

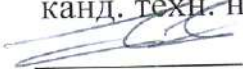
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОРДОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Н. П. ОГАРЁВА»

Институт электроники и светотехники
Кафедра электроники и нанoeлектроники

УТВЕРЖДАЮ

Зав. Кафедрой

канд. техн. наук, доцент

 Н. Н. Беспалов

« 24 » 06 2019 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

**РАЗРАБОТКА ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ХАРАКТЕРИОГРАФА ДЛЯ
МДП-ТРАНЗИСТОРОВ**

Автор бакалаврской работы *Пугачёв* 14.06.2019 В. И. Пугачев

Обозначение бакалаврской работы БР – 02069964 – 11.03.04 – 14 – 19

Направление подготовки 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника»

Руководитель работы  14.06.2019 А. Е. Лысенков

Нормоконтролер  19.06.2019 А. А. Шестёркина

Саранск

2019

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОРДОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Н. П. ОГАРЁВА»

Институт электроники и светотехники
Кафедра электроники и нанoeлектроники

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой
канд. техн. наук

 Н. Н. Беспалов

« 12 » 11 2018 г.

ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ

(в форме бакалаврской работы)

Студент: Пугачев Валерий Игоревич

1 Тема: «Разработка источника питания характернографа для МДП–транзисторов».

Утверждена приказом по МордГУ №9507-с от «12» ноября 2018 года.

2 Срок представления работы к защите: «17» ноября 2019 года.

3 Исходные данные для проектирования: необходимо разработать источник питания характернографа для МДП-транзисторов. Источник питания должен формировать прямоугольные импульсы тока амплитудой от 0 до 20 А. Максимальное выходное напряжение — 50 В.

4 Содержание дипломного проекта:

4.1 Реферат

4.2 Введение

4.3 Характернографы

4.3.1 Обзор современных характернографов

4.3.1.1 Характернограф Keithley 4200A-SCS

4.3.1.2 Характернограф ИППП-3

4.3.1.3 Характериограф Л2-100 ТЕКО

4.3.2 Анализ достоинств и недостатков современных характериографов

4.4 Разработка структурной схемы источника питания характериографа

4.5 Разработка электрической принципиальной схемы

4.5.1 Выбор управляющего р-канального транзистора

4.5.2 Разработка схемы управления для р-канального транзистора

4.5.3 Разработка схемы двухтактного усилителя мощности

4.5.4 Выбор измерительного шунта и расчет масштабирующего операционного усилителя

4.5.5 Расчет схемы источника напряжения

4.5.6 Разработка схемы блока питания

4.5.4.1 Разработка структурной схемы источника питания

4.5.4.2 Разработка электрической принципиальной схемы

блока питания

4.6 Разработка конструкции источника питания характериографа для МДП-транзисторов

4.6.1 Конструкторский расчет печатной платы

4.6.2 Расчет электрических параметров печатной платы

4.6.3 Разработка печатной платы устройства

4.6.4 Выбор корпуса для разрабатываемого устройства

4.7 Заключение

4.8 Список использованных источников

5 Графический материал:

5.1 Структурная схема источника питания характериографа

5.2 Электрическая принципиальная схема источника питания характериографа

5.3 Печатная плата источника питания характериографа

5.4 Сборочный чертеж печатной платы

Руководитель работы  12.11.18 А. Е. Лысенков

Задание к исполнению принял Пугачёв 12.11.18 В. И. Пугачев

РЕФЕРАТ

Выпускная работа содержит 47 страниц, 15 рисунков, 8 использованных источников.

ХАРАКТЕРИОГРАФ, ВАХ, ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ, МДП-ТРАНЗИСТОРЫ, ШУНТ, ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ, РЕЗИСТИВНЫЙ ДЕЛИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ, ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ.

Цель работы — разработка источника питания характернографа для МДП-транзисторов.

В процессе работы использовался опыт разработки электрических принципиальных схем, а также опыт эксплуатации современных систем автоматизированного проектирования.

В результате проведенной работы разработан источник питания характернографа для МДП-транзисторов. Рассчитана и разработана электрическая принципиальная схема устройства. Расчеты подтверждены результатами моделирования в схемотехническом симуляторе NI Multisim. Разработана печатная плата устройства.

Степень внедрения — выполняется по научно-исследовательской работе кафедры электроники и наноэлектроники МГУ им. Н. П. Огарёва.

Область применения — исследование характеристик полупроводниковых МДП-транзисторов.

Эффективность — применение разработанного источника питания характернографа для МДП-транзисторов позволит снимать вольт-амперные характеристики мощных транзисторов.

БР-02069964-11.03.04-14-19								
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Разработка источника питания характернографа для МДП-транзисторов	Лит.	Лист	Листов
Разраб.		Пугачев В. И.	<i>Пугачев</i>	14.06.19				
Провер.		Лысенков А. Е.	<i>Лысенков</i>	14.06.19			4	47
Реценз						МГУ ИЭС ЭНЭ 411		
Н. Контр.		Шестёркина А.А.	<i>Шестёркина</i>	19.06.19				
Утверд.		Беспалов Н. Н.	<i>Беспалов</i>	19.06.19				

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1 Характериографы	8
1.1 Обзор современных характериографов	8
1.1.1 Характериограф Keithley 4200A-SCS	9
1.1.2 Характериограф ИППП-3	11
1.1.3 Характериограф Л2-100 ТЕКО	12
1.2 Анализ достоинств и недостатков современных характериографов	14
2 Разработка структурной схемы источника питания характериографа	15
3 Разработка электрической принципиальной схемы	16
3.1 Выбор управляющего р-канального транзистора	16
3.2 Разработка схемы управления для р-канального транзистора	17
3.3 Разработка схемы двухтактного усилителя мощности	18
3.4 Выбор измерительного шунта и расчет масштабирующего операционного усилителя	20
3.5 Расчет схемы источника напряжения	21
3.6 Разработка схемы блока питания	24
3.6.1 Разработка структурной схемы источника питания	24
3.6.2 Разработка электрической принципиальной схемы блока питания	25
4 Разработка конструкции источника питания характериографа для МДП-транзисторов	31
4.1 Конструкторский расчет печатной платы	31
4.2 Расчет электрических параметров печатной платы	35
4.3 Разработка печатной платы устройства	37
4.4 Выбор корпуса для разрабатываемого устройства	40
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	42
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	43
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) Структурная схема источника питания характериографа	44

ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное) Электрическая принципиальная схема источника питания характериографа	45
ПРИЛОЖЕНИЕ В (обязательное) Печатная плата источника питания характериографа	46
ПРИЛОЖЕНИЕ Г (обязательное) Сборочный чертеж печатной платы	47

					БР-02069964-11.03.04-14-19	Лист
						6
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ВВЕДЕНИЕ

Характериограф — общее название приборов, предназначенных для наблюдения и исследования характеристик радиоэлектронных устройств и компонентов. Измерительная информация в этих приборах отображается, как правило, на экране в виде кривой или семейства кривых.

В данной выпускной квалификационной работе согласно техническому заданию требуется разработать источник питания характериографа для МДП-транзисторов.

Необходимо рассмотреть существующие технические решения, провести анализ их достоинств и недостатков. Разработать структурную схему устройства. Провести расчет электрической принципиальной схемы источника питания характериографа, результаты подтвердить моделированием. На основе электрической принципиальной схемы разработать печатную плату устройства.

					БР-02069964-11.03.04-14-19	Лист
						7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

1 Характериографы

В зависимости от функционала, характериографы могут определять не только вольт-амперные характеристики на постоянном токе, но и вольт-фарадные характеристики на переменном токе, ёмкость между выводами биполярного транзистора. По сути характериографы представляют собой одновременно источники тока и напряжения и могут включать прецизионные мультиметры.

Измеряемые величины для каждого характериографа свои, но можно выделить общие для большинства: минимальный и максимальный ток, как постоянный, так и импульсный; максимальное значение величины постоянного напряжения, подаваемого на прибор. При подготовке к измерению для режима источника тока указываются минимальное и максимальное значение постоянного тока, а также предельное значение импульсного. Может указываться предел величины сопротивления, измеряемой установкой. Для установок обозначатся интерфейсы ввода/вывода. Некоторые модели могут иметь сенсорные ЖК-экраны, для которых прописываются в параметрах характериографа их диагональ и разрешение.

1.1 Обзор современных характериографов

В настоящее время существует большое количество характериографов. Они имеют ряд отличительных характеристик:

- 1) возможность подключения приборов к персональному компьютеру;
- 2) широкий набор интерфейсов и портов;
- 3) простые методы настройки параметров и управления работой.

Современные характериографы не требуют от пользователя знаний в области программирования.

					БР-02069964-11.03.04-14-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

Рассмотрим основные модели характериографов от различных производителей.

1.1.1 Характериограф Keithley 4200A-SCS

Система Keithley 4200A-SCS — универсальная система для измерения вольт-амперных (далее ВАХ) характеристик на постоянном токе, для снятия вольт-фарадных характеристик на переменном токе и в импульсном режиме для полупроводниковых приборов и тестовых структур на пластине в полупроводниковом производстве.

Система имеет модульную многоканальную архитектуру и настраиваемую конфигурацию, поддерживая до 9 измерительных и дополнительных модулей. На рисунке 1.1 представлена лицевая сторона Keithley 4200A-SCS.



Рисунок 1.1 — Keithley 4200A-SCS вид спереди

Система Keithley 4200A-SCS имеет ряд особенностей. Собственная встроенная рабочая станция на базе ОС Windows 7, интерактивная

пользовательская среда тестирования, библиотека стандартных тестов. Прибор имеет сенсорный 15,6" ЖК монитор высокого разрешения (1920x1080), Широкий набор интерфейсов и портов. В их числе: USB, SVGA, Printer, GPIB, Ethernet, mouse, Keyboard. Поддержка до 9 измерительных модулей одновременно.

Прибор обеспечивает измерение ВАХ в диапазоне токов 0,1 фА до 1 А и напряжения от 1 мкВ до 210 В. Измерения на переменном токе в диапазоне до 420 В с разрешением 1 мВ, в частотном диапазоне от 1 кГц до 10 МГц.

Система измерения параметров полупроводников Keithley 4200A — это комплекс аппаратных и программных средств. На рисунке 1.2 представлен комплекс аппаратных и программных средств прибора.

4200A-SCS			
Программные средства	Clarius™ с >450 тестов/проектов/устройств		
ВАХ на пост. токе	4200-SMU 210 В, 100 мА	4210-SMU 210 В, 1 А	4200-PA Предусилитель 100аА
Импульсный режим Переходные режимы	4225-PMU Импульсн. измерения	4225-RPM Предусил./коммут.	4220-PGU Импульсн. генератор
C-V метрия	4210-CVU от 1 кГц до 1 МГц	Ramp-Rate (Квазистатич.) C-V	Ультранизкие частоты (VLF) C-V
Коммутация	4200-UL-LS/V Ультра слабые токи	4225-RPM Слабые токи	4200A-CVIV Автокоммут. CV/IV
Драйверы для зондовых станций, темп. контроллеров, внешних устройств			

Рисунок 1.2 — Аппаратные и программные средства Keithley 4200A-SCS

Рассмотрим основные характеристики подключаемого модуля. Модуль 4200-SMU используется для снятия ВАХ на постоянном токе. Он обеспечивает максимальное выходное напряжение 21 В при токе 100 мА и 210 В при токе 10 мА. Диапазон тока от 100 нА до 100 мА для генерации и измерения. Диапазон напряжения от 200 мВ до 200 В для генерации и измерения.

