

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ,.....	6
СИМВОЛОВ И ТЕРМИНОВ	6
ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ И СХЕМОТЕХНИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ СВЧ МАГНЕТРОНА	9
2 ОБЩЕТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЗРАБОТКИ УСТРОЙСТВА	17
2.1 АНАЛИЗ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ.....	17
2.2 ФОРМИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ.....	21
К РАЗРАБАТЫВАЕМОЙ КОНСТРУКЦИИ	21
3 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМ УСТРОЙСТВА	25
4 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ПРОЕКТИРУЕМОГО ИЗДЕЛИЯ	30
4.1 ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ, КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, УСТАНОВОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ, МАТЕРИАЛОВ КОНСТРУКЦИИ И ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ.....	30
4.2 ВЫБОР ТИПА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОНТАЖА, ЭЛЕМЕНТОВ КРЕПЛЕНИЯ И ФИКСАЦИИ	41
4.3 ВЫБОР СПОСОБОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НОРМАЛЬНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА УСТРОЙСТВА (ВЫБОР СПОСОБА ОХЛАЖДЕНИЯ НА РАННЕЙ СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ; ВЫБОР НАИМЕНЕЕ ТЕПЛОСТОЙКИХ ЭЛЕМЕНТОВ, ДЛЯ КОТОРЫХ НЕОБХОДИМО ПРОВЕДЕНИЕ ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА)	43
4.4 ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ.....	46
5 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРОЕКТИРУЕМОГО ИЗДЕЛИЯ	50
5.1 РАСЧЕТ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА	50
5.2 РАСЧЕТ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ	56
5.3 РАСЧЕТ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ	58
5.4 РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ	62
6. ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ПАКЕТОВ ПРИКЛАДНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ.	66
7. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ	69

8. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ СБОРКИ ПРОЕКТИРУЕМОГО УСТРОЙСТВА.	73
9. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ WI-FI МОДУЛЕМ	75
9.1 АНАЛИЗ ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ МОДУЛЯ	75
9.2 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАБОТЫ ПРОГРАММЫ.	77
10 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЗРАБОТКИ И ПРОИЗВОДСТВА ДИСТАНЦИОННО УПРАВЛЯЕМОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ СВЧ МАГНЕТРОНА СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ	80
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	90
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	92
ПРИЛОЖЕНИЕ А	97
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	102
ПРИЛОЖЕНИЕ В	109
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	113
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	114

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ И ТЕРМИНОВ

<i>AD</i>	– <i>Analog-digital</i>
<i>AHB</i>	– <i>Advanced High-performance Bus</i>
<i>GPIO</i>	– <i>General Purpose Input/Output</i>
<i>PWM</i>	– <i>Pulse-width modulation</i>
<i>RISC</i>	– <i>Reduced Instruction Set Computer</i>
<i>ROM</i>	– <i>Read-Only Memory</i>
<i>SDK</i>	– <i>Software Development Kit</i>
<i>SPI</i>	– <i>Serial Peripheral Interface</i>
<i>SRAM</i>	– <i>Static Random Access Memory</i>
<i>UART</i>	– <i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i>
ЖК	– Жидкокристаллический
ПЛК	– Программируемый логический контроллер
ПП	– Печатная плата
РЭС	– Радиоэлектронное средство
СВЧ	– Сверхвысокие частоты
УГО	– Условное графическое обозначение
ШИМ	– Широтно-импульсная модуляция
ЭРЭ	– Электрорадиоэлемент

ВВЕДЕНИЕ

Дистанционно управляемый источник питания СВЧ магнетрона средней мощности – это электронное устройство способное на расстоянии осуществлять запуск и выключение подключённого к нему устройства (СВЧ магнетрона), так же регулирование режима его работы.

Развитие мощных магнетронов и научные исследования воздействия микроволновой энергии на различные материалы открыли широкие перспективы для промышленного применения СВЧ-техники и технологии.

Эффект микроволнового нагрева основан на поглощении электромагнитной энергии в диэлектриках. Поля СВЧ проникают на значительную глубину, которая зависит от свойств материалов. Взаимодействуя с веществом на атомном и молекулярном уровне, эти поля влияют на движение электронов, что приводит к преобразованию СВЧ-энергии в тепло.

Генераторное оборудование полностью электронное и работает практически безынерционно, благодаря чему уровень мощности СВЧ и момент ее подачи можно мгновенно изменять. Благодаря этим свойствам широкое распространение для питания СВЧ магнетронов получили импульсные источники питания.

Стремление сэкономить на внедрении нового оборудования нередко создает опасность для обслуживающего персонала, особенно если СВЧ-установки эксплуатируются ненадлежащим образом.

Во-первых, существует паразитное излучение, которое особенно опасно для глаз.

Во-вторых, опасность представляют высокие питающие напряжения 4 – 20 кВ не только из-за возможности поражения электрическим током, но и из-за неполного подавления рентгеновского излучения. Исходя из этого, наиболее удобным является управление СВЧ установкой на безопасном расстоянии. В дипломном проектировании эту проблему решает внедрения модуля дистанционного управления, позволяющего управлять источником питания.

Целью является проектирование конструкции дистанционно управляемого источника питания СВЧ магнетрона средней мощности.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Анализ литературно - патентных исследований, в котором проводится обзор конструктивных и схемотехнических особенностей импульсных источников питания СВЧ магнетрона, а также анализ самих патентных исследований.
2. Общетехническое обоснование разработки устройства, в котором проводится анализ исходных данных, а также сформированы основные технические

требования к разрабатываемому устройству.

3. Схемотехнический анализ радиоэлектронных средств (РЭС), где происходит разработка структурной и электрической принципиальной схем устройства.

4. Разработка конструкции проектируемого изделия, которая включает выбор элементной базы, конструктивных элементов, установочных изделий, материалов конструкции, защитных покрытий; выбор типа электрического монтажа, элементов крепления и фиксации; выбор способов обеспечения нормального теплового режима; выбор метода изготовления печатной платы;

5. Расчет параметров проектируемого изделия, где проводится расчет теплового режима; расчет на механические воздействия; расчет конструктивно-технологических параметров печатной платы; расчет электромагнитной совместимости.

6. Выбор пакетов прикладного программного обеспечения.

7. Разработка конструктивных элементов источника питания.

8. Разработка технологической схемы сборки проектируемого устройства.

9. Разработка программного обеспечения для управления *Wi-Fi* модулем и описание алгоритма его работы.

10. Выполнение технико-экономического обоснования.

Дипломный проект выполнен самостоятельно, проверен в системе «Антиплагиат». Процент оригинальности составляет%. Цитирования обозначены ссылками на публикации, указанными в «Списке использованных источников».

Скриншот приведен в приложении Д.

1 АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ И СХЕМОТЕХНИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ СВЧ МАГНЕТРОНА

Существуют различные методы реализации источников питания магнетронов как с конструктивной, так и со схемотехнической стороны. С помощью патентного исследования проводились сравнение уже существующих устройств и проектируемого.

Патентные исследования – это инструмент анализа, который позволяет решать технические, конъюнктурные и правовые задачи, связанные с разработкой и продвижением на рынок продукции, которая содержит научно-технические достижения [2].

Патентные исследования – исследования технического уровня объектов хозяйственной деятельности, их патентоспособности, патентной чистоты, конкурентоспособности (эффективности использования по назначению), которые базируются на патентной и прочих видах информации. Сегодня проведение патентных исследований выстраивается с опорой на анализ рынка продукции, которая является объектом патентных исследований [2].

Патентный поиск – это [3]:

- часть патентных исследований, которая должна проводиться на самых ранних этапах создания инновационных решений, перед регистрацией изобретения или полезной модели;
- процедура отбора информации, которая позволяет получить информацию, имеющую ключевое значение при принятии решений предприятием;
- выборка по фондам патентной документации для оценки охраноспособности изобретения, полезной модели, промышленного образца, а также для определения уровня техники – совокупности технических сведений, имеющих отношение к данному решению.

Такой поиск может производиться по нескольким различным признакам: конструкция, функции устройства, способ, вещество, элементы, параметры, свойства и явления [3].

Патентный поиск проводится в следующих целях [2]:

- проверка новизны технического решения;
- формирование базы знаний по той сфере деятельности, в которой производится выпуск продукции;
- выявление перспективных направлений для научно-исследовательской деятельности и динамики патентования в данной области.

– проверка возможности нарушения чужих авторских прав на схожее техническое решение.

При принятии решения о необходимости проведения патентного поиска следует учитывать тот факт, что сведения, содержащиеся в патентных документах, примерно на 80% являются уникальными и не дублируются в иных источниках.

В результате патентного поиска, исходя из понятий и задач патентного исследования, выявлены схожие по функциональным особенностям изделия, началом действия патентов не более 15 лет:

1. Источник питания для магнетрона. Настоящее изобретение относится к области электрорадиотехники.

Известно, что магнетроны могут изменять режим неожиданно, то есть они могут неожиданно прекращать генерировать на одной частоте и начинать генерировать на другой. В таких условиях они могут демонстрировать отрицательное полное сопротивление. Это может приводить к разрушительно высокому току. Поскольку, процесс контрагирования разряда носит быстропротекающий характер, скорость реакции системы контроля должна быть очень высокой (порядка микросекунды). По этой причине известно, что источники питания постоянного/регулируемого напряжения для магнетронов не подходят; для их питания обычно используются источники питания постоянного/регулируемого тока. [4]. Решение, представленное в данном изобретении, имеет один недостаток – недостаточная стабильность выходного напряжения. Создание мощных биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT) позволило решить эту проблему. В наиболее простой схеме дугоподавления такой транзистор устанавливается на выходе источника питания. При нормальной работе магнетрона он всегда открыт. Если же магнетронный разряд начинает переходить в дуговую стадию, то специальный датчик регистрирует это событие и транзистор закрывается. Время срабатывания защиты составляет около одной микросекунды. За этот промежуток в дуге выделяется энергия в несколько десятков миллиджоулей. При таком энерговыделении разогрева локальной точки поверхности катода до температур термоэмиссии еще не происходит, поэтому если через некоторое время (0,1 - 1 мс) опять подать питание на магнетрон, то он нормально работает [6].

К его схемотехническим особенностям относится использование мощных биполярных транзисторов. Схема данного схемотехнического решения показана на рисунке 1.1.

Такое решение хоть и классическое, однако является устаревшим, так как в нём используется не оптимальное количество радиоэлементов.

