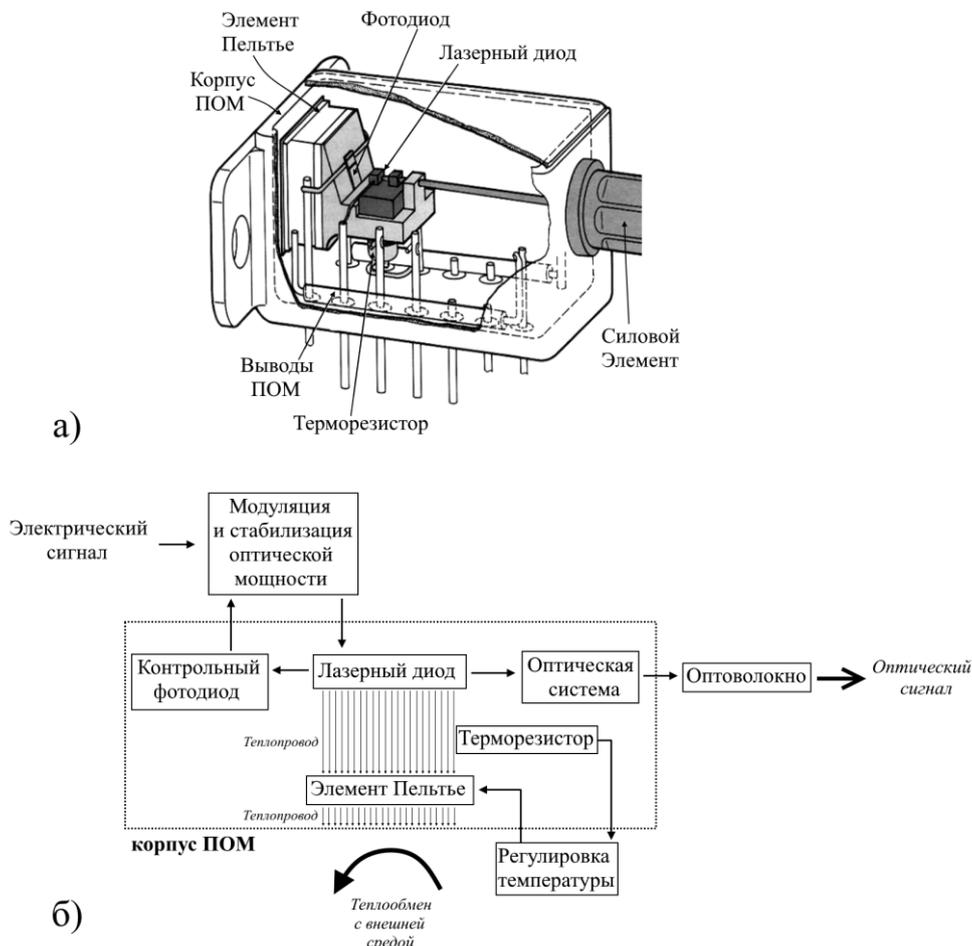


Рисунок 1.46 – Конструкция ПОМ (а); структура ПОМ (б)

Использование ПОМ в ВОЛС связано с высокой скоростью передачи данных, которая может достигать значений более нескольких Гбит/с. Для того чтобы обеспечить передачу информации на такой скорости, необходимо соблюдать жесткие требования, связанные с электронными характеристиками лазерного диода (светодиода), с подбором электронных компонентов схемы накачки, а также с проектированием печатной платы.

1.3.2 Схемы токовой накачки в импульсном режиме

Светодиоды и лазерные диоды могут работать в импульсном режиме, что используется в стробоскопах, датчиках, импульсных осветителях, системах связи. Импульсный режим работы обладает несколькими преимуществами по сравнению с режимом постоянного тока, так как позволяет увеличить оптическую мощность, а также уменьшить мощность рассеивания. Это связано с предельным режимом работы светодиодов и лазерных диодов, при котором значение импульсного тока может быть больше значения тока при постоянном режиме работы. При использовании импульсного режима важно, чтобы среднее значение мощности рассеивания светодиода (лазерного диода) было меньше максимально допустимой мощности рассеивания, значение которой можно найти в документации. Импульсная мощность светодиода (лазерного диода) рассчитывается по формуле (1.29).

$$P_{имп} = I_{имп} \cdot U. \quad (1.29)$$

Средняя мощность рассеивания светодиода (лазерного диода) рассчитывается по формуле (1.30).

$$P_{cp} = \frac{P_{имп}}{Q}, \quad (1.30)$$

где Q – скважность, которая определяется как отношение периода импульса T к его длительности τ , тогда средняя мощность рассеивания выражается как

$$P_{cp} = \frac{P_{имп} \cdot \tau}{T}. \quad (1.31)$$

Импульсный режим работы позволяет получить большую оптическую мощность при той же мощности рассеивания по сравнению с режимом постоянного тока. Исходя из этого, можно выделить дополнительное преимущество импульсного режима работы – это меньшая мощность рассеивания. Данный параметр является критичным при использовании мощных светодиодов.

При передаче данных по ВОЛС необходимо использовать источник оптического излучения с длиной волны из окон прозрачности оптического волокна, при котором достигаются минимальные оптические потери (850 нм, 1310 нм, 1550 нм). Лазерный диод должен использовать такую же частоту

модуляции, при которой будет передаваться информация на требуемой скорости. Источник излучения должен быть мощным, для того чтобы осуществлять передачу сигнала на большое расстояние. Также стоимость источника не должна быть необоснованно завышенной.

Модуляция оптического сигнала может быть осуществлена внутренним, внешним и прямым способом. В случае внутренней модуляции управляющий сигнал осуществляет модуляцию оптического сигнала внутри резонатора лазера (электрооптический способ). При внешней модуляции используется немодулируемый источник и дополнительный оптический модулятор, в таком случае способ модуляции может быть магнитооптический, акустооптический и т.п. В случае прямой модуляции модуляция оптического излучения осуществляется управлением токами накачки, данный способ является наиболее распространенным в современных системах.

При высокоскоростной передаче данных необходимым условием является наличие тока смещения, что является важным условием из-за задержки лазерного диода или светодиода в момент включения и выключения. При наличии тока смещения лазерный диод (светодиод) находится в открытом состоянии, детектирование логической единицы происходит при увеличении оптической мощности лазерного диода (светодиода) выше порогового значения, которое устанавливается на приемном устройстве. В случае использования аналогового сигнала, значение тока смещения устанавливается в центре линейного участка ватт-амперной характеристики (рис. 1.47 (а)), при использовании цифрового сигнала значение тока смещения устанавливается в начале линейного участка ватт-амперной характеристики (рис. 1.47 (б)).

Изменение оптической мощности лазерного диода или светодиода возможно при постоянном значении тока накачки, одним из ключевых факторов, который влияет на параметры р-п перехода и, следовательно, на мощность оптического излучения, является температура.

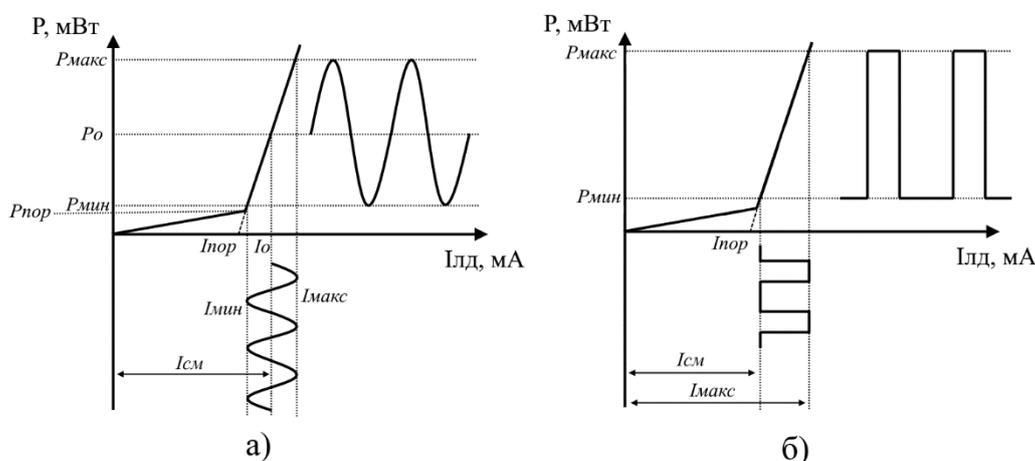


Рисунок 1.47 –Прямая токовая модуляция интенсивности: аналоговым сигналом (а); цифровым сигналом (б)

При изменении температуры меняется скорость генерации и рекомбинации свободных носителей. Так, при увеличении температуры в р-п переходе начинает преобладать процесс генерации свободных носителей, доминируя над процессом рекомбинации. Уменьшение количества рекомбинаций, в результате которых происходит излучение фотонов, является причиной уменьшения оптической мощности. В случае стабилизации тока накачки и увеличения температуры кристалла лазерного диода (светодиода), оптическая мощность уменьшится. Для того чтобы стабилизировать выходную мощность оптического излучения, используется фотодиод обратной связи и элемент Пельтье. Измеренное значение тока фотодиода обратной связи является сигналом для блока регулирования тока лазерного диода (светодиода). Дополнительно в ПОМ происходит стабилизация температуры кристалла лазерного диода (светодиода) посредством терморезистора и элемента Пельтье. На рисунке 1.48 представлена схема управления ПОМ со стабилизацией оптической мощности по цепи обратной связи.

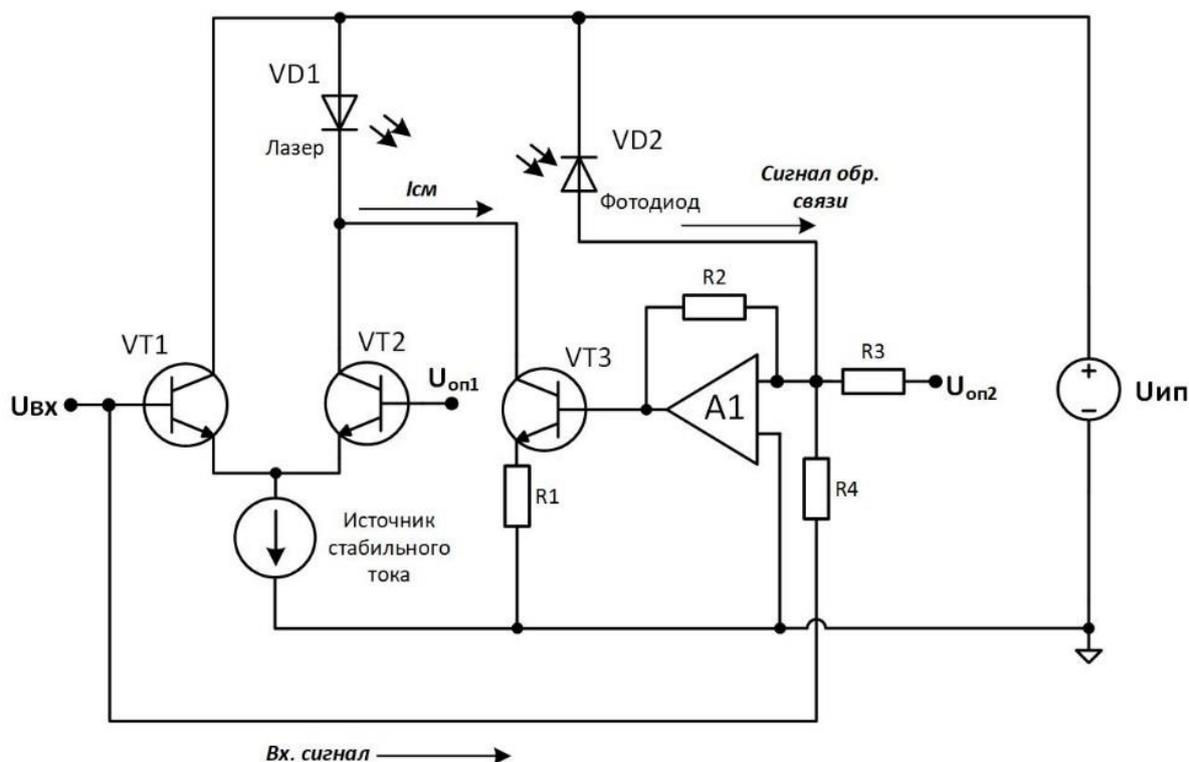


Рисунок 1.48 – Схема управления ПОМ со стабилизацией оптической мощности по цепи обратной связи

Представленная электрическая схема состоит из нескольких основных каскадов, одним из которых является дифференциальный усилитель, созданный с использованием биполярных транзисторов n-типа $VT1$ и $VT2$. В данном примере на вход схемы управления ПОМ подается униполярный сигнал, на базу транзистора $VT2$ подается напряжение $U_{оп1}$, источник стабильного тока задает ток через лазерный диод. Следующим важным каскадом является каскад обратной связи по мощности. Оптическое излучение лазерного диода $VD1$ поступает на фотоприемник обратной связи $VD2$, анод которого подключен к

усилителю $A1$. На вход усилителя поступает разность входного сигнала $U_{вх}$ и сигнала обратной связи по мощности, в зависимости от которого происходит изменение напряжения на базе биполярного транзистора $VT3$, коллекторный ток которого регулирует ток накачки и, следовательно, оптическую мощность лазерного диода $VD1$. Начальное значение тока смещения $I_{см}$ устанавливается с помощью напряжения $U_{оп2}$.

Также используются более сложные схемы управления ПОМ с независимой регулировкой амплитуды импульса и тока смещения (рис. 1.49). В представленной схеме используются две цепи обратной связи, в одной из которых для установления тока смещения используются усилители $A1$, $A3$, $A4$, а также опорное напряжение $U_{оп2}$. Усилитель $A1$ усиливает сигнал обратной связи, усилитель $A3$ осуществляет вычитание переменной составляющей из сигнала обратной связи. Далее на входы усилителя $A4$ поступают значение, соответствующее току смещения лазерного диода $VD1$, и значение, соответствующее опорному напряжению $U_{оп2}$. При несоответствии тока смещения опорному значению на выходе усилителя $A4$ возникает напряжение, которое устанавливает напряжение на базе транзистора $VT3$, что способствует изменению тока смещения лазерного диода. Во второй цепи обратной связи используется пиковый детектор для детектирования пикового значения сигнала обратной связи, а также усилитель $A5$, который осуществляет изменение тока регулируемого источника тока, тем самым изменяет амплитудное значение тока накачки.

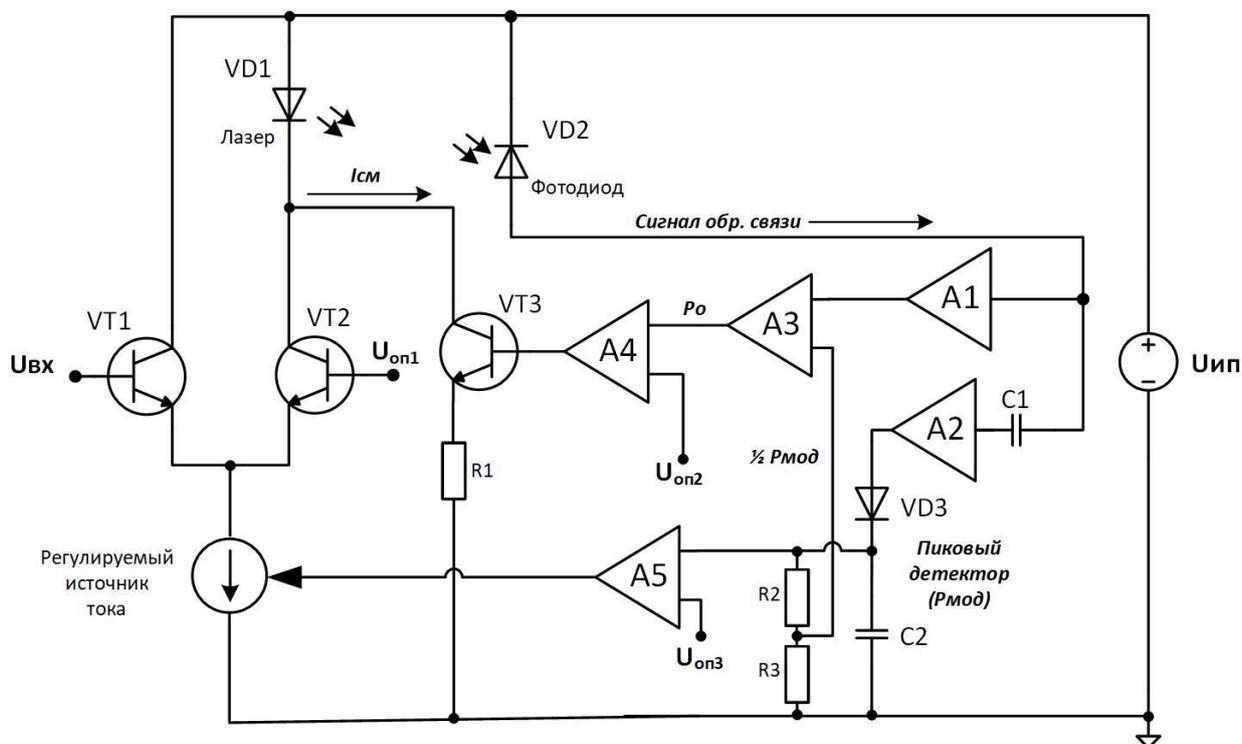


Рисунок 1.49 – Схема управления ПОМ с независимой регулировкой амплитуды и тока смещения

В настоящее время в промышленном масштабе выпускается огромное количество микросхем, предназначенных для токовой накачки светодиодов и

лазерных диодов для применения в различных областях науки и техники. Преимуществом использования микросхем для токовой накачки светодиодов и лазерных диодов являются меньшие размеры и большая скорость работы, которая связана с совершенствованием технологии производства микросхем и уменьшением их паразитных параметров. При использовании подобных микросхем необходимо детально изучить техническую документацию, выполнить необходимые рекомендации по схеме включения, выбору режима работы, а также учитывать необходимые требования по проектированию и разработке высокочастотных печатных плат.

Контрольные вопросы:

1. В чем заключаются преимущества использования ПОМ?
2. Какие требования предъявляются к источнику оптического излучения?
3. Как устанавливается рабочая точка при прямой модуляции аналоговым сигналом?
4. Как устанавливается рабочая точка при прямой модуляции цифровым сигналом?
5. Зачем необходима цепь обратной связи по оптической мощности?
6. Каков принцип работы схемы драйвера со стабилизацией мощности оптического излучения по цепи обратной связи?
7. Каков принцип работы лазерного драйвера с независимой регулировкой амплитуды импульса и тока смещения?

ГЛАВА 2

2.1 Фоточувствительные элементы

2.1.1 Явление фотоэффекта

Явление фотоэффекта обычно разделяют на два вида – внешний фотоэффект и внутренний фотоэффект. При явлении внешнего фотоэффекта происходит эмиссия электронов с поверхностного слоя фоточувствительного элемента во внешнюю среду (например вакуум) под действием падающего излучения (фотоэмиссия). На основе внешнего фотоэффекта работают вакуумные фотоэлементы и фотоэлектронные умножители.

При явлении внутреннего фотоэффекта в материале разрушается ковалентная связь между атомами и происходит образование свободного электрона. Оптически возбужденные электроны (фотоэлектроны) остаются внутри освещаемого материала. Внутренний фотоэффект является основой

работы для таких полупроводниковых приборов, как фоторезистор, фотодиод и фототранзистор.

Основные законы внешнего фотоэффекта:

а) Фототок в режиме насыщения (все фотоэлектроны, вылетевшие из катода, собираются на анод, и нет зависимости фототока от напряжения питания) прямо пропорционален потоку фотонов, поглощенных катодом, при неизменном составе спектра падающего излучения (закон Столетова):

$$I_{\phi} = \Phi S_{int}, \quad (2.1)$$

где S_{int} – интегральная чувствительность фотокатода, Φ — поглощенный катодом поток фотонов; I_{ϕ} – фототок.

б) Максимальная энергия выбиваемых с поверхности фотокатода фотоэлектронов пропорциональна частоте излучения ν , падающего на катод.

в) Для любого материала существует «красная граница» (граница внешнего фотоэффекта). Энергия излучения фотонов $h\nu$ уменьшается при увеличении длины волны и, соответственно, уменьшении частоты. Частота границы фотоэффекта $\nu_{гр}$ соответствует энергии излучения, при которой максимум энергии фотоэлектронов равен нулю.

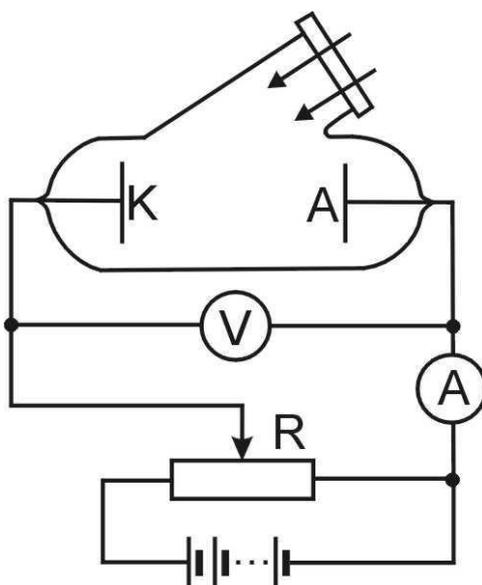


Рисунок 2.1 – Классическая схема исследования внешнего фотоэффекта

На рисунке 2.1 представлена схема для исследования внешнего фотоэффекта. Электроны, испускаемые при фотоэффекте, движутся к аноду А под действием электрического поля. В результате образуется фототок, который измеряется амперметром А. На катод и анод подаётся напряжение, которое можно измерить вольтметром V и изменять его величину с помощью потенциометра R.

2.1.2 Фоторезистор. Определение, основные характеристики и параметры

Фоторезистор – это полупроводниковый прибор, который состоит из полупроводниковой пластины с контактами на противоположных её концах. Основой действия фоторезистора является его фотопроводимость – эффект изменения проводимости полупроводника при его освещении.

Фоторезисторы для видимой области спектра обычно изготавливаются из соединения кадмия с теллурием, селеном, серой. Для ближнего инфракрасного (ИК) излучения применяется кремний с добавками золота или цинка. Для длинноволнового ИК излучения используются соединения свинца с серой и селеном, германия, сурьмянистого индия. Светочувствительный элемент в фоторезисторе может быть выполнен в виде пластины в корпусе с выводами или же может представлять тонкий слой полупроводника, нанесенного на подложку.

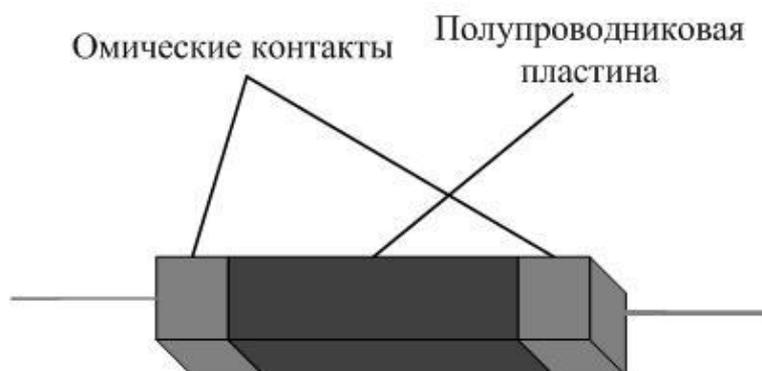


Рисунок 2.2 – Монокристаллический фоторезистор

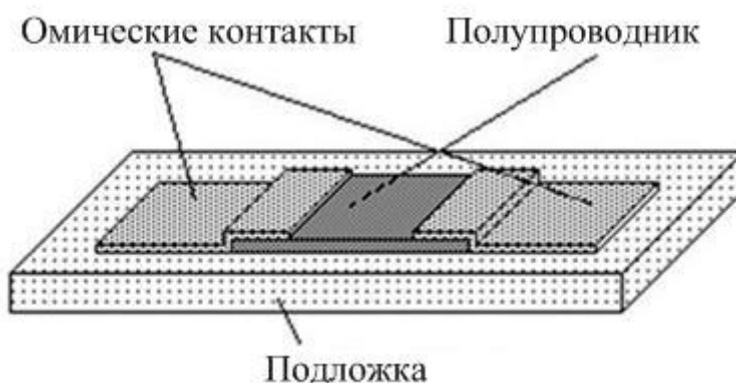


Рисунок 2.3 – Пленочный фоторезистор

К основным параметрам фоторезисторов относятся:

- а) рабочая площадь - S_{ϕ} ;
- б) темновое сопротивление – R_T (сопротивление в полной темноте обычно варьируется от 1 кОм до 100 Мом);
- в) удельная чувствительность

$$K = I_{\Phi} / (\Phi * U), \quad (2.2)$$

где I_{Φ} – фототок, равный разности тока фоторезистора при свете и в темноте, Φ – световой поток, U – приложенное напряжение;

г) предельное рабочее напряжение (обычно от 1 до 1000 В);

д) среднее относительное изменение сопротивления в процентах

$$\Delta R/R = (R_T - R_C)/R_T, \quad (2.3)$$

где R_T и R_C – сопротивление в темноте и при свете соответственно (обычно лежит в пределах от 10 до 99.99%);

е) средняя кратность изменения сопротивления – R_T/R_C , где R_T и R_C – сопротивление в темноте и при свете соответственно (обычно от 1 до 1000).

К основным характеристикам фоторезисторов относятся:

а) световая характеристика;

б) вольт-амперная характеристика (ВАХ);

в) частотная характеристика;

г) спектральная характеристика.

Для большинства фоторезисторов зависимость тока фоторезистора I от поступающего на него потока излучения Φ_n можно представить в виде

$$I = I_T + I_{\Phi} = I + \Phi_n, \quad (2.4)$$

где I_T – темновой ток фоторезистора.

Проводимость полупроводника, как известно, зависит от концентрации в нем электронов и дырок. Количество возбуждаемых носителей в единицу времени под действием излучения прямо пропорционально потоку излучения. В состоянии равновесия, без падающего света и приложенного к полупроводнику напряжения, число возникающих в полупроводнике дырок и электронов равно числу рекомбинаций электронно-дырочных пар. С ростом числа электронов и дырок возрастает вероятность их рекомбинации. В результате влияния рекомбинации электронно-дырочных пар на проводимость полупроводника ее рост происходит не прямо пропорционально потоку падающего света, а по закону \sqrt{x} . Данное свойство приводит к нелинейности световой характеристики и является существенным недостатком фоторезистора.

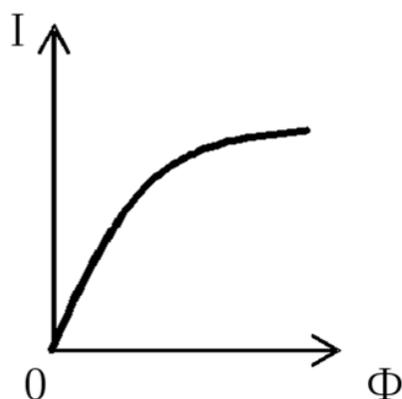


Рисунок 2.4 – Световая характеристика фоторезистора

Вольт-амперную характеристику фоторезистора можно представить формулой:

$$I = f(U). \quad (2.5)$$

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) фоторезистора линейна. Наклон ВАХ при отсутствии светового потока Φ зависит от темнового сопротивления R_T или собственной проводимости полупроводника.

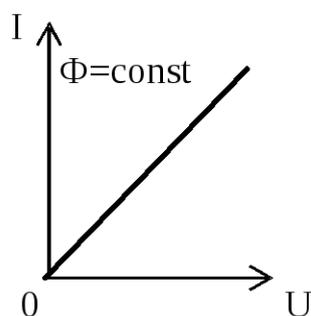


Рисунок 2.5 – ВАХ фоторезистора

Частотная характеристика определяет чувствительность фоторезистора при освещении его потоком излучения с различной частотой. Инерционность фоторезистора приводит к уменьшению фототока при увеличении частоты падающего излучения. Данное свойство ограничивает возможности работы фоторезистора на высоких частотах, что также является существенным недостатком фоторезистора.

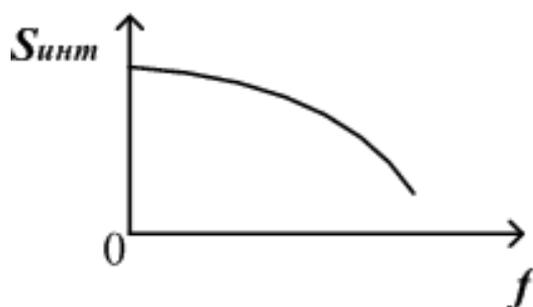


Рисунок 2.6 – Частотная характеристика фоторезистора

Спектральная характеристика определяет чувствительность фоторезистора при освещении его потоком излучения фиксированной мощности на различных длинах волн. Спектральные свойства фоторезистора определяются материалом его фоточувствительного элемента.

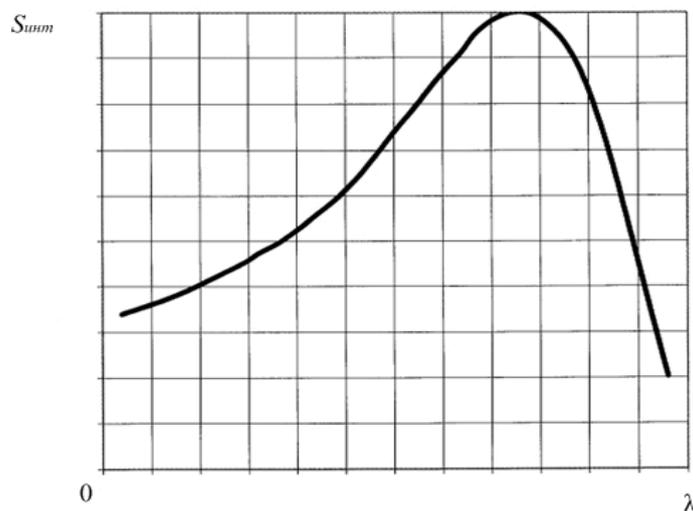


Рисунок 2.7 – Спектральная характеристика фоторезистора

Если включить фоторезистор последовательно с источником напряжения и не освещать его, то в этой цепи будет протекать его темновой ток:

$$I_T = E / (R_T + R_H), \quad (2.6)$$

где E – ЭДС источника напряжения; R_T – сопротивление фоторезистора без освещения; R_H – сопротивление резистора в цепи.

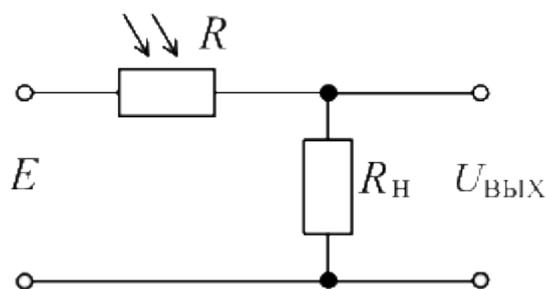


Рисунок 2.8 – Схема включения фоторезистора

При попадании на фоторезистор излучения энергия падающих фотонов идет на переход электронов в зону проводимости (ЗП). При этом возрастает количество свободных электронно-дырочных пар, сопротивление фоторезистора уменьшается, и через него начинает течь световой ток:

$$I_c = E / (R_c + R_H), \quad (2.7)$$

где R_c – сопротивление фоторезистора при попадании на него света.

Разность светового и темнового токов дает величину тока I_{ϕ} , или же первичный ток проводимости:

$$I_{\phi} = I_c - I_T. \quad (2.8)$$

Если поток излучения мал, то I_{ϕ} меняется прямо пропорционально величине потока излучения, попадающего на фоторезистор. При возрастании светового потока растет количество фотоэлектронов. При движении фотоэлектроны сталкиваются с атомами, ионизируют их и создают вторичный фототок. Рост количества ионизированных атомов препятствует движению фотоэлектронов. В результате этого изменение фототока происходит позднее изменения светового потока и проявляется инерционность фоторезистора, что является его существенным недостатком.

2.1.3 Фотодиодные элементы

2.1.3.1 Принцип действия и структура PN-фотодиода

Фотодиод — полупроводниковый прибор, который преобразует попавший на его фоточувствительную область световой поток в электрический заряд за счет процессов на PN-переходе. Фотодиоды работают за счет поглощения фотонов и генерируют низкий ток, пропорциональный падающему световому потоку, во внешней цепи.

PN-переход может быть сформирован путем диффузии внесением примеси P-типа (например бора) в кремниевую пластину N-типа, либо путем внесения примеси N-типа (например фосфора) в пластину P-типа. Область с примесью является активной областью фотодиода и имеет толщину менее 1 мкм, точный ее размер определяется длиной волны регистрируемого излучения. На активную область нанесено просветляющее покрытие для уменьшения френелевского отражения. P и N стороны структуры имеют металлические слои, которые обеспечивают электрический контакт.



Рисунок 2.9 – Схематическое изображение PN фотодиода

В основе работы фотодиода на PN переходе лежит внутренний фотоэффект в полупроводниковом материале и образование за счёт этого электронно-дырочных пар. Это происходит из-за движения электронов из валентной зоны (ВЗ) в ЗП.

В отсутствие освещения и смещения (т.е. в состоянии равновесия) через PN переход текут компенсирующие друг друга потоки основных и неосновных носителей – электронов из N-области в P-область и в обратном направлении, а также дырок из P-области в N-область и в обратном направлении.