Стоимость составляет около 3 миллионов 300 тысяч рублей. Это является главным недостатком данного прибора.

1.1.2 Характериограф ИППП-3

ИППП-3 измеритель параметров полупроводниковых приборов предназначен для контроля и исследований ВАХ электронных компонентов, путём их визуального наблюдения на экране ПК в виде графиков или таблиц, расчёта на их основе стандартных параметров исследуемого объекта и отображения функциональных зависимостей этих параметров, запоминания и документирования результатов измерений. ИППП-3 представлен на рисунке 1.3.

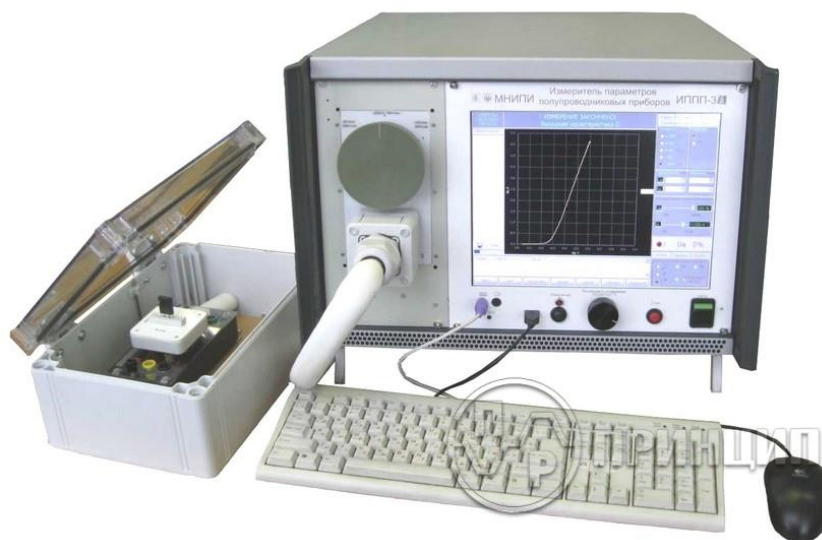


Рисунок 1.3 — Характериограф ИППП-3

Особенности ИППП-3. Отображение измеренных и расчетных характеристик в виде графиков и таблиц и сохранение таблиц в электронном виде. Наличие библиотеки стандартных тестов для измерения параметров стандартных полупроводниковых приборов. Создание собственного архива эталонных графиков с возможностью наложения эталонной ВАХ на измеренную характеристику. Возможность создания собственных моделей измерения по принципу: изделие, тестируемый элемент, тест. Поддержка портов и интерфейсов USB, mouse, Keyboard, Ethernet.

Данный характериограф позволяет вести измерение и анализ ВАХ в диапазонах токов до 20 А и напряжений до 2000 В. Представлено динамическое отображение графика ВАХ при регулировке напряжения повторяющейся развертки вручную. Прибор позволяет провести однократное измерение ВАХ по внутреннему или внешнему сигналу запуска развертки.

В режиме измерителя тока диапазон составляет от 10 нА до 20 А с минимальным шагом в 0,005 нА. В режиме измерителя напряжения диапазон составляет от 0,5 В до 2 кВ с минимальным шагом в 0,2 мВ.

В режиме источника напряжения при 20 В максимальный ток составляет 10 А, при 2 кВ ток 0,06 А.

Примерная стоимость 2 миллиона рублей.

Явными недостатками прибора является стоимость и невозможность прямого подключения к компьютеру.

1.1.3 Характериограф Л2-100 ТЕКО

Цифровой запоминающий характериограф полупроводниковых приборов Л2-100 ТЕКО компании «ТЕСТПРИБОР» предназначен для визуального наблюдения статических ВАХ полупроводниковых приборов (ППП), измерения напряжений на их электродах и токов в их цепях.

Характериограф позволяет исследовать ВАХ полупроводниковых диодов, стабилитронов и стабисторов, биполярных и полевых транзисторов, тиристоров, симисторов и других ППП, а также оптоэлектронных и пассивных компонентов. Прибор представлен на рисунке 1.4.

					БР-02069964-11.03.04-14-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

1.2 Анализ достоинств и недостатков современных характериографов

Несмотря на обширное и разнообразное количество характериографов, каждый из них имеет определенные недостатки и не удовлетворяет нашим требованиям: по стоимости; по функциональным возможностям. Поэтому для проведения исследований, измерений и решения соответствующих задач на кафедре принято решение реализовать источник питания характериографа для МДП-транзисторов с помощью программного обеспечения Multisim. Источник питания характериографа обеспечит построение ВАХ МДП-транзисторов; предоставит возможность использования различных режимов исследования; позволит подключаться к персональному компьютеру посредством связи через плату ввода/вывода данных PCI6251.

					БР-02069964-11.03.04-14-19	Лист
						14
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

2 Разработка структурной схемы источника питания характериографа

Начальным этапом решения поставленной задачи являлась разработка структурной схемы источника питания характериографа, отражающей взаимосвязь основных узлов. Генератор импульсного напряжения (ГИН) позволяет генерировать импульсы заданной длительности и амплитуды напряжения. Источник напряжения (ИП) задаёт предельное напряжение, необходимое для снятия ВАХ. Регулятор (Р) формирует нужную длину импульса. На испытуемый прибор (ИП) подается сгенерированное напряжение определённой длительности и амплитуды. Информация о напряжении и токе с прибора поступает на масштабирующий усилитель с целью приведения величин к максимально возможному диапазону работы платы РС16251.

Структурная схема представлена на рисунке 2.1.

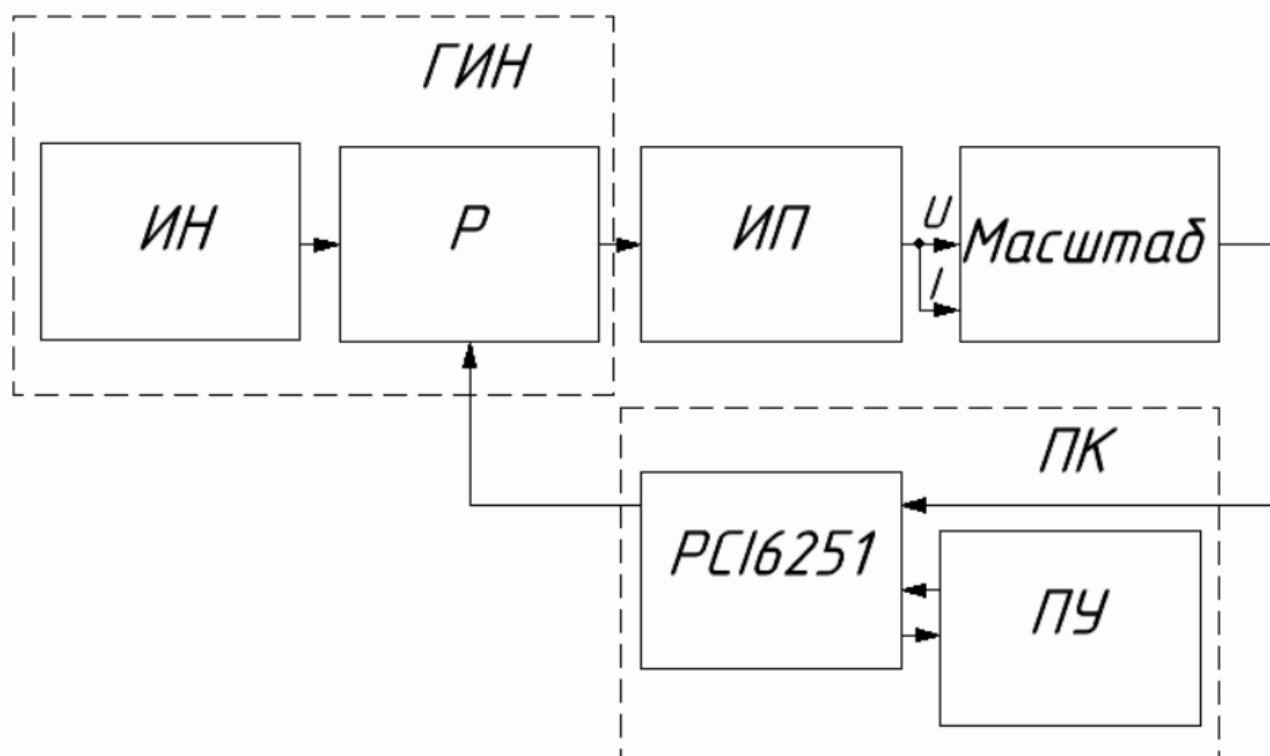


Рисунок 2.1 — Структурная схема устройства

3 Разработка электрической принципиальной схемы

В главе представлены результаты расчетов и моделирования электрических принципиальных схем структурных узлов источника питания характериографа для МДП-транзисторов. Устройство включает р-канальный управляющий транзистор и его схему управления, двухтактный усилитель мощности, схему источника напряжения, измерительный шунт и масштабирующий операционный усилитель, блок питания.

3.1 Выбор управляющего р-канального транзистора

В соответствии с заданием, управляющий транзистор должен выдерживать падение напряжения не менее 50 В [4]. Поэтому в качестве р-канального полевого МДП-транзистора выбрал IRF9Z34. Его технические характеристики представлены ниже:

- максимальная рассеиваемая мощность — 75 Вт;
- предельно допустимое напряжение сток-исток — 55 В;
- предельно допустимое напряжение затвор-исток — 20 В;
- пороговое напряжение включения — 4 В;
- максимально допустимый постоянный ток стока — 18 А;
- максимальная температура канала — 175 °С;
- общий заряд затвора — 34 нС;
- сопротивление сток-исток открытого транзистора — 0,14 Ом;
- тип корпуса — ТО220.

Несмотря на высокий допустимый ток стока 18 А, измерение ведется в импульсном режиме, поэтому транзистор не сгорит.

					БР-02069964-11.03.04-14-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		16

3.2 Разработка схемы управления для р-канального транзистора

Данная схема состоит из делителя напряжения и операционного усилителя. Схема представлена на рисунке 3.1.