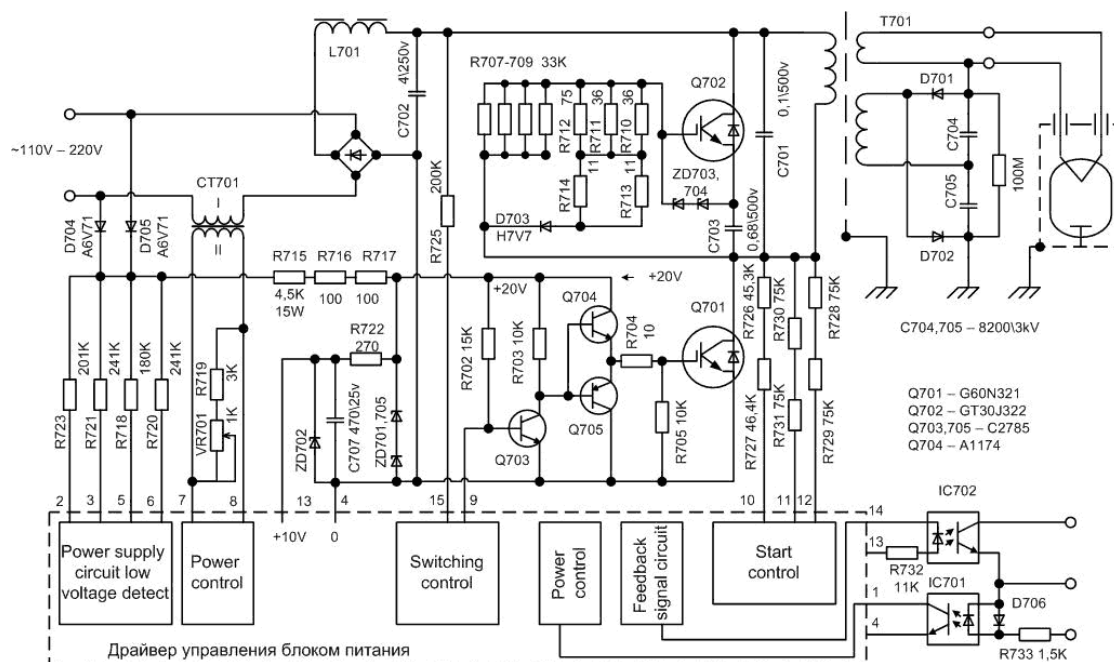


Рисунок 1.1 – Схема источника питания магнетрона

2. Полезная модель относится к области техники источников питания магнетронов. Источник питания конкретно относится к источнику питания магнетрона. К его схемотехническим особенностям этого источник питания относится возможность работы в импульсном режиме. Устройство состоит из аналогового интерфейса 0-5 В, цифрового интерфейса ПЛК, микроконтроллера, аналоговой схемы и контроллера источника питания. Аналоговый интерфейс 0-5 В и цифровой интерфейс ПЛК используются для ввода внешних управляющих сигналов; аналоговый интерфейс AD и цифровой последовательный интерфейс микроконтроллера используются соответственно для приема управляющих сигналов от аналогового интерфейса 0-5V и цифрового интерфейса ПЛК. Вычисляемый, при этом схема широтно-импульсной модуляции используется для преобразования сигнала в импульсную ШИМ-волну с плавно регулируемой скважностью и амплитудой 5 В и подачи импульсной ШИМ-волны в аналоговую схему, и аналоговая схема используется для преобразования внешнего сигнала напряжения в переменный резистор и регулировки значения сопротивления R в колебательном RC-цепи контроллера источника питания, так что частота переключения контроллера привода источника питания изменяется.

Режим управления аналоговой схемой используется для управления мощностью источника питания магнетрона, весь процесс питания регулируется линейно [4]. В технологиях реактивного магнетронного распыления, особенно при нанесении "капризных" пленок (например оксида кремния) описанный метод дугогашения не столь эффективен.

При частом срабатывании дугозащиты ускоряется "отравление" мишени, что приводит к увеличению частоты возникновения дуги окончательному отравлению мишени. Если на магнетрон подавать не постоянное, а импульсное напряжение, то с увеличением частоты импульсов вероятность образования дуг резко падает, а при частотах выше 50 - 60 кГц дуги не образуются совсем.

В данном устройстве, как и в проектируемом, для регулировки выходной мощности присутствует ШИМ-модулятор, позволяющий регулировать скважность управляющего сигнала. Однако используемый аналого-цифровой интерфейс является неоправданно усложненным для данного типа устройств [6].

Схемотехническое решение, применённое в описанном источнике питания представлено на рисунке 1.2.

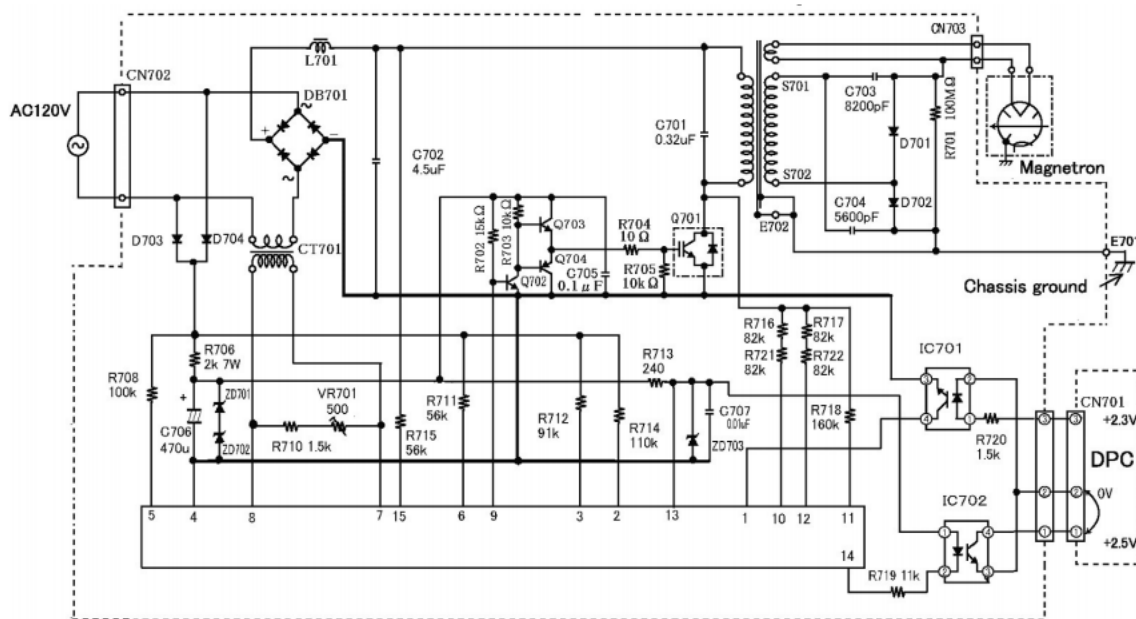


Рисунок 1.2 – Схема источника питания магнетрона

Именно это схемотехническое решение взято за основу при проектировании источника питания СВЧ магнетрона в дипломном проектировании, ввиду грамотно подобранной элементной базы.

Конструктивное решение этого источника питания можно увидеть на рисунке 1.3. Его главной особенностью является нетривиальная форма корпуса, обусловленная расположением самой платы, системы охлаждения и других компонентов друг относительно друга.



Рисунок 1.3 – Вариант конструктивного исполнения источника питания СВЧ магнетрона

3. Источник питания для магнетрона относится к области электрорадио-техники. Принцип работы данного устройства практически не отличается от аналогов, существуют лишь минимальные отличия в электрорадиоэлементах использованных для его реализации. Однако в данном источнике питания, построенном на основе преобразования переменного напряжения в постоянное с повышающим коэффициентом не возможен контроль устройства через приложение на мобильном устройстве посредством *wi-fi*, что в свою очередь является недостатком относительно проектируемого устройства с точки зрения удобства и безопасности его эксплуатации. Схемотехнической особенностью проектируемого устройства является наличие *wi-fi* модуля, обуславливающего возможность дистанционного управления. В современных технологических установках для нанесения многослойных покрытий на подложки большой площади может использоваться одновременно более десятка магнетронов и значительное количество других устройств, поэтому наличие микроконтроллера управления зачастую является обязательным. Вследствие высокой мощности, данный источник питания имеет значительные габариты. Это обу-

славливает такие конструктивные особенности как наличие нескольких вентиляторов для обеспечения воздушного охлаждения, а также горизонтальную компоновку электронных модулей. На рисунке 1.4 показано конструктивное исполнение этого устройства.



Рисунок 1.4 – Импульсный источник питания СВЧ магнетрона

При проектировании конструкции источников питания для СВЧ магнетрона наиболее часто применяются два типа компоновки: вертикальная, показана на рисунке 1.3, горизонтальная, показана на рисунке 1.4.

4. Изобретение относится к преобразователям переменного напряжения в постоянное и может быть использовано при создании блоков питания магнетронов непрерывного генерирования в станциях активных помех радиолокации, в микроволновых СВЧ печах и других устройствах подобного типа. Блок питания содержит два накальных и высоковольтный трансформаторы, два магнетрона, два высоковольтных диода и дроссель. Высоковольтные диоды и магнетроны включены в мостовую схему выпрямления, при этом два плеча моста представлены высоковольтными диодами, а два других - магнетронами, причем высоковольтный трансформатор выполнен без средней точки, а дроссель включен в диагональ моста [5]

Принципы, приведенные в настоящей заявке, обеспечивают достаточно стабильную работу магнетрона с возможностью регулировки выходной характеристики. Однако явным недостатком является сложность конструкции чем и обуславливается высокая стоимость.

5. Изобретение относится к преобразователям переменного напряжения в постоянное и является биполярным. Главным отличием данного изобретения является более эффективный метод борьбы с дугами. В паузе между импульсами отрицательного напряжения на катод магнетрона подается небольшое положительное напряжение. При этом на катод течет электронный ток, снимающий заряд с диэлектрических включений на катоде [6].

Термином «магнетрон» – называют специальный электронный прибор, в котором генерирование сверхвысокочастотных колебаний осуществляется модуляцией электронного потока по скорости. Магнетроны значительно расширили область применения нагрева токами высокой и сверхвысокой частоты. Менее распространены основанные на том же принципе амплитроны клистроны, лампы бегущей волны. Магнетрон является наиболее совершенным генератором сверхвысоких частот большой мощности. Это хорошо эвакуированная лампа с электронным потоком, управляемым электрическим и магнитным полями. Они позволяют получать весьма короткие волны при значительных мощностях.

В магнетронах используется движение электронов во взаимно перпендикулярных электрическом и магнитном полях, создаваемых в кольцевом зазоре между катодом и анодом. Между электродами подается анодное напряжение, создающее радиальное электрическое поле, под действием которого вырываемые из подогретого катода электроны устремляются к аноду [7]

Анодный блок, показанный на рисунке 1.5, помещается между полюсами электромагнита, который создает в кольцевом зазоре магнитное поле, направленное по оси магнетрона. Под действием магнитного поля электрон отклоняется от радиального направления и движется по сложной спиральной траектории. В пространстве между катодом и анодом образуется вращающееся электронное облако с языками, напоминающее ступицу колеса со спицами. Пролетая мимо щелей объемных резонаторов анода электроны возбуждают в них высокочастотные колебания.

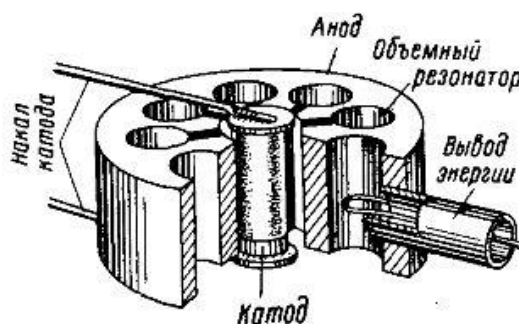


Рисунок 1.5 – Анодный блок магнетрона

Каждый из объемных резонаторов представляет собой колебательную систему с распределенными параметрами. Электрическое поле концентрируется у щелей, а магнитное поле сосредоточено внутри полости.