При освещении PN перехода потоком монохроматического излучения происходит поглощение квантов излучения и генерация неравновесных фотоэлектронов и фотодырок. Электрическое поле перехода переносит фотоносители: электроны - в N-область, а дырки – в P-область. В результате

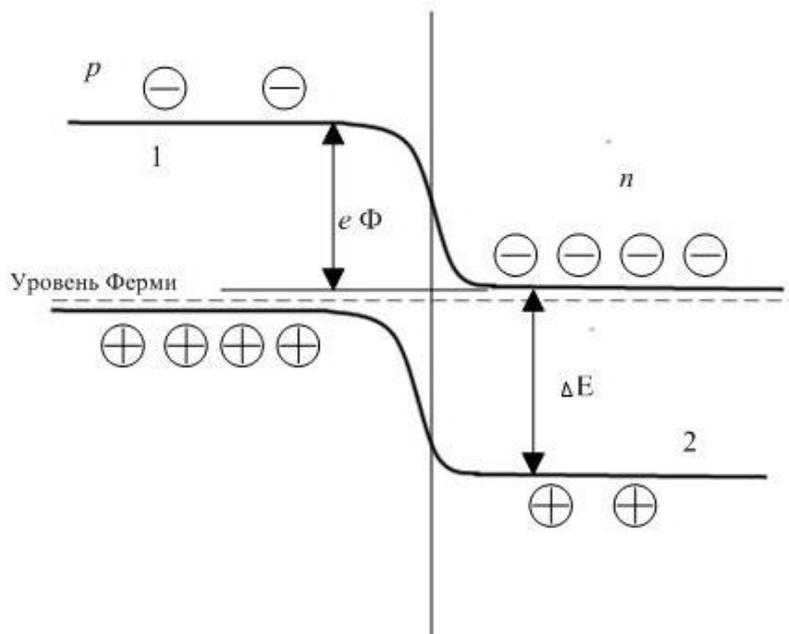


Рисунок 2.10 – Зонная диаграмма фотодиода без освещения

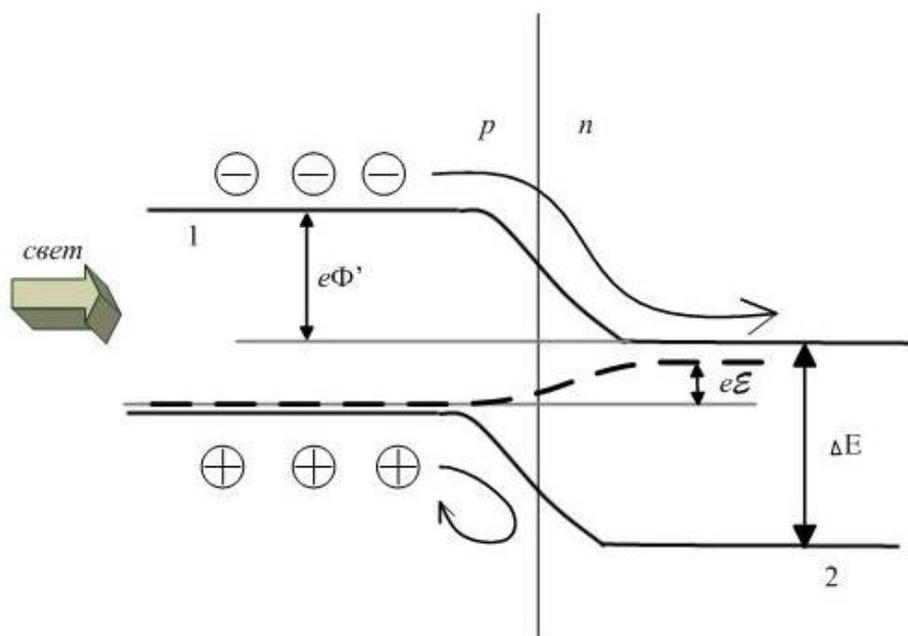


Рисунок 2.11 – Зонная диаграмма фотодиода при освещении

этого через PN переход протекает дрейфовый ток неравновесных носителей. На границе PN перехода концентрация электронов в ЗП и дырок в ВЗ меньше, чем в соответствующих полупроводниках, и область вблизи границы перехода является обеднённым слоем. Данный слой образован неподвижными дырками в N-области и неподвижными электронами в P-области перехода. Ширина обеднённого слоя определяется концентрацией легирующих примесей: при меньшем количестве примесей шире обеднённый слой.

При поглощении фотонов электроны переходят из ВЗ в ЗП и происходит образование электронно-дырочной пары. Если данные пары создаются в обеднённом слое, то под влиянием электрического поля перехода возникнет сильный дрейф: электроны будут дрейфовать в N-область, а дырки в P-область, в цепи возникнет ток (рисунок 2.11). Если данная пара образуется вне обеднённого слоя, то носители сперва диффундируют в направлении обедненного слоя и только после этого попадут на внешний контакт. Из-за того, что процесс диффузии гораздо медленнее дрейфа, необходимо, чтобы максимальная часть излучения поглощалась в обеднённом слое. Увеличить данный слой можно при помощи снижения концентрации легирующей примеси.

Разделению подвергаются фотоэлектроны и фотодырки, генерируемые в обеднённом слое PN перехода и прилегающей зоне размером, сравнимым с диффузионной длиной неосновных фотоносителей. Неосновной фотоноситель успевает пересечь границу PN перехода за время жизни только при расстоянии до неё меньше его диффузионной длины. Неосновные фотоносители в N-области и P-области на большем расстоянии от границы перехода, чем их диффузионная длина, из-за рекомбинации не попадают в обеднённый слой.

2.1.3.2 PIN фотодиод

PIN фотодиод получил своё название благодаря многослойной структуре полупроводниковых материалов, из которых он образован. Он отличается от PN фотодиодов тем, что имеет дополнительный нелегированный I-слой полупроводника, находящийся между сильно легированными P и N слоями полупроводника.

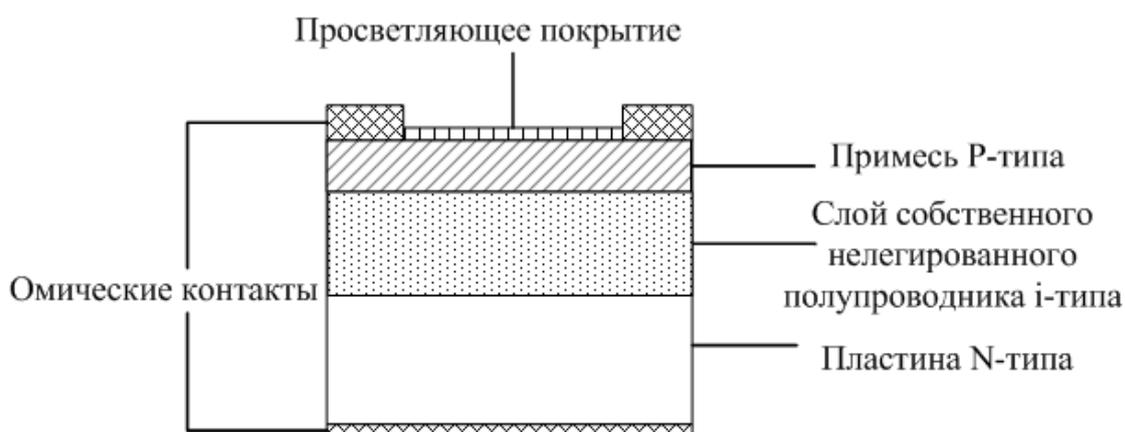


Рисунок 2.12 – Схематическое изображение PIN фотодиода

PN фотодиод имеет несколько существенных недостатков:

- а) емкость обедненного слоя слишком велика для того, чтобы производить фотодетектирование на высоких частотах модуляции;
- б) область поглощения излучения достаточно мала (не более нескольких микрон), и длинноволновые фотоны поглощаются за её пределами, в результате квантовая эффективность становится довольно низкой.

Фотодиоды с PIN структурой не имеют упомянутых выше недостатков. Высокое быстродействие PIN диодов объясняется меньшей, в сравнении с PN фотодиодами, емкостью перехода. Фотодиод можно представить в виде конденсатора. Его емкость прямо пропорциональна электрическому заряду и обратно пропорциональна расстоянию между обкладками. Из-за того, что ширина I-слоя PIN фотодиодов во много раз больше, чем ширина обедненной слоя PN фотодиода, емкость таких фотодиодов во много раз меньше, чем у PN фотодиодов. Данное свойство обеспечивает возможность детектирования сигнала на более высоких частотах.

Сквозь просветляющее покрытие оптическое излучение проникает в P-область. Здесь фотоны практически не поглощаются, так как из-за большой концентрации дырок в P-области на верхних энергетических уровнях ВЗ нет электронов, поэтому невозможно перенести электрон в ЗП и создать электронно-дырочную пару. Существенная разность концентраций носителей делает ниже проводимость обедненного I-слоя, и напряжение на контактах внешних слоев практически полностью прикладывается к границам этого слоя. Именно в обедненном I-слое происходит эффективное поглощение фотонов и образование электронно-дырочных пар из-за максимального заселения электронами верхних энергетических уровней ВЗ и малой концентрации основных носителей. Электрическое поле направляет появившиеся фотоносители к P- и N-областям.

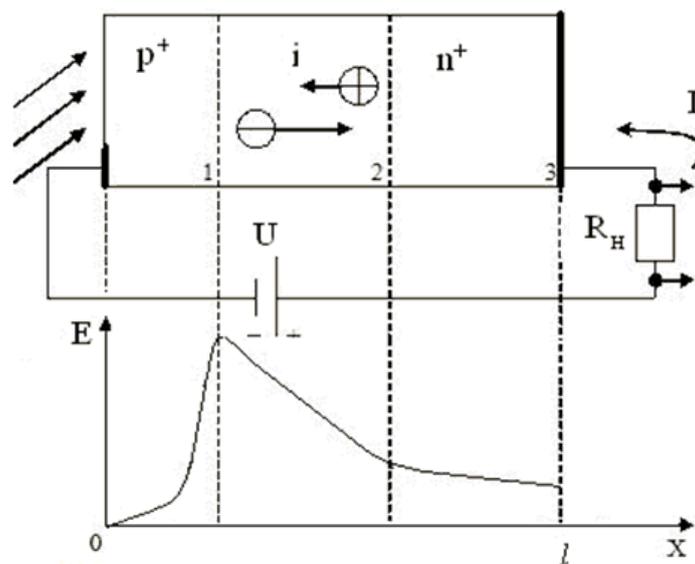


Рисунок 2.13 – Образование фотоносителей, возникновение фототока и распределение электрического поля в PIN фотодиоде

Ширина I-слоя выбирается по следующим критериям:

а) все попавшие на него фотоны должны быть поглощены, для достижения максимального фототока ширину слоя необходимо сделать максимально большой;

б) рожденные электронно-дырочные пары должны достигнуть P- и N-областей максимально быстро, чтобы обеспечить высокое быстродействие ширину обедненной I-слоя необходимо максимально уменьшить.

Данные два требования несовместимы. В практическом случае разработчик фотодиода должен выбрать компромиссный вариант. PIN фотодиод конструируется так, чтобы свет максимально поглощался в пределах I-слоя. Для этого PN переход размещают максимально близко к поверхности кристалла. Носители фототока при движении к контактам концентрируются на границе I-слоя, потому что за границей обедненного слоя электрическое поле практически отсутствует.

PIN фотодиод имеет довольно простую структуру и обладает достаточным быстродействием. При помощи их детектируют оптические сигналы гигагерцового диапазона.

2.1.3.3 Лавинный фотодиод

Порог чувствительности PIN фотодиода характеризуется тепловым и дробовым шумами и шумом темнового тока. Увеличить порог чувствительности можно благодаря лавинным фотодиодам, которые работают на основе лавинного умножения носителей. В данном случае происходит внутреннее усиление в M раз (коэффициент лавинного усиления). При таком усилении умножаются и шумы диода, однако суммарно получается положительный эффект.

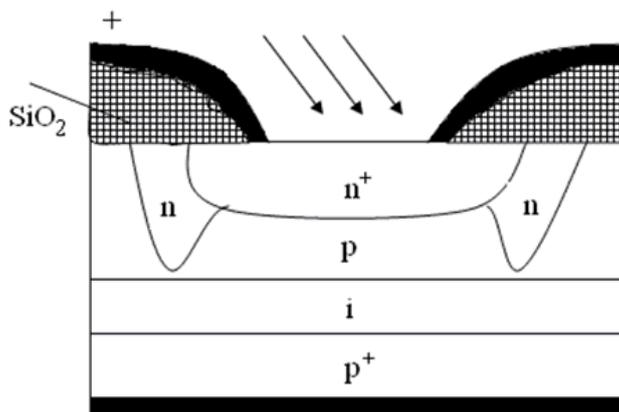


Рисунок 2.14 Структура лавинного фотодиода

Лавинный фотодиод отличается наличием «защитного кольца», представленного в виде глубоко диффундированной N-области на границах PN перехода. Это кольцо способствует уменьшению тока утечки у границ PN перехода и предотвращает низковольтный пробой. Напряжение пробоя вокруг границ становится выше.

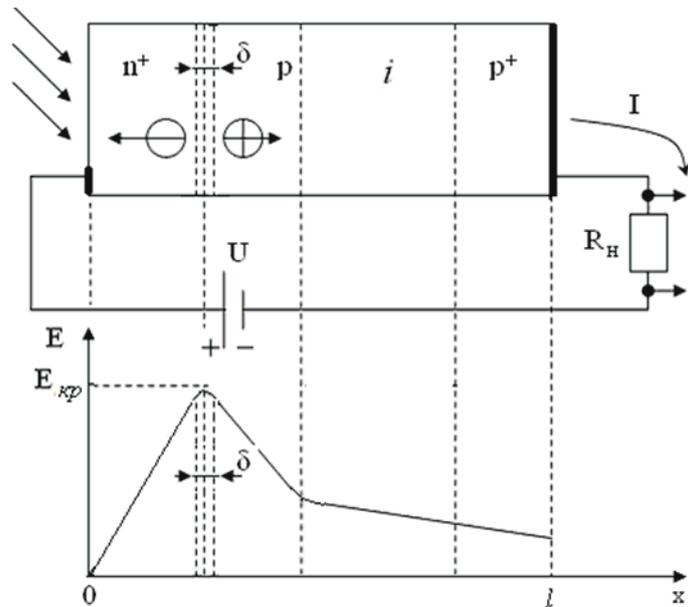


Рисунок 2.15 – Образование фотоносителей, возникновение фототока и распределение электрического поля в лавинном фотодиоде

Первичные фотоносители получают энергию, достаточную для образования ударной ионизацией новой пары носителей, а в узкой области δ вблизи пика электрического поля происходит умножение фотоносителей. Первичные фотоносители получают кинетическую энергию, равную ширине запрещённой зоны, а вторичные фотоносители помогают образованию новой электронно-дырочной пары. Благодаря этому слабый изначально фототок лавинообразно возрастает.

В отличие от других видов фотодиодов, в лавинном фотодиоде поглощение одного фотона образует M электронно-дырочных пар. Этот коэффициент характеризует рост фототока и имеет название «коэффициент лавинного умножения». Коэффициент лавинного умножения можно представить в виде

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{U}{U_{кр}}\right)^\gamma}, \quad (2.9)$$

где U – приложенное внешнее смещение перехода; $U_{кр}$ – критическое напряжение перехода.

На практике в лавинном фотодиоде лавинное умножение не строго определено (то есть первичная электронно-дырочная пара рождает неопределенное количество вторичных электронно-дырочных пар). Величина лавинного умножения находится в пределах порядка 10–100. Лавинный фотодиод по своей конструкции во много раз сложнее PIN фотодиода. Также его особенностью является то, что для лавинного умножения фотоносителей необходимо увеличивать ширину обеднённой области. При большом напряжении смещения сильный ток приведет к нагреванию полупроводника, что во много раз увеличит темновой ток и уменьшит фототок.

Также лавинный фотодиод уступает по шумовым характеристикам, так как лавинный процесс случаен и образует шумы.

2.1.3.4 Основные параметры и характеристики фотодиода

2.1.3.4.1 ВАХ фотодиода

На рисунке 3.16 изображены вольт-амперные характеристики (ВАХ) фотодиода в областях прямого и обратного смещения PN перехода. ВАХ фотодиода представляет зависимость его тока I_ϕ от напряжения на нем U при различных значениях потока излучения Φ . На рисунке 2.16 показано, что ВАХ фотодиода является нелинейной.

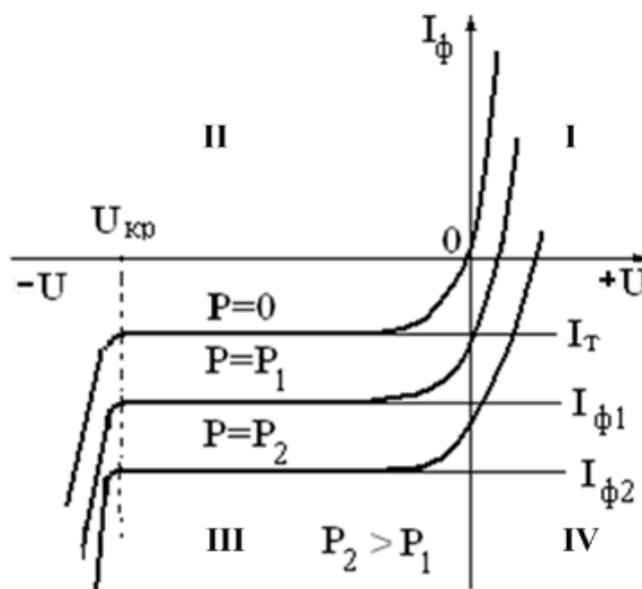


Рисунок 2.16 – ВАХ фотодиода

ВАХ фотодиода расположены в квадрантах I, III и IV. Квадрант I является нерабочей областью, здесь прикладывается прямое напряжение к PN переходу и доминирует диффузионная составляющая. Управление фотодиодом в этом режиме невозможно.

Областью работы фотодиода в фотодиодном режиме является III квадрант. Здесь к PN переходу приложено обратное напряжение смещения. В данной области фототок почти не зависит от напряжения смещения и сопротивления нагрузки. Фототок здесь возникает за счёт гальванического эффекта даже при нулевом смещении, при наличии оптической мощности. На рисунке 2.16 представлены три ветви ВАХ, которые соответствуют определенным значениям оптической мощности P . Видно, что увеличение светового потока вызывает увеличение фототока. При отсутствии оптической мощности ток, протекающий через фотодиод, называется темновым током и обычно имеет значение порядка 10^{-9} – 10^{-7} . Он является важным параметром фотодиода, так как I_T определяет значительную долю шумов оптического тракта.

Квадрант IV ВАХ фотодиода соответствует фотовольтаическому режиму работы фотодиода. Точки пересечения ВАХ фотодиода с осью напряжения определяют значения фотоЭДС или напряжения холостого хода при разных потоках падающего излучения. Точки пересечения ВАХ фотодиода с осью I определяют значения тока короткого замыкания. При известном значении тока по ВАХ фотодиода можно подобрать оптимальный режим работы в фотовольтаическом режиме (выбрать такое сопротивление резистора, при котором в него будет передаваться максимальная мощность).

2.1.3.4.2 Спектральная чувствительность фотодиода

Одним из основных параметров фотодиода является спектральная чувствительность. Она определяет зависимость реакции фотоприемника на воздействие излучения с различной длиной волны. Чувствительность R определяется как отношение фототока фотодиода в [А] I_ϕ к мощности падающего света P_0 в [Вт]. Данное выражение определяет абсолютную спектральную чувствительность в [А/Вт]:

$$R = \frac{I_\phi}{P_0}. \quad (2.10)$$

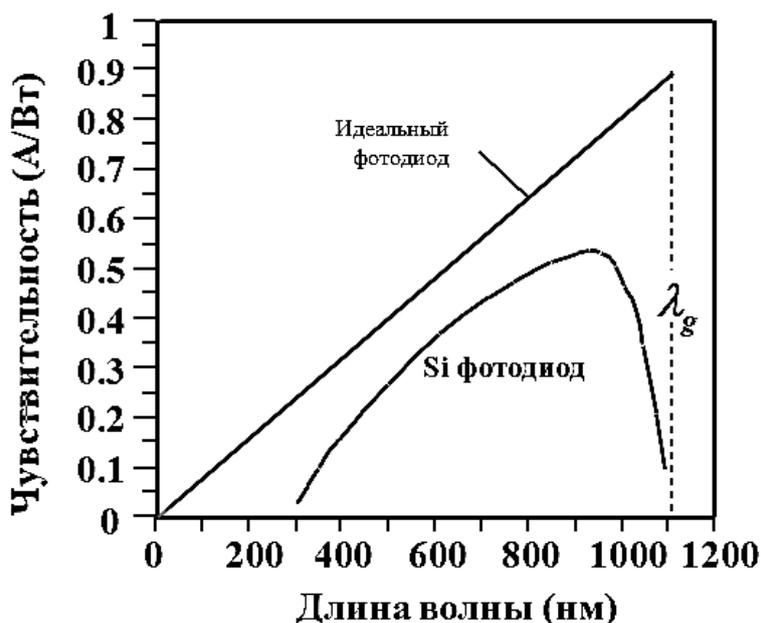


Рисунок 2.17 – Графики спектральной чувствительности идеального и кремниевого фотодиодов

Коротковолновое излучение имеет высокий коэффициент поглощения, поэтому поглощение происходит в основном в области, близкой к поверхности фотодиода. В данном случае фототок будет малым, из-за того, что область поглощения излучения удалена от PN перехода. Длинноволновое излучение поглощается на всей глубине фотодиода. Здесь эффективность преобразования будет максимальной. А на крайне больших длинах волн фототок будет уменьшаться из-за приближения к красной границе фотоэффекта. Зависимость

спектральной чувствительности от длины волны является сложной и достигает максимума при определенной длине волны.

При выборе фотодиода необходимо учитывать его спектральную чувствительность. Ширина полосы спектральной чувствительности фотоприёмников, определяющая их селективность, должна совпадать с шириной полосы источников излучения.

2.1.3.4.3 Квантовая эффективность фотодиода

Не все поглощенные кванты света приводят к образованию электронно-дырочной пары. Это необходимо учитывать при помощи коэффициента, характеризующего эффективность преобразования фотонов в электрический ток, или так называемой квантовой эффективностью (квантовым выходом) фотодетектора.

Квантовой эффективностью (выходом) фотодиода называется отношение числа рождающихся в секунду электронов к числу фотонов, падающих на ФД:

$$\eta = \frac{N_э}{N_ф} = \frac{I_ф/e}{P/h\nu} = \frac{I_ф h\nu}{eP}, \quad (2.11)$$

где $I_ф$ – фототок; e – заряд электрона; h – постоянная Планка; ν – частота излучения; P – мощность оптического излучения.

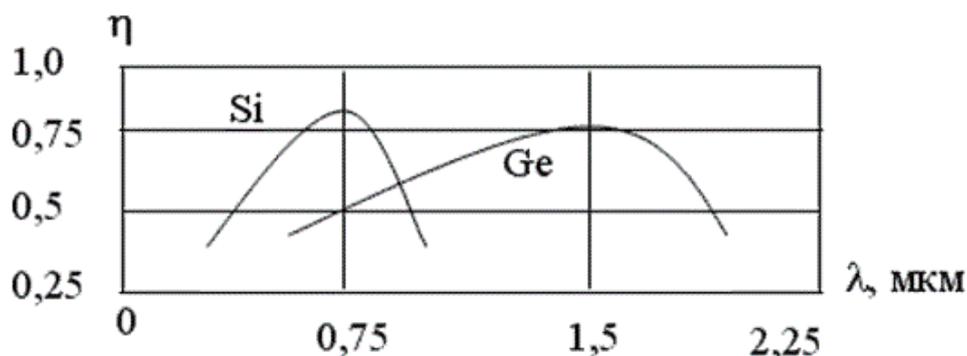


Рисунок 2.18 – Графики квантовой эффективности для германиевого и кремниевого фотодиодов

Квантовая эффективность для фотодиодов не может быть больше 1(100%). Работая в идеальных условиях, высококачественный кремниевый фотодиод оптимальной конструкции будет способен приблизиться к квантовой эффективности 0,8 (80%).

2.1.3.5 Режимы работы фотодиода

2.1.3.5.1 Фотовольтаический режим

Фотовольтаический эффект в полупроводнике заключается в возникновении ЭДС под влиянием светового потока в результате разделения фотоносителей электрическим полем на границе двух полупроводниковых сред.

В фотовольтаическом режиме фотодиод работает без внешнего источника напряжения. В данном режиме он может работать как датчик или как элемент питания, так как под воздействием излучения на выводах фотодиода появляется напряжение, зависящее от потока света и нагрузки. Генерируемое напряжение является логарифмической функцией интенсивности падающего света.

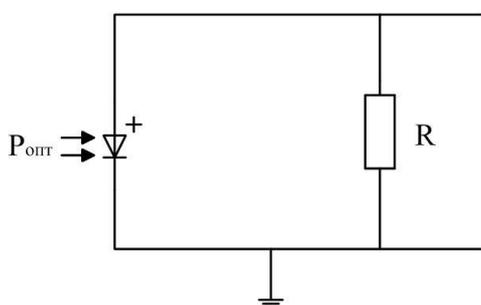


Рисунок 2.19 – Схема включения фотодиода в фотовольтаическом режиме

Фотовольтаическому режиму соответствует часть ВАХ фотодиода, расположенная в IV квадранте.

2.1.3.5.2 Фотодиодный режим

Фотодиодный режим работы фотодиода определяется приложением обратного напряжения на PN переход. При подаче на PN переход обратного напряжения смещения можно увеличить ширину обедненного слоя и, следовательно, уменьшить емкость PN перехода. Когда обедненный слой достигает задней части фотодиода, его называют «полностью истощенным». Ток через переход в этом случае определяется потоком неосновных носителей. В фотодиодном режиме работы последовательно с фотодиодом необходимо включить источник обратного напряжения. При подаче на фотодиод обратного напряжения и отсутствии светового потока через фотодиод проходит небольшой обратный ток PN перехода, который является темновым током. Фототок, возникающий при освещении фотодиода, вызывает увеличение обратного тока. Фотодиодному режиму соответствует часть ВАХ фотодиода, расположенная в III квадранте.

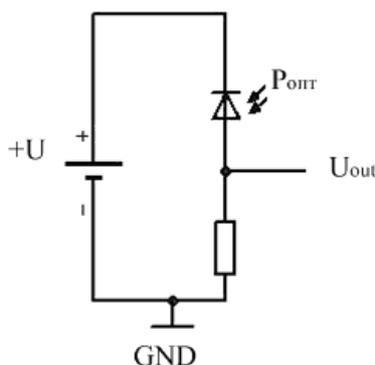


Рисунок 2.20 – Схема включения фотодиода в фотодиодном режиме

Фотодиодный режим обладает некоторыми достоинствами по сравнению с фотовольтаическим: малая инерционность, повышенная чувствительность к длинноволновой части спектра, широкий динамический диапазон линейности характеристик. Главный его недостаток – шумовой ток, протекающий через нагрузку. Из-за этого для снижения уровня шума фотодиода фотовольтаический режим может иногда оказаться более выгодным.

2.1.3.5.3 Режим короткого замыкания

Если P- и N-области фотодиода соединить внешним проводником без включения нагрузки, то фотодиод будет работать в режиме короткого замыкания (КЗ). В этом режиме напряжение на контактах фотодиода равно нулю и ток во внешней цепи равен фототоку. Величина тока КЗ прямо пропорциональна потоку излучения. Точки пересечения ВАХ фотодиода с осью токов соответствуют значениям токов КЗ.

2.1.3.6 Схема замещения фотодиода

Фотодиод может быть представлен источником тока, подключенным параллельно с идеальным диодом. Источник тока представляет ток, генерируемый падающими фотонами, а диод представляет PN переход. Также емкость C перехода и шунтирующее сопротивление $R_{ш}$ подключены параллельно компонентам. Сопротивление R_{ϕ} соединено последовательно со всеми компонентами этой модели.

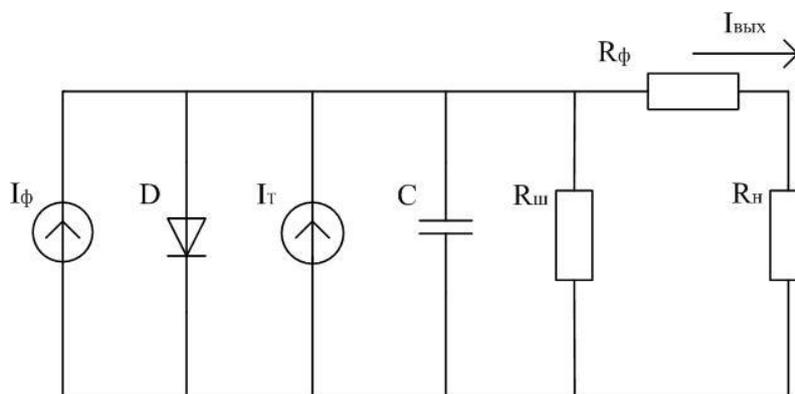


Рисунок 2.21 – Схема замещения фотодиода, I_{ϕ} – источник тока, генерируемого падающими фотонами, I_T – источник темнового тока фотодиода, R_H – сопротивление нагрузки

Сопротивление шунта $R_{ш}$ – это наклон вольт-амперной характеристики фотодиода в начале координат. Хотя идеальный фотодиод должен иметь бесконечно большое сопротивление шунта, фактические значения находятся в диапазоне от 10 до 1000 МОм и возрастают с увеличением температуры (увеличиваются в два раза при росте температуры на 10°). Сопротивление шунта используется для определения тока шума в фотодиоде без смещения (фотовольтаический режим). Для достижения наилучших характеристик фотодиодов требуется максимально высокое сопротивление шунта.

Сопротивление R_ϕ фотодиода возникает из-за сопротивления контактов и сопротивления обедненных полупроводников. Его можно выразить формулой

$$R_\phi = \frac{(W_s - W_d)\rho}{A} + R_c, \quad (2.12)$$

где W_s - толщина подложки, W_d - ширина обедненной области, A - площадь перехода, ρ - удельное сопротивление подложки, а R_c - сопротивление контактов. Последовательное сопротивление используется для определения времени нарастания и линейности фотодиода.

Границы обедненной области действуют как конденсатор с параллельными пластинами. Емкость перехода прямо пропорциональна площади перехода и обратно пропорциональна толщине обедненной области. Емкость фотодиода зависит от величины напряжения обратного смещения следующим образом:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 A}{\sqrt{2\varepsilon\varepsilon_0\mu\rho(V_A + V_{bi})}}, \quad (2.13)$$

где ε_0 - диэлектрическая проницаемость свободного пространства, ε - диэлектрическая проницаемость полупроводника, μ - подвижность основных носителей, ρ - удельное сопротивление, V_{bi} - встроенное напряжение PN-перехода, а V_A - приложенное напряжение смещения. Емкость перехода используется для определения скорости отклика фотодиода.

Значение выходного тока $I_{вых}$ представляет из себя сумму значений темнового тока и тока, генерируемого падающими фотонами.

Для анализа схемы замещения фотодиода можно воспользоваться бесплатным симулятором работы электрических схем LTspice XVII. Составим электрическую схему в программе LTspice XVII.

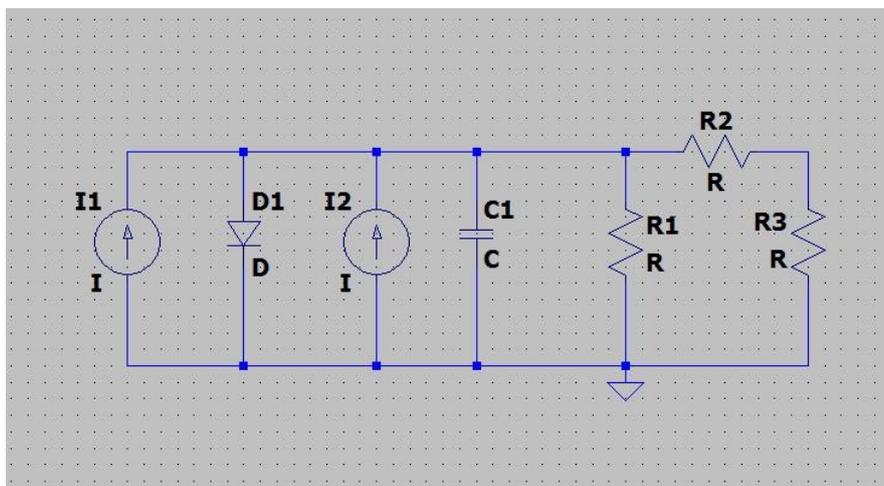


Рисунок 2.22 – Схема замещения фотодиода в программе LTspice XVII, I_1 – источник тока, генерируемого падающими фотонами, I_2 – источник темнового тока фотодиода, R_1 - сопротивление шунта, R_2 - сопротивление фотодиода, R_3 – сопротивление нагрузки, C_1 – емкость фотодиода, D_1 - диод

Построим ВАХ кремниевого фотодиода, для этого зададим компонентам схемы его типичные параметры при комнатной температуре. Последовательное сопротивление $R2$ пренебрежимо мало, и его влиянием в большинстве случаев можно пренебречь. Емкость фотодиода примем за $C1 = 1\text{нФ}$, сопротивление шунта $R1 = 1\text{ГОм}$, темновой ток $I2 = 50\text{нА}$, сопротивление нагрузки $R3 = 1\text{МОм}$. Ток, генерируемый падающими фотонами, $I1 = 2..20\text{мкА}$. На рисунке 2.23 представлена ВАХ данного фотодиода, построенная в программе LTspice XVII.



Рисунок 2.23 – ВАХ фотодиода в программе LTspice XVII

На характеристике представлена кривая центральной части ВАХ фотодиода. В правой части характеристики представлена область, где прикладывается прямое напряжение к фотодиоду и доминирует диффузионная составляющая. В левой части к фотодиоду приложено обратное напряжение смещения. Фототок здесь возникает за счёт гальванического эффекта.