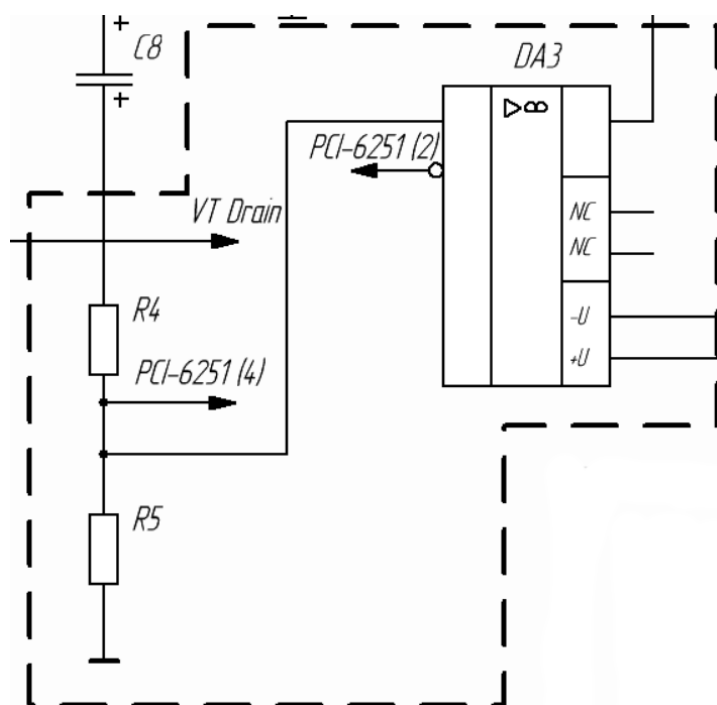


Рисунок 3.1 — Схема управления для р-канального транзистора

Делители напряжения — это измерительные устройства, предназначенные для уменьшения измеряемого напряжения в некоторое число раз, называемое коэффициентом деления. На вход резистивного делителя поступает предельное напряжение $U_{in} = 50$ В. На неинвертирующий вход операционного делителя, стоящего после делителя можно подать максимум 10 В [7]. Следовательно, делитель рассчитан таким образом, чтобы отмасштабировать входящее на операционный усилитель напряжение в рамки 10 В. Выбрал коэффициент деления $k = 5$. Принял сопротивление резистора $R5 = 10$ кОм. Тогда сопротивление $R4$ определяется по формуле:

$$k = \frac{R4 + R5}{R5}, \quad (3.1)$$

$$R4 = (k - 1) R5 = 40 \text{ кОм}. \quad (3.2)$$

Сопротивление второго резистора соответственно $R4 = 40 \text{ кОм}$. Ближайший по номиналу к резистору $R4$ из ряда E24 — 39 кОм . Выбрал по справочнику наиболее подходящие резисторы CF-100 (С1-4) по требуемому номиналу. Резистор $R5$ взял CF-100 (С1-4) 1 Вт, 10 кОм , 5%, а резистор $R4$ CF-100 (С1-4) 1 Вт, 39 кОм , 5%.

Операционный усилитель КР140УД17. Данный операционный усилитель является прецизионным, с малым напряжением смещения и высоким коэффициентом усиления напряжения. Имеет внутреннюю частотную коррекцию. КР140УД17 обладает неплохим сочетанием параметров входных напряжений и тока шума. Обычно данный операционный усилитель применяется в высокоточных измерительных цепях с большим коэффициентом усиления [7].

Технические характеристики КР140УД17:

- напряжение питания — $\pm 15 \text{ В}$;
- температурный диапазон — $0 \text{ }^\circ\text{С} \dots +70 \text{ }^\circ\text{С}$;
- частота — $0,6 \text{ МГц}$;
- количество каналов — 1;
- напряжение смещения — $0,06 \text{ мкВ}$;
- тип корпуса — DIP8.

3.3 Разработка схемы двухтактного усилителя мощности

Выходной ток операционного усилителя достаточно мал. МДП-транзисторы имеют паразитные ёмкости. Эти ёмкости замедляют открытые

					БР-02069964-11.03.04-14-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18

транзистора. Поэтому для быстрого открывания транзисторов рассчитан данный усилитель мощности на двух транзисторах [5]. Операционный усилитель работает как повторитель напряжения. Выходное напряжение данной схемы будет равно входному напряжению, что позволит подать на затвор испытуемого транзистора точно такое же напряжение, которое зададим для моделирования ВАХ [2]. Данная схема представлена на рисунке 3.2.

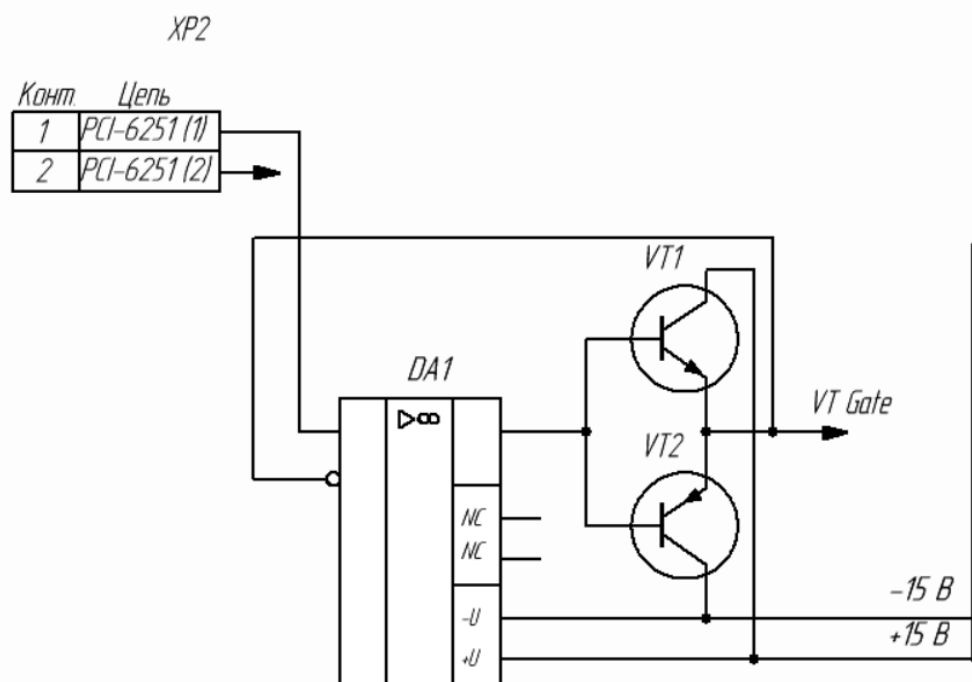


Рисунок 3.2 — Двухтактный усилитель мощности на двух транзисторах с ОУ

В качестве операционного усилителя в данной схеме выбрал КР140УД17. Данный операционный усилитель является прецизионным и обладает наиболее подходящими параметрами. Характеристики операционного усилителя рассматривались в предыдущем пункте.

В схеме используются транзисторы n-p-n и p-n-p структуры [5]. В качестве транзистора n-p-n структуры выбрал 2N6488G. Этот транзистор обладает следующими характеристиками:

- максимальное напряжение коллектор-база при заданном обратном токе коллектора и разомкнутой цепи эмиттера ($U_{кбо\ макс}$) — 90 В;
- максимальное напряжение коллектор-эмиттер при заданном токе коллектора и разомкнутой цепи базы ($U_{кэо\ макс}$) — 90 В;
- максимально допустимый ток коллектора ($I_{к\ макс}$) — 15 А;
- статический коэффициент передачи тока $h_{21э\ мин}$ — 15;
- граничная частота коэффициента передачи тока $f_{гр}$ — 5 МГц;
- максимальная рассеиваемая мощность — 75 Вт.

Комплиментарным транзистором р-п-р структуры подобрал 2N6491G. Данный транзистор имеет следующие характеристики:

- максимальное напряжение коллектор-база при заданном обратном токе коллектора и разомкнутой цепи эмиттера ($U_{кбо\ макс}$) — 80 В;
- максимальное напряжение коллектор-эмиттер при заданном токе коллектора и разомкнутой цепи базы ($U_{кэо\ макс}$) — 80 В;
- максимально допустимый ток коллектора ($I_{к\ макс}$) — 15 А;
- статический коэффициент передачи тока $h_{21э\ мин}$ — 20;
- граничная частота коэффициента передачи тока $f_{гр}$ — 5 МГц;
- максимальная рассеиваемая мощность — 75 Вт.

3.4 Выбор измерительного шунта и расчет масштабирующего операционного усилителя

Измерительный токовый шунт должен иметь как можно более низкое падение напряжения. Это связано с тем, что шунт заземлен, а управление р-канальным транзистором происходит относительно шунта. В связи с этим, любое напряжение, падающее на шунт будет мешать открытию управляющего транзистора [3]. Это значит, что напряжение падающее на шунте вычитается из напряжения, подаваемого на транзистор. Выберем в роли шунта резистор КНР-100 со следующими характеристиками:

					БР-02069964-11.03.04-14-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		20

- точность — 5 %;
- номинальная мощность — 5 Вт;
- рабочая температура — -55..155°C.

Рассчитал мощность, падающую на шунте при токе 20 А, напряжении 50 В в импульсном режиме со скважностью $D = 200$ мкс:

$$P_{ш} = I \cdot U \cdot D = 20 \cdot 50 \cdot (200 \cdot 10^{-6}) = 0,2 \text{ Вт.} \quad (3.3)$$

Полученная мощность удовлетворяет номинальной мощности выбранного шунта.

Масштабирующий усилитель реализован на операционном усилителе К140УД17А [8]. Коэффициент усиления по напряжению равен:

$$K_{oc} = \frac{R8}{R7} = 10. \quad (3.4)$$

Выбрал резистор $R7 = 1$ кОм, тогда резистор, исходя из формулы $R8 = 10$ кОм. При напряжении в 1 В на шунте, на выходе ОУ будет 10 В.

3.5 Расчет схемы источника напряжения

Выбрал 4 диода MUR840 для диодного моста [6]. Характеристики данного диода следующие:

- максимальный непрерывный прямой ток — 16 А;
- максимальное падение напряжения — 1,3 В;
- максимальное обратное напряжение — 400 В;
- максимальный импульсный ток — 100 А;
- максимальный обратный ток — 10 мкА;
- максимальный диапазон рабочих температур — от - 65 °С до +175 °С.

Ёмкость электролитических конденсаторов подбираются таким образом, чтобы за короткий промежуток времени выдаваемое напряжение источником питания на тестируемый транзистор было неизменным. Время подачи напряжения на МДП-транзистор должно составлять 200 мкс. Это время выбрано с той целью, чтобы не перегреть транзистор и другие элементы схемы, что негативным образом скажется на точности измерения характеристик прибора. Необходимый по условию ток 20 А, напряжение 50 В. Рассчитаем сопротивление схемы для моделирования.

$$R_m = \frac{U}{I} = \frac{50}{20} = 2,5 \text{ Ом.} \quad (3.5)$$

Ёмкость батареи конденсаторов C_c подобрана с помощью схемотехнического симулятора NI Multisim 10.

В начальные параметры конденсатора зададим напряжение, с которого будет идти разряд. Напряжение установил равным 50 В. Провел моделирование этой схемы с помощью программного обеспечения NI Multisim 10. Схема представлена на рисунке 3.3.