Вывод энергии из магнетрона, устройство которого показано на рисунке 1.6, осуществляется при помощи индуктивной петли, помещаемой в один или

чаще два соседних резонатора. По коаксиальному кабелю энергия подводится к нагрузке.

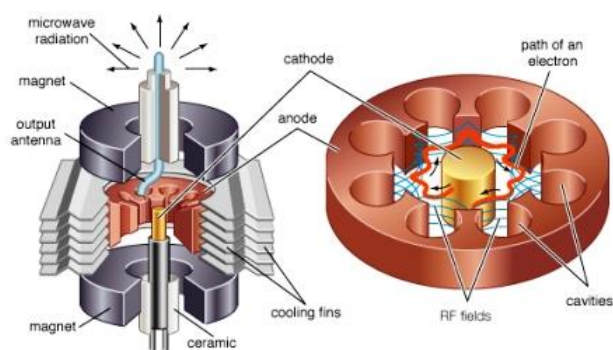


Рисунок 1.6 – Устройство магнетрона

Нагрев токами СВЧ осуществляется в волноводах круглого или прямоугольного сечения, или в объемных резонаторах, в которых возбуждаются электромагнитные волны простейших форм. Нагрев может осуществляться и излучением электромагнитной волны на объект нагрева [8].

Магнетроны могут работать на различных частотах от 0,5 до 100 ГГц, с мощностями от нескольких Вт до десятков кВт в непрерывном режиме, и от 10 Вт до 5 МВт в импульсном режиме при длительностях импульсов главным образом от долей до десятков микросекунд.

Простота устройства и относительно невысокая стоимость магнетронов в сочетании с высокой интенсивностью нагрева и разнообразием применения токов СВЧ открывают перед ними большие перспективы применения в различных областях промышленности, сельского хозяйства и в быту.

Справка об исследовании патентной и научно-технической литературы представлена в приложении А.

2 ОБЩЕТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЗРАБОТКИ УСТРОЙСТВА

2.1 Анализ исходных данных

В дипломном проекте рассматривается проект дистанционно-управляемого источника питания СВЧ магнетрона средней мощности.

Схема электрическая принципиальная приведена в графических материалах. Подробный схемотехнический анализ схемы будет рассмотрен в пунктах 3.1 и 3.2.

Максимальный потребляемый ток составляет 10 А. Напряжения источника питания 220 В, питания на микроконтроллерах и других внутренних модулях 3,3 - 5 В. Максимальная дальность связи при беспроводном подключении 100м. Максимальное выходное напряжение -3,8кВ.

При проектировании будут использоваться следующие нормативные источники:

1 СТП 01-2017 «Стандарт предприятия. Дипломные проекты (работы). Общие требования». Настоящий стандарт устанавливает общие требования к организации дипломного проектирования, построению, содержанию, оформлению и порядку защиты дипломных проектов (работ) в БГУИР.

2 Общие технические условия (требования) устанавливает ГОСТ 18953-73 «Источники питания электрические. Общие технические условия». Настоящий стандарт распространяется на автономные и встраиваемые стабилизированные и нестабилизированные источники вторичного электропитания постоянного и переменного тока, предназначенные для питания изделий Государственной системы промышленных приборов и средств автоматизации. Все требования стандарта являются обязательными. [12].

3 Устойчивость к климатическим воздействиям данного устройства определяется по ГОСТ 15150–69 «Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды». Устойчивость к климатическим воздействиям для устройства: УХЛ 4.2. Это означает, что эксплуатация устройства будет производиться в лабораторных, капитальных жилых и других подобного типа помещениях. Изделие должно сохранять свои параметры в пределах норм, установленных техническими заданиями, стандартами или техническими условиями в течение сроков службы и сроков сохраняемости,

указанных в технических заданиях, стандартах или технических условиях, после и в процессе воздействия климатических факторов, значения которых установлены настоящим стандартом.

Данные о температурных режимах и относительной влажности представлены в таблице 2.1 [13].

Таблица 2.1 – Нормальные значения климатических факторов внешней среды при эксплуатации устройства

Климатические факторы внешней среды	Значения
Верхнее рабочее значение температуры воздуха при эксплуатации, °С	+35
Нижнее рабочее значение температуры воздуха при эксплуатации, °С	+10
Верхнее предельное рабочее значение температуры воздуха при эксплуатации, °С	+40
Нижнее предельное рабочее значение температуры воздуха при эксплуатации, °С	+1
Величина изменения температуры воздуха за 8 ч, °С	40
Верхнее значение относительной влажности при 25 °С, %	80
Среднегодовое значение относительной влажности при 25 °С, %	60
Рабочее значение атмосферного давления, кПа	86,6

За нормальные значения факторов внешней среды при испытаниях устройства (нормальные климатические условия испытаний) принимаются:

- температура $+25 \pm 10$ °С;
- относительная влажность воздуха 45...80 %;
- атмосферное давление 84...106,7 кПа.

Так как блок питания предназначен для работы в нормальных условиях, в качестве номинальных значений климатических факторов принимаем нормальные значения климатических факторов, указанные выше.

За эффективную температуру окружающей среды принимается максимальное значение температуры.

За эффективные значения сочетания влажности и температуры при расчетах параметров устройства, изменение которых вызывается сравнительно длительными процессами, принимаются среднемесячные значения сочетаний влажности и температуры в наиболее теплый и влажный.

За эффективное значение давления воздуха принимается среднее значение давления.

Источник питания может считаться аппаратурой радиоэлектронной, относящимся к группе 1. ГОСТ 11478-88 [14] определяет параметры для источника питания.

Значения влияющих величин, характеризующих климатические воздействия и электропитание средств измерений в нормальных условиях применения, и допускаемые отклонения от них должны соответствовать указанным в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Нормальные условия применения

Влияющая величина	Нормальное значение (нормальная область значений)	Допускаемое отклонение от нормального значения при испытаниях
Температура окружающего воздуха, °С	+15 – 30	$\pm 0,1$; $\pm 0,2$; $\pm 0,5$; ± 1 ; ± 2 ; ± 5 ; ± 10 и -5 ; ± 10
Относительная влажность воздуха, %	45 – 75	—
Атмосферное давление, кПа (мм рт. ст.)	86 – 106 (650 – 800)	—
Частота питающей сети, Гц	50 Свыше 50	± 1 % ± 2 %

К разрабатываемой конструкции предъявляются следующие конструкторские требования:

- габаритные размеры, не более 300×200×350 мм;
- коэффициент заполнения по объёму, не менее $K_z = 0,5$;
- масса изделия, не более 2 кг;
- годовая программа выпуска, не менее 1000 шт.

Специальными техническими требованиями является осуществление проектирования с учетом следующих ГОСТов:

1 ГОСТ 12.2.007.0-75 «Изделия электротехнические. Общие требования безопасности. Настоящий стандарт распространяется на электротехнические изделия и устанавливает общие требования безопасности к их конструкции. [15].

2 ГОСТ 29254-91 «Совместимость технических средств электромагнитная. Аппаратура измерения, контроля и управления технологическими процессами. Технические требования и методы испытаний на помехоустойчивость». Стандарт устанавливает технические требования и методы испытаний изделий на устойчивость к воздействию электромагнитных помех [16].

3 ГОСТ 26.007-85 «Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Методы испытаний на надежность». Стандарт устанавливает единый методологический подход к испытаниям на надежность и регламентирует методы и порядок проведения испытаний на надежность при разработке и производстве аппаратуры, состав показателей надежности, принципы классификации отказов, правила оценки результатов испытаний, а также требования к документации, необходимой при испытаниях [17].

4 ГОСТ 28002-88 «Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Общие требования по защите от электростатических разрядов и методы испытаний». Стандарт устанавливает требования к восприимчивости аппаратурой электростатических разрядов от накапливаемых на поверхности тела человека [18].

5 ГОСТ 11478-88 «Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Нормы и методы испытаний на воздействие внешних механических и климатических факторов» [19].

6 ГОСТ Р 51317.6.1-99 «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых в жилых, коммерческих зонах и производственных зонах с малым энергопотреблением. Требования и методы испытаний». Указанные требования устойчивости к помехам представляют собой основные требования электромагнитной совместимости [20].

Требования к надёжности устанавливает ГОСТ 27.003–90 [21].

Требования к надежности разрабатываемого устройства – совокупность количественных и качественных требований к следующим показателям:

- безотказность;
- долговечность;
- ремонтпригодность.

В качестве показателя безотказности устанавливают среднюю наработку на отказ T_0 или вероятность безотказной работы за время $P(t_p)$. В качестве показателя долговечности устанавливают средний срок службы $T_{сл}$, средний ресурс T_p или гамма-процентный ресурс T_γ . В качестве показателя ремонтпригодности устанавливают среднее время восстановления $T_в$.

Под вероятностью безотказной работы $P(t_p)$, за время t_p понимается вероятность того, что элемент или РЭС будут выполнять заданные функции и сохранять параметры в установленных пределах в течении заданного промежутка времени и при определённых условиях эксплуатации.

Под наработкой на отказ (средней наработкой на отказ) T_0 понимается среднее время безотказной работы РЭС между двумя соседними отказами.

Под гамма–процентной наработкой до отказа T_γ понимают наработку, в течение которой отказ в изделии не возникает с вероятностью γ .

Под средним временем безотказной работы (средняя наработка до отказа) T_{cp} понимается математическое ожидание времени безотказной работы РЭС до первого отказа.

2.2 Формирование основных технических требований к разрабатываемой конструкции

Требования, которым должна отвечать конструкция РЭС, определяются ее назначением, областью применения, условиями эксплуатации, типом производства и представляются в техническом задании, которое является исходным документом для конструирования РЭС [15].

Устройство дистанционно-управляемого источника питания СВЧ магнетрона средней мощности разрабатывают на основании дипломного проектирования. В качестве источников разработки используются схемы уже готовых устройств данного типа.

К техническим требованиям разрабатываемой конструкции относятся:

- требования к конструкции;
- требования к электрическим параметрам;
- требования к технологичности;
- требования к надежности;
- ориентировочная программа выпуска;
- требования безопасности;
- эстетические и эргономические требования;
- условия эксплуатации;
- требования к маркировке и упаковке;
- требования к техническому обслуживанию и ремонту.

Основными электрическими параметрами разрабатываемого устройства являются: Максимальное выходное напряжение $-3.8 \text{ кВ} \pm 5\%$ и максимально допустимый ток – 10 А.

Источник питания должен отвечать требованиям надежности по ГОСТу 21317-87 «Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Методы испытаний на надежность». Средняя наработка на отказ должна составлять не менее 1000 ч. Средний срок службы должен быть не менее 8 лет. Испытания на срок службы не проводится. Время восстановления после ремонта должно быть не более 1ч. Устройство должно быть восстанавливаемое и обслуживаемое.

Конструкция устройства должна быть разработана с учетом требований к производственной, монтажной и эксплуатационной технологичности. Масса изделия составляет не более 2 кг. Габаритные размеры составляют не более 300×200×350 мм.