2.1.4 Другие виды полупроводниковых элементов

2.1.4.1 Фототранзистор

Фототранзистор – это транзистор, в котором инжекция фотоносителей происходит на основе явления фотоэффекта. Фототранзистор преобразует оптический сигнал в электрический, одновременно усиливая фототок. Конструкция фототранзистора представляет собой пластину из полупроводникового материала с тремя областями, которые называются, как и в простом транзисторе: эмиттер, коллектор и база. Подключение фототранзистора похоже на подключение биполярного транзистора по схеме с общим эмиттером. При облучении на коллекторно-базовом переходе в фототранзисторе образуются электронно-дырочные пары, которые разносятся электрическим полем коллекторного PN перехода. В области базы в результате этого происходит накопление основных носителей, это приводит к снижению потенциального барьера PN перехода эмиттера и увеличению фототока по сравнению с

фототоком, образованным переносом только непосредственных первичных фотоносителей.

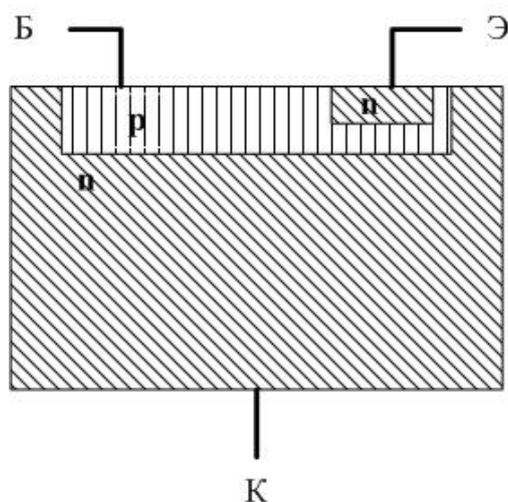


Рисунок 2.24 – Схематическое изображение фототранзистора

ВАХ фототранзистора не имеет отличий от ВАХ биполярного транзистора, однако здесь входным условием является не базовый ток, а поток излучения.

Основные параметры и характеристики фототранзисторов:

- а) чувствительность (отношение фототока к падающему световому потоку);
- б) спектральная характеристика (зависимость чувствительности от длины волны монохроматического излучения);
- в) постоянная времени (характеризующая инерционность фототранзистора).

Также фототранзистор характеризуется коэффициентом усиления первоначального фототока, достигающим 10^2 - 10^3 .

Фототранзистор действует так же, как и остальные фотодетекторы, однако его транзисторный эффект производит усиление фототока. В сравнении с фотодиодом методика изготовления транзистора сложнее, и из-за большей площади перехода он проигрывает в быстродействии.

Контрольные вопросы:

1. На чем основано явление фотоэффекта?
2. Каковы основные параметры и характеристики фоторезистора?
3. Каковы основные параметры и характеристики фототранзистора?
4. Каков принцип работы PN фотодиода?

5. В чем отличие PIN и лавинных фотодиодов от PN фотодиода?
6. Какие существуют режимы работы фотодиода?
7. Как выглядит схема замещения фотодиода?

2.2 Схемы включения фотодиода

2.2.1 Простейший преобразователь ток-напряжение

2.2.1.1 Преобразователь ток-напряжение с резистором

Рассмотрим несколько схем включения фотодиода. На первый взгляд самой простой для реализации схемой преобразователя ток-напряжение является включение фотодиода последовательно с резистором большого номинала. Дополнительно прикладываем обратное напряжение смещения для работы фотодиода в фотодиодном режиме, при котором можно достичь максимального быстродействия.

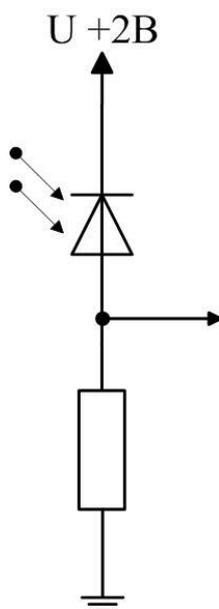


Рисунок 2.25 – Простейший преобразователь ток-напряжение с резистором

В идеальном случае в данной схеме приложение обратного напряжения к фотодиоду вызывает темновой ток значения порядка 10 нА. При большом значении сопротивления резистора порядка 1 МОм и максимальной квантовой эффективности 1 А/Вт выходное напряжение смещения будет иметь значение порядка 10 мВ и определяться по формуле

$$U_{\text{вых}} = P_{\text{опт}} * \eta * R. \quad (2.14)$$

На самом деле в реальном случае большое сопротивление резистора будет создавать большой тепловой шум:

$$U_{R_шум} = \sqrt{4kTRB}. \quad (2.15)$$

Темновой ток с ростом температуры будет нелинейно возрастать и также вносить шум, так как имеет случайную природу. Общая формула выходного напряжения в реальном случае будет выглядеть так:

$$U_{\text{вых}} = P_{\text{опт}} * \eta * R + U_{R_шум} + I_T * R. \quad (2.16)$$

Кроме этого, при дальнейшем усилении сигнала будет усиливаться и выходное напряжение смещения, которое и без усиления уже имеет величину порядка 10 мВ. Такие большие значения выходного напряжения смещения недопустимы на практике. Также большое сопротивление выходной цепи создает трудности для согласования с последующими каскадами усиления.

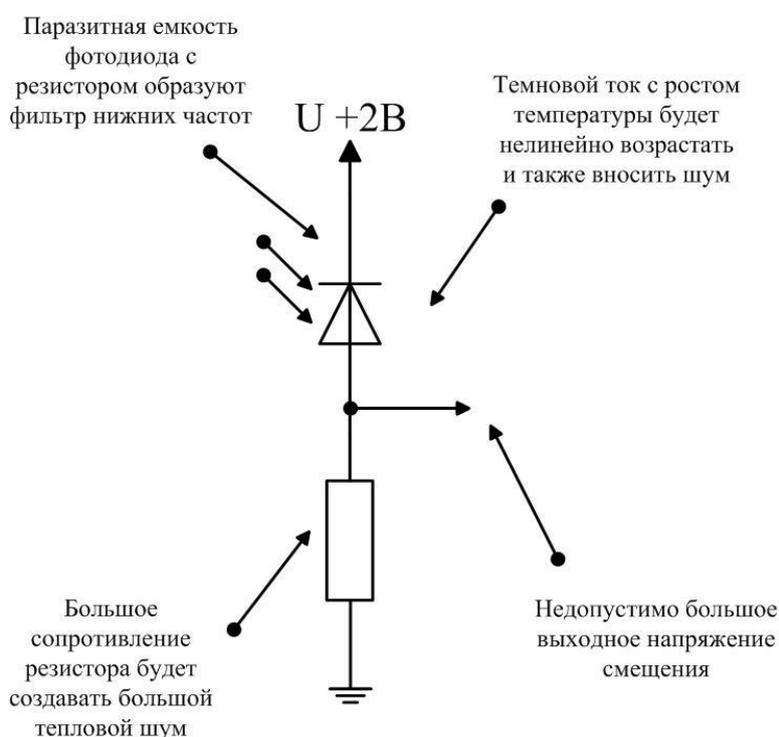


Рисунок 2.26 – Возникновение шумов в простейшем преобразователе ток-напряжение с резистором

Стоит учитывать и паразитную емкость фотодиода, которая в сочетании с резистором создает фильтр нижних частот. Изменение приложенного обратного напряжения приводит к нелинейному изменению емкости фотодиода и, соответственно, к изменению частотных характеристик всей цепи. Для увеличения чувствительности фотодиода часто увеличивают площадь PN перехода, что дополнительно увеличивает паразитную емкость фотодиода и уменьшает быстродействие данной «простой» схемы.

Рассмотрим работу данной «простой» схемы в программе LT Spice XVII. Представим фотодиод в виде импульсного источника тока, который будет представлять собой сигнал на фотодиоде – I_1 , постоянный источник тока -50 нА, представляющий темновой ток – I_2 , конденсатор емкостью 10 пФ,

представляющий емкость фотодиода – $C1$ и резистор $20\text{ Г}\Omega$, представляющий сопротивление шунта – $R2$. Добавим смещение $+2\text{ В}$ в виде источника напряжения $V1$ и резистор нагрузки $1\text{ М}\Omega$ – $R1$.

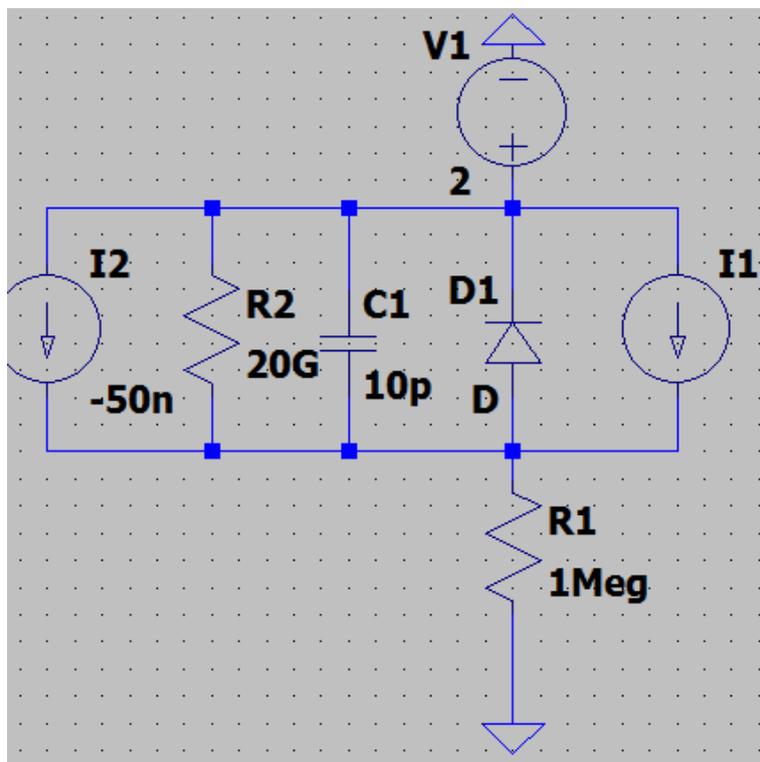


Рисунок 2.27 – Схема простейшего преобразователя ток-напряжение с резистором в программе LT Spice XVII

Зададим сигнал на источнике тока периодом 10 миллисекунд и измерим значение напряжения в точке, указанной маркером.

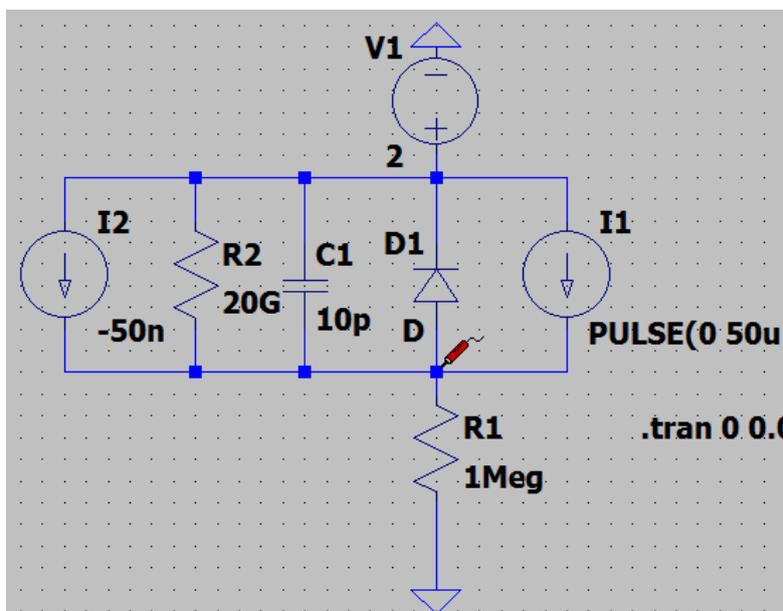


Рисунок 2.28 – Измерение значения напряжения в простейшем преобразователе ток-напряжение с резистором в программе LT Spice

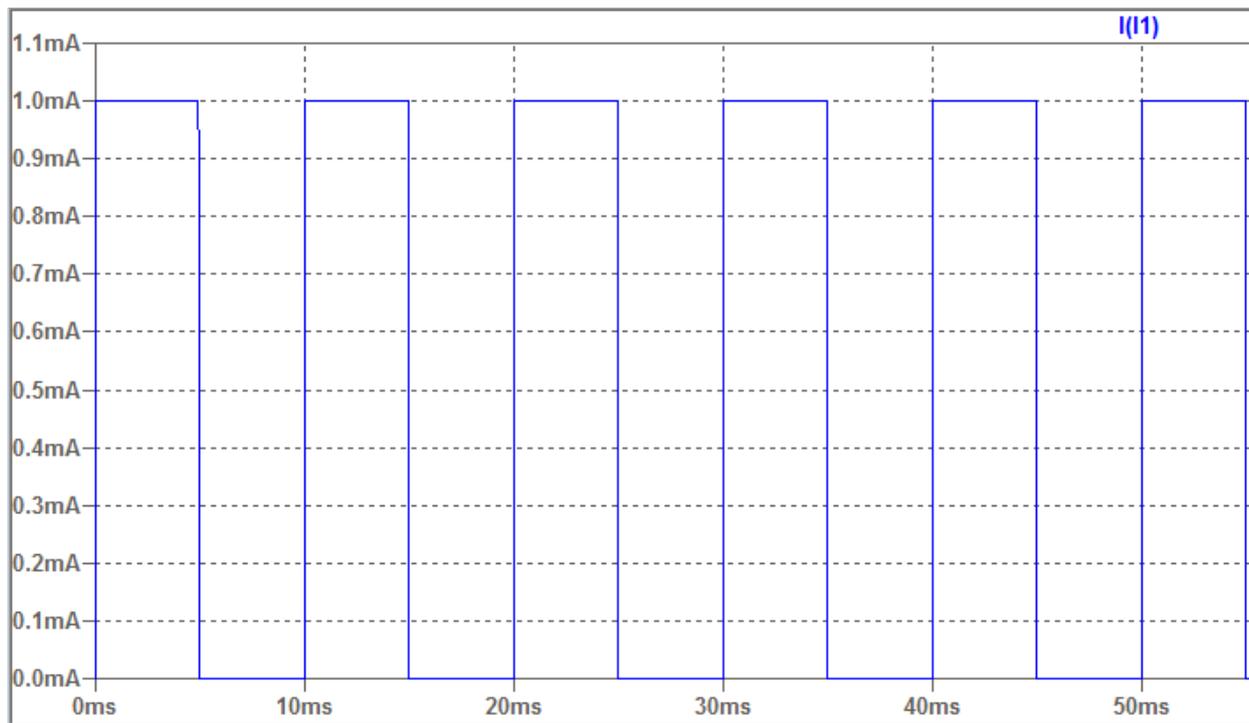


Рисунок 2.29 – Сигнал источника тока I в простейшем преобразователе ток-напряжение с резистором в программе LT Spice с периодом 10 мс

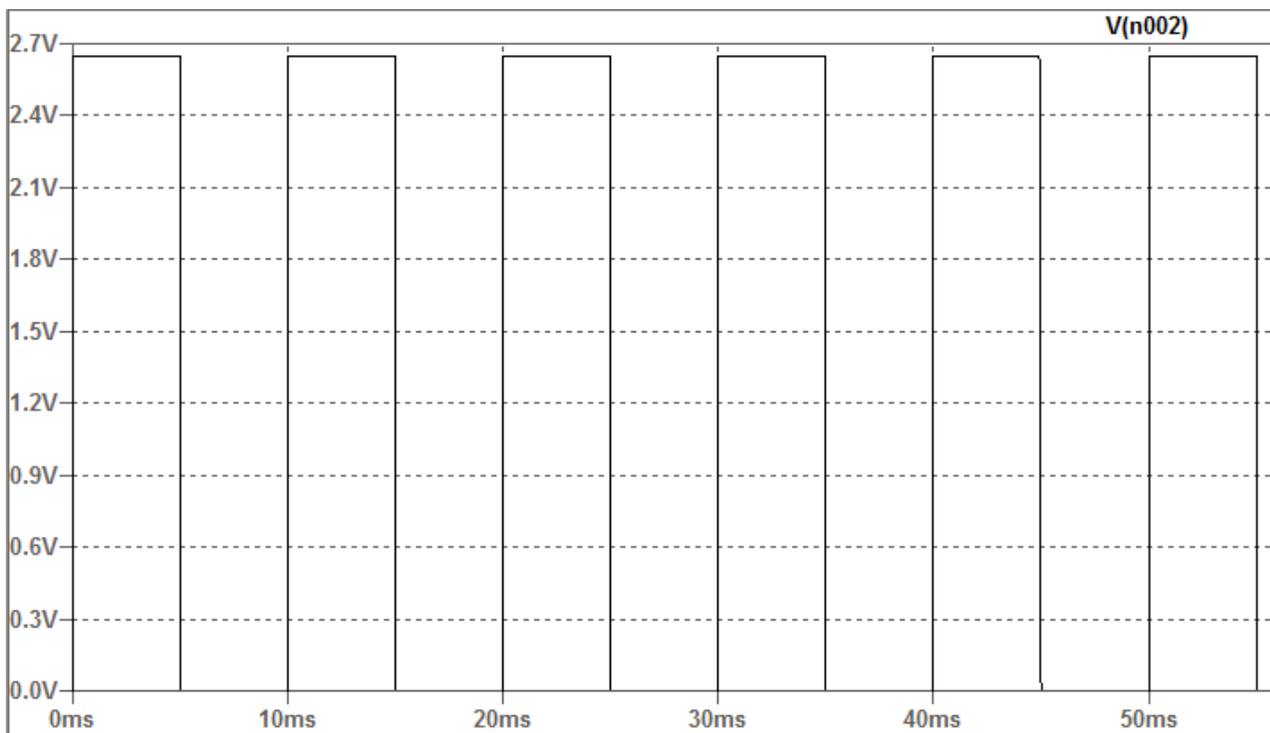


Рисунок 2.30 – Сигнал с нагрузки в простейшем преобразователе ток-напряжение с резистором в программе LT Spice с периодом 10 мс

Зададим сигнал на источнике тока периодом 10 микросекунд и измерим значение напряжения в той же точке.

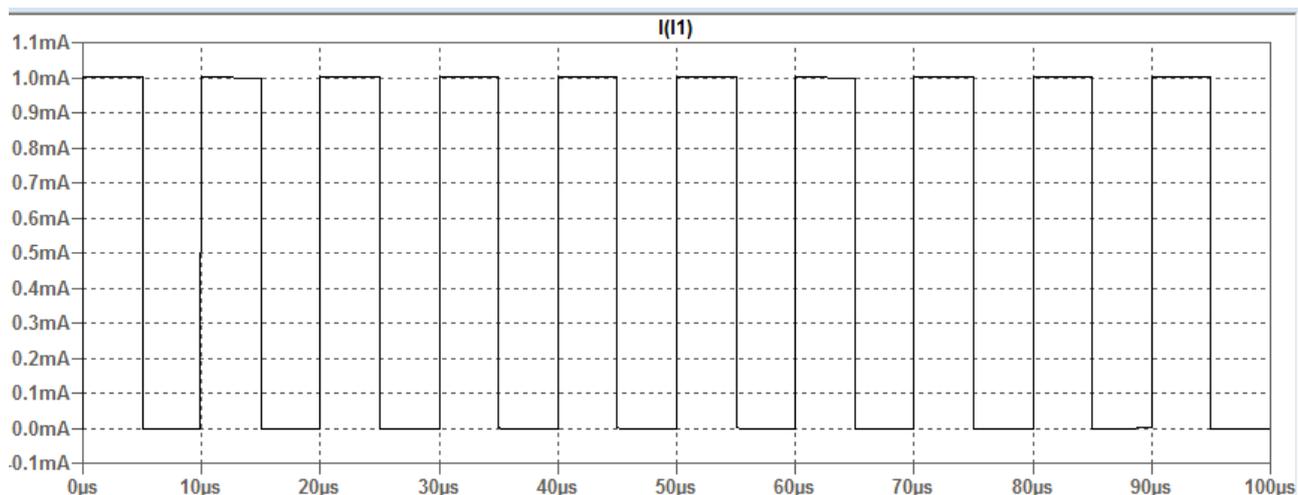


Рисунок 2.31 – Сигнал источника тока I в простейшем преобразователе ток-напряжения с резистором в программе LT Spice с периодом 10 мкс

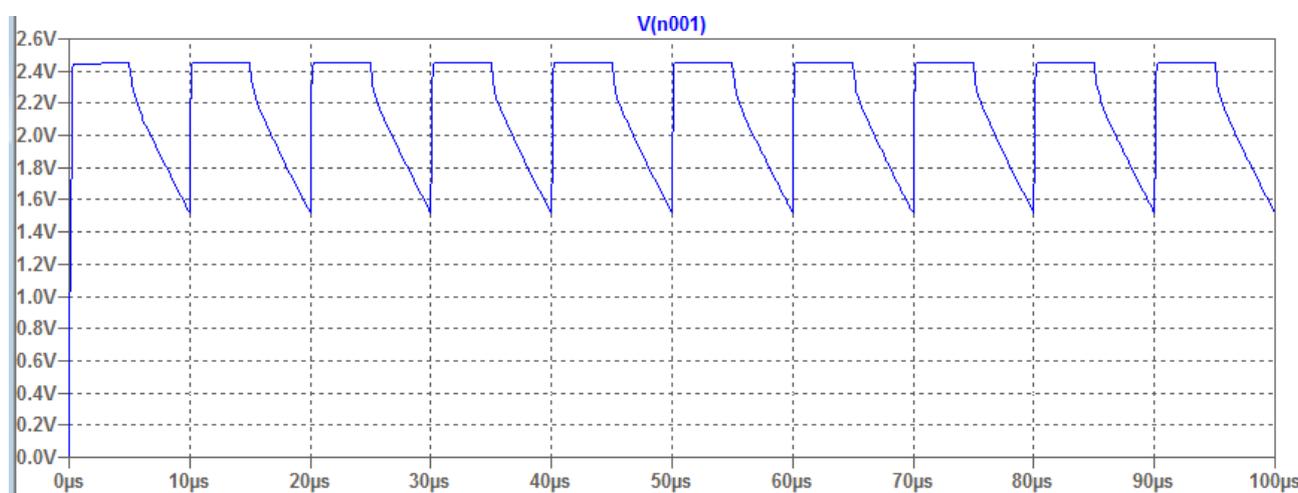


Рисунок 2.32 – Сигнал с нагрузки в простейшем преобразователе ток-напряжения с резистором в программе LT Spice с периодом 10 мкс

Как видно из графиков, на высоких частотах в простейшем преобразователе ток-напряжения происходит изменение формы сигнала, и передача данных становится невозможной.

2.2.2 Трансимпедансный усилитель

2.2.2.1 Выбор схемы трансимпедансного усилителя

Для задач, связанных с необходимостью измерения оптических сигналов, наиболее предпочтительным представляется другой способ реализации фотоприемного узла, который заключается в сопряжении фотодиода с операционным усилителем. Для правильной конструкции трансимпедансного усилителя необходимо учитывать множество факторов, например, стабильность и ограничения диапазона входного и выходного напряжения. Кроме того, влияние источников постоянного тока, таких как входной ток смещения и входное напряжение смещения, часто игнорируется разработчиками, что может ухудшить передаточную цепь.

В своей самой простой форме трансимпедансный усилитель состоит из операционного усилителя и резистора обратной связи. Усиливаемый ток подается на инвертирующий вход, вызывая изменение выходного напряжения в соответствии с уравнением

$$V_{\text{ВЫХ}} = -I_{\text{ВХ}} R_{\text{ОС}}. \quad (2.17)$$

На рисунке 2.33 представлена упрощенная схема преобразователя ток-напряжение (трансимпедансный усилитель) с включением фотодиода в фотовольтаическом режиме

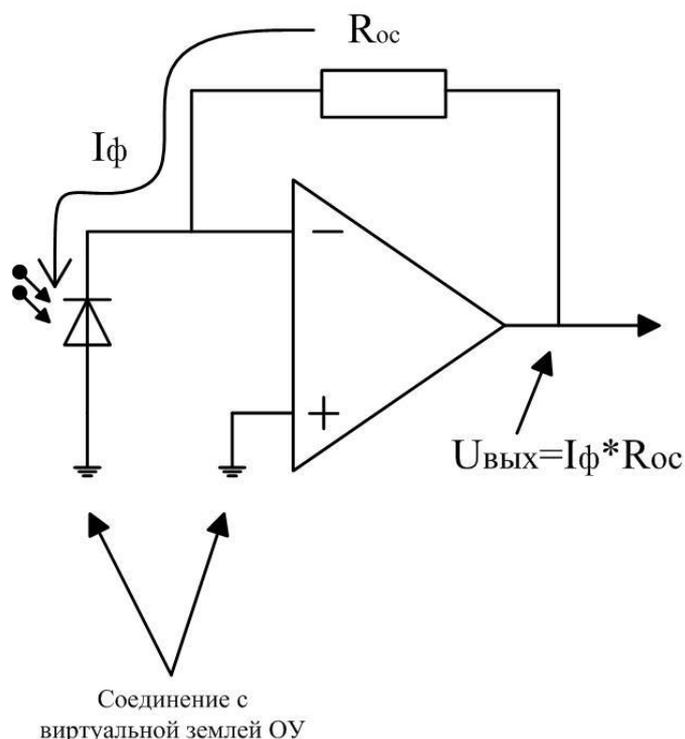


Рисунок 2.33 – Упрощенная схема трансимпедансного усилителя (фотовольтаический режим)

Ток диода почти не течет через вход операционного усилителя (ОУ), полностью направляясь в резистор с фиксированным значением сопротивления обратной связи (ОС). Таким образом, результирующее напряжение линейно зависит от мощности падающего излучения. Чтобы достичь такого эффекта ОУ определяет на выходе напряжение, которое равно произведению тока фотодиода на сопротивление ОС. Чтобы получить большой коэффициент преобразования, сопротивление ОС в трансимпедансном усилителе максимально увеличивают. При большом значении сопротивления резистор ОС начинает давать значительный температурный дрейф напряжения из-за температурного эффекта входного тока усиления. Для компенсации этой ошибки к неинвертирующему входу усилителя подключают резистор с таким же сопротивлением, как у резистора ОС, и добавляют емкостную развязку для устранения большей части его шума. Оставшаяся ошибка по постоянному току определяется разностью входных токов усилителя и разбросом сопротивлений двух резисторов.

Недостатком такого способа коррекции ошибки является падение напряжения, которое создается на диоде, и возникающий в результате него ток утечки диода. Эта утечка может свести на нет коррекцию, полученную от резистора на неинвертирующем входе, так как для получения высокой чувствительности фотодиоды обычно имеют большой размер области р-п-перехода, а ток утечки пропорционален этому размеру и может оказаться даже больше, чем входные токи операционного усилителя. Для снижения сопротивления нагрузки при сохранении большого усиления фотодиод соединяют с виртуальной землей операционного усилителя. Ноль по напряжению на фотодиоде поддерживается виртуальной землей ОУ, а ток КЗ преобразуется в напряжение.

Применение такой схемы в фотовольтаическом режиме возможно для высокоточных измерений при низкой скорости. Низкий уровень шума и отсутствие темнового тока делают возможным измерять величину тока порядка пикоампер.

Рассмотрим работу данной схемы трансимпедансного усилителя в программе LT Spice XVII. Представим фотодиод в виде импульсного источника тока, который будет представлять сигнал на фотодиоде – $I1$, постоянный источник тока -50 нА, представляющий темновой ток – $I2$, конденсатор емкостью 10 пФ, представляющий емкость фотодиода – $C1$, и резистор 20 ГОм, представляющий сопротивление шунта – $R2$. Добавим в схему ОУ LT1223, имеющий полосу пропускания до 100 МГц, и резистор обратной связи 10 КОм – $R1$.

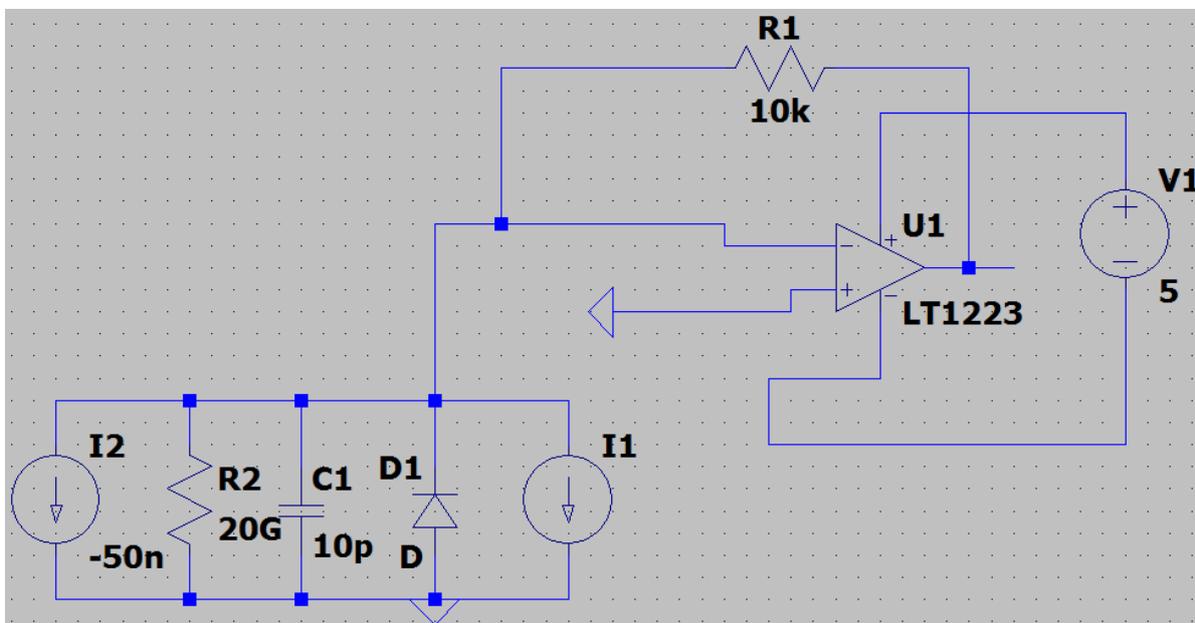


Рисунок 2.34 – Упрощенная схема трансимпедансного усилителя в программе LT Spice

Зададим сигнал на источнике тока периодом 10 микросекунд и измерим значение напряжения в точке, указанной маркером.