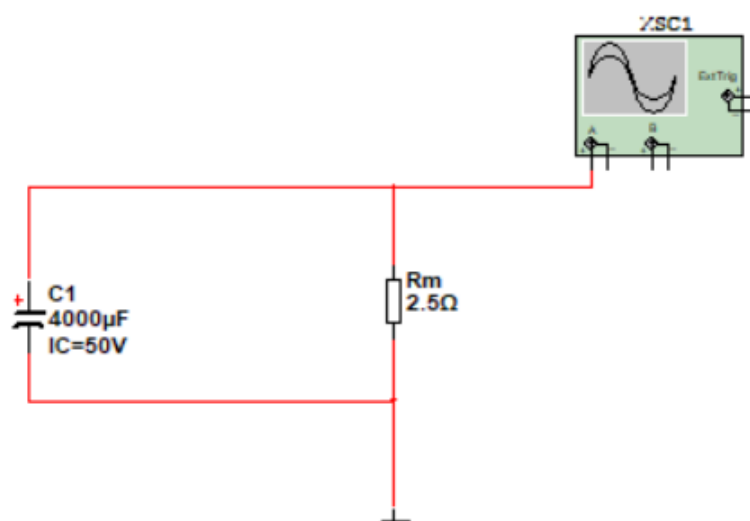


Рисунок 3.3 — Моделирование схемы с рассчитываемой ёмкостью конденсатора в программе NI Multisim 10

Результаты моделирования представлены на рисунке 3.4.

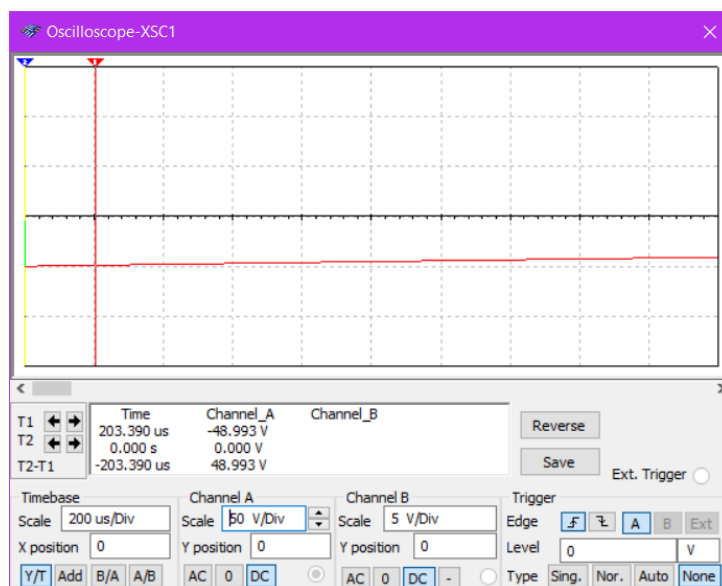


Рисунок 3.4 — Результат моделирование схемы ёмкости конденсатора в программе NI Multisim 10

Моделирование показало, что необходимая ёмкость электролитического конденсатора $C_c=4000$ мкФ. За время 200 мкс конденсатор разрядился на величину напряжения равной 1 В. Это значит, что подобранная ёмкость полностью подходит под установленные нами задачи. Заменяем расчетный конденсатор четырьмя электролитическими конденсаторами $C5 - C8$ ёмкостью 1000 мкФ каждый.

Резистор, идущий после диодного моста, выбирается исходя из необходимости ограничить ток на диоды и на конденсаторы. Для этого на выходе диодного моста поставим резистор $R3 = 10$ кОм [6].

Общая схема источника питания показана на рисунке 3.5.

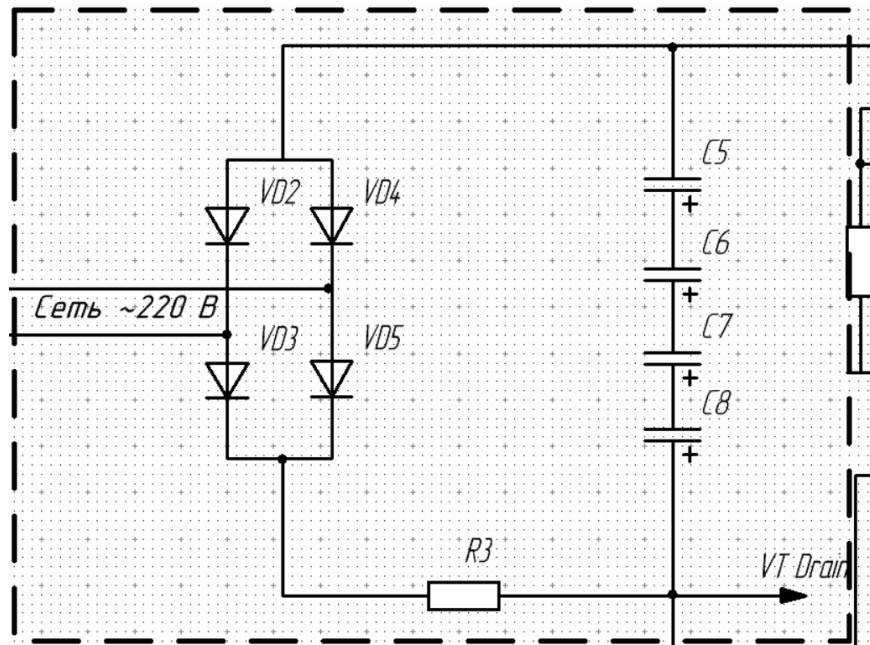


Рисунок 3.5 — Общая схема источника напряжения

3.6 Разработка схемы блока питания

3.6.1 Разработка структурной схемы источника питания

Для проектируемой установки необходимы питающие напряжения: +15 В, -15 В. Структура источника питания представлена на рисунке 3.6:

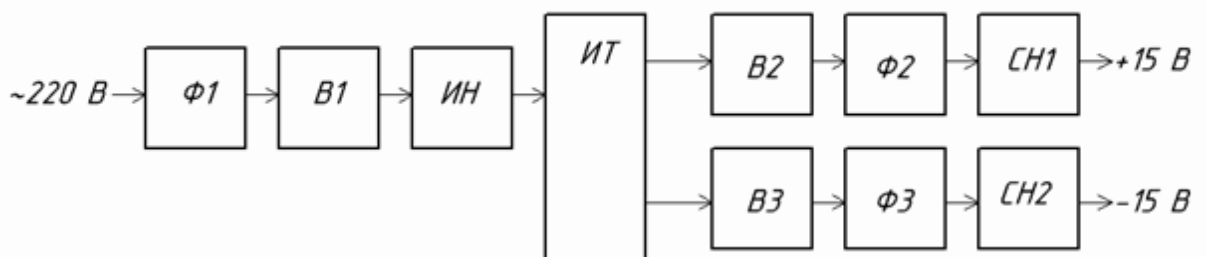


Рисунок 3.6 — Структурная схема блока питания

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Сетевое напряжение через фильтр Ф1 подается на выпрямитель В1 и преобразуется в постоянное, которое питает инвертор напряжения (ИН). В качестве инвертора используется специализированная микросхема IR53H(D)420. Частота инвертора 20 кГц, задается с помощью RC-цепочки R2, C4 [8].

В качестве нагрузки инвертора выступает импульсный трансформатор. Он имеет две вторичные обмотки с соответствующим напряжением для каждого канала. Переменное напряжение каждого из каналов преобразуется в постоянное с помощью выпрямителей В2 и В3, после чего фильтруются фильтрами Ф2 и Ф3. Каналы, питающие интегральные микросхемы устройства, дополнительно стабилизируются линейными стабилизаторами напряжения СН1 и СН2.

3.6.2 Разработка электрической принципиальной схемы блока питания

Рассчитаем мощность, потребляемую от источника питания при работе установки. Потребляемая мощность складывается из общей мощности потребителей:

$$P_{\text{потр}} = I_1 \cdot U_1 + I_2 \cdot U_2 = 22,5 \text{ Вт.} \quad (3.6)$$

С небольшим запасом примем мощность ИБП равной 25 Вт.

Переменное напряжение сети подается через помехоподавляющий фильтр на мостовую схему выпрямления.

Входной помехоподавляющий фильтр обладает свойством двунаправленного помехоподавления, т. е. предотвращает проникновение высокочастотных импульсных помех из сети (которые иногда могут иметь к тому же значительную амплитуду) в БП, и наоборот — из БП в сеть. Воспользуемся стандартными параметрами фильтра: $C1 = C2 = 0,1 \text{ мкФ}$,

$L_1 = 5$ мГн. Резистор R_1 номиналом 100 кОм предназначен для разрядки конденсаторов C_1, C_2 после отключения источника питания от сети. Обмотки дросселя L_1 имеют одинаковое количество витков и наматываются двумя проводами одновременно. Рассчитаем число витков дросселя w , применив в качестве сердечника ферритовое кольцо марки 2000НМ1 К12×8×3:

$$w = \sqrt{\frac{L_1 l_{cp}}{4\pi \cdot 10^{-7} \mu S_C}}, \quad (3.7)$$

где L_1 — индуктивность дросселя;

l_{cp} — средняя длина магнитной линии;

μ — относительная магнитная проницаемость;

S_C — площадь сечения сердечника.

Средняя длина магнитной линии сердечника равна:

$$l_{cp} = \pi \frac{D+d}{2} = \pi \frac{12+8}{2} = 31,4 \text{ мм} = 3,14 \cdot 10^{-2} \text{ м}, \quad (3.8)$$

где D — внешний диаметр сердечника;

d — внутренний диаметр сердечника.

$$S_C = h \frac{D-d}{2} = 3 \cdot \frac{12-8}{2} = 6 \text{ мм}^2 = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2, \quad (3.9)$$

где h — высота сердечника;

$$w_1 = \sqrt{\frac{L_1 \cdot l_{cp}}{4\pi \cdot 10^{-7} \mu \cdot S_C}} = \sqrt{\frac{5 \cdot 10^{-3} \cdot 3,14 \cdot 10^{-2}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1223 \cdot 6 \cdot 10^{-6}}} = 130 \text{ вит.} \quad (3.10)$$

Вычислим ток I_{L_1} через дроссель:

					БР-02069964-11.03.04-14-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		26

$$I_{L1} = \frac{P_{ИБП}}{U_{сет}} = \frac{25}{220} = 0,114 \text{ А}, \quad (3.11)$$

где $P_{ИБП}$ — мощность источника питания;

$U_{сет}$ — сетевое напряжение.

Найдём площадь поперечного сечения провода $S_{np1} = S_{np2}$, приняв плотность тока равной $j = 3 \text{ А/мм}^2$:

$$S_{np1} = S_{np2} = \frac{I_{L1}}{j} = \frac{0,114}{3} = 0,038 \text{ мм}^2. \quad (3.12)$$

Откуда найдём диаметр d_2 :

$$d_2 = \sqrt{\frac{4S_{np1}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,038}{\pi}} = 0,22 \text{ мм}. \quad (3.13)$$

Выберем обмоточный провод марки ПЭТ-155-0,25.

Выберем диодный выпрямительный мост VD1 марки DF10M.

Проведем расчет трансформатора.

Напряжение и ток первичной обмотки трансформатора составляют:

$$U_1 = \sim 220 \text{ В}, I_1 = 0,114 \text{ А}.$$

Напряжения и токи вторичных обмоток трансформатора составляют:

$$1) \quad U_{21} = \sim 21 \text{ В}, I_1 = 0,2 \text{ А};$$

$$2) \quad U_{22} = \sim 21 \text{ В}, I_2 = 0,2 \text{ А};$$

U_{21} и U_{22} берем с учетом падения напряжения на диодах (по 1 В на каждом) и микросхеме стабилизатора (2,5 В).