Устройство источник питания предназначено для эксплуатации в лабораторных, капитальных жилых и других подобного типа помещениях. ГОСТ 15150–69 устанавливает нормы по климатическому исполнению и категории. Для устройства плавного пуска УХЛ 4.2 – эксплуатация в помещениях (объемах) с искусственно регулируемым климатическими условиями [13].

В зависимости от условий эксплуатации определяют группу жесткости, которая предъявляет соответствующие требования к конструкции печатной платы, к материалу основания и необходимости применения дополнительной защиты от внешних воздействий (климатических, механических) [12].

Устройство источник питания по своему назначению относится к классу наземных РЭС. В таблице 2.3 приведены обобщенные значения механических воздействующих факторов в зависимости от класса РЭС.

Таблица 2.3 – Обобщенные значения механических воздействующих факторов в зависимости от класса РЭС

Воздействующий фактор	Класс РЭС
	Наземное
Вибрация: Частота, Гц Ускорение, g	10...70 1...4
Одиночные удары: Ускорение, g Длительность, мс	50...1000 0,5...10
Акустические шумы: Уровень, дБ Частота, Гц	82...125 50...1000

Устройство испытывает влияние различных дестабилизирующих факторов в процессе эксплуатации. РЭС является бытовым и не предполагает его перемещение во время использования, но может, поэтому устройство не будет подвергаться достаточно значимым колебаниям.

Устройство источник питания не подвержено частым ударным нагрузкам, однако существует вероятность падения.

Устройство источник питания не будет подвержено прямому воздействию солнечного излучения. Однако само помещение может находиться под постоянным воздействием высоких температур. Поэтому устройство может подвергаться дополнительным температурным нагрузкам, которые могут привести к расширению, размягчению, деформации печатной платы (ПП), уменьшению электропроводности, высыханию и растрескиванию защитных покрытий.

Эксплуатацию устройства следует производить строго в соответствии с требованиями, изложенными в инструкции по эксплуатации.

Общие требования безопасности, меры и класс защиты от поражения электрическим током в соответствии с требованиями:

- ГОСТ 11487–88 «Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Нормы и методы испытаний на воздействие внешних механических и климатических факторов» [14];

- ГОСТ 12.2.007.0 –75 «Система стандартов безопасности труда. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности» [22];

- ГОСТ 22782.0 – 81 «Электрооборудование взрывозащищенное. Общие технические требования и методы испытаний» [23];

- ГОСТ Р 51515-99 Совместимость технических средств электромагнитная. Помехоустойчивость радиовещательных приемников, телевизоров и другой бытовой радиоэлектронной аппаратуры. Требования и методы испытаний. [24].

Совместимость технических средств должна соответствовать ГОСТу 29254 –91. Устройство должно быть упаковано в индивидуальную тару, обеспечивающую его сохранность при транспортировании и хранении.

Устройство маркируется в соответствии с ГОСТ 27570.0–87 «Безопасность бытовых и аналогичных электрических приборов. Общие требования и методы испытаний» [25]. В качестве маркировки должны быть нанесены:

- наименование изготовителя или товарный знак;
- наименование модели или типа;
- условное обозначение степени защиты от влаги, если требуется.

Устройство источника питания должно отвечать общим требованиям эстетики по ГОСТ 12.2.049–80 «Система стандартов безопасности труда. Оборудование производственное. Общие эргономические требования». Эргономические требования к производственному оборудованию должны устанавливаться к тем его элементам, которые сопряжены с человеком при выполнении им трудовых действий в процессе эксплуатации, монтажа, ремонта, транспортирования и хранения производственного оборудования [26].

Устройство должно подвергаться приемосдаточным, периодическим, типовым испытаниям и испытаниям на надежность, а также приемочным испытаниям по ГОСТу 15.009–91 «Система разработки и постановки продукции на производство. Непродовольственные товары народного потребления» [26] и квалификационным испытаниям, при этом обязательными являются:

- внешний осмотр;
- испытание электрической прочности изоляции прибора без увлажнения по ГОСТу 27570.0 – 87 «Безопасность бытовых и аналогичных электрических приборов. Общие требования и методы испытаний» [25];
- испытание на функционирование.

Непродовольственные товары народного потребления, подлежащие разработке и постановке на производство, должны удовлетворять запросам населения с учетом возрастных, социальных и национальных групп потребителей, направлений развития ассортимента и моды, а также отвечать требованиям, обеспечивающим безопасность для жизни и здоровья населения и охрану окружающей среды.

Если перед началом испытаний устройство находилось в климатических условиях, отличающихся от нормальных условий применения, испытания должны начинаться с выдержки их в нормальных условиях в течение 24 ч.

Выполнение всех выше приведенных требований позволит создать продукт высокого качества, способный конкурировать на рынке.

Техническое задание для дистанционно-управляемого источника питания СВЧ магнетрона средней мощности приведено в приложении А.

3 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМ УСТРОЙСТВА

Схема электрическая принципиальная структурная дистанционно управляемого источника питания СВЧ магнетрона средней мощности показанная на рисунке 3.1, приведена в графических материалах к дипломному проекту.

Источник питания имеет следующие основные возможности:

- дистанционный запуск/выключение при помощи смартфона;
- регулировка выходной мощности без изменения частоты питания;

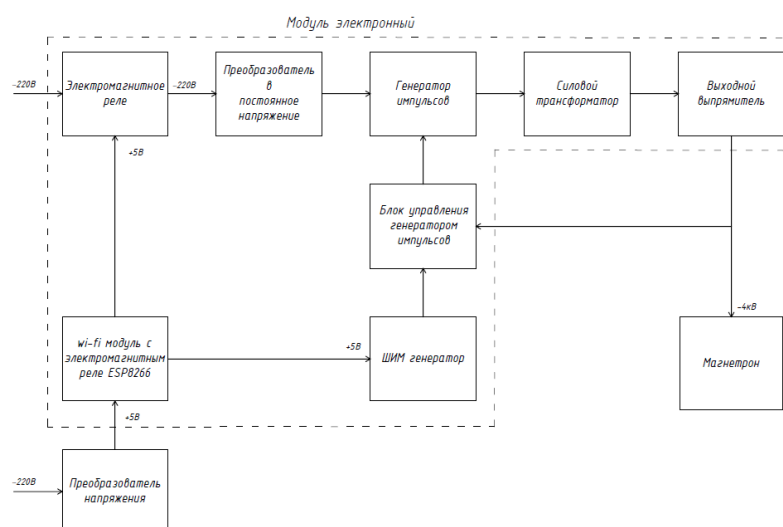


Рисунок 3.1 – Схема структурная

Преобразователь напряжения с номинальным значением 5В на выходе подключается к модулю *ESP8266*, который содержит в себе *WI-FI* модуль и реле.

WI-FI модуль включает в себя полноценный 32 битный микроконтроллер со своим набором *GPIO*, в том числе *SPI*, *UART*, *I2C*. При этом схема модуля состоит из минимального количества деталей: самого чипа *ESP8266*, flash памяти, кварца. Изначально в модуль загружена прошивка, которая образует *WIFI-UART* мост для подключения к другому микроконтроллеру, в том числе и к *Arduino*. Настройка и обмен данными происходят с помощью *AT* команд. *PCB* антенна обеспечивает дальность до 400м на открытом пространстве. Таким образом появляется возможность подключения блока питания к мобильному устройству.

Электромагнитное реле при подаче на него сигнала логической единицы

с *WI-FI* модуля замкнёт цепь питания. Как только *WI-FI* модуль подаст сигнал логического нуля цепь разомкнётся.

К *ESP8266* параллельно подключаются 2 модуля, а именно ШИМ генератор и электромагнитное реле с механически настраиваемым таймером.

Генератор ШИМ сигнала сигналов ЖК 1Гц-150кГц 3.3-30В XY-LPWM используется для ручного или программного регулирования параметров выходных импульсов в широких пределах. Модуль генерирует последовательность прямоугольных импульсов (дискретный сигнал, ШИМ) частотой 1 Гц – 150 кГц.

Генератор прямоугольных импульсов *XY-LPWM* имеет четыре группы контактов:

1. Контакты, обозначенные *VIN+* и *VIN-*, используются для подключения питания;

2. Контакты, обозначенные *GND*, *TXD*, *RXD*, используются для подключения к генератору управляющего сигнала от компьютера или микроконтроллера:

Команда "F101": установит частоту 101 Гц (от 1 Гц до 999 Гц);

Команда "F1.05": установит частоту 1,05 кГц (от 1 кГц до 9,99 кГц);

Команда "F10.5": установит частоту 10,5 кГц (от 10 кГц до 99,9 кГц);

Команда "F1.0.5": установит частоту 105 кГц (от 100 кГц до 150 кГц);

Команда "D050": установит скважность 50%.

3. Контакты, обозначенные *PWM* и *GND*, выходной сигнал прямоугольных импульсов;

4. Группа контактов, обозначенная *J3*, используется для прошивки микроконтроллера *Nuvoton N76E003AT20*.

Генератор прямоугольных импульсов *XY-LPWM* имеет две группы кнопок:

Кнопки, обозначенные *DUTY+* и *DUTY-*, используются для регулировки скважности выходного сигнала от 0 до 100% с шагом 1%;

Кнопки, обозначенные *FREQ+* и *FREQ-*, используются для регулировки частоты выходного сигнала от 1 Гц до 150 кГц. В пределах от 1 Гц до 999 Гц – шаг 1 Гц, от 1 кГц до 9,99 кГц – шаг 0,01 кГц, от 10 кГц до 99,9 кГц – шаг 0,1 кГц, от 100 кГц до 150 кГц – шаг 1 кГц.

В пределах от 1 Гц до 999 Гц изображение на дисплее будет без точки, в пределах от 1 кГц до 99,99 кГц – с одной точкой, в пределах 100 кГц до 150 кГц – с двумя точками.

Напряжение питания генератора составляет 3,3 – 30 В, максимальный

выходной ток составляет 30 мА. Амплитуда выходного сигнала будет равна напряжению питания. Генератор оснащен защитой от перегрузки.

После отключения питания все настройки сохраняются в энергонезависимой памяти [27].

Подключенное к *ESP8266* реле, отвечает за включение всего устройства, так как замыкает и размыкает цепь питания.

После замыкания цепи 220В переменного тока попадают следующий модуль.

Изображённый на рисунке 3.1 электронный модуль состоит из нескольких основных частей, позволяющих получая на вход 220В отдавать непосредственно на магнетрон питание -3,8 кВ.

Питание магнетронов осуществляется выпрямленным током с упрощенной схемой выпрямителя. Установки очень малой мощности могут питаться переменным током. Блок питания магнетрона должен обеспечивать подачу постоянного анодного напряжения на магнетрон $U_a = 3,8$ кВ и переменное напряжение накала 3,15 В. Упрощённая схема блока питания магнетрона изображена на рисунке 3.2. При этом величина анодного тока составляет примерно 300 мА, а тока накала 10 А. Указанные величины могут незначительно изменяться в ту или иную сторону в зависимости от типа магнетрона и требуемой мощности [3].