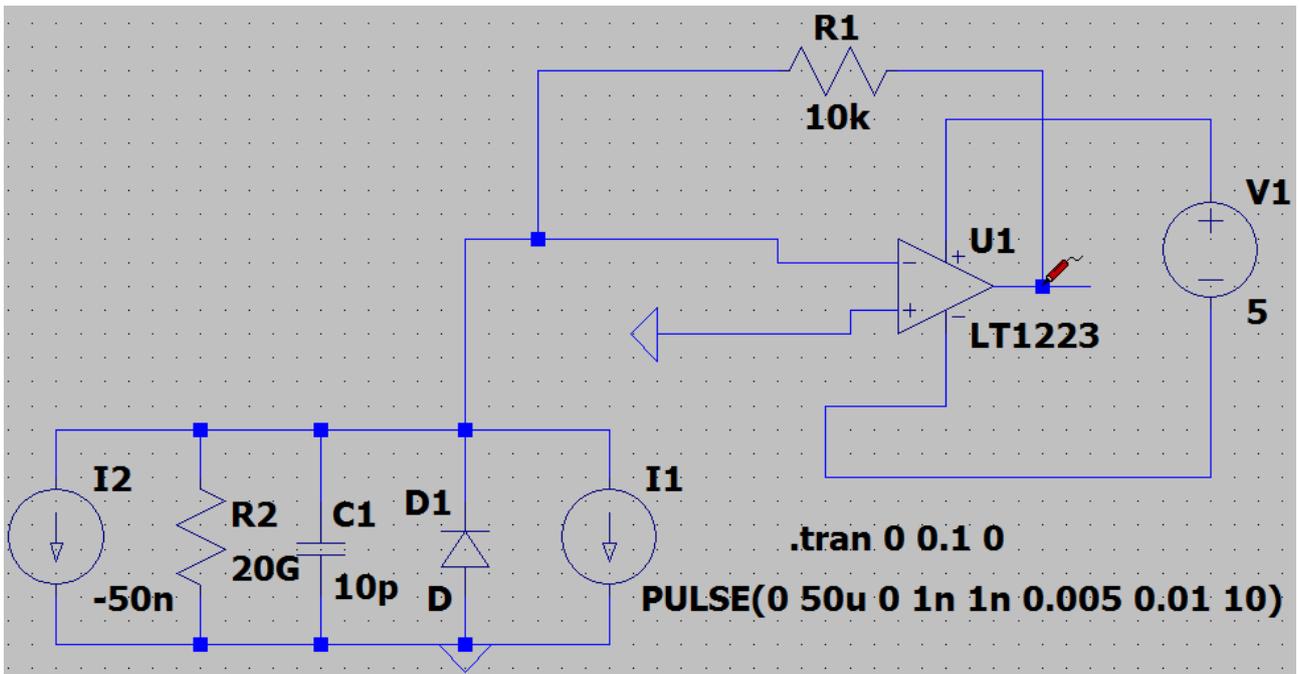


Рисунок 2.35 – Измерение значения напряжения в схеме трансимпедансного усилителя в программе LT Spice

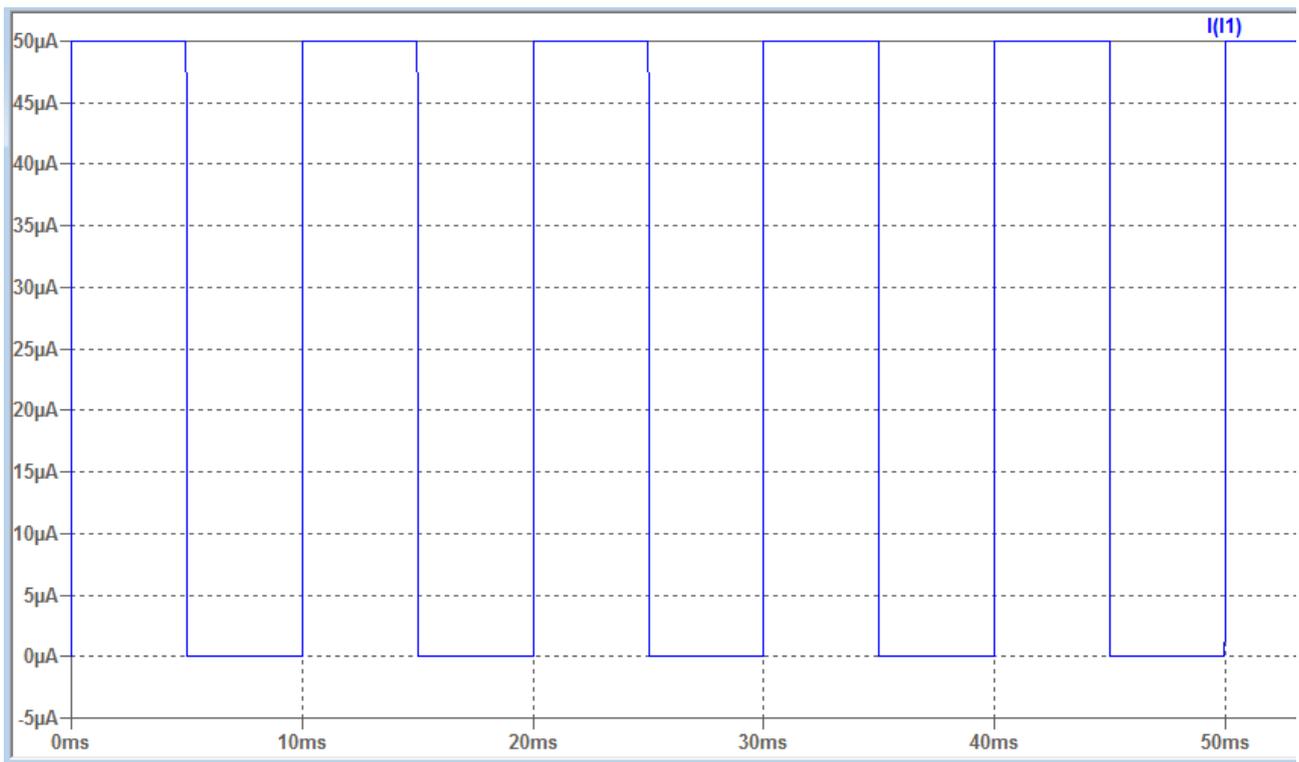


Рисунок 2.36 – Сигнал источника тока I1 в схеме трансимпедансного усилителя в программе LT Spice с периодом 10 мс

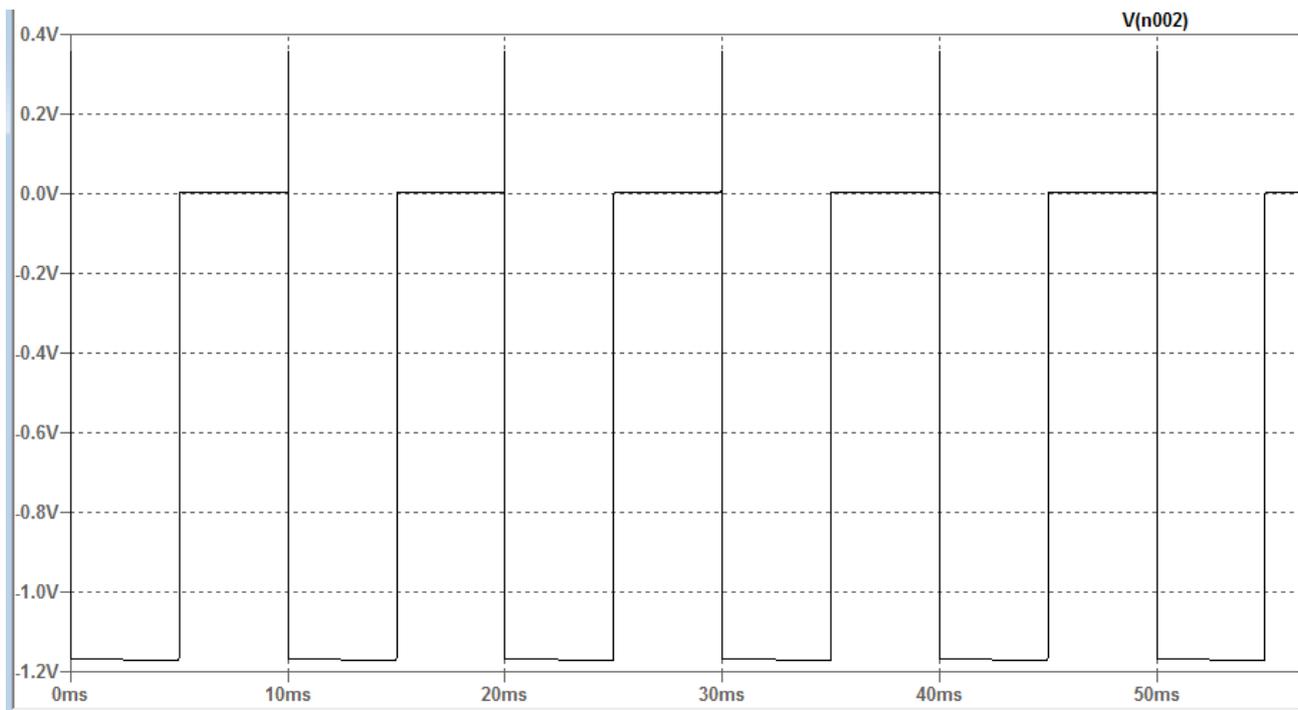


Рисунок 2.37 – Сигнал с выхода ОУ в схеме трансимпедансного усилителя в программе LT Spice с периодом 10 мс

Зададим сигнал на источнике тока периодом 10 микросекунд и измерим значение напряжения в той же точке.

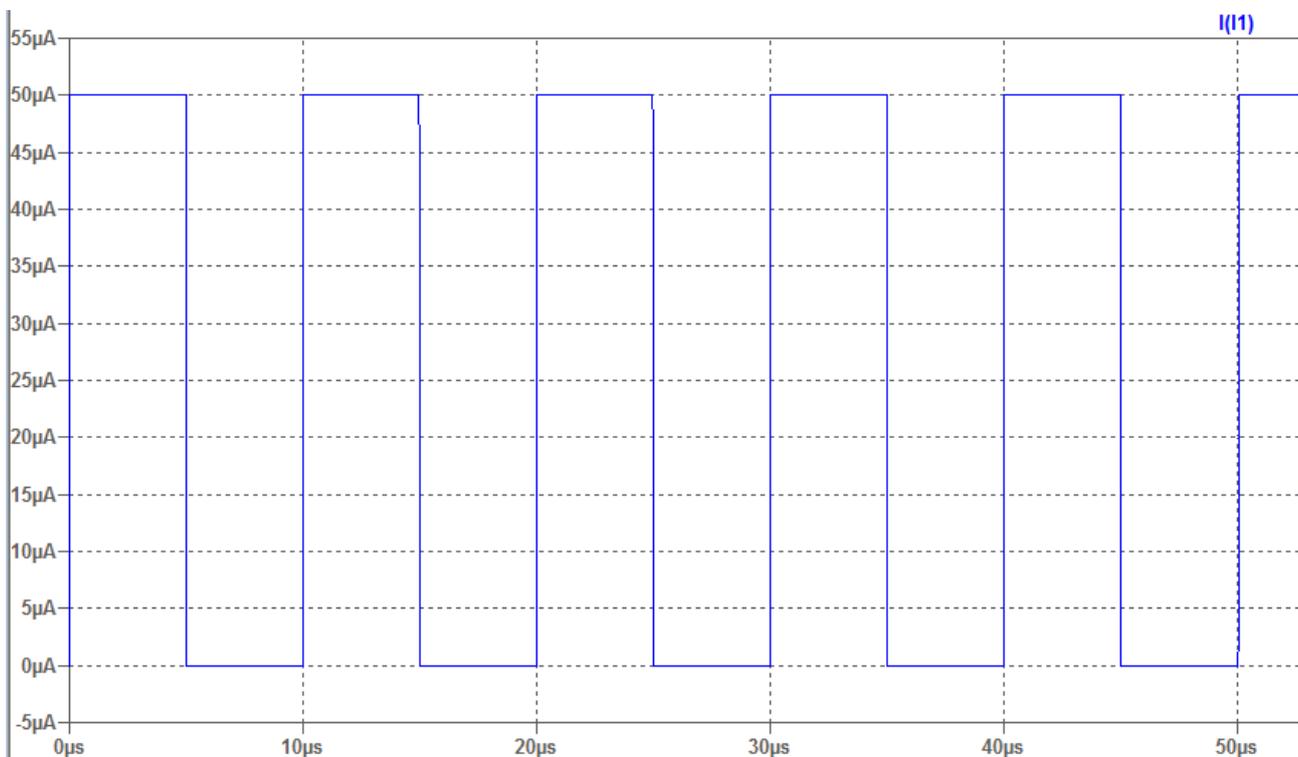


Рисунок 2.38 – Сигнал источника тока $I1$ в схеме трансимпедансного усилителя в программе LT Spice с периодом 10 мкс

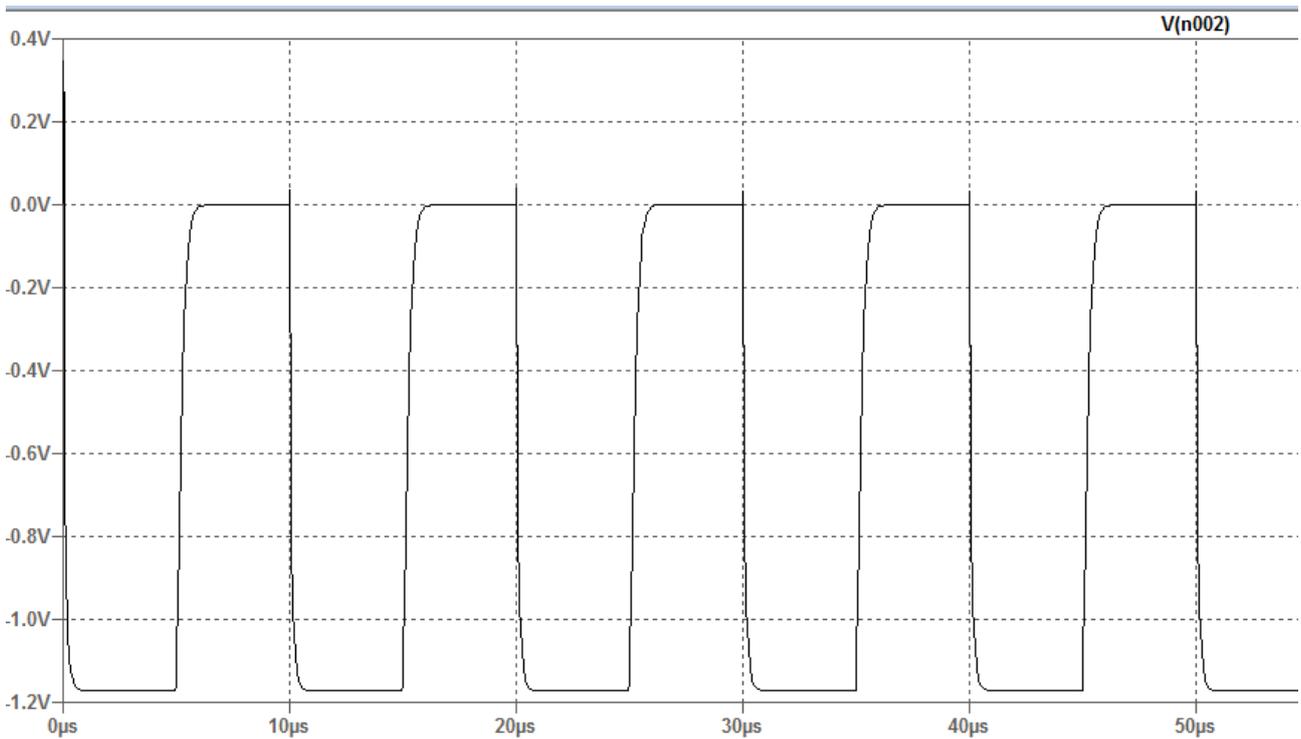


Рисунок 2.39 – Сигнал с выхода ОУ в схеме трансимпедансного усилителя в программе LT Spice с периодом 10 мкс

Увеличим частоту сигнала еще больше, зададим период сигнала на источнике тока 1 мкс.

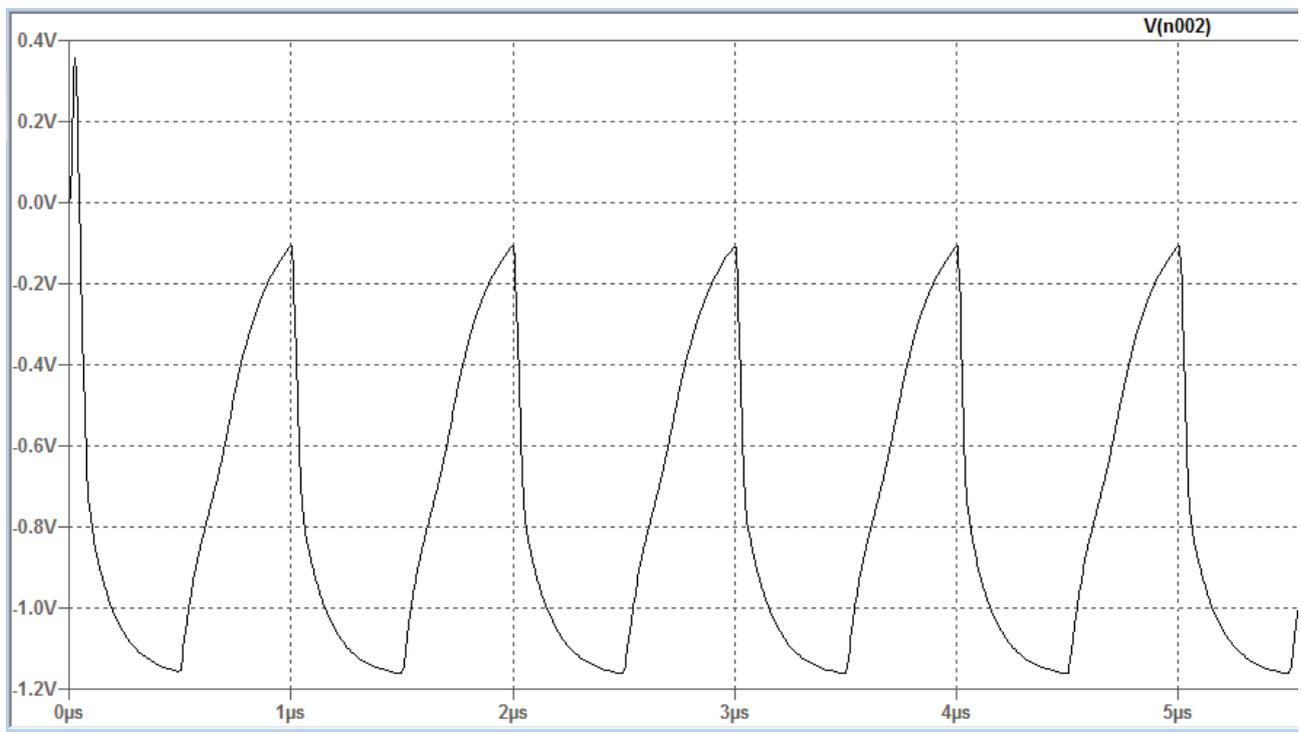


Рисунок 2.40 – Сигнал с выхода ОУ в схеме трансимпедансного усилителя в программе LT Spice с периодом 1 мкс

Как видно из графиков, сигнал в данной схеме передается без изменения формы на более высоких частотах, чем в простейшем преобразователе ток-напряжение.

Для снижения емкости фотодиода и повышения его быстродействия прикладываем большое обратное напряжение смещения для работы в фотодиодном режиме. Приложение избыточного обратного напряжения к фотодиоду может привести к выходу из строя устройства. Любое подаваемое обратное напряжение должно быть ниже максимально допустимого значения.

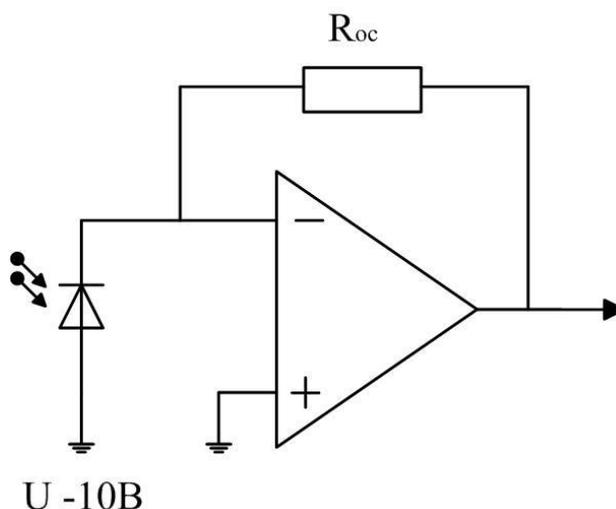


Рисунок 2.41 – Упрощенная схема трансимпедансного усилителя.
Фотодиодный режим

Поскольку в фотодиодном режиме при обратном смещении сопротивление фотодиода практически постоянно, схема может давать линейный отклик выходного напряжения на интенсивность излучения. При включении в фотодиодном режиме в фотодиоде возникает темновой ток, что является дополнительным источником дробового шума. Это ухудшает стабильность параметров по постоянному току и превращает токовый шум фотодиода в дополнительный фактор ошибки.

Емкость фотодиода при работе на высоких частотах вносит дополнительную задержку выходного сигнала и значительно усиливает шумы по напряжению. Этот эффект может появиться и на низкой частоте, если емкость фотодиода и сопротивление ОС имеют большие значения. Емкость фотодиодов может достигать сотен пикофарад, таким образом внося большую задержку и усиливая шум по напряжению в сотни раз. В этом случае необходимо установить конденсатор параллельно резистору ОС. Он образует новый полюс в цепи обратной связи, при помощи которого можно управлять фазовым сдвигом и компенсировать емкость фотодиода на инвертирующем входе операционного усилителя.

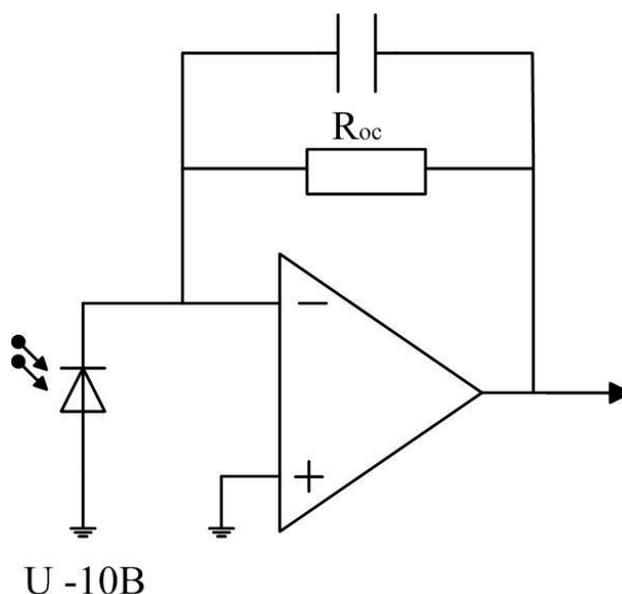


Рисунок 2.42 – Схема трансимпедансного усилителя с компенсирующей частотной цепью

Конденсатор обратной связи в сочетании с резистором обратной связи образует полюс в частотной характеристике усилителя:

$$f_p = 1/2\pi C_{oc}R_{oc}. \quad (2.18)$$

Выше этой частоты усиление цепи будет снижаться. Максимальное значение конденсатора обратной связи может быть определено из значения резистора обратной связи и желаемой ширины полосы:

$$C_{oc} \leq 1/2\pi f_p R_{oc}. \quad (2.19)$$

Поддерживая конденсатор обратной связи на уровне или ниже значения, рассчитанного по формуле 3.19, мы гарантируем, что схема будет соответствовать заявленным требованиям полосы пропускания.

Также необходимо учитывать входной ток смещения операционного усилителя. Его величина растет с увеличением температуры и при больших значения сопротивления обратной связи может даже превышать ток фотодиода. Например, ток смещения величиной 15 мкА на инвертирующем входе при включении с обратной связью, сопротивление которой 1 МОм, будет на выходе операционного усилителя давать уже -15 В и эта величина будет меняться в зависимости от изменения температуры. Для компенсации входного тока смещения необходимо добавить в схему два резистора, так чтобы сопротивление со стороны обоих входов одинаковым: первый подключить параллельно фотодиоду, а второй – на неинвертирующий выход усилителя.

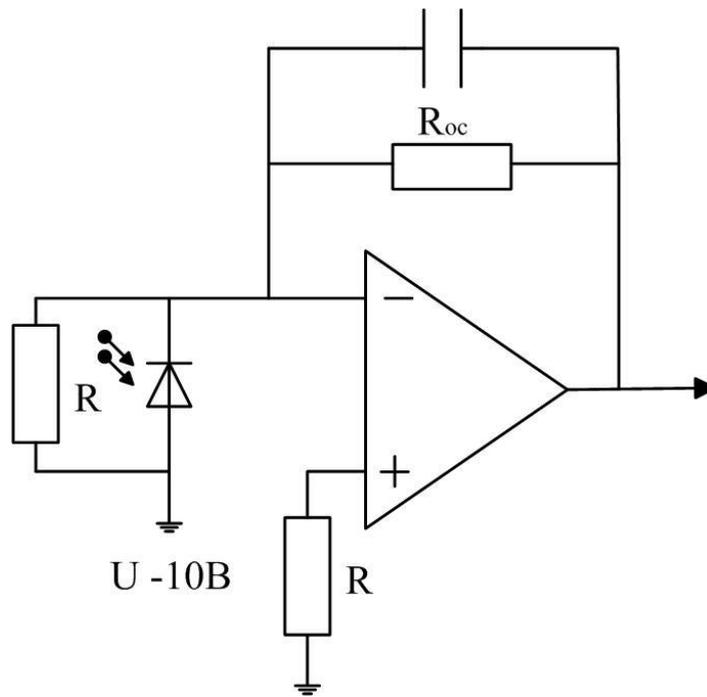


Рисунок 2.43 – Схема трансимпедансного усилителя с компенсирующими резисторами

Дополним нашу схему в программе LT Spice XVII. Добавим большое обратное напряжение смещения при помощи источника напряжения $V2$. Поставим резистор $R3$ на неинвертирующий вход ОУ и резистор $R2$ параллельно фотодиоду. Конденсатор $C2$ поместим в цепь обратной связи.

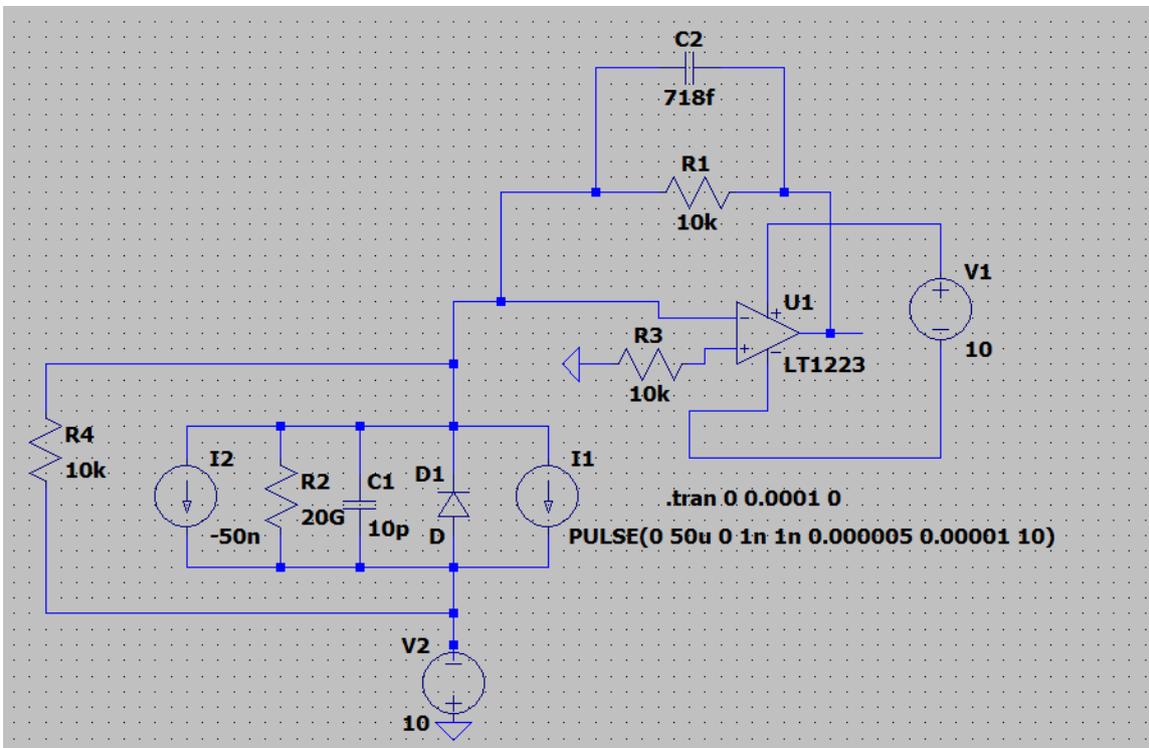


Рисунок 2.44 – Схема трансимпедансного усилителя с компенсирующими резисторами и частотной цепью в программе LT Spice

Зададим сигнал на источнике тока периодом 10 микросекунд и измерим значение напряжения на выходе ОУ.

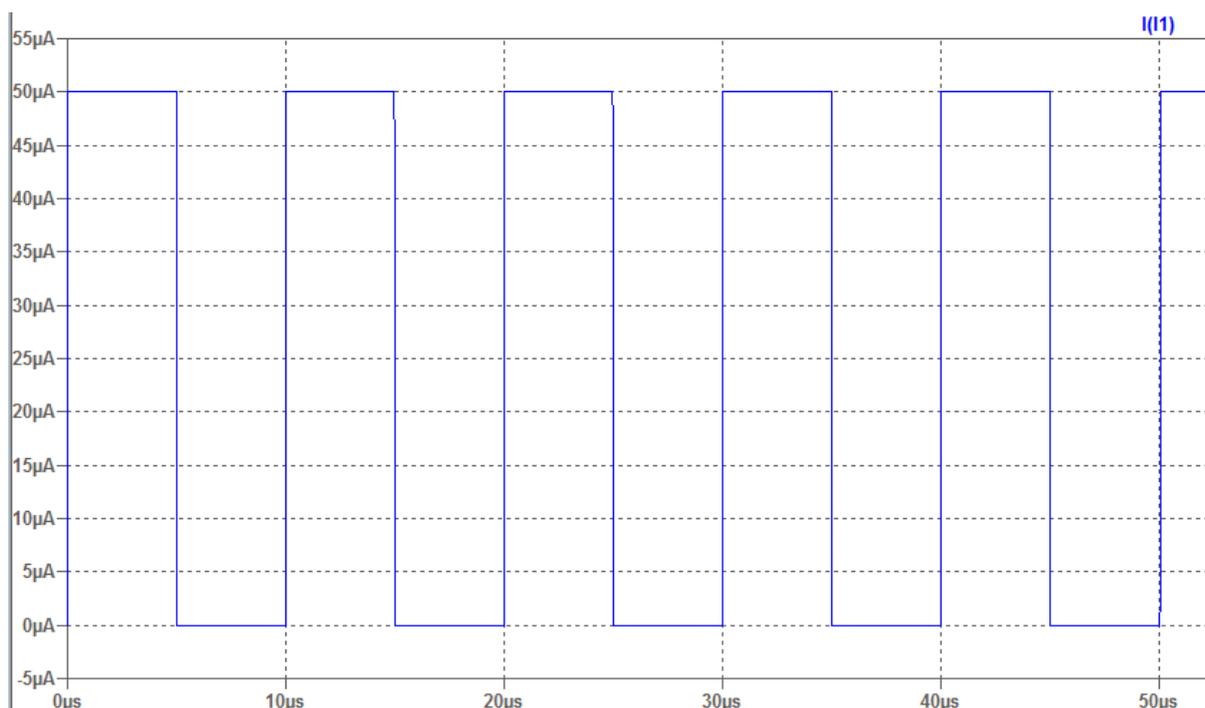


Рисунок 2.45 – Сигнал источника тока I1 в схеме трансимпеданного усилителя в программе LT Spice с периодом 10 мкс

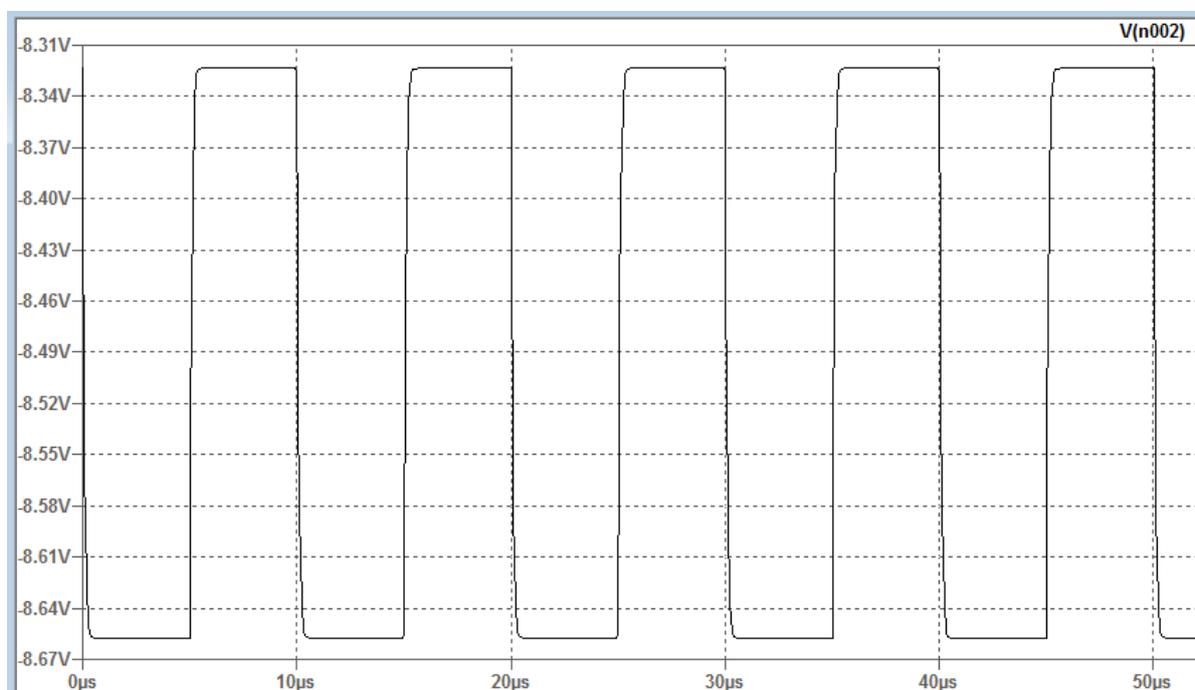


Рисунок 2.46 – Сигнал с выхода ОУ в схеме трансимпеданного усилителя в программе LT Spice с периодом 10 мкс

Как видно при сравнении рисунков 2.39 и 2.45, форма сигнала периодом 10 мкс с выхода ОУ в схеме трансимпеданного усилителя в последнем случае

при добавлении компенсирующих резисторов и частотной цепи стала более приближена к форме сигнала источника тока, чем в схеме без них.

Зададим сигнал на источнике тока периодом 1 микросекунду и измерим значение напряжения на выходе ОУ.

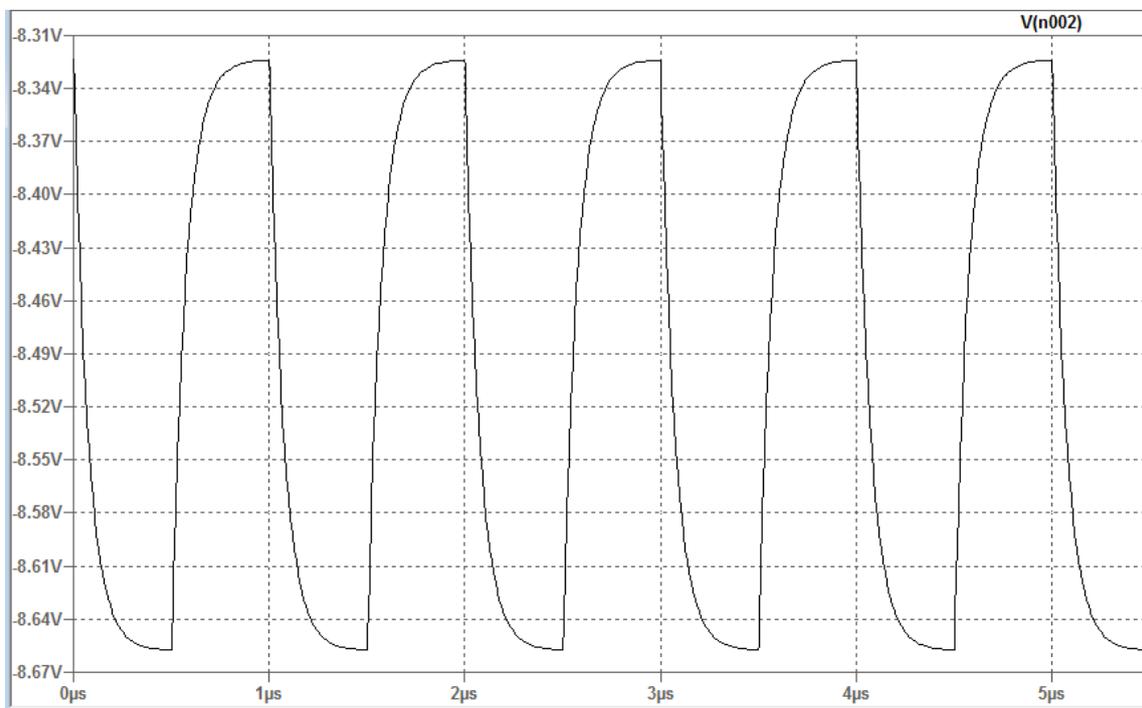


Рисунок 2.47 – Сигнал с выхода ОУ в схеме трансимпедансного усилителя в программе LT Spice с периодом 1 мкс

Как видно при сравнении рисунков 2.40 и 2.47, форма сигнала периодом 1 мкс с выхода ОУ в схеме трансимпедансного усилителя в последнем случае при добавлении компенсирующих резисторов и частотной цепи стала более приближена к форме сигнала источника тока, чем в схеме без них.