Найдём значение произведения площади поперечного сечения S_c на площадь окна S_0 сердечника трансформатора.

$$S_c S_0 = \frac{t_{II} P_T}{k_c k_0 j B_m} = \frac{2,98 \cdot 10^{-5} \cdot 25}{1 \cdot 0,18 \cdot 3 \cdot 10^6 \cdot 0,38} = 1,176 \cdot 10^{-9} \text{ м}^4, \quad (3.14)$$

					БР-02069964-11.03.04-14-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		27

где t_H — длительность импульсов;

P_r — габаритная мощность;

k_c — коэффициент заполнения сердечника;

k_0 — коэффициент заполнения окна;

B_m — индукция.

Полученному значению $S_C S_0$ удовлетворяет сердечник 7x4x1,5.

Рассчитаем количество витков в первичной обмотке:

$$w_1 = \frac{t_H U_1}{S_C k_c 2 B_m} = \frac{2,98 \cdot 10^{-5} \cdot 220}{4,4 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 0,38} = 40 \text{ вит.} \quad (3.15)$$

Рассчитаем диаметр провода:

$$S_{1np} = \frac{I_1}{j} = \frac{0,114}{3} \approx 0,038 \text{ мм}^2, \quad (3.16)$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{1np}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,038}{\pi}} = 0,22 \text{ мм.} \quad (3.17)$$

Выберем обмоточный провод марки ПЭТ-155-0,25.

Найдём коэффициент трансформации n_1 , n_2 для каждого канала:

$$n_1 = n_2 = \frac{U_{21}}{U_1} = \frac{21}{220} = 0,095; \quad (3.18)$$

Вычислим количество витков во вторичных обмотках w_{21} , w_{22} :

$$w_{21} = w_{22} = w_1 \cdot n_1 = 40 \cdot 0,095 = 4 \text{ вит;} \quad (3.19)$$

Задавшись плотностью тока в обмотках трансформатора равной $j = 3 \text{ А/мм}^2$ рассчитаем площадь поперечного сечения провода и его диаметр:

					БР-02069964-11.03.04-14-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		28

$$S_{21np} = S_{22np} = \frac{I_{21}}{j} = \frac{0,2}{3} = 0,066 \text{ (мм}^2\text{)}, \quad (3.20)$$

$$d_{21} = d_{22} = \sqrt{\frac{4S_{21np}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,066}{\pi}} = 0,3 \text{ (мм)}. \quad (3.21)$$

Выберем обмоточный провод марки ПЭТ-155-0,3.

Расчет выпрямителей.

Для первого и второго каналов с учетом падения напряжения на вентилях выпрямителя выпрямленное напряжение будет равно:

$$U_{d1} = U_{d2} = 0,9U_1 - 2 = 0,9 \cdot 21 - 2 = 16,9 \text{ (В)}. \quad (3.22)$$

Обратное напряжение на диодах U_{vm} выпрямителя составляет:

$$U_{vm} = \frac{\pi}{2} U_1 = 1,57 \cdot 21 = 33 \text{ (В)}. \quad (3.23)$$

Среднее значение тока через диод I_{vc} равно:

$$I_{vc} = \frac{I_1}{2} = \frac{0,2}{2} = 0,1 \text{ (А)}. \quad (3.24)$$

По справочнику выбираем диодные мосты VD5 и VD6 для обоих каналов марки DF10M, параметры которых: $I = 1 \text{ А}$; $U_{обр} = 1000 \text{ В}$.

Выбор линейных стабилизаторов напряжения.

По справочнику для стабилизации напряжения в первом и втором каналах выбираем стабилизатор серии LM78M15, параметры которого: $U_{ст} = +15 \text{ В}$; $U_{ВХ} = 17,5 \div 35 \text{ В}$; $I_{max} = 0,5 \text{ А}$.

Расчёт LC-фильтров для каналов +15 и -15 В.

Коэффициент пульсаций на выходе выпрямителя q_1 :

					БР-02069964-11.03.04-14-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		29

$$q_1 = \frac{2}{m^2 - 1} = \frac{2}{2^2 - 1} = 0,67, \quad (3.25)$$

где $m = 2$ — фазность выпрямителя.

Требуемый коэффициент сглаживания фильтра:

$$S = \frac{q_1}{q_2} = \frac{0,67}{0,3} = 2,23. \quad (3.26)$$

$$X_{C12} = X_{C13} = 0,01 \cdot R_H = 0,01 \cdot \frac{U_H}{I_H} = 0,845 \text{ (Ом)}; \quad (3.27)$$

$$C12 = C13 = \frac{1}{\omega \cdot X_{C8}} = 7,8 \cdot 10^{-6} \text{ (Ф)}. \quad (3.28)$$

Выбираем конденсаторы $C12$ и $C13$ типа К50-35-25В-10 мкФ.

Определим величину индуктивности сглаживающих дросселей $L2$ и $L3$:

$$L_2 = L_3 = \frac{S}{\omega^2 C12} = \frac{2,23}{(1,256 \cdot 10^5)^2 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ (Гн)}. \quad (3.29)$$

Выбираем дроссели $L2$ и $L3$ типа ЕС24-101К с индуктивностью 15 мкГн.

На выходе стабилизаторов напряжения выбираем помехоподавляющие конденсаторы 1 мкФ. Для подавления высокочастотных помех на входе и выходе стабилизатора ставят высокочастотные конденсаторы емкостью 100 нФ.

Для разряда емкостей фильтра в случае работы источника питания без нагрузки предусмотрены балластные резисторы $R9$ и $R10$ сопротивлением по 10 кОм.

4 Разработка конструкции источника питания характериографа для МДП-транзисторов

4.1 Конструкторский расчёт печатной платы

Для проведения конструкторского расчёта имеются следующие данные:

- плата односторонняя с размерами 160x100 мм;
- материал основания — стеклотекстолит фольгированный марки СФ-2-35 ГОСТ 10316-78 толщиной 2 мм;
- резистивное покрытие — олово-свинец;
- шаг координатной сетки — 2,5 мм;
- точность выполнения элементов конструкции печатной платы — по первому классу.

Согласно таблице 2 [1], первому классу точности соответствуют следующие минимальные значения основных параметров элементов конструкции печатной платы для узкого места:

- ширина печатного проводника $t' = 0,75$ мм;
- расстояние между краями соседних элементов проводящего рисунка $S' = 0,75$ мм;
- расстояние от края просверленного отверстия до края контактной площадки (гарантийный пояс) $b' = 0,30$ мм;
- отношение диаметра неметаллизированного отверстия к толщине печатной платы $\gamma^* = 0,4$.

Номинальные значения диаметров переходных металлизированных и монтажных отверстий определяются по формуле:

$$d' = d_{\text{э}} + r' + |\Delta d'_{\text{НО}}|, \quad (4.1)$$

где $d_{\text{э}}$ — максимальное значение диаметра вывода навесного элемента,

					БР-02069964-11.03.04-14-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		31

устанавливаемого на печатную плату; r' — разность между минимальным значением диаметра отверстия и максимальным значением диаметра вывода устанавливаемого элемента; $\Delta d'_{\text{НО}}$ — нижнее предельное отклонение номинального значения диаметра отверстия.

Конструкция разрабатываемого устройства включает в себя элементы со следующими диаметрами выводов:

- 0,8 мм — конденсаторы К50–35, конденсаторы К10–17Б, микросхема TDE1898C_SIP9, микросхемы КР140УД17, диоды КД521А, транзисторы 2N6488G, 2N6491G, трансформатор, резисторы, разъем;

- 1,3 мм — диоды КД521А.

Значение r' выбирается в пределах $0,1 \div 0,4$ мм. Согласно таблице 3.2 [1], значение $\Delta d'_{\text{НО}}$ для печатных плат первого класса точности составляет 0,1 мм.

Для пайки проводов диаметром 0,8 мм:

$$d_3' = 0,8 + 0,2 + 0,1 = 1,1 \text{ мм} . \quad (4.2)$$

Для пайки проводов диаметром 1,3 мм:

$$d_3' = 1,3 + 0,2 + 0,1 = 1,6 \text{ мм} . \quad (4.3)$$

Для расчета наименьшего номинального значения диаметра контактной площадки под выбранное отверстие для печатных плат используется следующая формула:

$$D_{\text{КП}} = d' + \Delta d'_{\text{ВО}} + 2 \cdot b' + \Delta t_{\text{ВО}} + 2 \cdot \Delta \cdot d'_{\text{ТР}} + \left[T_{d'}^2 + T_{D_{\text{КП}}}^2 + t_{\text{НО}}^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4.4)$$

где $d'_{\text{ВО}}$ — верхнее предельное отклонение диаметра отверстия; $\Delta t'_{\text{ВО}}$ и $\Delta t'_{\text{НО}}$ — верхнее и нижнее предельные отклонения диаметра контактной площадки; $T_{d'}^2$ — позиционный допуск расположения отверстия; $T_{D_{\text{КП}}}^2$ — позиционный

допуск расположения центра контактной площадки.

Согласно таблицам 3 — 4 [1] для печатной платы, изготовленной по первому классу точности $d'_{\text{ВО}} = 0,1$ мм, $T_{d'}^2 = 0,2$ мм; $T_{D_{\text{КП}}}^2 = 0,35$ мм; $\Delta t'_{\text{НО}} = 0,1$ мм.

Для отверстий диаметром 0,8 мм получаем:

$$D_{\text{КП}} = 0,8 + 2 \cdot 0,1 + [0,2^2 + 0,35^2 + 0,1^2]^{\frac{1}{2}} = 1,4 \text{ мм}. \quad (4.5)$$

Для отверстий диаметром 1,5 мм получаем:

$$D_{\text{КП}} = 1,3 + 2 \cdot 0,1 + [0,2^2 + 0,35^2 + 0,1^2]^{\frac{1}{2}} = 1,9 \text{ мм}. \quad (4.6)$$

Наименьшее значение ширины проводника рассчитывается по формуле:

$$t' = t'_{\text{МД}} + |\Delta t'_{\text{НО}}|, \quad (4.7)$$

где $t'_{\text{МД}}$ — минимально допустимая ширина проводника.

Учитывая, что значение $t'_{\text{МД}}$ для первого класса точности составляет 0,75 из таблицы 4 [1], получаем:

$$t' = 0,75 + 0,1 = 0,85 \text{ мм}. \quad (4.8)$$

Номинальное значение расстояния между соседними элементами проводящего рисунка определяется по формуле:

$$S' = S'_{\text{МД}} + \Delta t'_{\text{ВО}}, \quad (4.9)$$

где $S'_{\text{МД}}$ — минимально допустимое расстояние между соседними элементами проводящего рисунка.