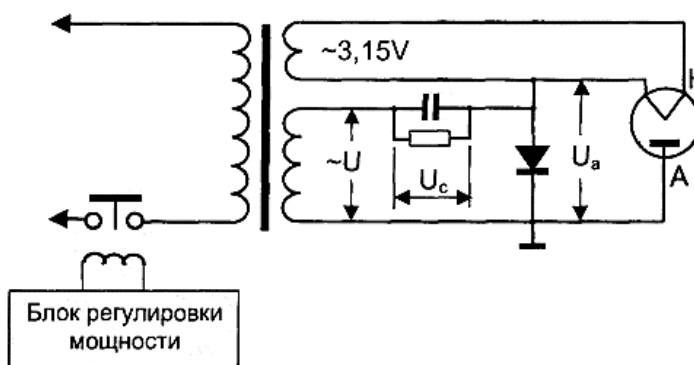


Рисунок 3.2 – Упрощённая схема блока питания магнетрона

Первой частью модуля является модуль преобразования в постоянное напряжение. На схеме электрической принципиальной, показанной на рисунке 3.3, его можно увидеть в качестве диодного моста DB701 [28]. На этом этапе происходит выпрямление переменного напряжения. Однако пройдя через ди-

одный мост напряжение не становится постоянным, оно становится пульсирующим.

Чтобы сгладить пульсации выходного напряжения используется конденсатор C702.

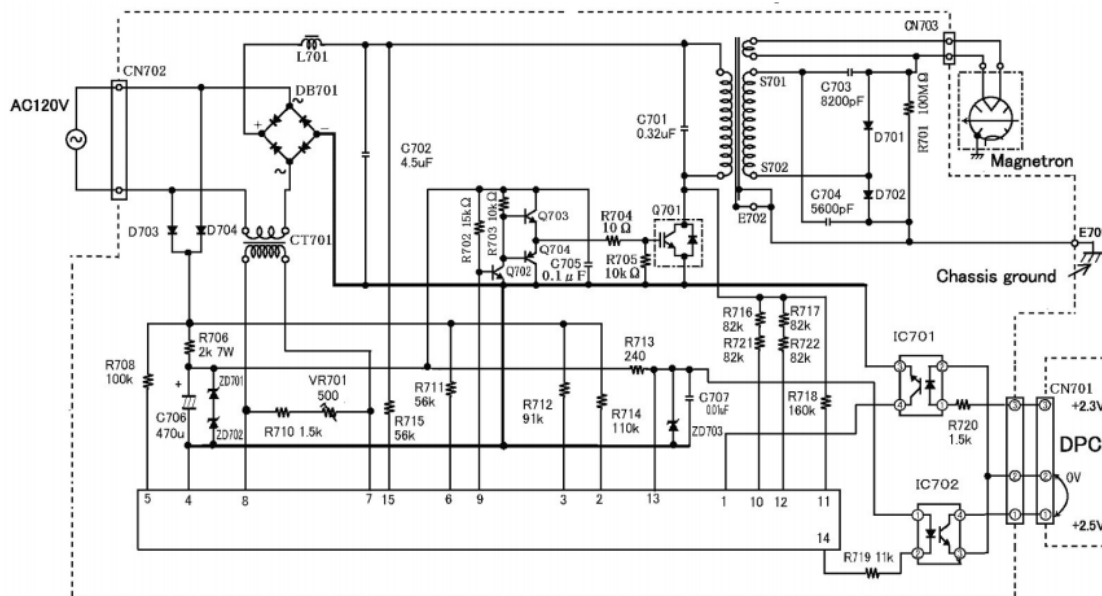


Рисунок 3.3 – Схема электрическая принципиальная модуля преобразования

Выходной сигнал этой части модуля показан на рисунке 3.4

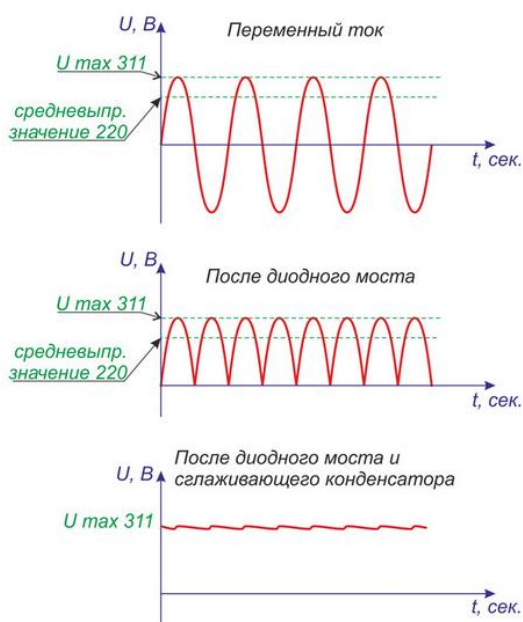


Рисунок 3.4 – Преобразование напряжения диодным мостом [29]

Далее располагается блок генератора импульсов. Основным его элементом является силовой транзистор, являющийся в схеме инвертором. Перед ним в схеме реализован ключ на двух биполярных транзисторах. Данный блок контролируется микросхемой управления, показанной внизу рисунка 3.3, к которой подключён ШИМ генератор. Взаимодействие этих блоков реализует принцип обратной связи.

Следующими блоками являются силовой импульсный трансформатор и выходной выпрямитель. Импульсный трансформатор значительно повышает напряжение, которое снимается со вторичной обмотки и попадает на диоды D702, D701 и конденсаторы C703, C704 которые в свою очередь выполняют две функции: выпрямление импульсов, увеличение значения напряжения в два раза. Преобразованное напряжение питающее СВЧ магнетрон может иметь значение до -4кВ.

4 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ПРОЕКТИРУЕМОГО ИЗДЕЛИЯ

4.1 Выбор и обоснование элементной базы, конструктивных элементов, установочных изделий, материалов конструкции и защитных покрытий

Выбор элементной базы проводится согласно схеме электрической принципиальной. Используемая элементная база представлена в перечне элементов, представленном в приложении Г.

Для правильного выбора типа элементов необходимо на основании требований к установке в части климатических, механических и других воздействий проанализировать условия работы каждого элемента и определить эксплуатационные факторы: интервал рабочих температур, относительную влажность окружающей среды, атмосферное давление, механические нагрузки и др.

Критерием отбора электрорадиоэлементов (ЭРЭ) является соответствие технических и эксплуатационных характеристик ЭРЭ заданным условиям работы и эксплуатации [30].

Выбор элементной базы по вышеназванным критериям позволяет обеспечить надежную работу изделия [30].

Дополнительными критериями при выборе ЭРЭ являются:

- унификация;
- масса и габариты;
- наименьшая стоимость;
- надежность.

С учетом всех вышеперечисленных параметров осуществлен выбор элементной базы для дистанционно-управляемого источника питания СВЧ магнетрона средней мощности.

Основные технические параметры модуля одноканального *ESP8266* для *WiFi*-контроллера *ESP-01/01S* приведены в таблице 4.1 [9].

Таблица 4.1 – Технические параметры модуля *ESP8266*

Технические параметры	Значения параметров
Рабочее напряжение, В	3,3
Максимально допустимый ток, мА	220
Габаритные параметры, д×ш×в, мм	24,8 × 14,3 × 8
Масса, г	20

Продолжение таблицы 4.1

Рабочая частота, ГГц	2,4
Flash память, кб	1024
Количество GPIO, шт	2

Модуль *ESP8266* представлен на рисунке 4.1

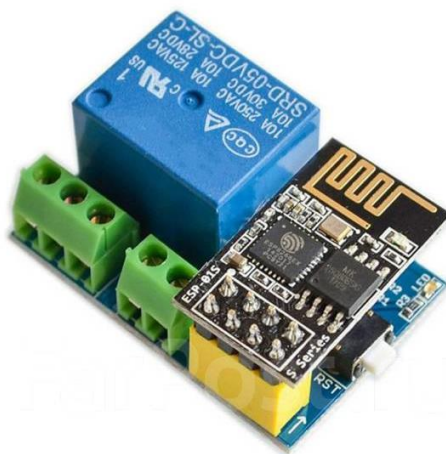


Рисунок 4.1 Модуль *ESP8266*

Генератор ШИМ сигнала – электронное устройство, позволяющее управлять уровнем мощности, подаваемой к нагрузке, путём изменения продолжительности импульсов при их постоянной частоте. Основные технические параметры генератора ШИМ сигналов приведены в таблице 4.2 [10]. Модуль генератор ШИМ сигнала представлен на рисунке 4.2.



Рисунок 4.2 – Модуль генератора ШИМ сигналов

Таблица 4.2 – Технические параметры генератора ШИМ сигналов

Технические параметры	Значения параметров
Модель	<i>XY-LPWM</i>
Микроконтроллер	<i>Nuvoton N76E003AT20</i>
Диапазон частоты выходного сигнала, Гц	$1 - 150 \times 10^3$
Точность частоты, %	2
Габаритные параметры, д×ш×в, мм	$52 \times 32 \times 10$
Масса, г	13
Скважность выходного сигнала, %	0 – 100
Максимальный коммутируемый ток, мА	30
Напряжение питания, В	3,3 – 30

Релейные модули с опторазвязкой выступают в роли связывающего звена между низковольтным управляющим устройством или иной аналогичной электрической схемой, и исполняющей частью. Интегрированное реле оснащено блоком винтовых терминалов, предназначенных для коммутации внешних схем, и состоит из трёх линий подключения. Реле позволяет замыкать/размыкать как одну независимую цепь переменного или постоянного напряжения, так и переключаться между двумя зависимыми цепями с одной общей линией питания. Основные технические параметры реле приведены в таблице 4.3 [11]. Модуль модуль реле с опторазвязкой представлен на рисунке 4.3.



Рисунок 4.3 – Модуль реле с опторазвязкой

Таблица 4.3 – Технические параметры релейного модуля

Технические параметры	Значения параметров
Рабочее напряжение, В	12
Потребляемый ток, мА	100
Габаритные параметры, д×ш×в, мм	50×26×18,5
Масса, г	21
Модель реле	JQC-3FF-S-Z
Коммутируемое напряжение: постоянное / переменное, В	30 / 250
Ток нагрузки: постоянный / переменный, А	7 / 5
Пиковый кратковременный ток, А	10

Конденсаторы керамические *SMD* 0805, изображённые на рисунке 4.4 – постоянные конденсаторы, использующие керамический материал в качестве диэлектрика. Основные технические параметры конденсаторов приведены в таблице 4.4 [31].



Рисунок 4.4 – Конденсаторы керамические *SMD* 0805

Таблица 4.4 – Технические параметры конденсаторов керамических

Технические параметры	Значения параметров
Рабочее напряжение, В	50 - 250
Номинальная емкость	10 пФ (для C3), 2,2 пФ (для C5), 2,2мкФ (для C7), 5600пФ (для C9),

Продолжение таблицы 4.4

Технические параметры	Значения параметров
Номинальная емкость	45 мкФ (для <i>C10</i>), 0,1 мкФ (для <i>C8, C11</i>), 0,33 мкФ (для <i>C12</i>), 8200 пФ (для <i>C13</i>), 150 пФ (для <i>C15</i>),
Рабочее напряжение, В	50 - 250
Допуск, %	5-10
Рабочая температура, °C	-55 ... +125
Тип диэлектрика	<i>X7R</i>
Габаритные параметры, д×ш×в, мм	2,0×1,25×1,0
Масса, г	0,0055

Конденсаторы алюминиевые электролитические – разновидность конденсаторов, в которых диэлектриком между обкладками является плёнка оксида металла, где анод выполнен из металла, а катод представляет собой твёрдый, жидкий или гелевый электролит. Основные технические параметры электролитических конденсаторов приведены в таблице 4.5 [32].