2.2.2.2 Подбор операционного усилителя

Для минимизации влияния входного тока операционного усилителя и обеспечения высокой светочувствительности ОУ для быстрого преобразования ток-напряжение должен быть широкополосным с FET транзисторами на входе. Шумовые характеристики усилителей на биполярных транзисторах зависят от тока покоя. В современных операционных усилителях на полевых транзисторах можно добиться одновременно и низких значений шумового тока, и значений шумового напряжения, близких к показателям усилителей на биполярных транзисторах (однако не настолько низких, как в лучших усилителях с входным каскадом на биполярных транзисторах).

Операционные усилители с входами JFET или CMOS являются наиболее часто выбираемым типом, потому что эти операционные усилители обычно имеют намного меньший ток смещения, чем усилители с входными

устройствами ВЛТ. Это приводит к снижению напряжения погрешности постоянного тока и снижению шума из-за снижения шума на входном токе.

2.2.3 Проблема шумов в схемах трансимпедансного усилителя

Отношение сигнал/шум на выходе фотоприемного устройства (ФУ) определяется суммой собственного шума фотодиода (ФД) и шумов, вносимых электронной схемой преобразования и усиления сигнала. При оценке параметров усилителя для применения в схеме фотоприемного устройства необходимо рассматривать как внутренние, так и внешние источники шумов.

Внешний шум включает в себя любые типы внешних воздействий, таких как влияние внешних компонентов и помех, вызванных электрическими и электромагнитными полями. Помеха может представлять собой сигнал в виде коротких импульсов, ступенчатых скачков, синусоидальных колебаний или случайного шума. Источником помех может быть что угодно: работающие механизмы, линии электропитания, которые расположены поблизости, радиоприемники или радиопередатчики, компьютеры и даже схемы, входящие в состав того же оборудования, что и элемент, на который воздействует помеха (цифровые схемы или импульсные источники питания). Даже если можно было бы исключить все помехи путем грамотного проектирования и/или разводки печатной платы, то все равно останется случайный шум самого усилителя и компонентов его схемы.

Что касается внутренних источников шума, то шум, появляющийся на выходе усилителя, обычно измеряется в виде напряжения, однако он генерируется как источниками напряжения, так и источниками тока. Все внутренние шумы обычно приводятся к входу, и для них используется модель с некоррелированными или независимыми генераторами случайного шума, подключенными последовательно или параллельно к входам идеального усилителя. Эти источники шума считаются случайными и/или имеющими гауссово распределение, и это важно учитывать при их суммировании. Внутренний шум усилителя можно разделить на пять категорий:

- приведенное к входу шумовое напряжение;
- приведенный к входу шумовой ток;
- дробовой шум;
- попкорн-шум;
- шум низких частот.

2.2.3.1 Шум Джонсона (тепловой шум)

Шум Джонсона генерируется внешними источниками – резистивными компонентами схемы. При температурах выше абсолютного нуля любое сопротивление представляет собой источник шума, который обусловлен

тепловым движением носителей заряда и называется шумом Джонсона, или тепловым шумом.

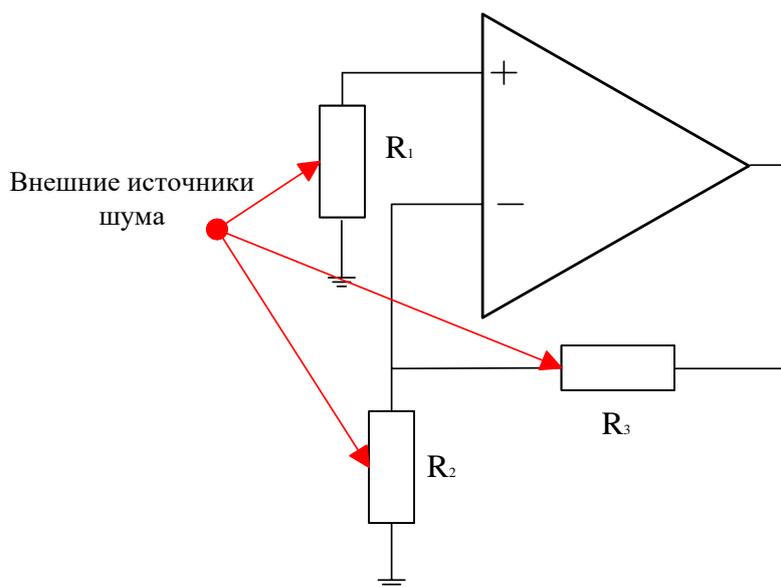


Рисунок 2.48 – Внешние источники шума Джонсона на шумовой модели операционного усилителя

Этот шум возрастает при увеличении сопротивления, температуры и полосы частот. Шумы Джонсона по напряжению и току описываются выражениями

$$V_{\text{тш}} = \sqrt{4kTB R}, \quad (2.20)$$

$$I_{\text{тш}} = \sqrt{\frac{4kTB}{R}}, \quad (2.21)$$

где $V_{\text{тш}}$ — шумовое напряжение (В); k — постоянная Больцмана; T — температура в градусах Кельвина (К); B — ширина полосы в герцах (Гц); R — сопротивление в омах (Ом); $I_{\text{тш}}$ — шумовой ток в амперах (А).

Шум Джонсона генерируется тепловыми колебаниями, они происходят из-за случайного движения электронов в проводнике. Электроны находятся в постоянном движении, сталкиваясь друг с другом и с атомами материала. Каждое движение электрона между столкновениями представляет собой крошечный ток. Сумма всех этих токов, взятых за длительный период времени, равна нулю, но их случайные флуктуации на коротких интервалах составляют шум Джонсона. Чтобы уменьшить величину шума Джонсона, можно охладить систему, особенно нагрузочный резистор, и максимально уменьшить значение сопротивления нагрузки. Типовой шум, генерируемый резистором номиналом 1 кОм при комнатной температуре, составляет примерно $4 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$.

Реактивные сопротивления не генерируют шум, однако протекающие через них шумовые токи приводят к появлению шумового напряжения, а также других паразитных эффектов. Все резисторы, входящие в состав схемы,

генерируют шум, и его влияние всегда нужно учитывать. На практике ощутимый вклад в полный шум схемы, скорее всего, будут вносить только резисторы во входной цепи и в цепи обратной связи (обычно при больших коэффициентах усиления).

2.2.3.2 Шум напряжения

Как правило, приведенное к входу шумовое напряжение представляют в виде генератора шумового напряжения.

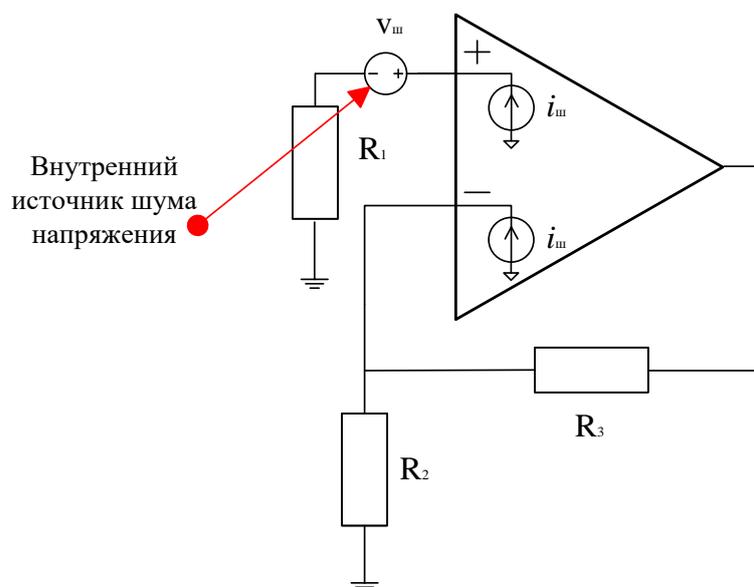


Рисунок 2.49 – Внутренний источник шума напряжения на шумовой модели операционного усилителя

Шумовое напряжение является характеристикой шума, на которую обычно делают основной акцент. В лучших операционных усилителях спектральная плотность шума может быть даже ниже $1 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$. Деление на $\sqrt{\text{Гц}}$ возникает вследствие того, что мощность шума пропорциональна ширине полосы, а шумовое напряжение пропорционально корню из ширины полосы.

У операционных усилителей на биполярных транзисторах шумовое напряжение традиционно ниже, чем у операционных усилителей на полевых транзисторах.

2.2.3.3 Шум тока

При высоких значениях входного импеданса ограничивающим фактором шумовых характеристик системы часто становится токовый шум. Шумовое напряжение усилителя трансформируется в дополнительный токовый шум на фотодиоде. Приведенный к входу шум тока обычно проявляется как два источника токового шума, прокачивающих токи через два дифференциальных входа.

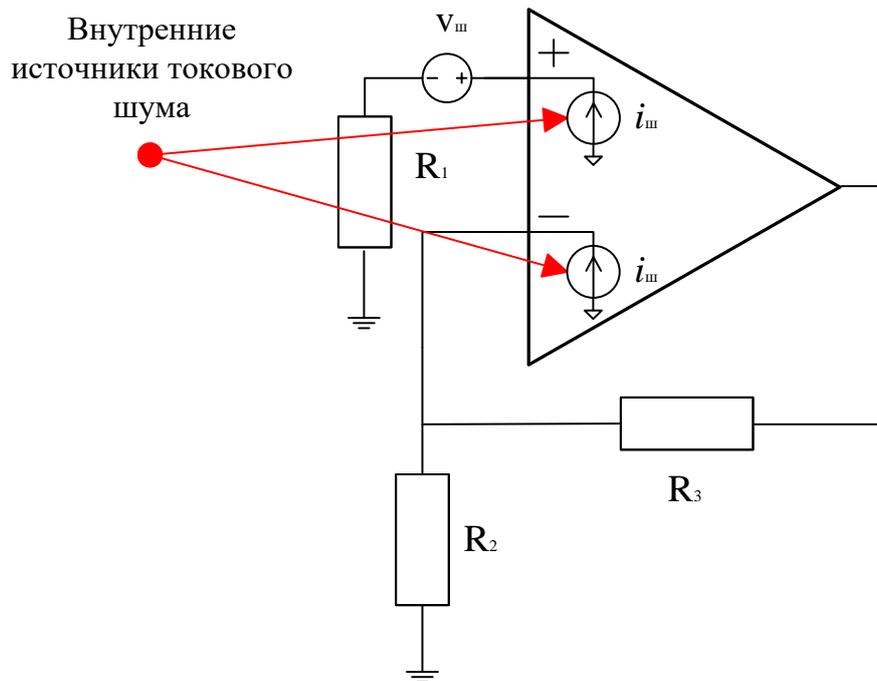


Рисунок 2.50 – Внутренние источники токового шума на шумовой модели операционного усилителя

Токовый шум обычного операционного усилителя на биполярных транзисторах имеет порядок $100 \text{ фА}/\sqrt{\text{Гц}}$ при токе смещения порядка 10 нА и существенно не изменяется с температурой, за исключением усилителей с компенсацией токов смещения. Токовый шум в усилителях с входными каскадами на полевых транзисторах с р-п-переходом имеет порядок $1\text{-}10 \text{ фА}/\sqrt{\text{Гц}}$ при токе смещения порядка 10 пА . Он хотя и ниже по значению, но удваивается на каждые 20°C увеличения температуры микросхемы, поскольку токи смещения в усилителях с входными каскадами на полевых транзисторах с р-п-переходом удваиваются при росте температуры на каждые 10°C .

В традиционных операционных усилителях с обратной связью по напряжению, имеющих сбалансированные входы, значения шумовых токов (коррелированных и некоррелированных) на инвертирующем и неинвертирующем входах обычно равны. Во многих усилителях (особенно в тех, которые имеют схемы подавления входного тока смещения) коррелированная составляющая шума намного превышает некоррелированную составляющую. В целом, несмотря на распространенное мнение, уровень шума можно улучшить, добавив резистор для согласования импеданса на обоих — положительном и отрицательном — входах.

В современных операционных усилителях на полевых транзисторах можно добиться одновременно и низких значений шумового тока, и значений шумового напряжения, близких к показателям усилителей на биполярных транзисторах (однако не настолько низких, как в лучших усилителях с входным каскадом на биполярных транзисторах).

При высоких сопротивлениях источника сигнала операционные усилители с FET-входами вносят совсем небольшой дополнительный шум, а шумовой ток FET-усилителя, как правило, не играет важной роли, пока не достигнет высокоомного диапазона. Таким образом, при малом сопротивлении источника малошумящие усилители с биполярными входами обычно обеспечивают более низкий уровень шума. При сопротивлениях выше 10 кОм КМОП- или JFET-усилители будут иметь преимущество.

2.2.3.4 Дробовой шум

Дробовой шум — это токовый шум, вызванный случайным распределением носителей заряда в токе, преодолевающим потенциальный барьер, например, р-п-переход. Значение дробового шума можно получить с помощью формулы

$$i_{\text{дш}} = \sqrt{2I_B q B}, \quad (2.22)$$

где I_B — ток смещения в амперах (А); q — заряд электрона в кулонах; B - полоса пропускания в герцах (Гц).

Дробовой шум присутствует в фотодиодах с обратным смещением без освещения. Термин "дробовой шум" происходит от колебаний потока электронов в вакуумной трубке. Эти изменения создают шум из-за случайных колебаний по прибытии электронов на анод. Название дробового шума происходит от сходства с шумом града выстрелов, поражающих цель. В полупроводниках основным источником дробового шума являются случайные изменения скорости, с которой генерируются и рекомбинируют носители заряда. Этот шум, называемый шумом генерации-рекомбинации, является полупроводниковым проявлением дробового шума.

Шум может быть сведен к минимуму, если оставить любой компонент постоянного тока равным малому току, особенно темновому току, а также сохранить небольшую полосу пропускания системы усиления.

2.2.3.5 Шум низких частот

Шум операционного усилителя представляет собой в широком диапазоне частот гауссов шум с постоянной спектральной плотностью (белый шум), однако с уменьшением частоты спектральная плотность начинает возрастать. Этот рост зависит от технологического процесса производства, разводки кристалла интегральной схемы, а также типа устройства и составляет примерно:

- 3 дБ на октаву для КМОП-усилителей;
- 3,5–4,5 дБ на октаву для усилителей на биполярных транзисторах;
- до 5 дБ на октаву для усилителей с входными каскадами на полевых транзисторах с р-п-переходом.

Эта низкочастотная шумовая характеристика называется «шум низких частот», «фликкер-шум» или «шум $1/f$ », эти термины используются для описания ряда типов шума, которые присутствуют, когда частота модуляции f низкая. Этот тип шума также называют избыточным шумом, потому что он превышает дробовой шум на частотах ниже нескольких сотен герц. Механизмы, которые производят шум $1/f$, плохо изучены. Мощность шума обратно пропорциональна f , частоте модуляции. Чтобы уменьшить шум $1/f$, оптический детектор должен работать на достаточно высокой частоте, часто до 1000 Гц. Это достаточно высокое значение, чтобы уменьшить вклад низкочастотного шума.

$1/f$ шум ОУ накладывается в виде аддитивной помехи на выходной сигнал фотоприемного устройства во всей полосе детектирования полезного сигнала, включая его высокочастотные составляющие. Вклад этой составляющей шумов оказывается тем существеннее, чем меньше сопротивление источника сигнала, поэтому для ИК-фотодиодов с малым динамическим сопротивлением низкочастотная (НЧ) составляющая шумов становится одним из основных факторов, ограничивающих пороговую чувствительность фотоприемного устройства в широкой полосе частот детектирования сигнала.

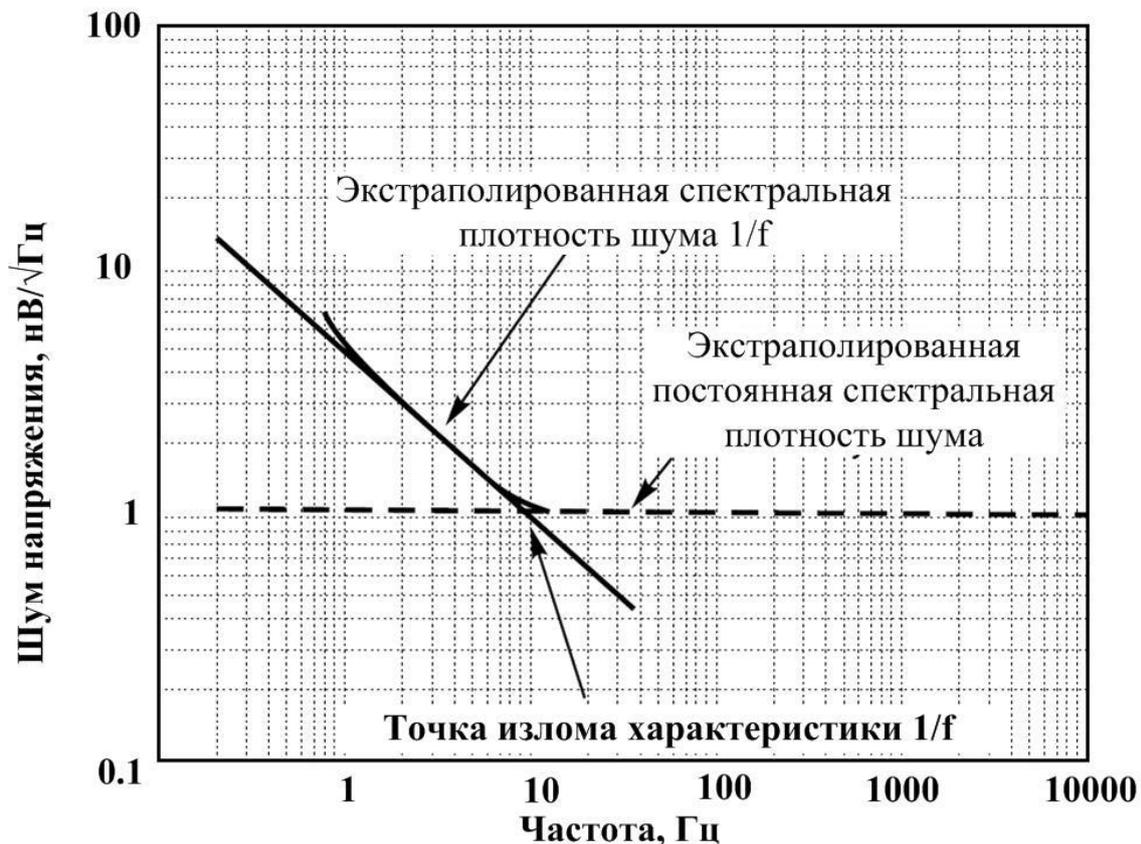


Рисунок 2.51 – Экстраполированная характеристика спектральной плотности шума $1/f$

При логарифмической шкале наклон шумовой характеристики равен -1 . Частоту, при которой экстраполированная линия спектральной плотности с наклоном -3 дБ на октаву (для КМОП-усилителей) пересекает линию

постоянной широкополосной спектральной плотности, называют частотой излома характеристики $1/f$. Она является показателем качества усилителя. Несмотря на то, что усилители на биполярных транзисторах и полевых транзисторах с р-п-переходом имеют больший наклон характеристики по сравнению с КМОП-усилителями, частота излома $1/f$ у них ниже.

2.2.3.6 Попкорн-шум

Попкорн-шум (обычно в спецификациях не указывается) — это внезапный скачок тока или напряжения смещения, длящийся несколько миллисекунд и имеющий амплитуду от единиц до сотен мкВ. Этот эффект имеет совершенно случайный характер. Наиболее благоприятные условия для возникновения попкорн-шума создаются при низких температурах и высоких сопротивлениях источника. Какой-то одной доминирующей причины попкорн-шума не существует, однако известно, что он может быть вызван загрязнением металлизации, а также внутренними дефектами или дефектами поверхности кристалла. Несмотря на то, что при современных технологиях производства пластин кристаллов предпринимаются серьезные меры по сокращению источников попкорн-шума, полностью устранить его невозможно.

2.2.3.7 Суммирование источников шума

Источники шума бывают белыми и гауссовыми. Белый шум — это шум, мощность которого в пределах заданной полосы частот постоянна. Гауссов шум — шум, вероятность появления конкретного значения амплитуды которого имеет гауссово распределение. Гауссов шум обладает следующим свойством: при сложении среднеквадратичных значений шума от двух и более некоррелированных источников гауссова шума (когда один шумовой сигнал не может быть приведен к другому шумовому сигналу) результирующий шум будет равен не арифметической сумме, а квадратному корню из суммы квадратов отдельных среднеквадратичных значений:

$$V_{ni,TOTAL} = \sqrt{(e_n)^2 + (R_S * i_n)^2 + V_n(R_{EX})^2}, \quad (2.23)$$

где $V_{ni,TOTAL}$ — общий приведенный к входу шум; e_n — приведенное к входу шумовое напряжение; i_n — приведенный к входу шумовой ток; R_S — эквивалентное сопротивление источника или сопротивление на входе усилителя; $V_n(R_{EX})$ — шумовое напряжение внешней части схемы.

Отметим следующее:

- Любое сопротивление на неинвертирующем входе обладает шумом Джонсона и преобразует шумовой ток в шумовое напряжение.
- Шум Джонсона в резисторах обратной связи в высокоомных схемах может быть значительным.

На рисунке 2.52 графически представлено уравнение 3.23 как сумма векторов с использованием теоремы Пифагора.

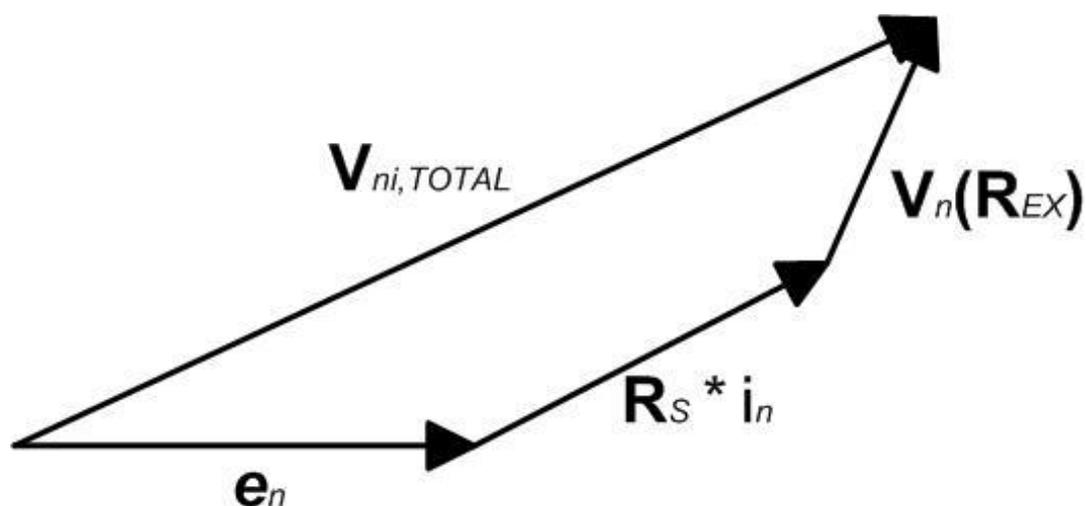


Рисунок 2.52 – Векторное суммирование источников шума

Шумы, которые обсуждались ранее, могут быть объединены в приведенный к входу шум схемы усилителя. Для того чтобы рассчитать общий выходной шум схемы усилителя, общий объединенный шум на входе должен быть умножен на шумовое усиление схемы усилителя. Шумовое усиление — это усиление схемы усилителя для приведенного к входу шума. Оно обычно используется для определения устойчивости схемы усилителя.

Обычно при расчете принято предполагать, что общий приведенный к входу шум прикладывается к неинвертирующему входу усилителя:

$$V_{no,TOTAL} = G_N * V_{ni,TOTAL}, \quad (2.24)$$

где $V_{no,TOTAL}$ — общий приведенный к выходу шум; $V_{ni,TOTAL}$ — общий приведенный к входу шум.

$$G_N = 1 + \frac{R_1}{R_2}, \quad (2.25)$$

где G_N — шумовое усиление; R_1 — эквивалентный импеданс цепи обратной связи, R_2 — входной эквивалентный импеданс.

В некоторых случаях шумовое усиление и усиление сигнала не являются эквивалентными. Полоса пропускания схемы с замкнутой обратной связью определяется делением произведения усиления на полосу (или частоты единичного усиления) на шумовое усиление схемы усилителя.

При очень малых сопротивлениях источника вклад шума, генерируемого сопротивлением источника, и шумового тока усилителя в суммарный шум незначителен. В данном случае шум на входе определяется только шумовым напряжением операционного усилителя. Если сопротивление источника велико, то шум Джонсона сопротивления источника может доминировать и над

шумовым напряжением операционного усилителя, и над напряжением, вызванным шумовым током. При этом следует отметить, что, поскольку шум Джонсона пропорционален квадратному корню из сопротивления, а шумовое напряжение, обусловленное шумовым током, прямо пропорционально входному импедансу, при достаточно высоких значениях входного импеданса всегда будет преобладать шумовой ток усилителя. Если и шумовое напряжение, и шумовой ток усилителя достаточно велики, то вполне возможна ситуация, в которой шум Джонсона не будет вносить доминирующий вклад ни при каких значениях входного сопротивления. Для выбора усилителя, у которого вклад собственного шума пренебрежимо мал по сравнению с сопротивлением источника, можно воспользоваться показателем качества операционного усилителя — $R_{S,OP}$. Его можно найти, используя шумовые характеристики усилителя, по формуле 2.26:

$$R_{S,OP} = \frac{e_n}{i_n}, \quad (2.26)$$

где e_n — приведенное к входу шумовое напряжение; i_n — приведенный к входу шумовой ток.

При оценке шумовых показателей усилителя с позиций его применения в проекте, где требуется обеспечение низкого уровня шумов, необходимо рассматривать все потенциальные источники шума. Основной вклад шумов операционного усилителя зависит от сопротивления источников следующим образом:

- $R_S \gg R_{S,OP}$ — доминирует приведенный к входу токовый шум;
- $R_S = R_{S,OP}$ — шум усилителя пренебрежимо мал, доминирует шум резистора;
- $R_S \ll R_{S,OP}$ — доминирует приведенный к входу шум напряжения.

Контрольные вопросы:

1. Какие проблемы возникают в преобразователе ток-напряжение с резистором?
2. Какие факторы влияют на выбор конструкции трансимпедансного усилителя для фотодиода?
3. Какие факторы влияют на выбор операционного усилителя для трансимпедансного усилителя?
4. Какие виды шумов возникают в схеме трансимпедансного усилителя?

ГЛАВА 3

3.1 Лабораторная работа №1: Делитель напряжения

Описание лабораторной работы

Для того, чтобы получить из исходного напряжения лишь его часть, используется делитель напряжения.

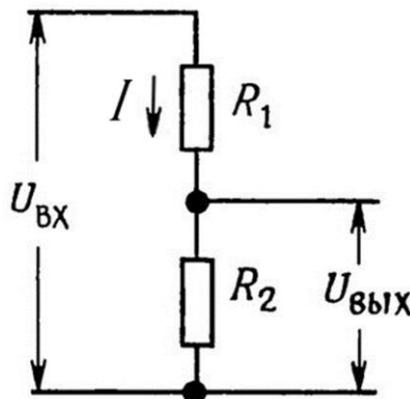


Рисунок 1 – Схема делителя напряжения

Ток I , протекающий через R_1 и R_2 одинаков, пока к выходу ничего не подключено. Суммарное сопротивление пары резисторов равно их сумме:

$$R_{об} = R_1 + R_2.$$

Таким образом, применяя закон Ома, вычислим силу тока:

$$I = \frac{U_{вх}}{R_{об}} = \frac{U_{вх}}{R_1 + R_2}.$$

Зная силу тока, протекающего через R_2 , можно рассчитать падение напряжения на нем:

$$U_{вых} = I \cdot R_2 = U_{вх} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

Допустим, $R_1 = 400$ Ом, $R_2 = 500$ Ом, $U_{вх} = 9$ В, тогда

$$U_{вых} = 9 \cdot \frac{500}{400 + 500} = 5 \text{ В}.$$

Так при помощи двух резисторов напряжение изменилось с 9 до 5 В. Это простой способ получить несколько различных напряжений в одной схеме, оставив при этом только один источник питания.

С делителем напряжения не всё так просто, когда к выходному подключению подключается какой-либо потребитель тока, который ещё называют нагрузкой (load):

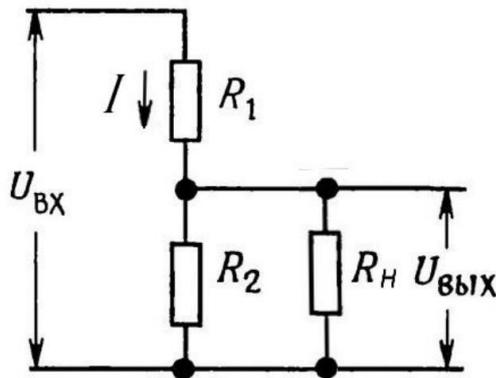


Рисунок 2 – Схема делителя напряжения с подключенной нагрузкой

В этом случае нагрузка вносит дополнительное падение напряжения. Допустим, нагрузка потребляет ток 10 мА при напряжении 5В, тогда её сопротивление равно

$$R_{\text{н}} = \frac{5}{0.01} = 500 \text{ Ом.}$$

В случае с подключенной нагрузкой следует рассматривать нижнюю часть делителя, как два резистора, соединенных параллельно (рисунок 3).

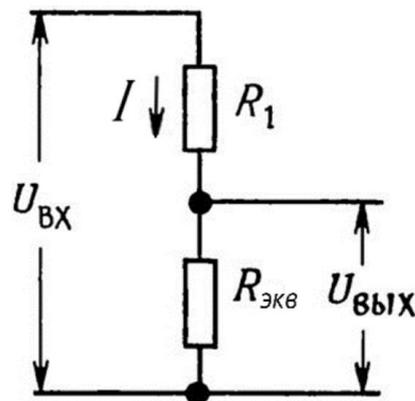


Рисунок 3 – Схема делителя напряжения с подключенной нагрузкой (эквивалентная схема)

$$R_{\text{ЭКВ}} = \frac{R_2 \cdot R_{\text{н}}}{R_2 + R_{\text{н}}}$$

Таким образом, выходное напряжение будет равно

$$U_{\text{ВЫХ}} = I \cdot R_{\text{ЭКВ}} = U_{\text{ВХ}} \cdot \frac{R_{\text{ЭКВ}}}{R_1 + R_{\text{ЭКВ}}}$$

Посчитаем, используя те же значения, что и в первом случае: $R_1 = 400 \text{ Ом}$, $R_2 = 500 \text{ Ом}$, $U_{\text{вх}} = 9 \text{ В}$, тогда

$$R_{\text{ЭКВ}} = \frac{500 \cdot 500}{500 + 500} = 250 \text{ Ом,}$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = 9 \cdot \frac{250}{400+250} \approx 3.46 \text{ В.}$$

Как видно, мы потеряли более полутора вольт напряжения из-за подключения нагрузки (без нагрузки $U_{\text{вых}} = 5 \text{ В}$, с нагрузкой $U_{\text{вых}} = 3.46 \text{ В}$). И, тем ошутимее будут потери, чем более номинал R_2 по отношению к сопротивлению нагрузки. Чтобы нивелировать этот эффект мы могли бы использовать в качестве R_1 и R_2 резисторы, например, в 10 раз меньших номиналов.

Уменьшим R_1 и R_2 в 10 раз и пересчитаем.

1) без нагрузки:

$$U_{\text{ВЫХ}} = 9 \cdot \frac{50}{40+50} = 5 \text{ В.}$$

2) с нагрузкой:

$$R_{\text{ЭКВ}} = \frac{50 \cdot 500}{50 + 500} \approx 45.45 \text{ Ом,}$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = 9 \cdot \frac{45.45}{40+45.45} \approx 4.79 \text{ В.}$$

Видим, что потери напряжения уменьшились. Мощность схемы можно рассчитать по формуле:

$$P = U_{\text{ВХ}} I_{\text{ВХ}} = \frac{U_{\text{ВХ}}^2}{R_{\text{Об}}}$$

Для случая без нагрузки: $R_{\text{Об}} = R_1 + R_2$.

С нагрузкой: $R_{\text{Об}} = R_1 + R_{\text{ЭКВ}}$.

Рассчитаем мощность схемы с нагрузкой для двух случаев:

1) $R_1 = 400 \text{ Ом}$, $R_2 = 500 \text{ Ом}$, $R_n = 500 \text{ Ом}$

$$P = \frac{9^2}{400+250} \approx 0.12 \text{ Вт.}$$

2) $R_1 = 40 \text{ Ом}$, $R_2 = 50 \text{ Ом}$, $R_n = 500 \text{ Ом}$

$$P = \frac{9^2}{40+45.45} \approx 0.95 \text{ Вт.}$$

Можно сделать вывод, что при неизменной нагрузке уменьшение сопротивление резисторов приводит к увеличению потребляемой мощности. Другими словами, мощность, рассеиваемая на резисторах, увеличится.