					БР-02069964-11.03.04-14-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		33

Учитывая, что значение $S'_{\text{мд}}$ для первого класса точности составляет 0,75 из таблицы 3.1 [1], получаем:

$$S' = 0,75 + 0,1 = 0,85 \text{ мм} . \quad (4.10)$$

Расчёт минимального расстояния для прокладки n -го количества проводников между двумя отверстиями с контактными площадками диаметрами $D_{\text{кп1}}$ и $D_{\text{кп2}}$ производят по формуле:

$$l' = \frac{(D_{\text{кп1}} + D_{\text{кп2}})}{2} + t' \cdot n + S' \cdot (n + 1) + T'_1, \quad (4.11)$$

где T'_1 — позиционный допуск расположения печатного проводника относительно соседнего элемента проводящего рисунка.

Согласно таблице 8 [1], значение T'_1 для односторонних печатных плат первого класса точности составляет 0,2 мм.

Таким образом, для $n = 1$ и $D_{\text{кп1}} = D_{\text{кп2}} = 1,3$ мм получим:

$$l'_1 = \frac{(1,3 + 1,3)}{2} + 0,85 + 0,85 \cdot (1 + 1) + 0,2 = 4,05 \text{ мм} . \quad (4.12)$$

Проведение анализа результатов конструкторского расчёта печатной платы источника питания характерографа для МДП-транзисторов, показывает, что результаты полученные в ходе расчета удовлетворяют требованиям топологии рисунка печатной платы.

4.2 Расчет электрических параметров печатной платы

Ключевую роль в схемах занимает вопрос связи между отдельными элементами. Требуется определить не только параметры линий связи, но также и влияние, оказываемое ими друг на друга. Электрическое сопротивление проводников с покрытием определяется по формуле:

$$R = \frac{\rho}{h'} \sum_{i=1}^{m'} \frac{L'_i}{t'_i}, \quad (4.13)$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление; h' — толщина печатного проводника с покрытием; m' — количество участков печатного проводника, имеющих различную ширину; L'_i — длина i -ого участка; t'_i — ширина проводника на i -ом участке.

Определим электрическое сопротивление проводника «земли».

В этом случае при $\rho = 1,72 \cdot 10^{-8}$ Ом/м, $h' = 50 \cdot 10^{-6}$ м, $t' = 7,5 \cdot 10^{-4}$ м $L = 0,13$ м, получаем:

$$R = \frac{1,72 \cdot 10^{-8} \cdot 0,13}{50 \cdot 10^{-6} \cdot 7,5 \cdot 10^{-3}} = 0,006 \text{ Ом}. \quad (4.14)$$

Допустимая нагрузочная способность по току на элементы проводящего рисунка рассчитываются из условия допустимого превышения температуры окружающей среды. Для медного печатного проводника толщиной 35 мкм, шириной 0,75 мм при нагреве на 20 °С она составит 1,5 А, что следует из рисунка 3.4 [1].

Величина допустимого рабочего напряжения между элементами проводящего рисунка для $S' = 0,75$ мм, согласно ГОСТ 23751-86, равна 350 В.

Допустимое падение напряжения на проводнике вычисляется по формуле:

					БР-02069964-11.03.04-14-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		35

$$U = \frac{\rho \cdot L_i}{h \cdot t'} \cdot I, \quad (4.15)$$

где I — ток через проводник.

Ток протекающий по данным проводникам не превышает 0,159 А, тогда:

$$U = 0,006 \times 0,159 = 0,00095B. \quad (4.16)$$

В данной схеме допустимое падение напряжения в цепях «питание» и «сигнал» не должно превышать 1—2% от номинального. Полученные в ходе расчетов результаты удовлетворяют установленному требованию.

Для определения помехоустойчивости устройств электронной техники на ПП, необходимо рассчитать емкостную и индуктивную составляющие паразитной связи, которые зависят от паразитной емкости C_{II} между печатными проводниками и паразитной взаимоиндукции M между ними.

Паразитная емкость между двумя печатными проводниками определяется по формуле:

$$C_{II} = C_{\text{ПОГ}} \times l_{\text{ПЕР}}, \quad (4.17)$$

где $C_{\text{ПОГ}}$ — печатная емкость связи между двумя проводниками, $l_{\text{ПЕР}}$ — длина взаимного перекрытия проводников.

Паразитная емкость между проводниками, имеющими наибольшую длину перекрытия 90 мм, при $C_{\text{ПОГ}} = 0,3$ пФ/мм будет рассчитываться по следующей формуле:

$$C_{II} = 0,3 \times 90 = 27 \text{ пФ}. \quad (4.18)$$

Индуктивность печатного прямоугольного проводника вычисляется по формуле:

$$L_{\text{ПР}} = L_{\text{ПОГ}} \cdot l_{\text{ПП}}, \quad (4.19)$$

где $L_{\text{ПОГ}}$ — погонная индуктивность плоского прямоугольного проводника; $l_{\text{ПП}}$ — длина печатного проводника.

Определим индуктивность наиболее длинного проводника, при $l_{\text{ПП}} = 178$ мм, $L_{\text{ПОГ}} = 10$ нГн/мм, рис. 3.8 [1]:

$$L_{\text{ПР}} = 10 \times 178 = 1,78 \text{ мкГн}, \quad (4.20)$$

Взаимоиндукция между печатными проводниками рассчитывается по формуле:

$$M_{\text{ПП}} = M_{\text{ПОГ}} \cdot l_{\text{ПЕР}}, \quad (4.21)$$

где $M_{\text{ПОГ}}$ — погонная взаимоиנדукция.

Определим взаимоиנדукцию между проводниками, имеющие наибольшую длину перекрытия, при $M_{\text{ПОГ}} = 3,5$ нГн, $l_{\text{ПЕР}} = 90$ мм:

$$M_{\text{ПП}} = 3,5 \times 90 = 315 \text{ нГн}. \quad (4.22)$$

4.3 Разработка печатной платы устройства

В соответствии с техническим заданием произведем разработку печатной платы установки. Проектируемую печатную плату будем изготавливать прямоугольной формы с габаритными размерами 160x100 мм.

В качестве материала основания будем использовать двусторонний фольгированный стеклотекстолит марки СФ-2-35 ГОСТ 10316-78 толщиной 2 мм.

					БР-02069964-11.03.04-14-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		37

Благодаря своим оптимальным электрическим, химическим и механическим характеристикам, относительно общей распространенности и стоимости других марок стеклотекстолита, был выбран именно этот.

Толщина материала 2 мм соответствует требованиям условий эксплуатации к механической прочности печатной платы.

После формирования печатного рисунка плату необходимо покрыть сплавом «Розе» для улучшения способности к пайке и сохранения электрических параметров проводников. Также этот сплав предотвращает окислительные процессы.

Сборочный чертёж и чертёж печатной платы, дающие полное представление о конструкции печатной платы, приведены в Приложении В, Г.

С помощью программного обеспечения National Instruments Ultiboard в соответствии с произведенными в предыдущих пунктах расчетах, произвел размещение компонентов на печатной плате. Сделал трассировку печатных проводников. Разработанная плата с помощью программного обеспечения NI Ultiboard представлена на рисунке 4.1.

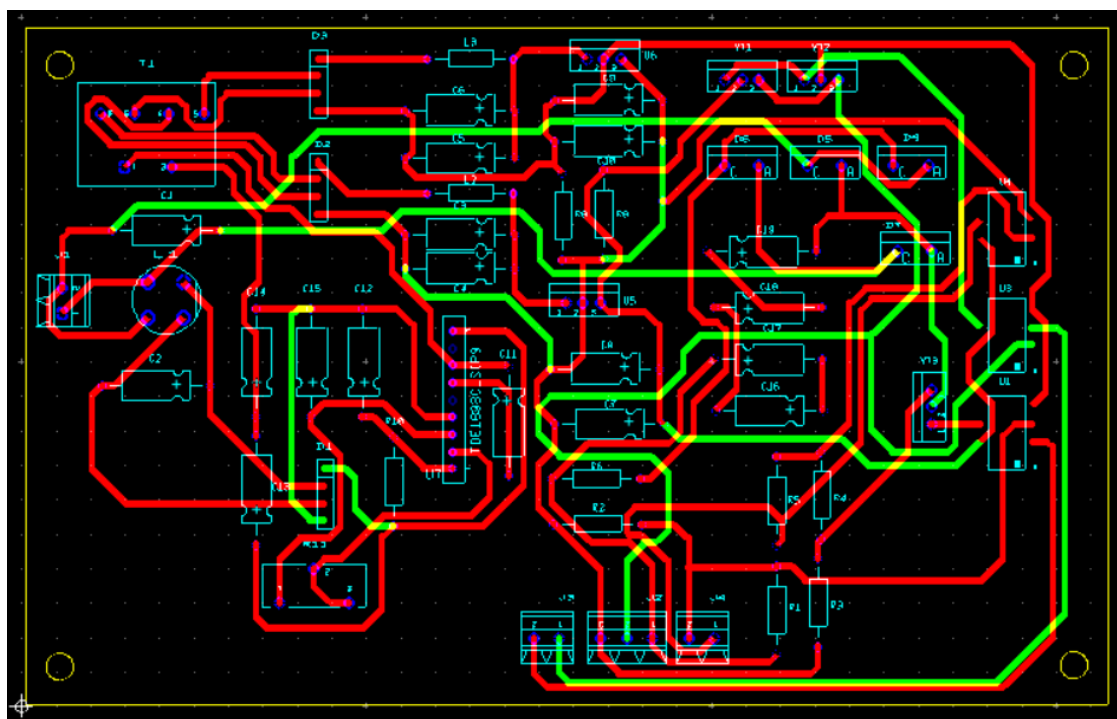


Рисунок 4.1 — Печатная плата разрабатываемого устройства

Трехмерное изображение платы проиллюстрировано на рисунке 4.2.

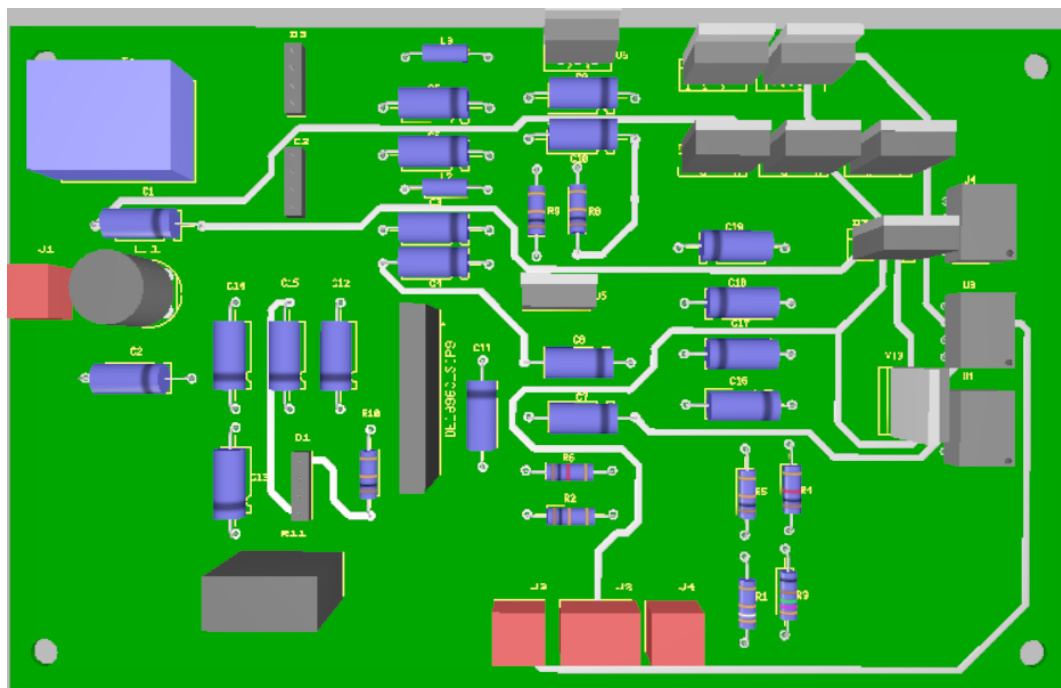


Рисунок 4.2 — 3D модель верхней стороны печатной платы

Трассировка дорожек с обратной стороны платы показана на рисунке 4.2.