Таблица 4.5 – Технические параметры конденсаторов электролитических

Технические параметры	Значения параметров
Рабочее напряжение, В	10-50
Номинальная емкость, мкФ	10 - 470
Допуск, %	10
Рабочая температура, °C	-40 ... +105
Габаритные параметры, д×ш×в, мм	6,3×7,8×5,4
Масса, г	0,295

Диодный мост – это устройство для преобразования переменного тока в постоянный. Основные технические параметры диодного моста KBPC5010 приведены в таблице 4.6 [33].

Таблица 4.6 – Технические параметры диодного моста KBPC5010

Технические параметры	Значения параметров
Корпус	<i>KBPC</i>
Максимальный прямой ток, А	50

Продолжение таблицы 4.6

Технические параметры	Значения параметров
Максимальный обратный ток, мкА	10
Рабочее напряжение, В	2 – 5,5
Рабочая температура, °С	-55...+150
Габаритные параметры, д×ш×в, мм	25×25×20
Масса, г	17.25

Устройства, которые входят в схему блока питания, и поддерживают стабильное выходное напряжение, называются стабилизаторами напряжения. Эти устройства рассчитаны на фиксированные значения напряжения выхода: 5, 9 или 12 вольт.

Основные технические параметры микросхемы LD111 приведены в таблице 4.7 [34].

Таблица 4.7 – Технические параметры диодного микросхемы LD111

Технические параметры	Значения параметров
Максимальный ток нагрузки, А	1
Выходное напряжение, В	3,3
Максимальное входное напряжение, В	15
Рабочая температура, °С	0...+125
Габаритные параметры, д×ш×в, мм	25×25×20
Масса, г	0.39

Основные технические параметры микросхемы TNY265 приведены в таблице 4.8 [35].

Таблица 4.8 – Технические параметры диодного микросхемы TNY265

Технические параметры	Значения параметров
Максимальная частота преобразователя, кГц	132
Номинальная мощность, Вт	11
Рабочая температура, °С	-40...+150
Габаритные параметры, д×ш×в, мм	9,4×8×7
Масса, г	1

Основные технические параметры микросхемы TCA785HKLA приведены в таблице 4.9 [36].

Таблица 4.9 – Технические параметры диодного микросхемы TCA785HKLA1

Технические параметры	Значения параметров
Выходной ток, А	0,25
Рабочая температура, °C	-40...+150
Габаритные параметры, д×ш×в, мм	20×8×7
Масса, г	2.1

Основные технические параметры трансформатора ТI-EE16-1534 приведены в таблице 4.10 [37].

Таблица 4.10 – Технические параметры трансформатора ТI-EE16-1534

Технические параметры	Значения параметров
Выходное напряжение, А	5В
Рабочая температура, °C	-20...+100
Габаритные параметры, д×ш×в, мм	12×12×12
Масса, г	5

Резисторы *SMD 0805* для поверхностного монтажа, изображенные на рисунке 4.5 – резисторы постоянные непроволочные общего применения, предназначены для работы в электрических цепях постоянного, переменного токов и в импульсном режиме.

Основные технические параметры резисторов приведены в таблице 4.11 [38].



Рисунок 4.5 – Резисторы *SMD 0805*

Таблица 4.11 – Технические параметры резисторов 0805

Технические параметры	Значения параметров
Корпус	0805
Номинальная мощность, Вт	0,125 -0,250
Номинальное сопротивление	10 кОм (для <i>R1, R8-R10</i>), 3,6 кОм (для <i>R2</i>), 2 кОм (для <i>R3, R11</i>), 200 кОм (для <i>R5</i>), 100 кОм (для <i>R6, R12, R13</i>), 15 кОм (для <i>R7</i>), 1,5 кОм (для <i>R14</i>), 56 кОм (для <i>R15, R19</i>), 91 кОм (для <i>R16</i>), 240 Ом (для <i>R17</i>), 110 кОм (для <i>R18</i>), 82 кОм (для <i>R20-R27</i>),
Допуск, %	1 – 5
Рабочая температура, °C	–55 ... +125
Габаритные параметры, д×ш×в, мм	2×1,25×0,5
Масса, г	0,01

Резистор подстроечный *3006P-1-501LF* – переменный резистор, пассивный электронный компонент, предназначенный для точной настройки заданных параметров. Основные технические параметры подстроечного резистора приведены в таблице 4.12 [39].

Таблица 4.12 – Технические параметры подстроечного резистора

Технические параметры	Значения параметров
Корпус	<i>SH-655MCL</i>
Номинальная мощность, мВт	300
Номинальное сопротивление	500 Ом
Допуск, %	20
Рабочая температура, °C	–10 ... +70
Габаритные параметры, д×ш×в, мм	5,1×6,4×7,5
Масса, г	0,37

Основные технические параметры трансформатора ALT3232M-151-T001 приведены в таблице 4.13 [40].

Таблица 4.13 – Технические параметры трансформатора ALT3232M-151-T001

Технические параметры	Значения параметров
Индуктивность, мкГн	150
Рабочая температура, °C	–40 ... +85
Габаритные параметры, д×ш×в, мм	3,2×3,2×2,8
Масса, г	0,12

Основные технические параметры трансформатора ТПА-20-5в приведены в таблице 4.14 [41].

Таблица 4.14 – Технические параметры трансформатора ТПА-20-5в

Технические параметры	Значения параметров
Типоразмер магнитопровода	<i>EI-60</i>
Частота, Гц	50
Максимальная выходная мощность, Вт	20
Габаритные параметры, д×ш×в, мм	60×50×45,7
Масса, г	490

Биполярный транзистор – полупроводниковый прибор, основной функцией которого является увеличение мощности входного электрического сигнала. Основные технические параметры транзистора 2N7002 приведены в таблице 4.15 [42].

Таблица 4.15 – Технические параметры транзистора 2N7002

Технические параметры	Значения параметров
Максимальное напряжение сток-исток $U_{си}$, В	60
Максимальный ток сток-исток $I_{си}$ макс. А	0,12
Максимальная рассеиваемая мощность, Вт	0,35
Габаритные параметры, д×ш×в, мм	5,2×13×2
Масса, г	0,5

Основные технические параметры КТ819А транзистора приведены в таблице 4.16[43].

Таблица 4.16 – Технические параметры КТ819А транзистора

Технические параметры	Значения параметров
Статический коэффициент передачи тока $h_{21э}$	15
Мощность рассеивания, Вт	60
Максимально допустимый ток, А	10
Рабочая температура, °С	–55 ... +100
Габаритные параметры, д×ш×в, мм	5×13×2
Масса, г	2,5

Основные технические параметры GT60N321 транзистора приведены в таблице 4.17[44].

Таблица 4.17 – Технические параметры GT60N321 транзистора

Технические параметры	Значения параметров
Статический коэффициент передачи тока $h_{21э}$	30
Мощность рассеивания, Вт	75
Максимально допустимый ток, А	60
Рабочая температура, °С	–55 ... +150
Габаритные параметры, д×ш×в, мм	5×13×2
Масса, г	9,8

Основные технические параметры 2SC2785 транзистора приведены в таблице 4.18[45].

Таблица 4.18 – Технические параметры 2SC2785 транзистора

Технические параметры	Значения параметров
Статический коэффициент передачи тока $h_{21э}$	110
Мощность рассеивания, Вт	0,25
Рабочая температура, °С	–35 ... +80
Габаритные параметры, д×ш×в, мм	4,2×13×2,2
Масса, г	0,25

Основные технические параметры 1N5819 диода Шоттки приведены в таблице 4.19[46].

Таблица 4.19 – Технические параметры 1N5819 диода Шоттки

Технические параметры	Значения параметров
Максимальное постоянное обратное напряжение, В	40
Максимальный прямой ток, А	1
Рабочая температура, °C	–40 ... +150
Габаритные параметры, д×ш×в, мм	2×4×12
Масса, г	0,4

Основные технические параметры FR207 диода приведены в таблице 4.20[47].

Таблица 4.20 – Технические параметры FR207 диода

Технические параметры	Значения параметров
Максимальное постоянное обратное напряжение, В	40
Максимальный прямой ток, А	2
Рабочая температура, °C	–55 ... +150
Габаритные параметры, д×ш×в, мм	2×4×12
Масса, г	0,6

Основные технические параметры SB3100 диода приведены в таблице 4.21[48].

Таблица 4.21 – Технические параметры SB3100 диода

Технические параметры	Значения параметров
Максимальное постоянное обратное напряжение, В	100
Максимальный прямой ток, А	3
Рабочая температура, °C	–65 ... +125
Габаритные параметры, д×ш×в, мм	4×6×12
Масса, г	1,2

Материал печатной платы должен иметь высокие электроизоляционные свойства, малые диэлектрические потери, обладать высокой химической стойкостью к действию химических растворов, используемых при изготовлении печатных плат, допускать штамповку, выдерживать кратковременные воздействия температуры до 240 °С в процессе пайки на плате ЭРЭ, иметь высокую влагостойкость, быть недорогим [49].

Таким образом, в качестве материала ПП в соответствии с ГОСТ 26246.5-89 целесообразно использовать стеклотекстолит FR-4-1,5 ГОСТ 26246.5-89 [50].

Выбор материалов для конструкций и деталей РЭС является сложной задачей из-за многовариантности, так как изделие РЭС можно создавать либо из различных материалов, либо из их сложных совокупностей [51].

Правильный выбор материала может быть сделан на основе анализа функционального назначения детали, условий ее эксплуатации и технологических показателей с учетом следующих факторов:

- материал является основой конструкции, т.е. определяет способность детали выполнять рабочие функции в изделии и противостоять воздействию дестабилизирующих климатических и механических факторов;
- материал влияет на габариты и массу прибора;
- материал определяет эксплуатационные характеристики детали, ее надёжность и долговечность.

В качестве материала конструкции источника питания целесообразно использовать нержавеющей сталь 08Х22Н6Т.

В качестве защитного покрытия ПП используется лак PLASTIK 71, ТУ2389-001-718983067-50. Покрытие печатных проводников, контактных площадок и металлизированных отверстий сплавом иммерсионного олова по ГОСТ Р 55693-2013 [52].

Маркировка печатной платы источника питания осуществляется белой краской МКЭЧ (белая) струйно-капельным методом по СТБ 992 – 95.

4.2 Выбор типа электрического монтажа, элементов крепления и фиксации

Печатная плата является основным элементом электронного устройства, выполняя функции несущей конструкции и коммутационного устройства.

ПП – это изделие, состоящее из плоского изолированного основания с отверстиями, пазами, вырезами и системой токопроводящих полосок металла,

которые используют для коммутации изделия и функциональных узлов в соответствии с схемой электрической принципиальной [53].