Кроме того, нужно помнить, что резисторы рассчитаны на определённую предельную мощность. Рассчитаем мощность, рассеиваемую на первом резисторе R_1 для обоих случаев:

$$P = U_1 I_{\text{BX}} = R_1 I_{\text{BX}}^2 = R_1 \left(\frac{U_{\text{BX}}}{R_1 + R_{\text{ЭКВ}}} \right)^2.$$

1) $R_1 = 400 \text{ Ом}$

$$P = 400 \cdot \left(\frac{9}{400+250} \right)^2 = 0.08 \text{ Вт.}$$

2) $R_1 = 40 \text{ Ом}$

$$P = 40 \cdot \left(\frac{9}{40+45.45} \right)^2 = 0.44 \text{ Вт.}$$

Таким образом, в первом случае можно использовать маломощный резистор на 0,125 Вт, а во втором случае необходимо брать резистор, как минимум, в 4 раза мощнее! Но рекомендуется всегда выбирать номинальную мощность резистора с запасом, поэтому в данном случае безопаснее будет выбрать резистор на 1 Вт.

Измерение мультиметром

Измерение сопротивления

Для того, чтобы измерить сопротивление, необходимо выставить мультиметр в режим измерения сопротивлений. В первую очередь нужно убедиться, что его щупы включены в правильные разъемы, как показано на рисунке. Чёрный щуп всегда должен находиться в разъёме СОМ, а красный в разъёме для измерения сопротивлений и напряжений.

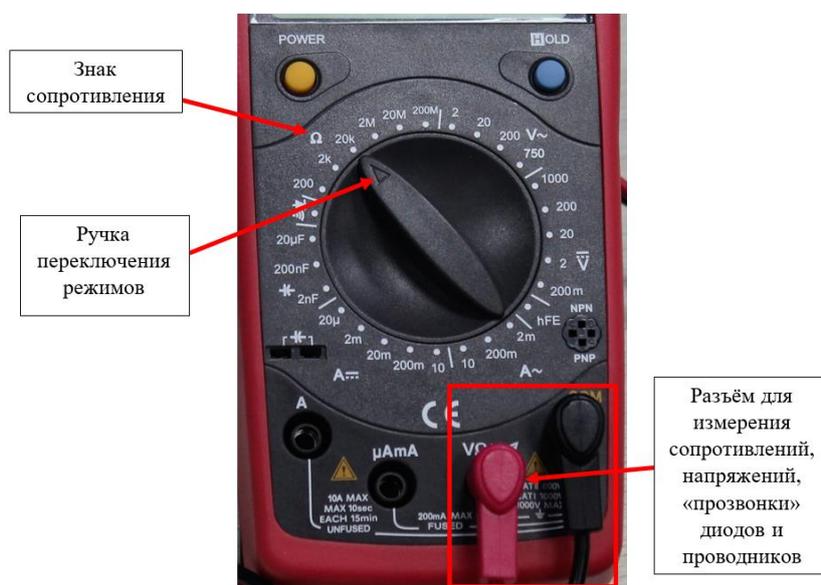


Рисунок 4 – Измерение сопротивления с помощью мультиметра

Затем ручку мультиметра необходимо выкрутить в режим измерения сопротивлений, обозначенный Ω . Также необходимо выбрать диапазон измерений. На рисунке ручка мультиметра стоит в диапазоне 20 кОм, что означает что в этом режиме мы можем измерять сопротивления до 20 кОм. Если

измеряемое сопротивление много меньше 20 кОм, то нужно выбрать более подходящий диапазон 2 кОм или 200 Ом.

Для измерения сопротивления резистора необходимо коснуться щупами мультиметра его выводов. При этом ваши пальцы не должны касаться резистора! Иначе в измерении будет участвовать ваше собственное сопротивление, т.е. получится следующая схема:

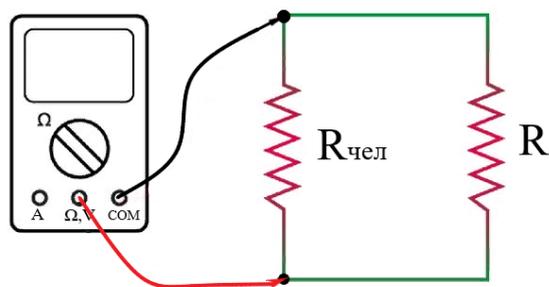


Рисунок 5 – Схема измерения сопротивления с помощью мультиметра (с учетом сопротивления человека)

И значит сопротивление, которое покажет мультиметр будет равно:

$$\frac{R_{\text{чел}} \cdot R}{R_{\text{чел}} + R}$$

Так измерять нельзя!

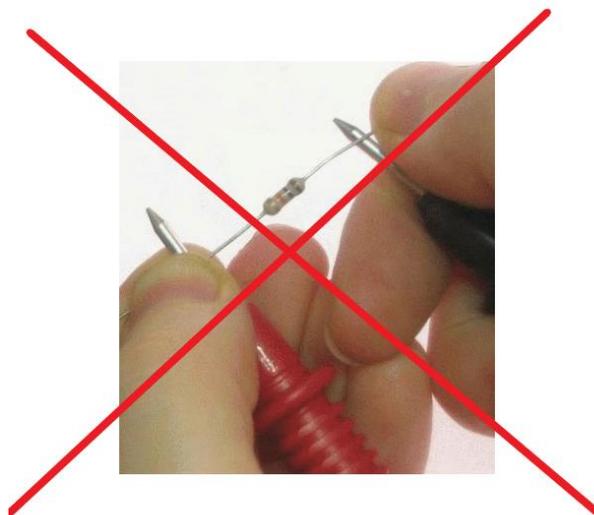


Рисунок 6 – Пример неправильного измерения сопротивления



Рисунок 7 – Пример правильного измерения сопротивления

Измерение напряжения

При измерении напряжения щупы мультиметра должны находиться в том же разъеме, что и при измерении сопротивления:



Рисунок 8 – Настройка мультиметра для измерения напряжения

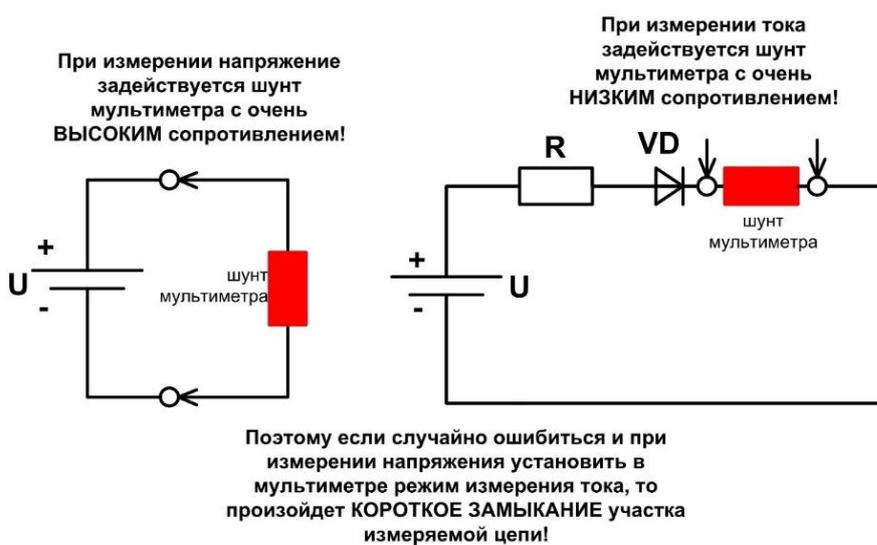


Рисунок 9 – Схема измерения напряжения

Если красный щуп будет находится в разъеме для измерения тока, а вы начнете измерять напряжение, то произойдет короткое замыкание и **предохранитель в мультиметре сгорит!** Поэтому в первую очередь перед тем, как измерить напряжение, проверьте правильно ли подключены щупы!

Затем необходимо выкрутить ручку в режим измерения напряжения и выбрать диапазон измеряемых напряжений, по аналогии с выбором диапазона сопротивлений.



Рисунок 10 – Измерение напряжения с помощью мультиметра

При измерении напряжения мультиметр включается параллельно участку, на котором необходимо измерить напряжение. Пример измерения напряжения на резисторе показан на рис. 11.

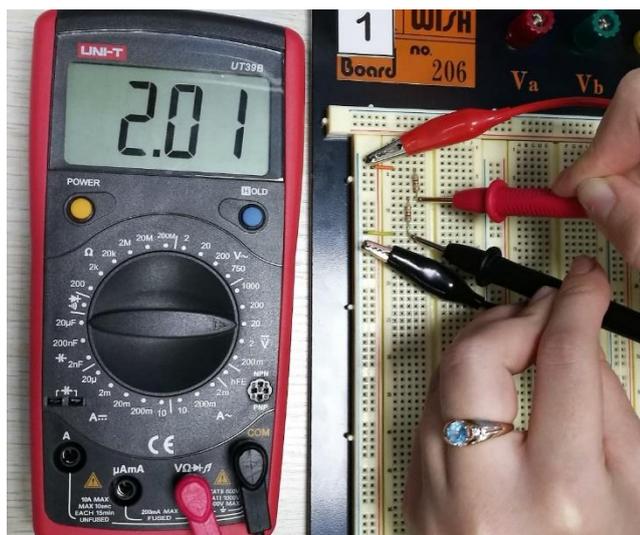


Рисунок 11 – Пример измерения напряжения с помощью мультиметра

Измерение тока

При измерении тока красный шуп должен находиться в одном из разъемов для режима измерения тока (рис. 12).

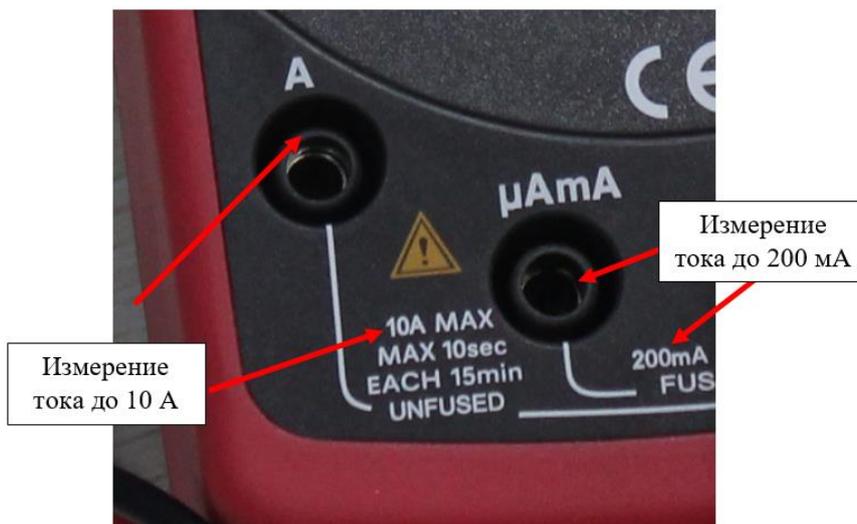


Рисунок 12 – Порты мультиметра для измерения тока

Ручка мультиметра также должна находиться в режиме измерения тока (рис. 13).

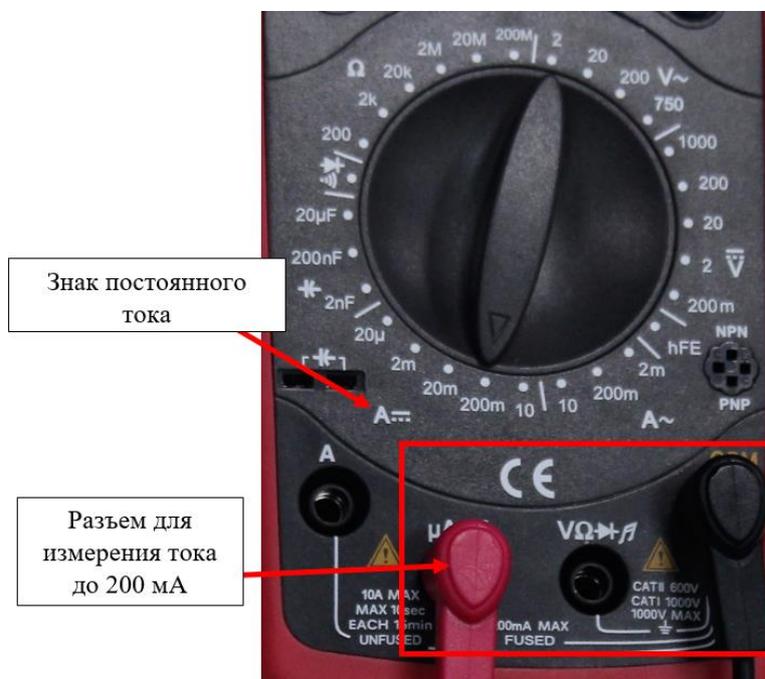


Рисунок 13 – Настройка мультиметра для измерения тока

Чтобы измерить ток, необходимо подключить мультиметр **последовательно в разрыв цепи** (рисунок ниже). Ни в коем случае нельзя измерять ток, подключив мультиметр параллельно! **Он сгорит!**

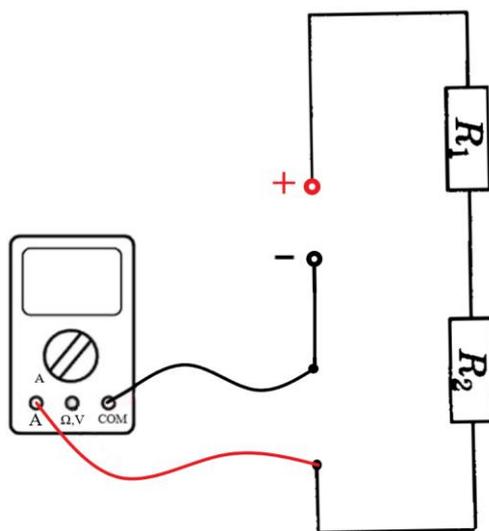


Рисунок 14 – Схема для измерения тока

Пример измерения тока в реальной цепи представлен ниже.

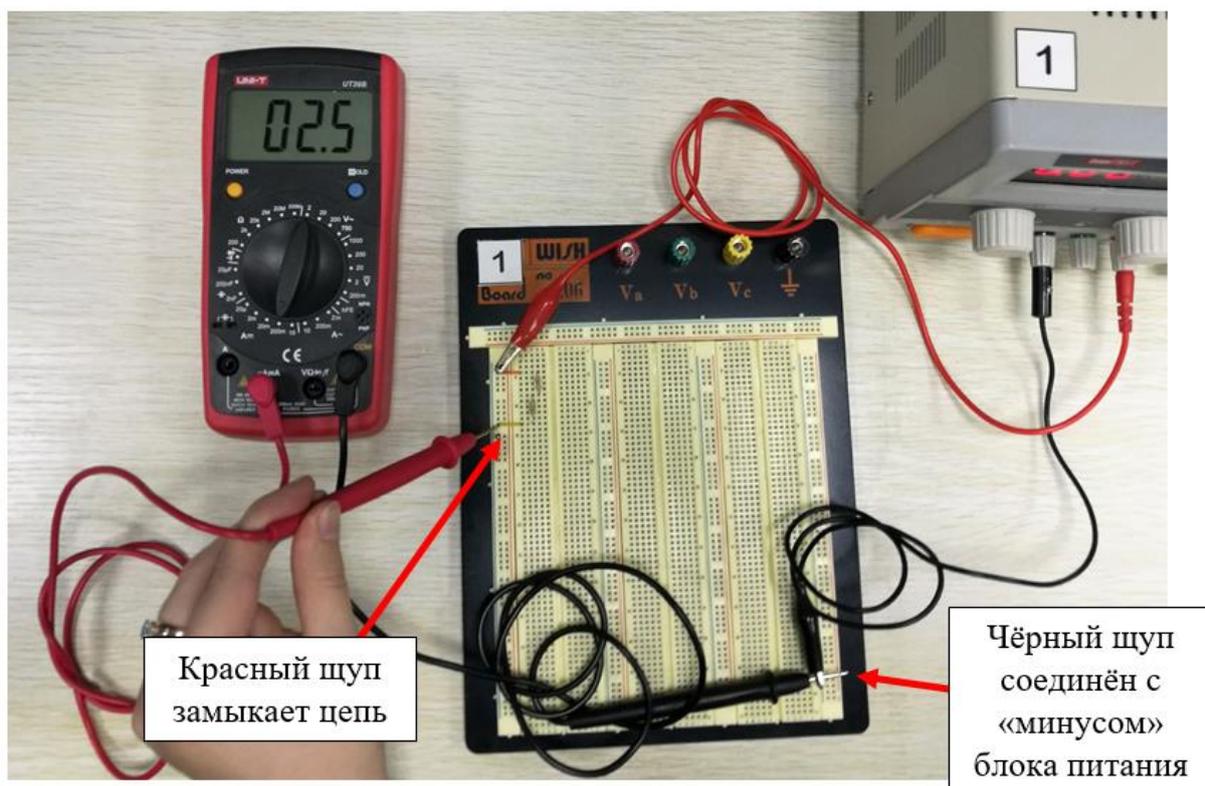


Рисунок 15 – Пример измерения тока в реальной схеме

После того как измерили ток, щуп мультиметра вернуть в разъем для измерения напряжения! Это важно, так как если после измерения тока вы забудете переключить щуп и начнете измерять напряжение, **то предохранитель в мультиметре сгорит!**

Настройка блока питания

Для начала в разъёмы **выключенного** блока питания «+» и «-» необходимо вставить провода с «крокодилами» на концах, через которые мы будем подавать напряжение в цепь, собранную на макетной плате.



Рисунок 16 – Настройка лабораторного источника питания (шаг 1)

Затем необходимо выкрутить ручки регулировки тока и напряжения против часовой стрелки до упора (установить ноль) и включить блок питания. Далее необходимо выставить ограничение по току. Для этого необходимо закоротить между собой выводы блока питания, как показано на рисунке 17.

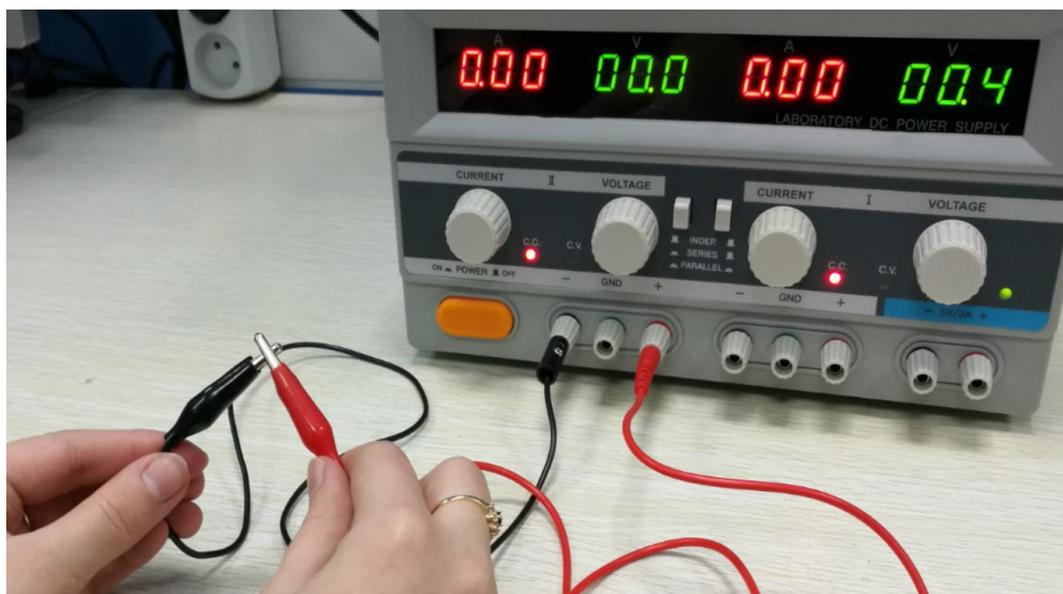


Рисунок 17 – Настройка лабораторного источника питания (шаг 2)

Затем немного подкрутить ручку регулировки напряжения, так как пока она на нуле, никакой ток не потечет, и ограничение выставить не удастся. Далее крутим ручку регулировки тока на необходимое значение. На рисунке 18 видно, что ограничение по току первого канала лабораторного источника питания установлено 0.05А или 50 мА.

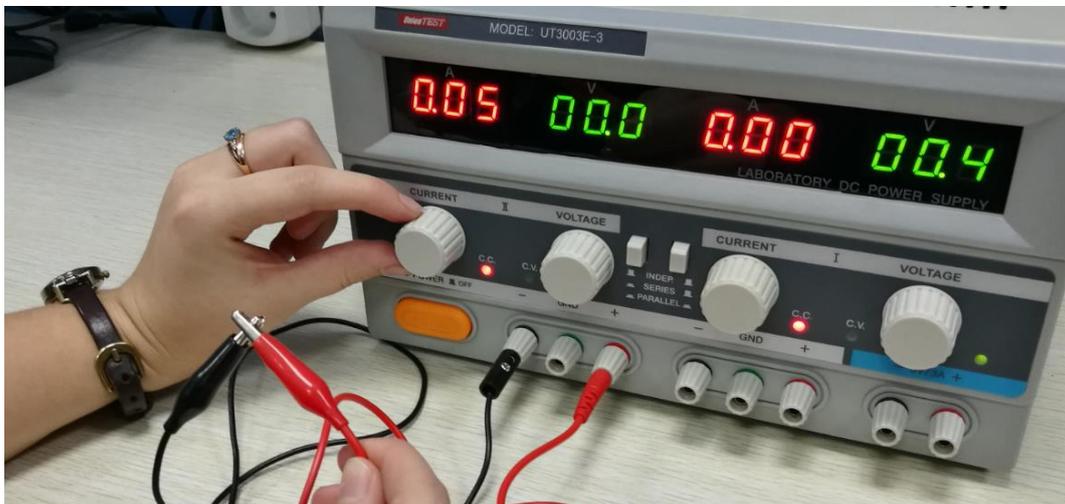


Рисунок 18 – Настройка лабораторного источника питания (шаг 3)

Как только необходимое значение тока выставлено, размыкаем «крокодилы» и устанавливаем нужное значение напряжения. На рисунке 19 выставлено напряжение в 4 В.

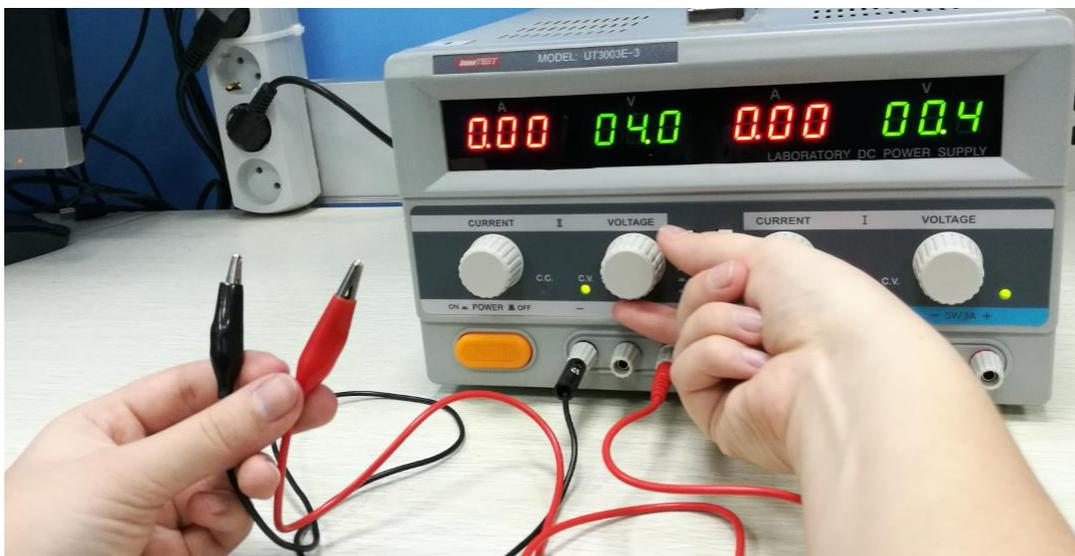


Рисунок 19 – Настройка лабораторного источника питания (шаг 4)

После настройки тока и напряжения **выключаем** блок питания. Блок настроен, теперь с него можно подавать напряжение на схему, собранную на макетной плате. Это можно сделать при помощи штырьков, вставленных в верхнюю или боковую шину питания. Как правило, синий цвет – минус (чёрный «крокодил»), красный – плюс (красный «крокодил»).

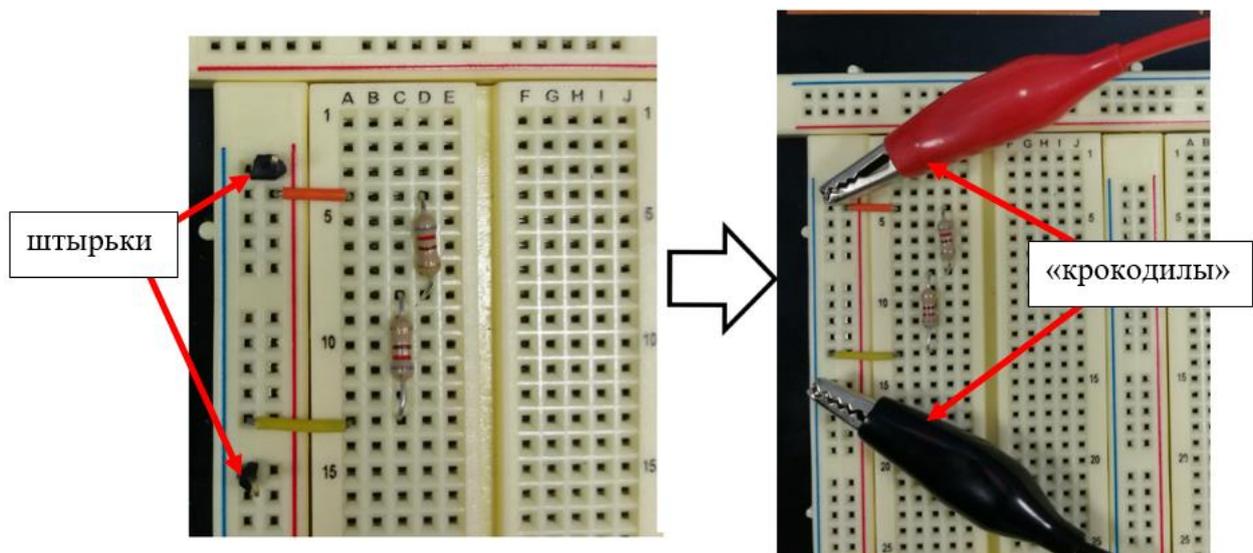


Рисунок 20 – Подключение питания к макетной плате

После того, как «крокодилы» прицеплены к штырькам, можно включать блок питания. На рисунке 21 приведен пример подключенной схемы.

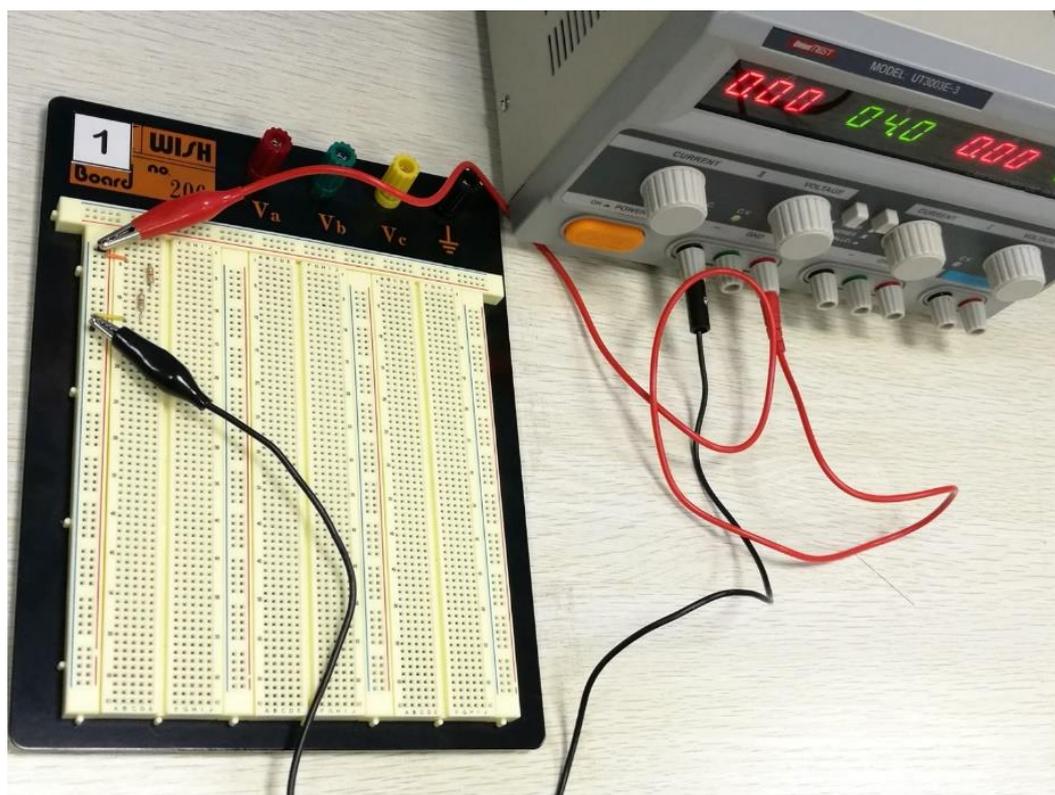


Рисунок 21 – Пример подключенной схемы

Порядок выполнения лабораторной работы

Задание 1

Исходные данные: $U_{пит}$, $U_{вых}$ и I .

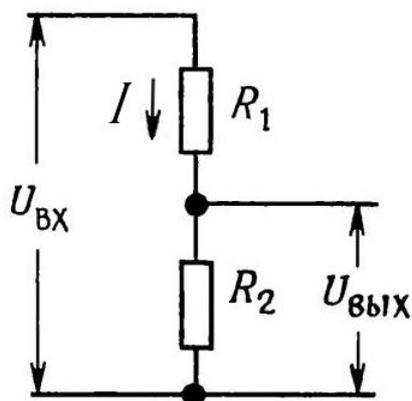


Рисунок 1 – Схема делителя напряжения

- 1) Для схемы на рисунке 1 рассчитать теоретические значения сопротивлений R_1 и R_2 .
- 2) Выбрать ближайшее значение сопротивлений из номинального ряда E12 в диапазоне от 10 Ом до 1 МОм для R_1 и R_2 таким образом, чтобы погрешность для $U_{вых}$ не превышала значения 2%.
- 3) Собрать схему делителя напряжения на макетной плате.
- 4) Включить и настроить блок питания: выставить входное напряжение $U_{вх}$ и выставить ограничение по току в 1,5 раза больше заданного значения I .
- 5) Подать питание на плату и измерить мультиметром: выходное напряжение $U_{вых\ измер}$ и сопротивления $R_{1\ измер}$, $R_{2\ измер}$.
- 6) Внести все необходимые значения в таблицу 1 в отчёте.
- 7) Выключить блок питания.

Задание 2

Исходные данные: два неизвестных резистора R_1 и R_2

- 1) Собрать схему делителя напряжения используя данные резисторы.
- 2) Включить блок питания и проверить, что напряжение и ограничение по току выставлено верно.
- 3) Подать питание на плату и измерить $U_{вых}$.
- 4) Рассчитать или измерить ток I .
- 5) Рассчитать R_1 и R_2 исходя из измеренных значений.

- 6) Измерить R_1 и R_2 .
- 7) Внести все необходимые значения в таблицу 2 в отчёте.
- 8) Выключить блок питания.

Требования к отчету

Отчёт по лабораторной работе 1 должен содержать:

- Титульный лист с названием лабораторной работы, номером варианта и ФИО студента,

- Исходные данные согласно варианту,

- Расчёт сопротивлений с формулами,

- Расчёт погрешностей с формулами,

- Заполненная таблица для задания 1 со значениями:

- теоретическое R_1 и R_2 (полученное при расчёте),

- номинальное из ряда E12 для R_1 и R_2 ,

- измеренное R_1 и R_2 ,

- теоретическое $U_{вых}$,

- экспериментальное $U_{вых}$ (рассчитанное исходя из измеренных R_1 и R_2),

- измеренное $U_{вых}$,

- погрешности для всех значений.

Таблица 1

	R_1 , кОм			R_2 , кОм			$U_{вых}$, В		
	Теор.	E12	Измер.	Теор.	E12	Измер.	Теор.	Экспер.	Измер.
Значение									
Погрешность									

- Заполненная таблица для задания 2 со значениями:

- измеренное напряжение $U_{вых}$,

- измеренное или рассчитанное I ,

- теоретическое R_1 и R_2 ,

□ - измеренное R_1 и R_2 .

Таблица 2

$U_{\text{вых}}$, В	I , мА	R_1 , кОм		R_2 , кОм	
		Теор.	Измер.	Теор.	Измер.