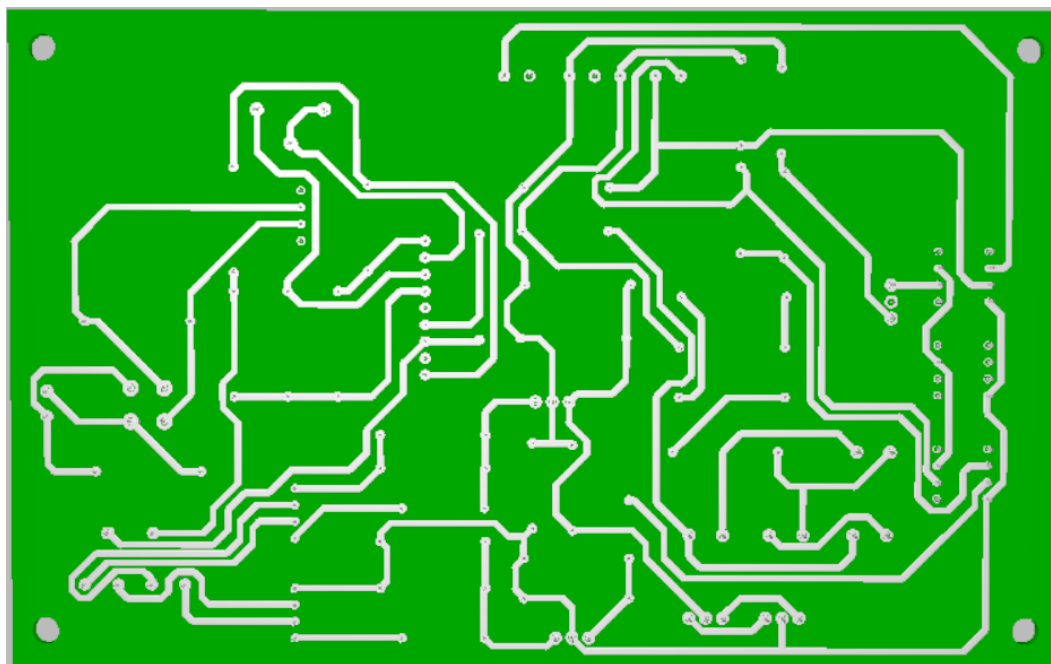


Рисунок 4.3 — 3D модель обратной стороны печатной платы

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

БР-02069964-11.03.04-14-19

Лист

39

Изучение и анализ технического задания на разрабатываемое устройство, в состав которого входит проектируемая печатная плата, а также анализ схемотехнических решений и общей конструкции устройства, позволяет сделать выбор и обоснование основных параметров печатной платы.

Невысокая плотность позволяет изготовить её в соответствии с первым классом точности выполнения элементов печатного рисунка. Печатные платы 1—2-го классов точности просты в исполнении, надёжны в эксплуатации и имеют минимальную стоимость, 3—5 классов требуют использования высококачественных материалов, инструмента и оборудования.

4.4. Выбор корпуса для разрабатываемого устройства

Для защиты устройства от воздействий окружающей среды; снижения конечной стоимости изделия выбрал корпус для характериографа. Корпус должен соответствовать габаритным показателям готовой печатной платы; иметь небольшой запас объема для монтажа в корпус. Подобрал готовый корпус G2018C. Внешний вид корпуса представлен на рисунке 4.4.



Рисунок 4.4 — Внешний вид корпуса G2018C

					БР-02069964-11.03.04-14-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		40

Он обладает следующими характеристиками:

- материал — поликарбонат;
- высота корпуса — 90 мм;
- длина корпуса — 240 мм;
- ширина корпуса — 160 мм;
- температурный диапазон — от -40°C до $+125^{\circ}\text{C}$.

Корпус комплектуется прозрачной крышкой. Крышка даст возможность легкого доступа к плате устройства, а прозрачность повысит безопасность устройства, благодаря визуальному доступу внутренних элементов. Корпус обладает защитой IP 65. Эта степень защиты гарантирует полную недоступность во внутрь корпуса пыли и струй воды. У корпуса высокая ударная прочность.

					БР-02069964-11.03.04-14-19	Лист
						41
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения выпускной квалификационной работы в соответствии с техническим заданием разработан источник питания характериографа для МДП-транзисторов.

Рассмотрены наиболее распространенные существующие технические решения характериографов. Проанализированы их достоинства и недостатки.

Разработана электрическая принципиальная схема проектируемого устройства, при помощи программного обеспечения sPlan 7.0. В программной среде NI Multisim 10.0 выполнено моделирование схемы.

При помощи программного обеспечения NI Ultiboard 10.0 разработана топология печатной платы на основе электрической принципиальной схемы. Печатная плата обладает следующими геометрическими размерами: длина — 160 мм, ширина 100 мм. Был подобран корпус устройства, подходящий по габаритным размерам.

Разработанное устройство позволяет снимать вольт-амперные характеристики МДП-транзисторов.

					БР-02069964-11.03.04-14-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 ГОСТ Р 53429-2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции. – Москва: Изд-во стандартов, 2009. – 6 с.

2 Розанов Ю. К., Рябчицкий М. В., Кваснюк А. А. Силовая электроника: учебник для вузов / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, А. А. Кваснюк. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 632 с.

3 Гуртов В. А. Электронные процессы в структурах металл - диэлектрик – полупроводник. / В. А. Гуртов. – Петрозаводск, 1984. – 116 с.

4 Гуртов В. А. Полевые транзисторы со структурой металл - диэлектрик – полупроводник. / В. А. Гуртов. – Петрозаводск, 1984. – 92 с.

5 Степаненко И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. / И. П. Степаненко. – М.: Энергия, 1977. – 671 с.

6 Пасынков В. В. Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. – СПб.: Лань, 2002. – 480 с.

7 Нестеренко Б. К. Интегральные операционные усилители: Справочное пособие по применению. / Нестеренко Б. К. – М.: Энергоиздат, 1982. – 128 с.

8 Крэккрафт Д., Джерджли С. Аналоговая электроника. Схемы, системы, обработка сигнала / Д. Крэккрафт, С. Джерджли – пер. с англ. – М.: Техносфера, 2005. – 360 с.

					БР-02069964-11.03.04-14-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		43

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

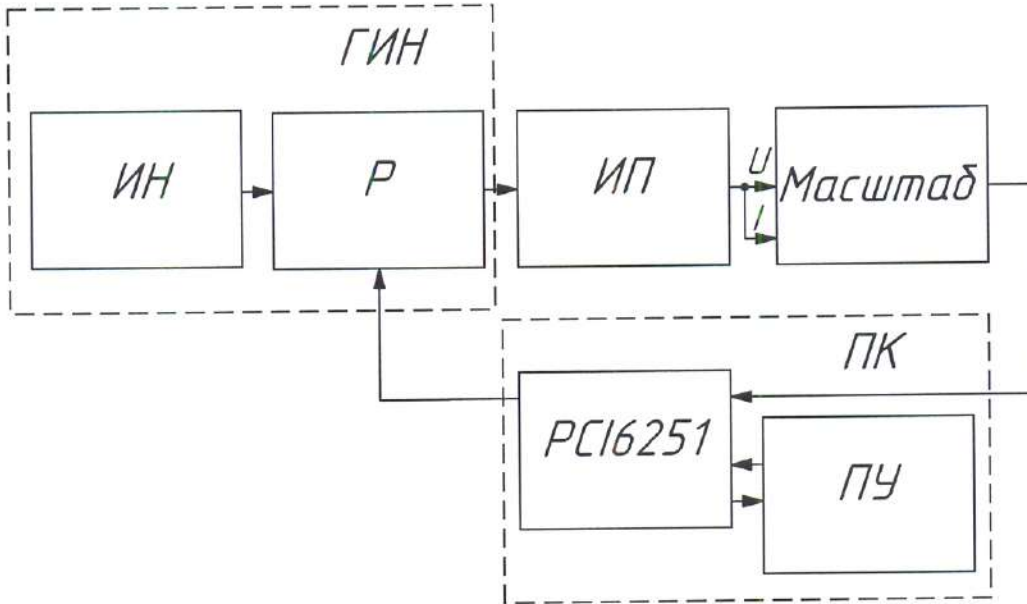
Структурная схема источника питания характериографа

					БР-02069964-11.03.04-14-19	Лист
						44
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

БР-02069964-11.03.04-14-19

Перв. примен.

Справ. №



ГИН - генератор импульсного напряжения
 ИН - источник напряжения
 Р - регулятор
 ИП - испытуемый прибор
 ПК - персональный компьютер
 ПУ - программа управления

БР-02069964-11.03.04-14-19

Структурная схема
 источника питания
 характериографа

Лит.	Масса	Масштаб
Лист		Листов 1

Инв. № подл.	Т. контр.	Н. контр.	Утв.
		Шестёркина	Беспалов
		19.06.19	24.06.19

МГУ им. Н. П. Огарёва
 ИЭС ЭиНЭ 411 гр.