В дипломном проектировании необходимо использовать двустороннюю печатную плату. На обеих сторонах ПП дистанционно управляемого источника питания СВЧ магнетрона располагаются элементы проводящего рисунка и все требуемые соединения в соответствии со схемой электрической принципиальной.

Чертеж ПП источника питания приведен в графических материалах дипломной работы.

Электрическая связь между сторонами осуществляется с помощью металлизированных отверстий. Для получения высоких производственных и эксплуатационных характеристик электрический монтаж должен обеспечить [54]:

- минимальное искажение и задержку полезных сигналов;
- высокую надёжность;
- допустимый уровень помех;
- минимальные габариты и вес.

Важнейшим элементом электрического монтажа являются соединения, которые должны удовлетворять ряду требований. Наиболее важные из которых являются минимальное переходное сопротивление контактной пары и достаточная механическая прочность [53].

В дипломном проектировании используются как элементы поверхностного монтажа, так и элементы сквозного монтажа. В качестве типа монтажа используется односторонний выводной и поверхностный монтаж. Схематично данный тип монтажа изображен на рисунке 4.6.

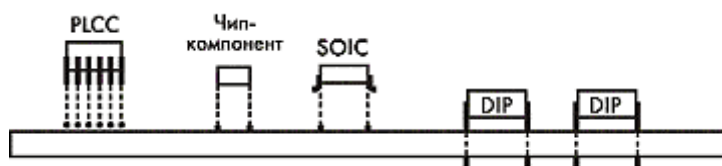


Рисунок 4.6 – Односторонний выводной и поверхностный монтаж

Такая технология носит в мировой практике название технологии оплавления припойных паст и является одной из стандартных в технологии монтажа на поверхность. Сборка модулей такого типа осуществляется следующим образом: на поверхность платы наносится припойная паста, на которую

устанавливают SMD-компоненты; затем паста оплавляется в печи, устанавливаются ТНТ-компоненты, проводится пайка волной припоя, после чего осуществляют промывку и контроль собранного модуля [54].

Возможен альтернативный вариант, при котором сборку начинают с установки компонентов в отверстия платы, после чего размещают поверхностно-монтажные компоненты [54].

Компоненты для поверхностного монтажа при повышенной плотности их размещения целесообразно монтировать в первую очередь, что требует минимального количества переворотов платы в процессе изготовления изделия [54].

Крепление и фиксация ПП в устройстве осуществляется при помощи четырех крепежных отверстий с использованием винтов М4.

4.3 Выбор способов обеспечения нормального теплового режима устройства (выбор способа охлаждения на ранней стадии проектирования; выбор наименее теплостойких элементов, для которых необходимо проведение теплового расчета)

Выбор способа охлаждения РЭС на ранней стадии конструирования дает возможность оценить вероятность обеспечения, указанного в ТЗ теплового режима при выбранном способе охлаждения, а также те усилия, которые нужно затратить при разработке будущей конструкции РЭС с учетом обеспечения теплового режима.

Для выбора способа охлаждения на ранней стадии проектирования использована методика, изложенная в [30].

Для выбора способа охлаждения требуются следующие исходные данные:

- суммарная рассеиваемая в блоке мощность $P - 1020$ Вт;
- диапазон изменения температуры окружающей среды $T_{c\ min} \dots T_{c\ max}$ – в соответствии с УХЛ 4.2 [13] – $1\ ^\circ\text{C}$ и $40\ ^\circ\text{C}$;
- допустимые температуры элементов $T_i - 373$ К;
- коэффициент заполнения устройства по объему K_3 – в соответствии с ТЗ – 0,5;
- габаритные горизонтальные и вертикальные размеры корпуса устройства L_1, L_2 и $L_3 - 0,3, 0,2$ и $0,35$ м соответственно.

Коэффициент заполнения устройства по объему характеризует степень полезного использования объема и является одним из главных показателей качества конструкции.

Выбор способа охлаждения можно осуществить с помощью графиков, характеризующих области целесообразного применения различных способов охлаждения (рисунок 4.3). Эти графики построены по результатам обработки статистических данных для реальных конструкций, тепловых расчетов и данных испытания макетов [55].

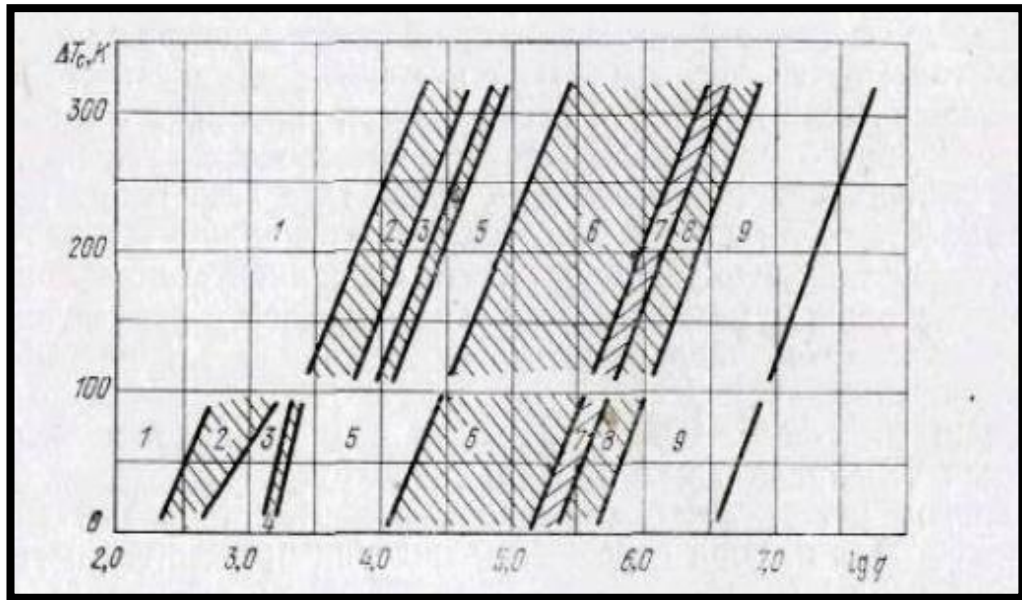


Рисунок 4.3 – Области целесообразного применения различных способов охлаждения

Для удобства пользования графиками необходимо из перечисленных выше исходных данных получить ряд комплексных показателей.

Размеры корпуса и коэффициент заполнения используются для определения условной величины поверхности теплообмена:

$$S_n = 2 * (L_1 L_2 + (L_1 + L_2) * L_3 = 2 * (0,3 * 0,2 + (0,3 + 0,2) * 0,35 * 0,5 = 0,295 \quad (4.1)$$

За основной показатель, определяющий область применения целесообразного способа охлаждения, принимается величина плотности теплового потока, проходящего через поверхность теплообмена:

$$q = \frac{PK_p}{S_n} = \frac{1020 \cdot 1}{0,295} = 3,45 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}, \quad (4.2)$$

где K_p – коэффициент, учитывающий давление воздуха (при атмосферном давлении $K_p = 1$).

Вторым определяющим показателем может служить минимально допустимый перегрев элементов РЭС:

$$\Delta T_{c \min} = T_{i \min} - T_c = 373 - 313 = 60 \text{ К}, \quad (4.3)$$

где $T_{i \min}$ – допустимая температура корпуса наименее теплостойкого элемента, т. е. элемента, для которого допустимая температура имеет минимальное значение;

T_c – температура окружающей среды.

Для естественного охлаждения $T_c = T_{c \max}$, т. е. она соответствует максимальной температуре окружающей среды, заданной в ТЗ.

Значение $\Delta T_{c \min} = 60 \text{ К}$ и $lg q = 3,5$

Исходя из графиков, представленных на рисунке 4.3, и расчетов получаем рекомендацию к использованию принудительного воздушного охлаждения.

Для определения наименее теплостойких элементов, для которых необходимо проведение теплового расчета, использована методика, изложенная в методическом пособии «Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры» Роткопа, Л. [55].

Мощность, рассеиваемая элементом, $P_{эл} = 60 \text{ Вт}$. Площадь поверхности устройства, омываемая воздухом, $S_{эл} = 0,0005818 \text{ м}^2$. Определяем удельную мощность элемента:

$$q_{эл} = \frac{P_{эл}}{S_{эл}} = \frac{60}{0,0005818} = 103,1 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2} \quad (4.4)$$

Рассчитываем перегрев поверхности элемента:

$$\vartheta_{эл}^{(Д)} = \vartheta_z \left(0,75 + \frac{0,25 q_{эл}}{q_z} \right) = 0,75 * \left(20 + \frac{0,25 * 103100}{168,1} \right) = 140 \quad (4.5)$$

где ϑ_z – перегрев нагретой зоны;

q_z – удельная мощность нагретой зоны.

Тогда:

$$T_{эл}^{(Д)} = T_c + \vartheta_{эл}^{(Д)} = 313 + 140 = 453 \text{ К}. \quad (4.6)$$

Дальнейшему расчету подлежат те элементы, для которых выполняется условие:

$$T_{эл k}^{(Д)} < T_{эл}^{(Д)}. \quad (4.7)$$

Таким образом, выполнив сравнение максимальных температур элементов с температурой 453 К можно сделать вывод, что подробный тепловой расчет наименее теплостойких требуется только для силовых транзисторов.

Проведен выбор способа охлаждения на ранней стадии проектирования. Результатом, которого является проектирование корпуса с принудительным воздушным охлаждением.

4.4 Выбор и обоснование метода изготовления печатной платы

Для межконтактных соединений в конструкциях РЭС на первом иерархическом уровне применяется в основном печатный монтаж (с помощью печатных плат). Применение печатных плат создает предпосылки для механизации и автоматизации процессов сборки РЭС, повышает их надежность, обеспечивает повторяемость параметров монтажа (емкость, индуктивность) от образца к образцу [30].

Печатная плата – это один или более слоев диэлектрика, на котором сформирована хотя бы одна токопроводящая цепь. Предназначена печатная плата для соединения отдельных электронных элементов или узлов в единое действующее устройство [30].

Печатные платы имеют основные технические требования в соответствии с ГОСТ 23752–79 [56]. Элементами печатных плат являются диэлектрическое основание, металлическое покрытие в виде рисунка печатных проводников и контактных площадок, монтажные и фиксирующие отверстия. ГОСТ 23752–79 определяет требования к конструкции и внешнему виду ПП, к устойчивости при климатических и механических воздействиях и т. д.

Основные технические требования к печатным платам:

1 Габаритные размеры печатной платы не должны превышать установленных значений. Толщина печатной платы выбирается из следующего ряда значений: 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 мм.

2 Плотность монтажа определяется шириной проводников и расстоянием между ними. В соответствии с ГОСТ 23751–86 для печатных плат установлено пять классов точности монтажа [56].

3 Трассировку рисунка схемы проводят по координатной сетке с шагом 2,5; 1,25; 0,625 мм. Минимальные диаметры отверстий, располагаемых в узлах координатной сетки, зависят от максимального диаметра вывода навесного элемента, наличия металлизации и толщины платы.