3.2 Лабораторная работа №2: Исследование ВАХ полупроводниковых элементов

Задание

Получить ВАХ диода, СИД, стабилитрона

Первая часть лабораторной работы

Дано:

$$U_{\text{ип}} = 5 \dots 10 \text{ В};$$

$$U_{\text{диода}} \sim 3 \text{ В};$$

$$I_{\text{max}} = 10 \text{ мА}$$

Схема измерения

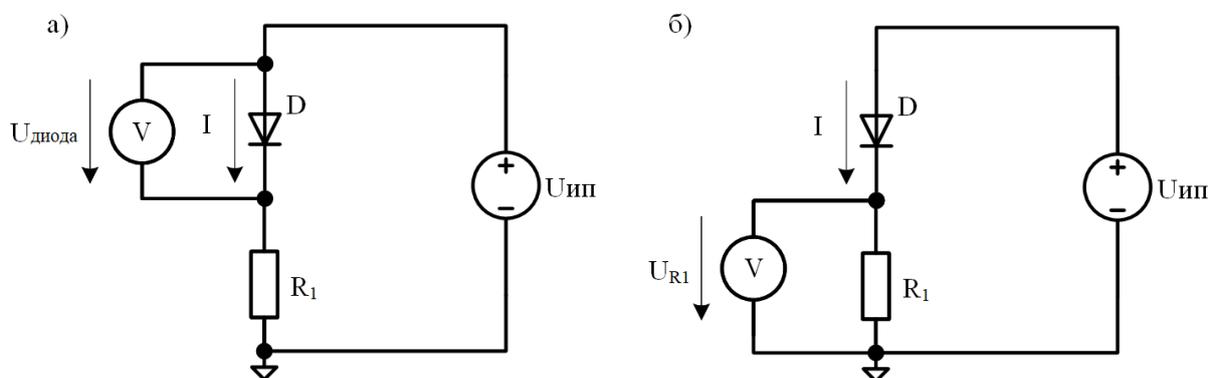


Рисунок 1 – Измерение напряжения на диоде (а); измерение напряжения на резисторе R_1 (б)

Рассчитать, какое необходимо взять значение R_1

$$I_{\text{max}} = \frac{U_{R_1}}{R_1} = \frac{U_{\text{ип}} - U_{\text{диода}}}{R_1} \Rightarrow R_1 = \frac{U_{\text{ип}} - U_{\text{диода}}}{I_{\text{max}}},$$

откуда $R_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ Ом

По номинальному ряду E12 выбрать $R_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ Ом. С помощью мультиметра получить измеренное значение $R_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ Ом, которое необходимо использовать в дальнейших вычислениях.

Собрать схему на плате и, постепенно изменяя напряжение питания U_{un} , измерять значения напряжений на диоде $U_{диод}$ и резисторе U_{R1} . Данные занести в таблицу. Затем рассчитать значение $I_{диод} = \frac{U_{R1}}{R_1}$, данные занести в таблицу 1.

Повторить измерения для СИД и ЛД. Необходимо взять 2 различных СИД и один лазерный диод!

Таблица 1

U_{un}, B	$U_{диод}, B$	U_{R1}, B	$I_{диод}, mA$
U_{un}			
...			
1,5			
1			
0,5			
0			

Вторая часть лабораторной работы

Дано:

$$U_{un} = 5 \dots 10 \text{ В};$$

$U_{стаб}$ - согласно варианту;

$$I_{стаб} = 10 \text{ мА}$$

Схема измерения:

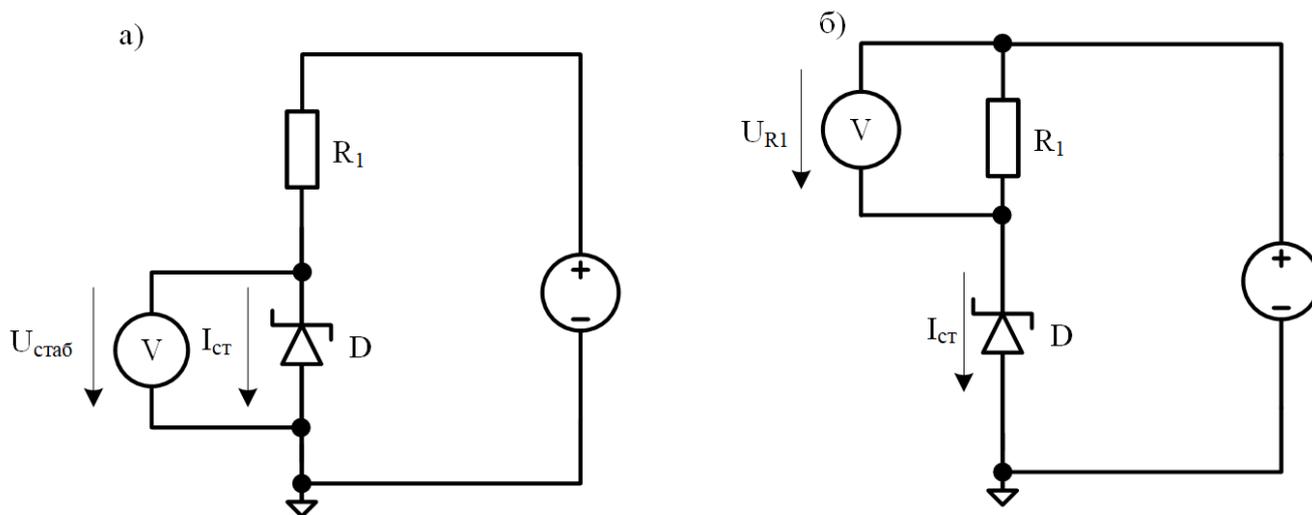


Рисунок 2 – Измерение напряжения на стабилитроне (а); измерение напряжения на резисторе $R1$ (б)

Рассчитать, какое необходимо взять значение R_I

$$I_{\text{стаб}} = \frac{U_{R_1}}{R_1} = \frac{U_{\text{ип}} - U_{\text{стаб}}}{R_1} \Rightarrow R_1 = \frac{U_{\text{ип}} - U_{\text{стаб}}}{I_{\text{стаб}}},$$

откуда $R_I = \underline{\hspace{2cm}}$ Ом

По номинальному ряду E12 выбрать $R_I = \underline{\hspace{2cm}}$ Ом. С помощью мультиметра получить измеренное значение $R_I = \underline{\hspace{2cm}}$ Ом, которое необходимо использовать в дальнейших вычислениях.

Собрать схему на плате и, постепенно изменяя напряжение питания $U_{\text{ип}}$, измерять значения напряжений на стабилитроне $U_{\text{стаб}}$ и резисторе U_{R_1} .

Данные занести в таблицу. Затем рассчитать значение $I_{\text{стаб}} = \frac{U_{R_1}}{R_1}$, данные занести в таблицу 2.

Таблица 2

$U_{\text{ип}}, В$	$U_{\text{стаб}}, В$	$U_{R_1}, В$	$I_{\text{стаб}}, мА$
$U_{\text{ип}} + 2,0$			
$U_{\text{ип}} + 1,5$			
$U_{\text{ип}} + 1,0$			
$U_{\text{ип}} + 0,5$			
$U_{\text{ип}}$			
...			
1,5			
1			
0,5			
0			

По данным, полученным в таблицах 1 и 2, получены ВАХ диода, СИД и стабилитрона (рис.3 и рис.4):

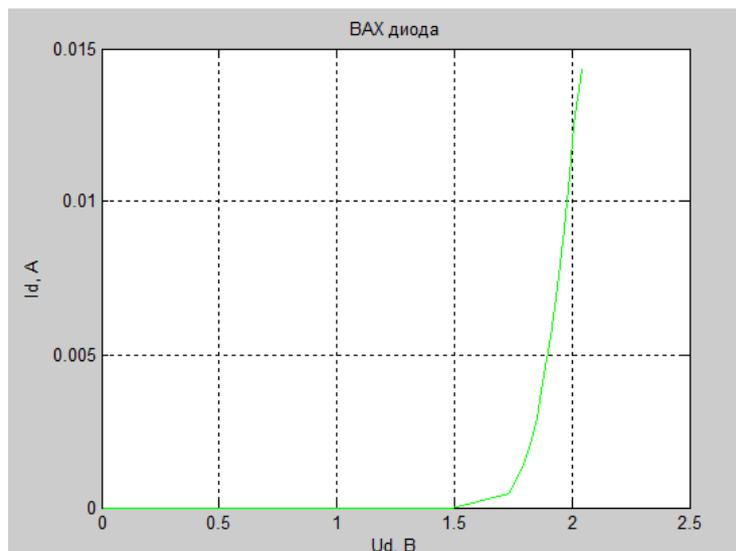


Рисунок 3 – Прямая ветвь ВАХ диода

$$U_{\text{нор}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ В,}$$

$$R_{\text{дифф}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Ом.}$$

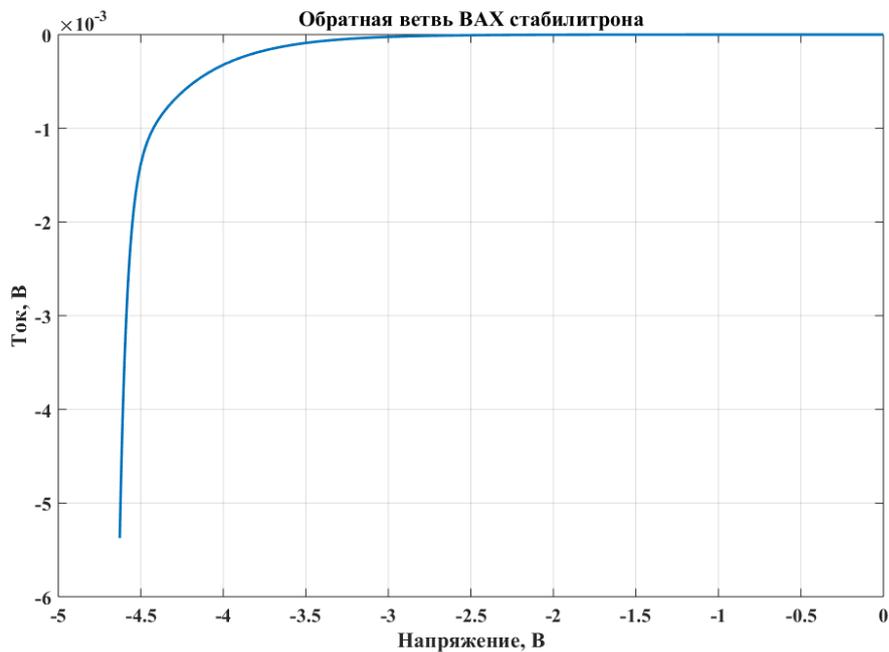


Рисунок 4 – Обратная ветвь ВАХ стабилитрона

$$U_{\text{стаб}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ В,}$$

$$R_{\text{дифф}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Ом.}$$

3.3 Лабораторная работа №3: Схемы накачки светоизлучающего и лазерного диодов

Дано:

$$R_3 = 500 \text{ Ом} \dots 4 \text{ кОм}, R_H = 100 \text{ Ом} \dots 1 \text{ кОм.}$$

Первая часть лабораторной работы

Рассчитайте $(U_{\text{ин}})_{\text{min}}$ для максимального значения опорного напряжения $((U_{\text{он}})_{\text{max}} = 5 \text{ В})$.

$$U_{\text{ин}} = U_{R_3} + 0,4 \text{ В} + U_{R_H}.$$

Схема для измерения передаточной и выходной характеристик БТ представлена на рисунке 1. Для наглядности, на рисунке 1 представлены места для измерения напряжения и тока. В случае возникновения сложностей при измерении данных величин, повторите материал представленный в лабораторной работе №1.

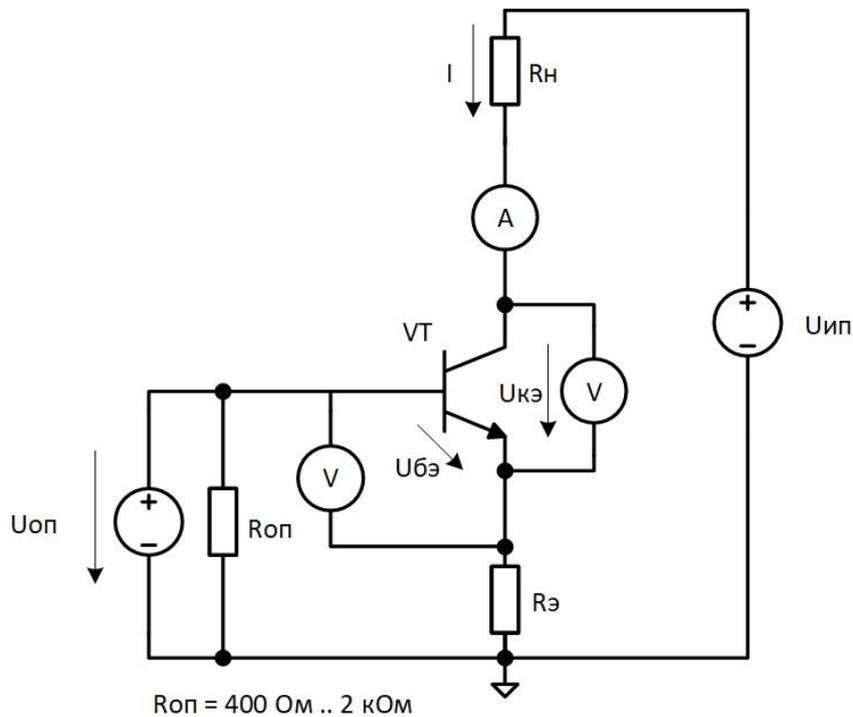


Рисунок 1 – Схема для измерения передаточной и выходной характеристик БТ

Запишите полученное значение напряжения источника питания $U_{ин} = \underline{\hspace{2cm}}$. Заполните таблицу 1 для построения передаточной характеристики БТ.

Таблица 1.

$U_{оп}, \text{В}$	$I, \text{мА}$	$U_{бэ}, \text{В}$
0		
1		
2		
3		
4		
5		

В таблицу 2 запишите измеренные значения для построения выходной характеристики БТ.

Таблица 2

$U_{ин}, \text{В}$	$U_{оп}, \text{В}$	$U_{кэ}, \text{В}$	$I, \text{мА}$
0	1		
1			

2			
3			
...			
$(U_{un})_{min}$			
$(U_{un})_{min} + 1$			
$(U_{un})_{min} + 2$			
$(U_{un})_{min} + 3$			
0	2		
1			
2			
3			
...			
$(U_{un})_{min}$			
$(U_{un})_{min} + 1$			
$(U_{un})_{min} + 2$			
$(U_{un})_{min} + 3$			

Постройте графики передаточной $I(U_{\bar{\sigma}\bar{\sigma}})$ и выходной $I(U_{\kappa\bar{\sigma}})$ характеристик БТ.

Вторая часть лабораторной работы

Рассчитайте $(U_{un})_{min}$ для максимального значения опорного напряжения ($(U_{on})_{max} = 5 \text{ В}$).

Для этого необходимо воспользоваться формулой ниже.

$$U_{un} = U_{R\bar{\sigma}} + 0,4 \text{ В} + U_{\text{ЛД}}.$$

$$U_{\text{ЛД}} \approx 3 \text{ В}.$$

На рисунке 2 представлена схема накачки лазерного диода для измерения передаточной и выходной характеристик БТ. В отличие от предыдущей схемы в качестве нагрузки используется лазерный диод или светодиод «D». Для наглядности, на рисунке 2 представлены места для измерения напряжения и тока. В случае возникновения сложностей при измерении данных величин, повторите материал представленный в лабораторной работе №1.

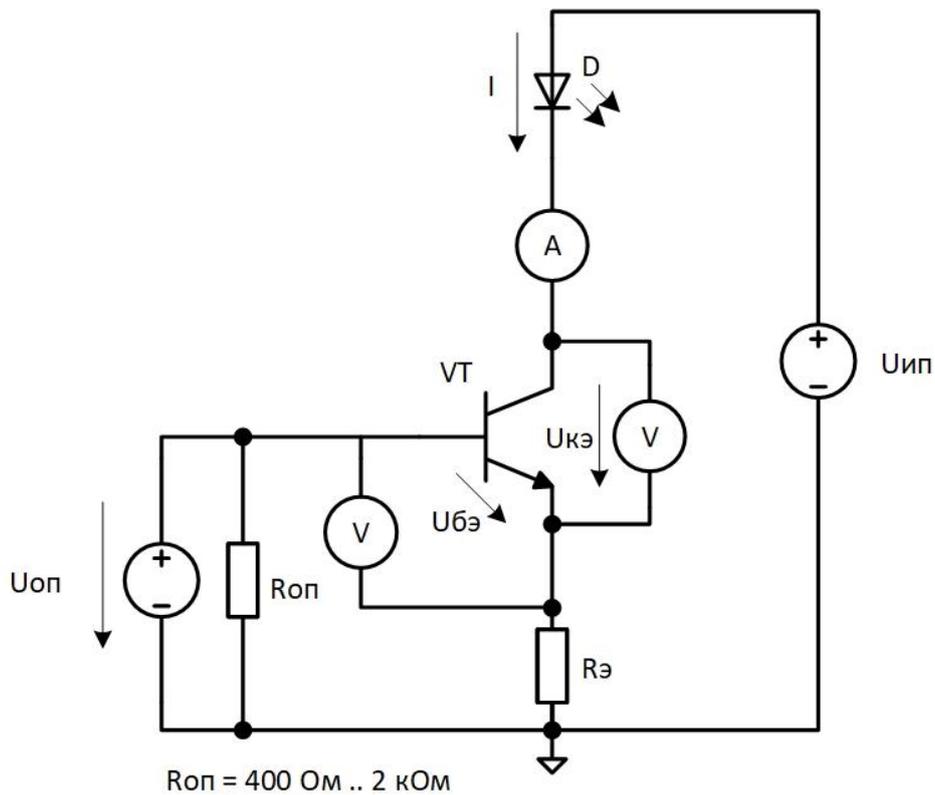


Рисунок 2 – Схема накачки лазерного диода для измерения передаточной и выходной характеристик БТ

Запишите значение напряжения источника питания $U_{ин} = \underline{\hspace{2cm}}$.
 Заполните таблицу 3 для построения передаточной характеристики БТ.

Таблица 3

$U_{оп}, \text{ В}$	$I, \text{ мА}$	$U_{бэ}, \text{ В}$
0		
1		
2		
3		
4		
5		

В таблицу 4 запишите измеренные значения для построения выходной характеристики БТ.

Таблица 4

$U_{ин}, \text{ В}$	$U_{оп}, \text{ В}$	$U_{кэ}, \text{ В}$	$I, \text{ мА}$
0			

1	1		
2			
3			
...			
$(U_{un})_{min}$			
$(U_{un})_{min} + 1$			
$(U_{un})_{min} + 2$			
$(U_{un})_{min} + 3$			
0	2		
1			
2			
3			
...			
$(U_{un})_{min}$			
$(U_{un})_{min} + 1$			
$(U_{un})_{min} + 2$			
$(U_{un})_{min} + 3$			

Постройте графики передаточной $I(U_{бэ})$ и выходной $I(U_{кэ})$ характеристик БТ.

Третья часть лабораторной работы

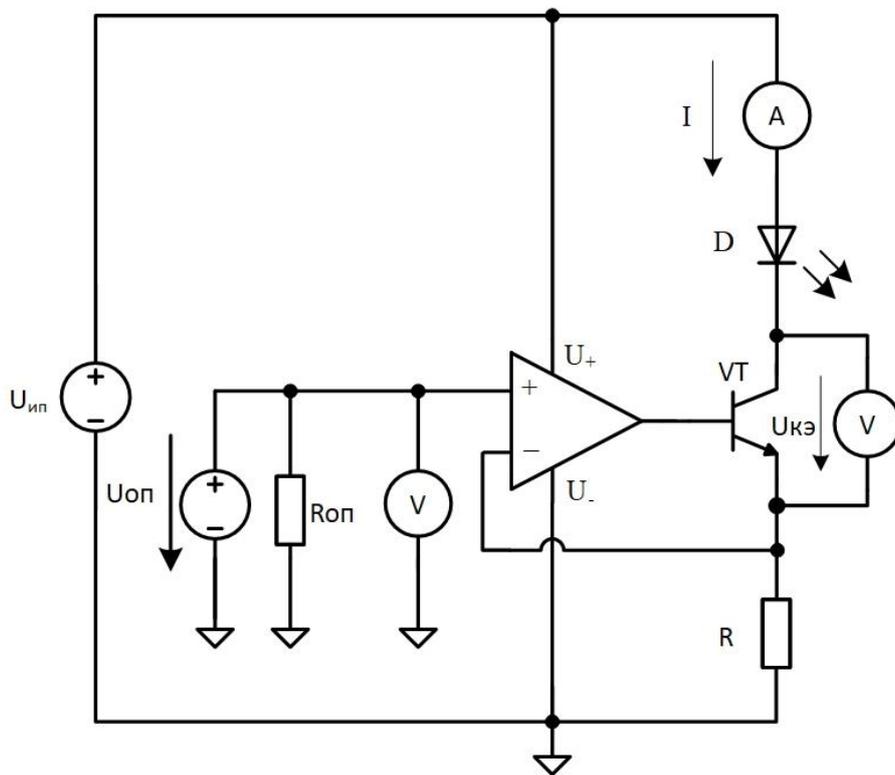
Рассчитайте $(U_{un})_{min}$ для максимального значения опорного напряжения ($(U_{on})_{max} = 5$ В).

Для расчета воспользуйтесь формулами, представленными ниже.

$$U_{un} = U_R + 0,4 \text{ В} + U_{ЛД}.$$

$$U_{ЛД} \approx 3 \text{ В}.$$

На рисунке 3 представлена схема накачки лазерного диода на основе операционного усилителя. В процессе подключения операционного усилителя необходимо изучить его техническую документацию. Также обратите внимание на полярность выводов питания. Для наглядности, на рисунке 3 представлены места для измерения напряжения и тока. В случае возникновения сложностей при измерении данных величин, повторите материал представленный в лабораторной работе №1.



$R_{оп} = 400 \text{ Ом} \dots 2 \text{ кОм}$

Рисунок 3 – Схема накачки лазерного диода с использованием операционного усилителя

Запишите значение напряжения источника питания $U_{ин} = \underline{\hspace{2cm}}$.
Заполните таблицу 5.

Таблица 5

$U_{оп}, \text{ В}$	$I, \text{ мА}$
0	
1	
2	
3	
4	
5	

В таблицу 6 запишите измеренные значения.

Таблица 6

$U_{ин}, \text{ В}$	$U_{оп}, \text{ В}$	$U_{кэ}, \text{ В}$	$I, \text{ мА}$
0			

1	1		
2			
3			
...			
$(U_{un})_{min}$			
$(U_{un})_{min} + 1$			
$(U_{un})_{min} + 2$			
$(U_{un})_{min} + 3$			
0	2		
1			
2			
3			
...			
$(U_{un})_{min}$			
$(U_{un})_{min} + 1$			
$(U_{un})_{min} + 2$			
$(U_{un})_{min} + 3$			

Постройте зависимости $I(U_{on})$, $I(U_{кэ})$.

3.4 Лабораторная работа №4: Схемы подключения фотоприемных устройств

Первая часть лабораторной работы

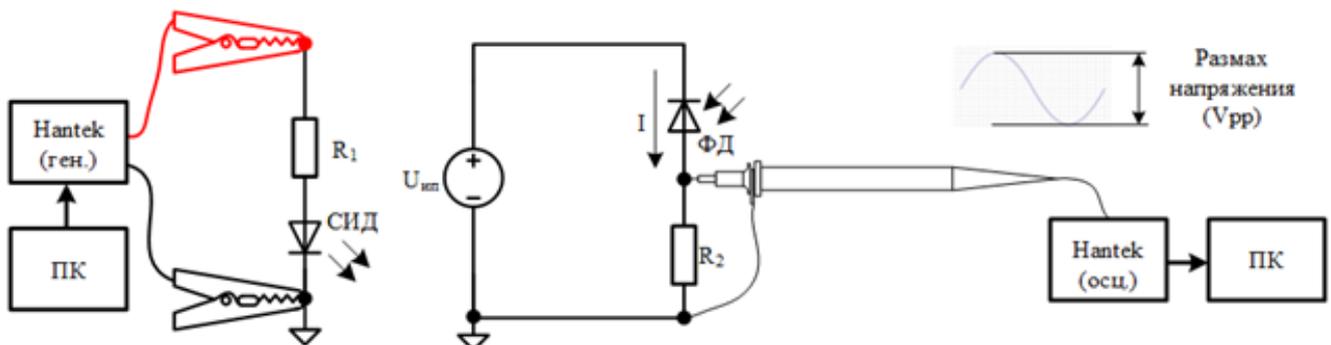


Рисунок 1 – Схема подключения генератора и осциллографа

Соберите электрическую схему, представленную на рисунке 1. Последовательность действий для выполнения данной части лабораторной работы представлена ниже.

Таблица 1

Частота (F, Гц)	Размах напряжения (Vpp, В)
10	
100	
1 000	
10 000	
100 000	
500 000	
1 000 000	
10 000 000	

1) Изменяйте частоту сигнала согласно таблице 1. Запишите размах напряжения измеренного сигнала.

2) Выключите генератор сигналов. Накройте ФД так, чтобы на него не попадал свет. Измерьте напряжение на резисторе R_2 для дальнейшего расчёта темнового тока ФД.

3) Постройте график по значениям таблицы 1. Рассчитайте темновой ток (I_D) ФД

Вторая часть лабораторной работы

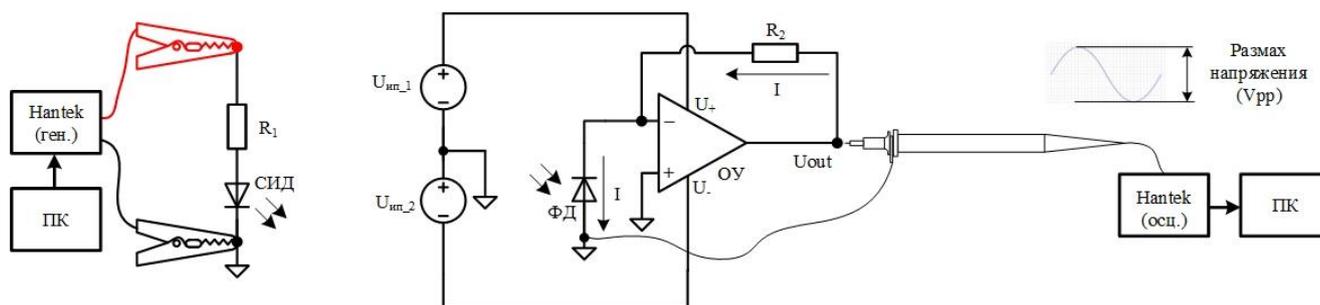


Рисунок 2 – Схема подключения генератора и осциллографа (ОУ)

Таблица 2

Частота (F, Гц)	Размах напряжения (Vpp, В)
10	

100	
1 000	
10 000	
100 000	
500 000	
1 000 000	
10 000 000	

1) Изменяйте частоту сигнала согласно таблице 2. Запишите размах напряжения измеренного сигнала.

2) Выключите генератор сигналов. Накройте ФД так, чтобы на него не попадал свет. Измерьте выходное напряжение U_{out} для дальнейшего расчёта темнового тока ФД (I_{D1}).

3) Добавьте компенсационный резистор $R_3 = R_2$ на неинвертирующий вход ОУ (рис. 3).

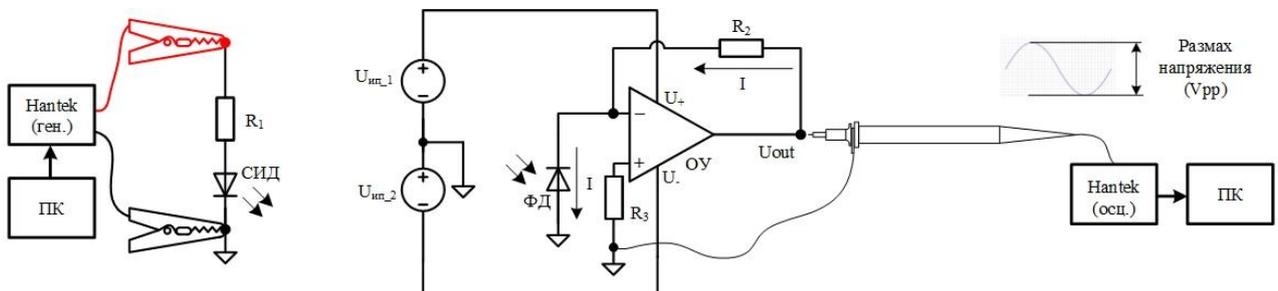


Рисунок 3 – Схема подключения генератора и осциллографа (ОУ и комп. резистор)

4) Выключите генератор сигналов. Накройте ФД так, чтобы на него не попадал свет. Измерьте выходное напряжение U_{out} для дальнейшего расчёта темнового тока ФД (I_{D2}).

5) Постройте график по значениям таблицы 2. Рассчитайте темной ток ФД I_{D1} и I_{D2} .

6) Рассчитайте паразитную ёмкость ФД для схемы с резистором и схемы с ОУ. Для расчета используйте полученные частотные характеристики. Паразитная ёмкость рассчитывается исходя из формулы RC-фильтра.

$$f_{\text{среза}} = \frac{1}{2\pi RC}$$

3.5 Лабораторная работа №5: Приемопередатчик

Первая часть лабораторной работы

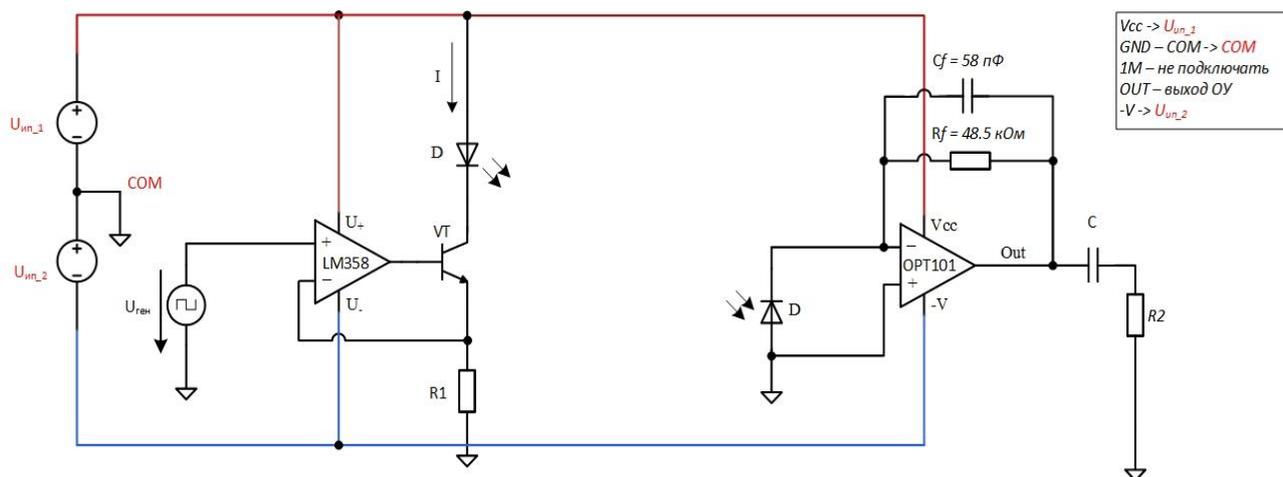


Рисунок 1 – Схемы токовой накачки и фотоприемного устройства

Для схемы токовой накачки используйте операционный усилитель LM358, при транзистор (например 2N2222), лазерный диод или СИД. Рассчитайте сопротивление R_1 , чтобы максимальный ток составлял 25 мА, для расчетов максимальное напряжение $U_{ген}$ примите равным 3 В. Затем рассчитайте напряжение U_{in_1} . Напряжение U_{in_2} установите 5 В.

Воспользуйтесь микросхемой OPT101 для того, чтобы собрать приемный модуль. Подключите плату согласно рисунку 1. Конденсатор и резистор в цепи обратной связи C_f и R_f уже установлены на плате. Вам необходимо рассчитать значения R_2 и C таким образом, чтобы частота среза составляла около 100 Гц.

Для проверки правильности подключения и выполненных расчетов подайте сигнал с генератора Hantek 1025G. Для начала можно подать синус с частотой 50 кГц со смещением от 0.7 до 1.5 В, амплитуда может меняться от 0.1 до 0.6 В. Посмотрите сигнал с использованием осциллографа Hantek 6052BE. Если все верно и сигнал отображается корректно, то поменяйте форму сигнала на меандр.

Например, на рисунке 2 представлены параметры генератора. В данном случае установлен прямоугольный сигнал (Square), напряжение смещения (Offset) составляет 1,5 В, амплитуда сигнала (Amplitude) равна 0,5 В. Для изменения сигнала генератора можно также использовать круглые ручки. Согласно документации генератора, максимальная амплитуда составляет 3,5 В. Частота сигнала (Frequency) может меняться от 0 до 26 МГц. Выходной импеданс равен 50 Ом. Обратите внимание, что максимальный ток генератора составляет 50 мА. Для того чтобы включить генератор необходимо нажать кнопку «Wave ON/OFF».

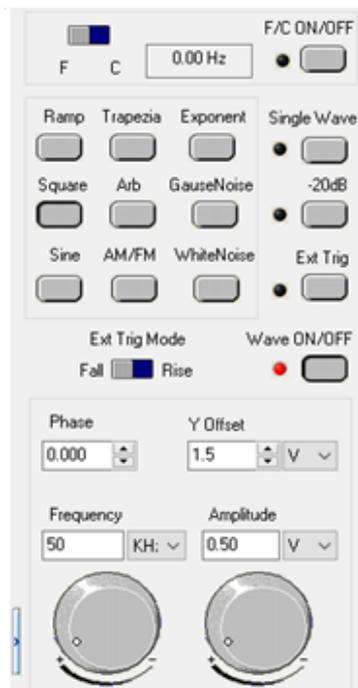


Рисунок 2 – Параметры генератора сигналов

На рисунке 3 представлен сигнал с выхода ОУ, оцифрованный осциллографом.