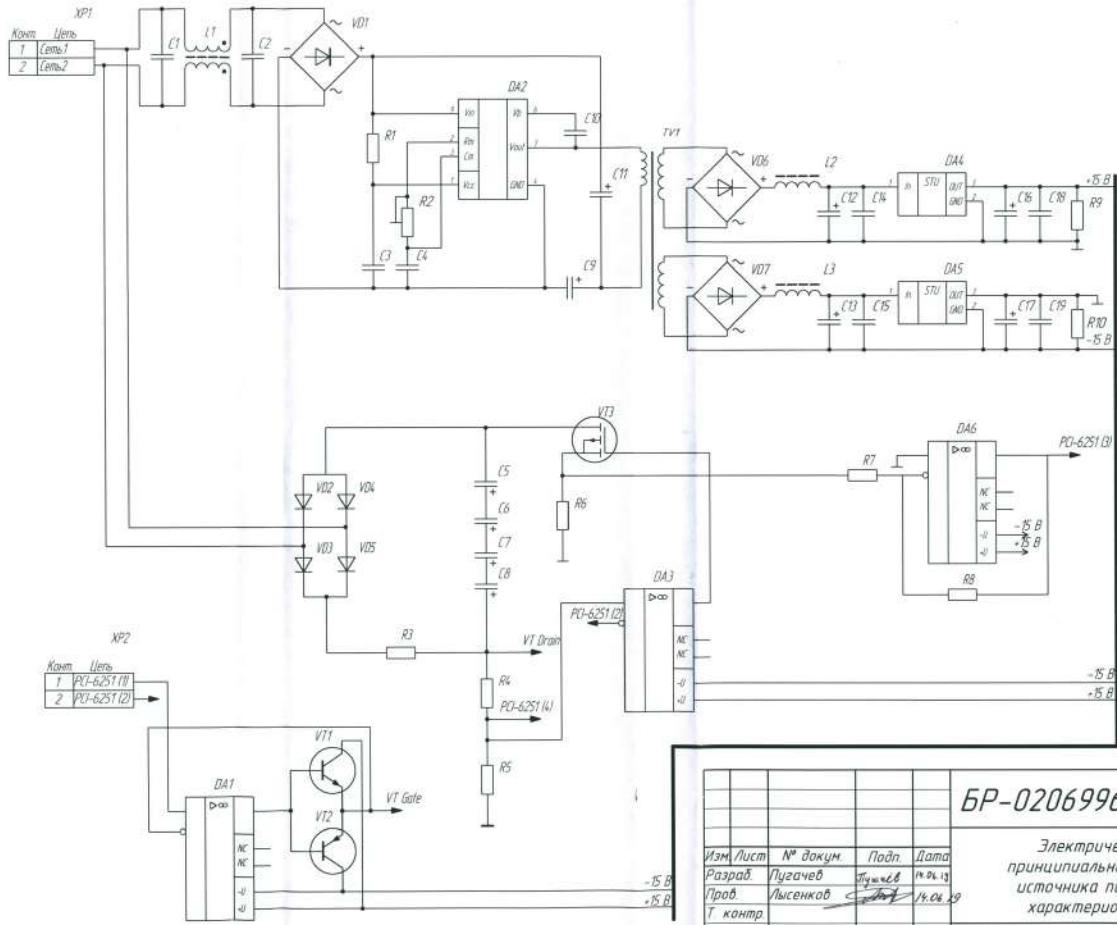
ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

**Электрическая принципиальная схема источника питания
характериографа**

					БР-02069964-11.03.04-14-19	Лист
						45
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

БР-02069964-11.03.04-14-19 ЭЗ



XP3

Цель	Конт
← PC1-6251 (3)	1
← PC1-6251 (4)	2

XP4

Цель	Конт
← VT Drain	1
← VT Gate	2
← VT Source	3

БР-02069964-11.03.04-14-19 ЭЗ

Электрическая
принципиальная схема
источника питания
характериографа

Изм/Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.	Лукачев	Лукачев	11.04.13
Проб.	Лысенков	Лысенков	14.04.13
Т. контр.			
Н. контр.	Шестеркина	Шестеркина	19.04.13
Чтв.	Беспалов	Беспалов	24.04.13

Лит.	Масса	Масштаб
Лист	Листов 1	
МГУ им. Н. П. Огарева ИЭС ЭИИЭ 411 гр.		

Перв. примен.

Справ. №

Подп. и дата

Взаим. инв. № инв. № дубл.

Подп. и дата

Инв. № подл.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

Печатная плата источника питания характериографа

					БР-02069964-11.03.04-14-19	Лист
						46
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

БР-02069964-11.03.04-14-19 ПП

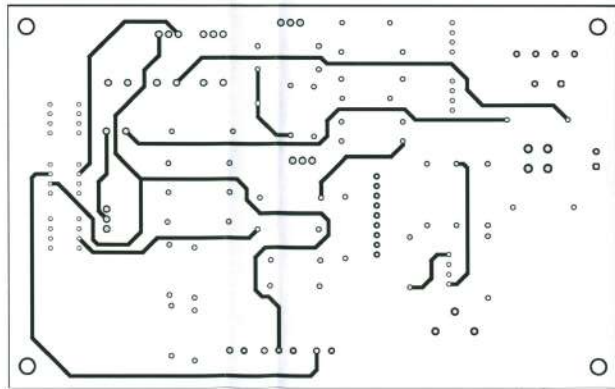
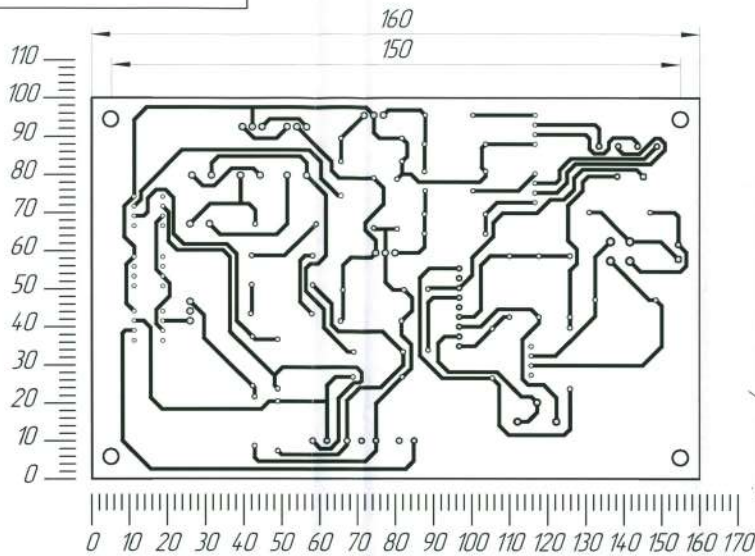


Таблица 1

Условное обозначение	Диаметр отверстия, мм	Размер элемента проводящего рисунка, мм	Количество отверстий	Примечание
•	0,8	1,2 x 1,2	100	метал.
○	1,2	2,0 x 2,0	4,8	метал.
○	3,5	4,0 x 4,0	4	метал.

1. Плату изготовить комбинированным методом.
2. Шаг координатной сетки 1,25 мм.
3. Конфигурация проводников выдерживать по чертежной сетке.
4. Расстояние между проводниками не менее 0,3 мм.
5. Допускается в узких местах занижение контактных площадок до 0,15 мм.
6. Проводники покрыть сплавом "Розе".
7. Плата должна соответствовать ГОСТ 23752-79

БР-02069964-11.03.04-14-19 ПП				Лит	Масса	Масштаб	
Изм	Лист	№ докум	Подп	Дата			
Разраб.	Лугачев	Фигачев	14.03.19				
Проб	Льсенков	14.03.19					
Г. контр						Лист	Листов 1
И. контр	Шестеркина	14.03.19					МГУ им. Н. П. Огарева
Утв.	Беспалов	14.03.19					ИСЗ ЭИИЗ 411 гр.
Печатная плата источника питания характеристикографа					1:1		
Стеклотекстолит фольгированный							

Перв. примен.
Справ. №
Подп. и дата
Взам. инв. №
Инв. № подл.

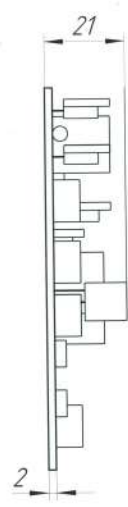
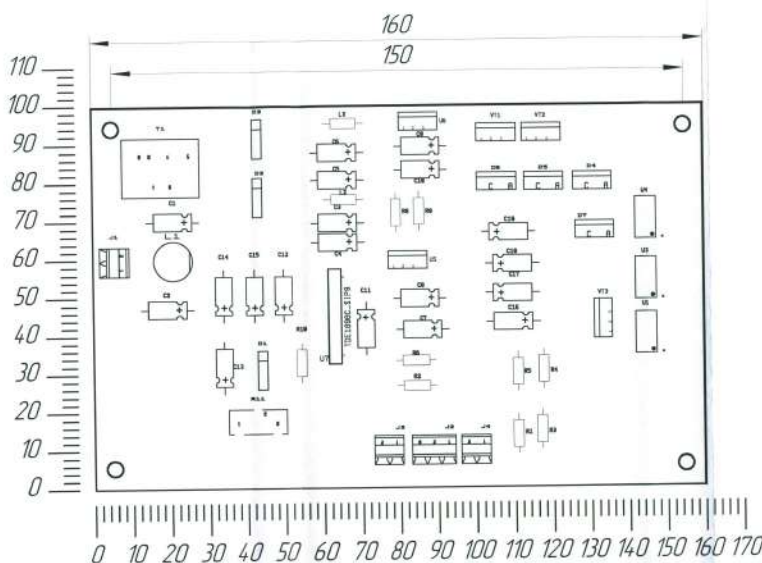
ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(обязательное)

Сборочный чертеж печатной платы

					БР-02069964-11.03.04-14-19	Лист
						47
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

БР-02069964-11.03.04-14-19 СБ



1. Припой ПОС-61 ГОСТ 21931-76.
2. Установку элементов производить по ОСТ4 ГО.О10.030-81.
3. Печатные проводники и переходные отверстия условно не показаны.
4. Плату после сборки покрыть эмалью ЭП-572, белый, ТУ6-10-1539.
5. Забодской номер, обозначения элементов маркировать краской ЧМ, черный, БМ, белый, ТУ029-02-859-78. Шрифт 2,5 по НО. О10. 007.
6. Места расположения маркировки показаны условно

				БР-02069964-11.03.04-14-19 СБ			
Изм/Лист	№ докум	Подп	Дата	Сборочный чертеж печатной платы	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.	Лукачев	Лукачев	14.06.19				1:1
Пров.	Лысенков	Лысенков	14.06.19		Лист		Листов 1
Т. контр.							
Н. контр.	Шестеркина	Шестеркина	14.06.19				МГУ им. Н. П. Огарёва ИЭС ЭИИЭ 411 гр.
Чтв.	Беспалов	Беспалов	14.06.19				

Перв. примен.

Справ. №

Подп. и дата

МФинв. № дробл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Инв. № подл.

ОТЗЫВ

на бакалаврскую работу
«Разработка источника питания характериографа для МДП-транзисторов»,
выполненную студентом направления «Электроника и наноэлектроника
Пугачевым Валерием Игоревичем

В рамках указанной работы дипломник разрабатывал источник питания для тестирования мощных МДП-транзисторов. В соответствии с заданием в первой главе работы представлен обзор существующих характериографов, в том числе предназначенных для определения вольт-амперных характеристик транзисторов с МДП-структурой, проведен анализ их возможностей, выявлены недостатки. Во второй главе описана структурная схема разрабатываемого устройства. Третья глава посвящена электрической принципиальной схеме. В четвертой главе проведен расчет печатной платы.

С поставленными задачами дипломник, в целом, справился. Изучил работу системы сквозного проектирования Circuit Design, в состав которой входят схемотехнический симулятор NI Multisim и система проектирования печатных плат NI Ultiboard, продемонстрировал навыки пользования программой для создания чертежей sPlan 7.0.

Считаю, что Пугачев В. И. заслуживает оценки «хорошо» и присвоения квалификации бакалавра по направлению подготовки «Электроника и наноэлектроника».

Руководитель работы
ст. преподаватель кафедры
электроники и наноэлектроники



А. Е. Лысенков