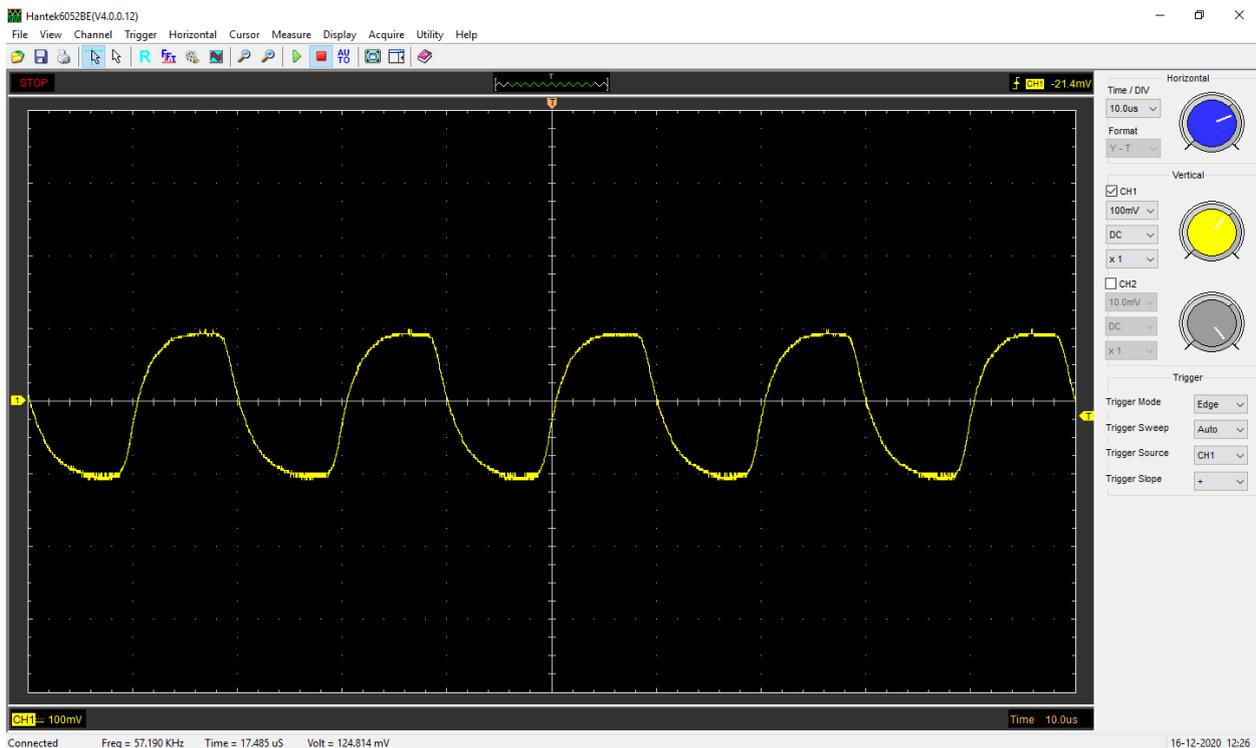


Рисунок 3 – Осциллограмма сигнала

Далее используйте программу для управления генератором, загрузите файл сигнала (без манчестерского кодирования) согласно вашему варианту File -> Open CSV.

Например в данном случае в сигнале закодировано сообщение «АВ» (А - 0100 0001, В - 0100 0010). С сигнале содержатся два старт бита «10» и два стоп бита «01» (рис. 4).

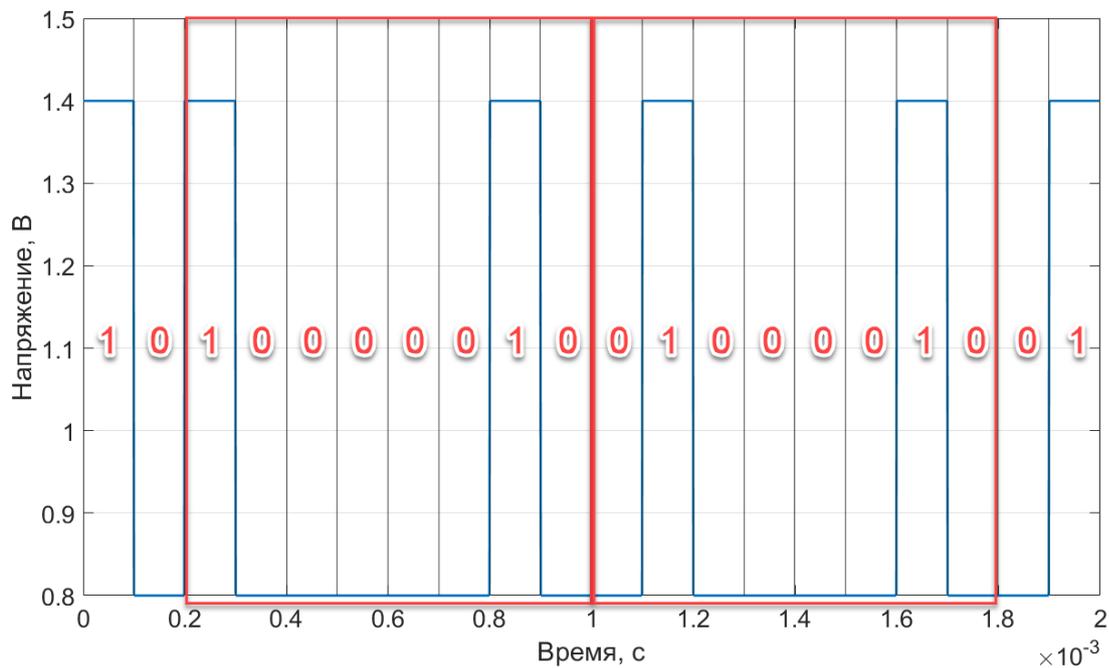


Рисунок 4 – Пример отправленного сообщения (без манч. кода)

На рисунке 5 представлена осциллограмма полученного сообщения.

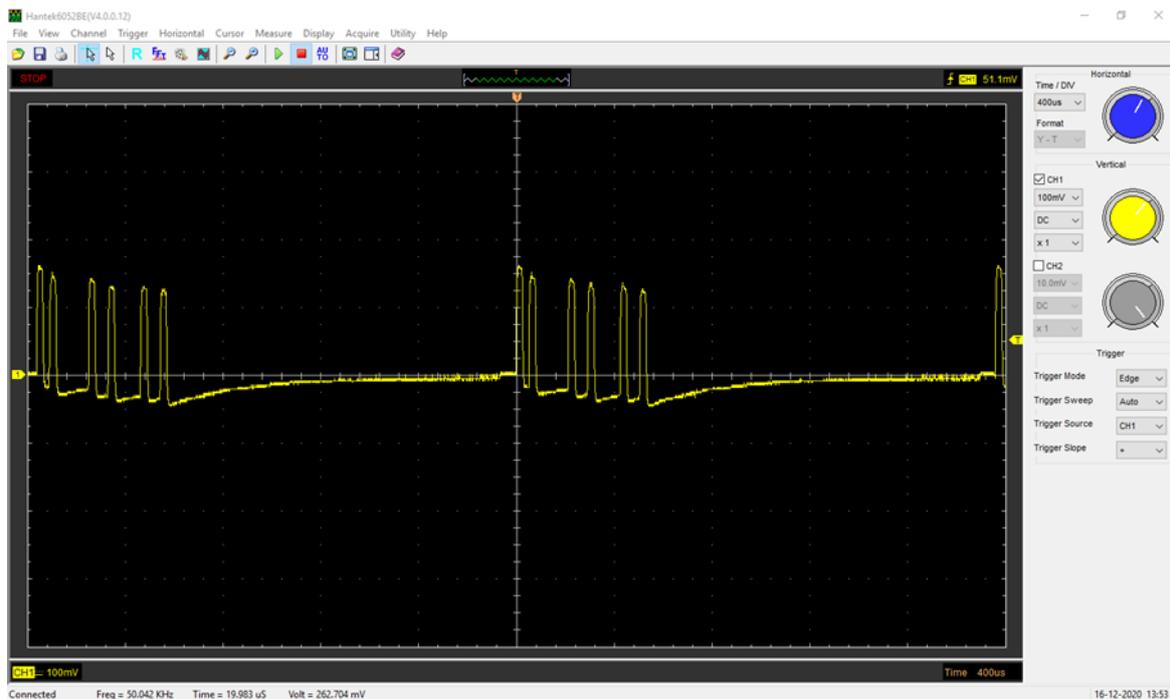


Рисунок 5 – Осциллограмма полученного сообщения

Сохраните данные File -> Save CSV -> CH1.

Вам необходимо воспользоваться скриптом Matlab «read_no_manc.m» для построения данных графиков (рис. 6).

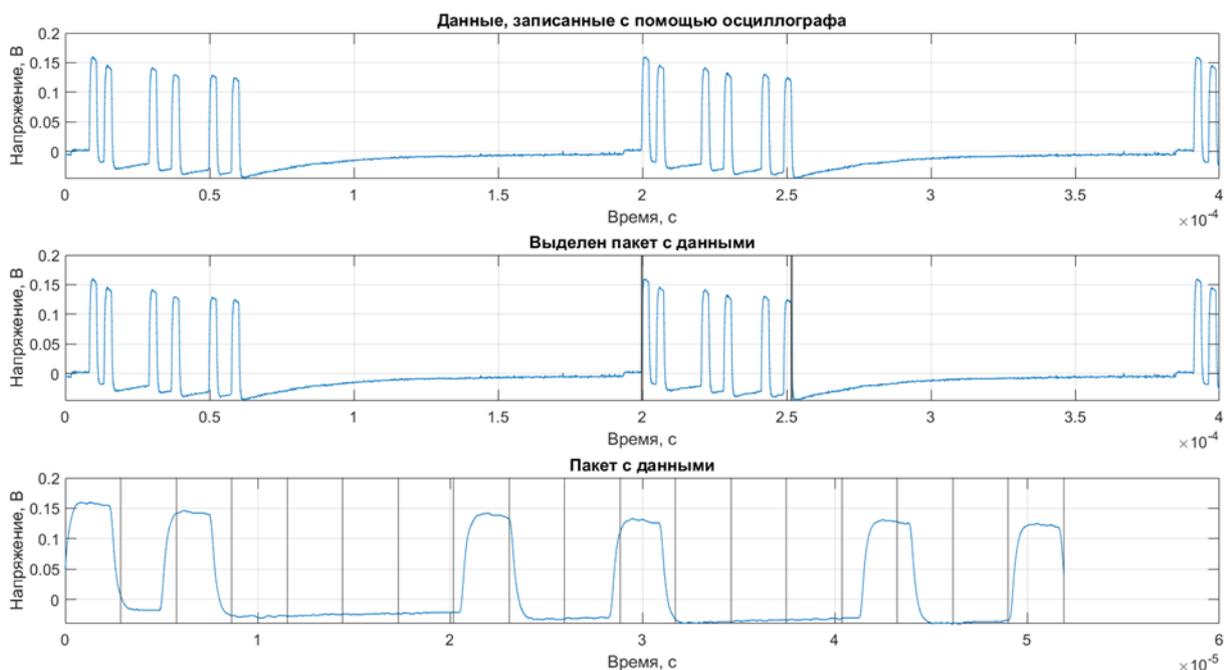


Рисунок 6 – Обработка полученного сообщения с помощью Matlab

Необходимо самостоятельно декодировать данное сообщение. Для удобства преобразования двоичных чисел в символы ASCII воспользуйтесь «ASCII text to binary converter».

Также нужно построить спектр данного сигнала. Для этого измените масштаб по оси «Time» в 10 раз. Нажмите на иконку FFT как показано на рисунке 7. Сохраните данные для дальнейшего самостоятельного построения.



Рисунок 7 – Построение спектра сигнала

Построенный спектр представлен на рисунке 8.

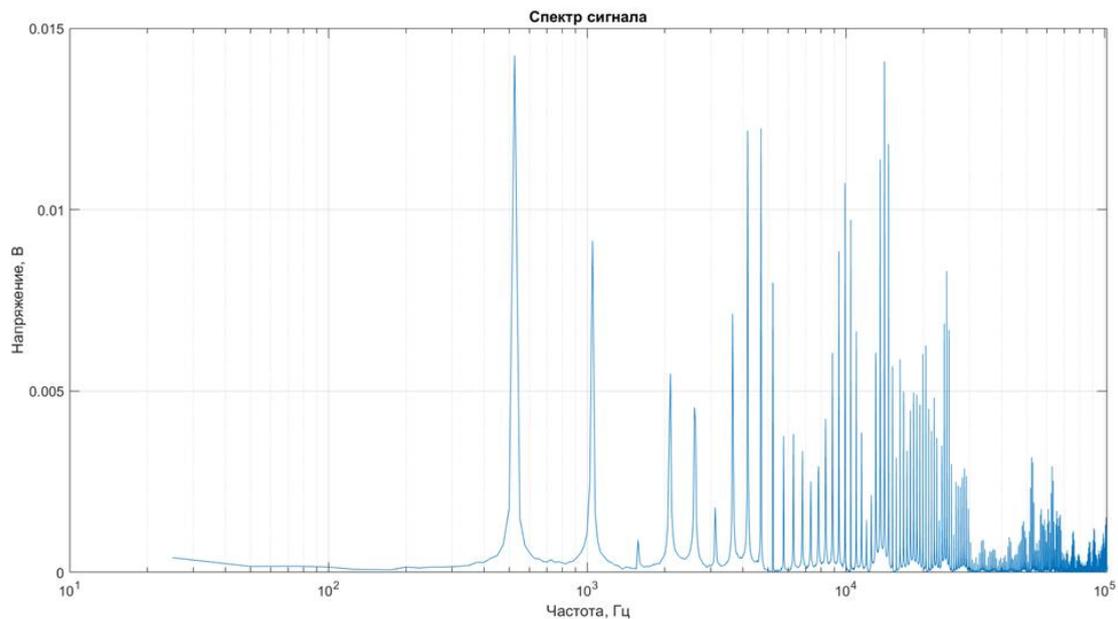


Рисунок 8 – Спектр полученного сигнала

Вторая часть лабораторной работы

Во второй части вы также работаете со схемой, представленной на рисунке 1. Вам необходимо загрузить в генератор данные согласно вашему варианту. В этой части сообщение будет закодировано манчестерским кодом.

На рисунке 9 представлено сообщение «example», которое закодировано манчестерским кодом.

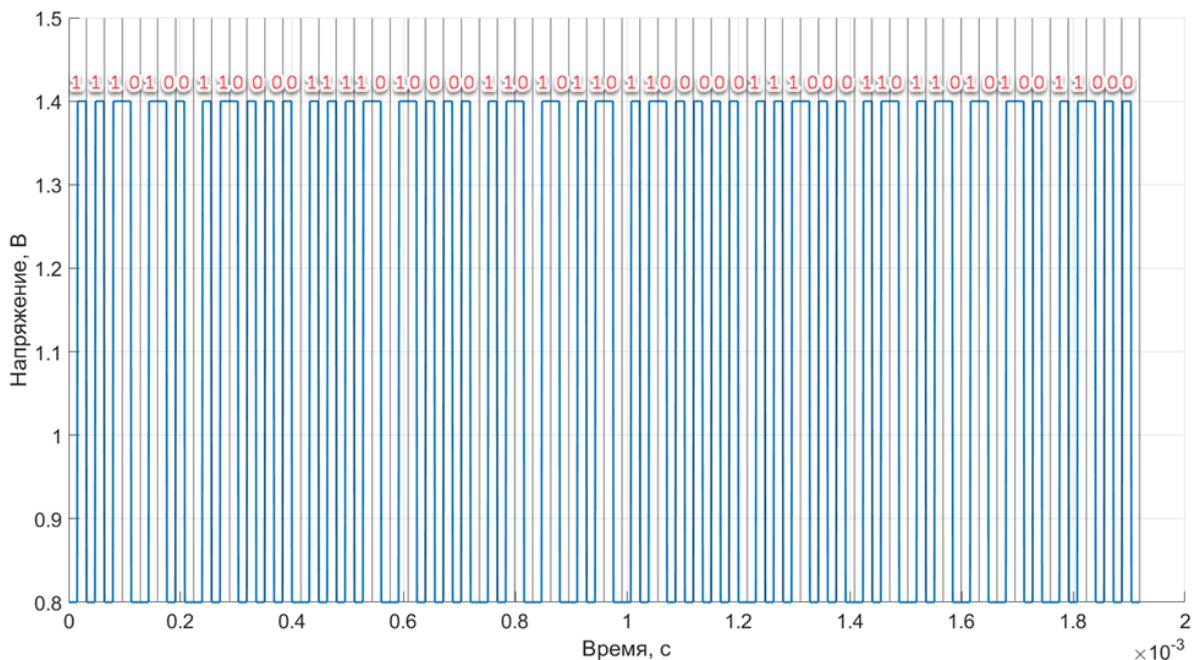


Рисунок 9 – Пример сообщения «example», созданное с использованием манчестерского кода.

В начале сообщения представлены два стартовых бита «11», в конце сообщения два стоп бита «00». Каждая буква в слове «example» закодирована 8 битами. На рисунке 10 представлена осциллограмма полученного сообщения.

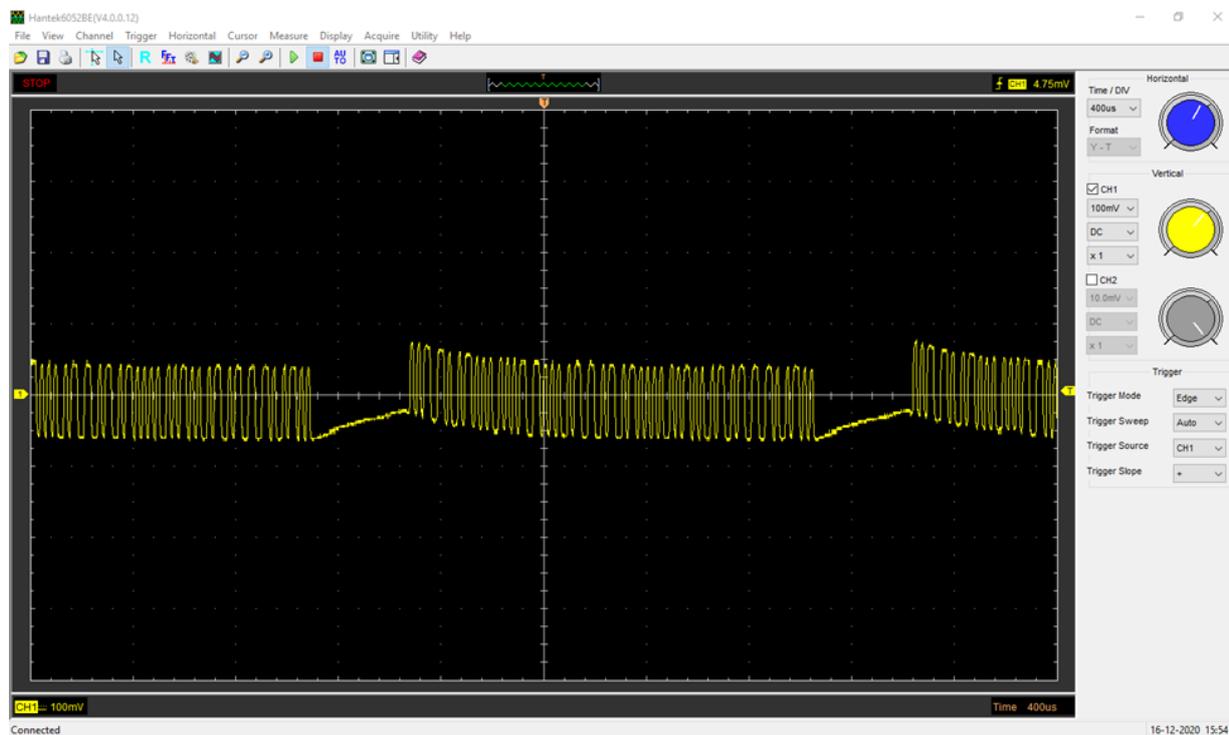


Рисунок 10 – Осциллограмма полученного сообщения.

Сохраните данные File -> Save CSV -> CH1. Вам необходимо воспользоваться скриптом Matlab «read_manс.m» для построения данных графиков (рис. 11).

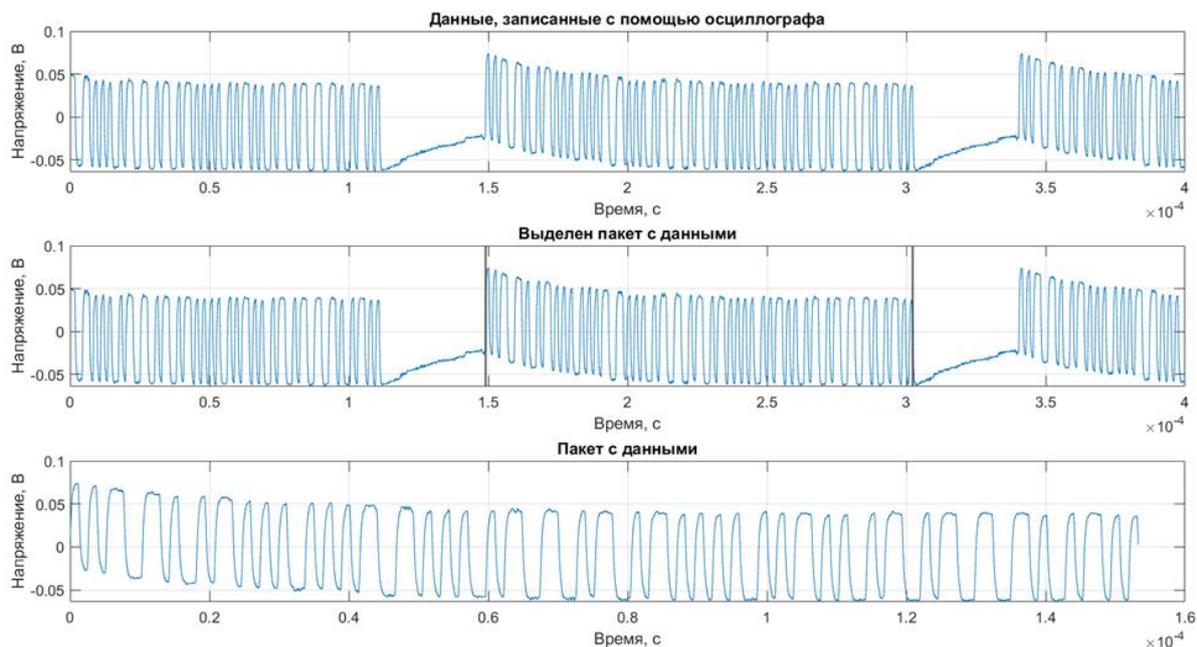


Рисунок 11 – Обработка полученного сообщения в Matlab

После выполнения скрипта появится окно с зашифрованным сообщением (рис.12).

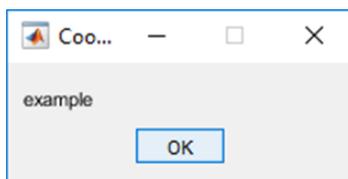


Рисунок 12 – Результат работы скрипта – зашифрованное сообщение.

С помощью программы для осциллографа вам необходимо также построить спектр полученного сигнала (рис. 13).

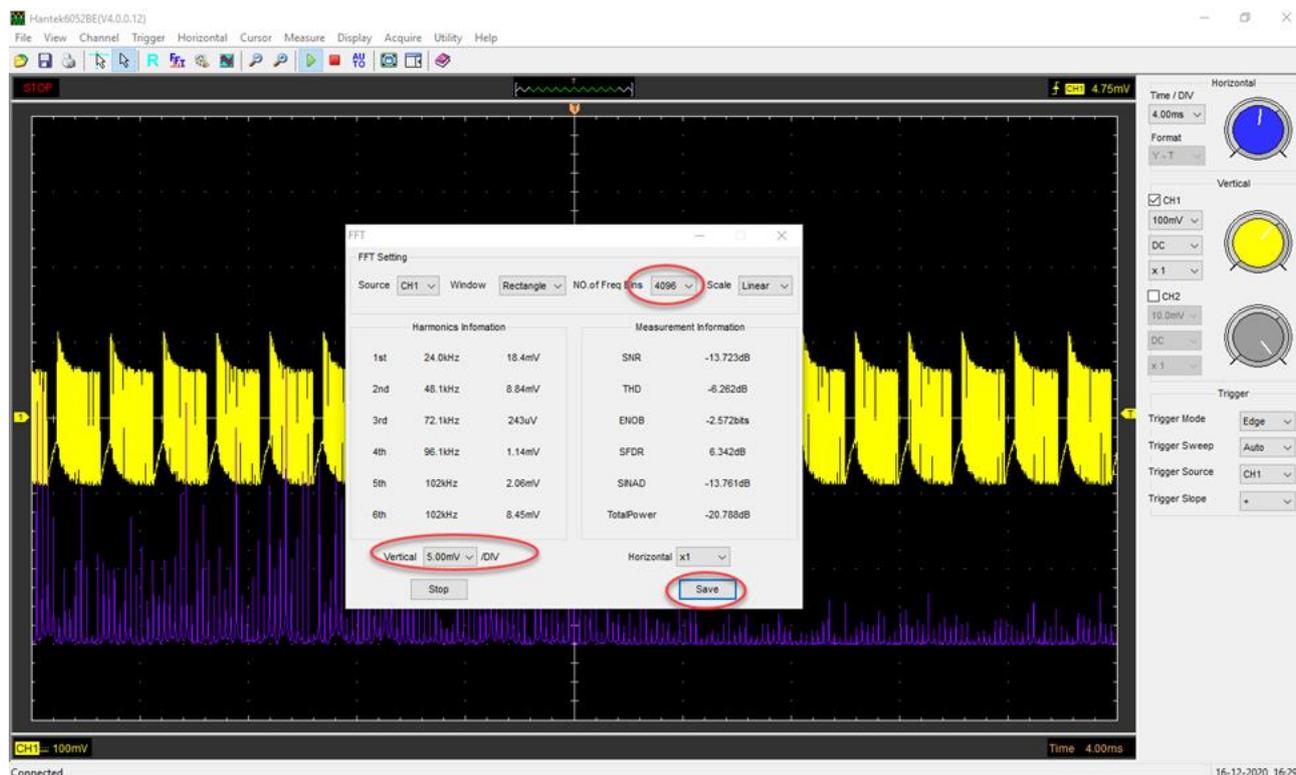


Рисунок 13 – Спектр полученного сигнала

Сохраните данные спектра с помощью программы Hantek6025BE, построенный по этим данным график представьте в отчете (рис. 14).

При составлении отчета и обработке результатов измерения, необходимо разобраться, в чем основное отличие спектров сигналов, а также в чем преимущества и недостатки использования манчестерского кодирования. В отчете рекомендуется последовательно описывать выполненные действия. При построении графиков можете пользоваться удобными для вас программами.

Также для использования пакета прикладных программ Matlab воспользуйтесь академической лицензией. При возникновении сложностей можете обратиться к преподавателю либо ассистенту.

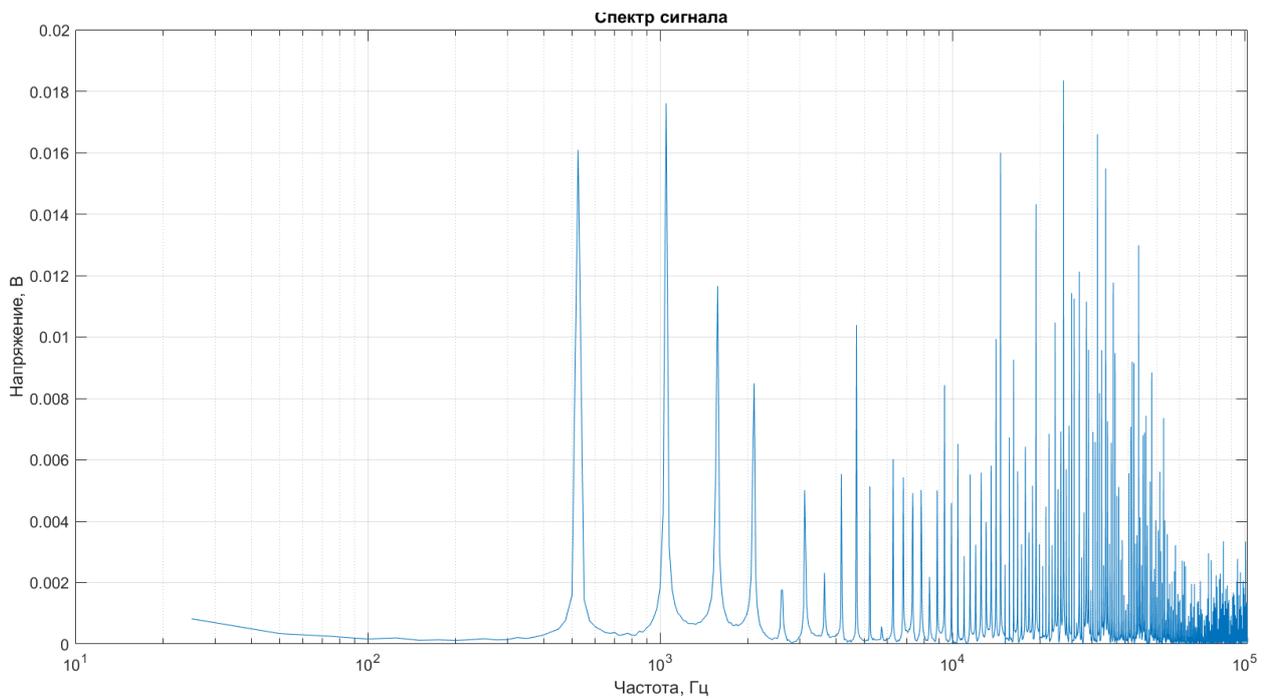


Рисунок 14 – Спектр полученного сигнала

Отчет должен быть оформлен согласно правилам оформления текстовых документов и написан технически грамотным языком. Оформленный отчет необходимо загрузить в систему управления курсами Moodle либо передать преподавателю в установленные ранее сроки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данного учебно-методического пособия рассмотрены схемотехнические решения по созданию передающего и приемного оптоэлектронных модулей. Представлены наиболее распространенные схемы токовой накачки на основе биполярных, полевых транзисторов и операционного усилителя, работающие как с постоянными, так и с переменными сигналами. Изучены основные параметры и характеристики фотоприемных устройств с приведением наиболее часто используемых схем включения.

В результате изучения представленных материалов студенты получают фундаментальные знания в области схемотехники современных электронных устройств. Выполнение практических заданий и лабораторных работ позволит закрепить полученные знания и использовать их на практике. Также описанные в данном пособии материалы могут быть использованы и в других областях. Авторы данного пособия надеются, что представленные материалы помогут студентам повысить уровень своих знаний и эффективность своей работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники, 7-е изд. — М.: Бином, 2016. 704 с. ISBN 978-5-9518-0351-1
2. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. — М.: ДМК-Пресс, 2009. 832 с. ISBN 978-5-94120-200-3
3. Картер Б., Манчини Р. Операционные усилители для всех. — М.: Додэка XXI, 2011. 510 с. ISBN 978-5-94120-242-3
4. Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника. – М.: Высшая школа, 2011. – 574 с..
5. Джонс М.Х. Электроника - практический курс. — М.: Техносфера, 2013. 510 с. ISBN 0-521-47879-0
6. Червяков Г.Г. Электронные приборы: учебное пособие. — Ростов н/Д.: Феникс, 2012. 335 с. ISBN 978-5-222-19217-7
7. Петров М.Н., Гудков Г.В. Моделирование компонентов и элементов интегральных схем: Учебное пособие. — М.: Лань, 2011. 464 с. ISBN 978-5-8114-1075-0
8. Зингеренко Ю.А. Оптические цифровые телекоммуникационные системы и сети синхронной цифровой иерархии: учебное пособие: СПб: НИУ ИТМО, 2013, 394с.
9. Григорьев Б.И. Элементная база и устройства цифровой техники. Учебное пособие: СПб: НИУ ИТМО, 2012, 85с.
10. Павлов В.Н., Ногин В.Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств. М.: Академия Издательский центр, 2008.
11. Пухальский, Г.И. Проектирование цифровых устройств + CD. [Электронный ресурс] / Г.И. Пухальский, Т.Я. Новосельцева. — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2012. — 896 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/68474> — Загл. с экрана. Электронно-библиотечная система. Издательство «Лань» [Электронный ресурс]
12. Л. Г. Муханин Схемотехника измерительных устройств — Издательство "Лань", 2009 .— Режим доступа (http://e.lanbook.com/books/element.php?p11_cid=25&p11_id=275).
13. Алейник А.С. Схемы накачки лазерных источников: СПб: НИУ ИТМО, 2014, 62с.
14. Алейник А.С., Волковский С.А. Проектирование оптико-электронных приборов: СПб: НИУ ИТМО, 2017, 107с.

15. Алейник А.С., Волковский С.А. Основы электроники: СПб: НИУ ИТМО, 2017.
16. Китаев Ю.В. Лабораторные и практические работы по курсу «Электроника и МП техника» Часть 1. Учебное пособие: СПб: СПбГУ ИТМО, 2008, 90с.
17. Китаев Ю.В. Основы цифровой техники. Учебное пособие: СПб: СПбГУ ИТМО, 2007, 87с.
18. Прянишников В.А. Электроника. Курс лекций, СПб: «Корона принт», 2006.
19. Опадчий Ю.Ф., Глудкин О.П., Гуров А.И. Аналоговая и цифровая электроника. М.: Горячая линия- Телеком, 2003.
20. Володин В.Я. LTspice. Компьютерное моделирование электронных схем. — СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 400 с. ISBN 978-5-9775-0543-7
21. Киселев, Г.Л. Квантовая и оптическая электроника [Текст]: учебное пособие / Г.Л. Киселев. –2-е издание. – Санкт-Петербург: Лань, 2011. -320 с.

Алейник Артем Сергеевич
Востриков Евгений Владимирович
Волковский Сергей Александрович
Дейнека Иван Геннадьевич
Стригалеv Владимир Евгеньевич
Мешковский Игорь Касьянович

Основы схемотехники приемопередающих электронных устройств

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, литер А