4 Плотность тока в печатных проводниках наружных слоев плат не должна превышать 20 А/мм².

5 Сопротивление изоляции зависит от материала диэлектрического основания и характера электрических цепей, для стеклотекстолита оно должно быть не менее 104 МОм.

6 Плотность сцепления печатных проводников с основанием должна составлять не менее 15 МПа.

7 Допустимый уровень рабочего напряжения зависит от расстояния между проводниками: для 2 – 4 классов $U_{раб}$ – до 50 В, для 1 класса $U_{раб}$ – до 100 В.

8 Контактные площадки должны смачиваться припоем за 3 – 5 секунд и выдерживать не менее трех перепаяек.

В соответствии с ГОСТ 10317–79 рекомендуется использовать платы прямоугольной формы, размеры каждой стороны печатной платы должны быть кратными 2,5; 5 или 10 при длине соответственно до 110 [58]. Данные ограничения обусловлены в основном возможностями технологического оборудования по изготовлению ПП. При необходимости возможно отклонение габаритов, соотношения сторон и формы ПП от рекомендуемых.

ГОСТ 23751–86 устанавливает основные конструктивные параметры ПП (размеры печатных проводников, зазоров, контактных площадок, отверстий и т. п.), электрические параметры и т.д. [56].

При выборе толщины печатных плат учитывают метод изготовления и предъявляемые к ним механические требования.

В зависимости от сложности схемы, реализуемой на ПП, и руководствуясь экономическими критериями, выбирают тип ПП.

По конструктивному исполнению печатные платы подразделяют на односторонние, двусторонние и многослойные. В зависимости от жесткости материала основания, определяемой его характеристиками и толщиной основания, различают гибкие (толщина до 0,5 мм) и жесткие (толщина свыше 0,5 мм) печатные платы. При рассмотрении конструкций односторонних и двусторонних ПП, полученных нанесением проводящего рисунка с одной или двух сторон, следует обратить внимание на то, что необходимые электриче-

ские соединения в них выполняются с помощью либо металлизированных отверстий, либо контактных площадок [53].

В дипломном проектировании для дистанционно управляемого источника питания СВЧ магнетрона выбрана двусторонняя ПП.

Учитывая все вышеизложенные факторы, а также пользуясь информацией о допустимых значениях воздействующих факторов по группам жёсткости и условия эксплуатации в соответствии с ГОСТ 15150–69 принято, что печатная плата имеет 1 группу жёсткости.

Класс точности определяет минимальные значения основных размеров конструктивных элементов (ширина проводника, расстояния между центрами двух проводников (контактных площадок), ширина гарантийного пояса металлизации контактной площадки и др.). ГОСТ 23751–86 определяет 5 классов точности [56].

В дипломном проектировании разрабатывается ПП 3 класса точности. Для ПП 3 класса точности необходимо использовать высококачественные материалы, более точный инструмент и оборудование.

Печатные платы 3 класса наиболее распространенные, поскольку обеспечивают достаточно высокую плотность трассировки и монтажа, и для их производства требуется рядовое, хотя и специализированное, оборудование.

Для изготовления двусторонней ПП с металлизацией отверстий применяют комбинированные негативный и позитивный методы, сочетающие в себе принципы химических и электрохимических методов.

При негативном методе экспонирование рисунка печатного монтажа осуществляется с фотонегатива, травление медной фольги с пробельных мест производится до металлизации отверстий. После травления рисунка нужно не только сверлить отверстия, но и их металлизировать. Для этого необходимо принимать меры по созданию проводящего подслоя в отверстиях.

Поэтому перед сверлением плату [58]:

- покрывают защитной «лаковой рубашкой»;
- сверлят через нее отверстия;
- химически металлизуют всю заготовку.

Лаковую рубашку наносят так, чтобы она легко отслаивалась. После ее удаления химически осажденный металл остается только в отверстиях.

Недостатки негативного метода [58]:

1 При металлизации отверстий открытые участки диэлектрического основания насыщаются химическими растворами, что в свою очередь, повышает их проводимость. Надежность изоляции, реализуемая этим методом – низкая.

2 Для гальванической металлизации отверстий возникают большие затруднения для организации электрического контакта стенок отверстий с катодом гальванической ванны. Это обуславливает наличие заметного количества непрокрытых или плохо прокрытых отверстий.

3 При отделении лаковой рубашки возможно частичное разрушение проводящего подслоя в отверстиях. Условия для электрохимической металлизации нарушаются. В связи с этим негативный метод уступил в распространении позитивному.

Позитивный метод предусматривает экспонирование с фотопозитива. Операция травления осуществляется после металлизации отверстий, а для соединения металлизированных отверстий с катодом используется еще не вытравленная фольга, изначально присутствующая на поверхности заготовки [58].

Преимущества позитивного метода [58]:

- возможность воспроизведения всех типов печатных элементов с высокой степенью разрешения;
- защищенность фольгой изоляции от технологических растворов – хорошая надежность изоляции;
- хорошая прочность сцепления (адгезия) металлических элементов платы с диэлектрическим основанием.

Недостатки позитивного метода [58]:

- относительно большая глубина травления (фольга + металлизация заготовки) создает боковое подтравливание, что существенно ограничивает разрешающую способность процесса;
- травление рисунка по металлорезисту ограничивает свободу выбора травящих растворов;
- после травления рисунка схемы, металлорезист или осветляют для улучшения паяемости, или удаляют и, после нанесения паяльной маски, осаждают финишные покрытия под пайку. Оба варианта требуют дополнительных капитальных затрат и прямых расходов.

Единственным преимуществом негативного метода на ранних стадиях развития производства печатных плат с металлизированными отверстиями являлась возможность сверления отверстий по сформированному рисунку печатной платы, когда контактные площадки можно использовать как мишень для ручного сверления отверстия [58].

Приняв во внимание все вышеперечисленное, сделан вывод, что в дипломном проектировании в качестве метода ПП будет комбинированный позитивный метод.

5 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРОЕКТИРУЕМОГО ИЗДЕЛИЯ

5.1 Расчет теплового режима

Конструкция РЭС представляет собой систему тел с сосредоточенными источниками тепла. Получить аналитические решения в задачах теплообмена таких систем сложно. Для обеспечения возможности математического анализа, переходят от реальных конструкций к некоторым условным понятиям, заменяя эти конструкции тепловыми моделям.

Пространство, заполненное теплорассеивающими элементами, называют нагретой зоной. Реальное теплоотражающее пространство обычно имеет весьма неправильное расположение источников тепла.

Среднеповерхностная температура и перегрев этого пространства обозначаются соответственно Q_3 и U_3 . В тепловой модели реальная поверхность нагретой зоны заменяется изотермической поверхностью S_3 некоторого прямоугольного параллелепипеда с той же температурой и перегревом и с равномерно распределенными источниками тепла. Это – изотермическая поверхность эквивалентной нагретой зоны. Причем, если источник тепла заметно изменяется по высоте платы или условия теплообмена одной части платы резко отличаются от условий теплообмена другой части платы, то проводят более подробную разбивку.

Поверхность корпуса S_R в тепловой модели также заменяется изотермической поверхностью, имеющей среднеповерхностную температуру и перегрев Q_R и U_R . В результате введения тепловых моделей и понятия эквивалентной нагретой зоны становится возможным математическое описание процессов теплообмена РЭС и создание инженерных методик тепловых расчетов.

Существенное влияние на тепловой режим РЭС оказывают: выделение тепла самим РЭС, условия эксплуатации, а также конструкция и габариты электронного средства, особенности системы охлаждения. Перечисленные факторы учитывают при расчете теплового режима электронного средства. Тепловой расчет всегда носит проверочный характер.

Расчет теплового режима РЭС заключается в определении по исходным данным температуры нагретой зоны и температур поверхностей теплонагруженных ИЭТ и сравнения полученных значений с допустимыми для каждого элемента в заданных условиях эксплуатации.

Исходными данными для проведения расчета являются:

- Мощность, рассеиваемая в блоке, Вт;
- Габаритные размеры корпуса блока, мм;
- Коэффициент заполнения блока;
- Температура окружающей среды, °С;
- Минимальная верхняя предельная температура элемента, °С.

Расчет теплового режима РЭС по индивидуальному заданию, проводим при следующих допущениях: конструкция разрабатываемого электронного средства не имеет теплонагруженных элементов и, как следствие, температурное поле распределено по плате равномерно.

Площадь поверхности корпуса $S_K, \text{м}^2$ определяем по формуле:

$$S_K = 2 \cdot [L_1 \cdot L_2 + L_3 \cdot (L_1 + L_2)] \quad [\text{м}^2]. \quad (5.1)$$

где L_1, L_2, L_3 – габаритные размеры блока.

Подставляя в формулу (5.1) значения, получаем:

$$S_K = 2 \cdot [300 \cdot 200 + 350 \cdot (300 + 200)] = 470000 \text{мм}^2 = 0,47 \text{ м}^2.$$

Поверхность нагретой зоны $S_3, \text{м}^2$ определяется по формуле:

$$S_3 = 2 \cdot [L_1 \cdot L_2 + K_3 \cdot L_3 \cdot (L_1 + L_2)] \quad [\text{м}^2]. \quad (5.2)$$

где L_1, L_2, L_3 – размеры нагретой зоны;

K_3 – коэффициент заполнения по объёму (0,3...0,7).

Подставляя данные формулу (5.2), получаем:

$$S_3 = 2 \cdot [300 \cdot 200 + 0,7 \cdot 350 \cdot (300 + 200)] = 365000 \text{ мм}^2 = 0,365 \text{ м}^2.$$

Удельная мощность, рассеиваемая с поверхности нагретой зоны $q_3, \text{Вт/м}^2$, определяется как:

$$q_3 = \frac{P}{S_3} \quad [\text{Вт/м}^2]. \quad (5.3)$$

где P – мощность источников тепла, рассеиваемая в аппарате, которая определяется по формуле:

$$P = K_{\text{нагрузки}} \cdot P_{\text{потр}} \quad [\text{Вт}]. \quad (5.4)$$

где $P_{\text{потр}}$ – мощность, потребляемая устройством ($P_{\text{потр}} = 1020 \text{ Вт}$);

$K_{\text{нагрузки}}$ – коэффициент нагрузки (0,4...0,8).

Обобщая вышесказанное, подставляем полученные данные в формулы (5.3) и (5.4), получаем:

$$P = 0,4 \cdot 1020 = 408 \text{ Вт.}$$

$$q_3 = \frac{408}{0,365} = 1117,8 \text{ Вт/м}^2.$$

Удельная мощность $q_K, \text{Вт/м}^2$, рассеиваемая поверхностью корпуса, определяется как:

$$q_K = \frac{P}{S_K} \quad [\text{кВт/м}^2]. \quad (5.5)$$

Подставим рассчитанные ранее значения в формулу (5.5):

$$q_K = \frac{408,2}{0,47} = 868,6 \text{ Вт/м}^2.$$

Коэффициент, являющийся функцией удельной мощности корпуса Q_1 , определяется по формуле:

$$Q_1 = 0,1474 \cdot q_K - 0,2962 \cdot 10^{-3} \cdot q_K^2 + 0,3127 \cdot 10^{-6} \cdot q_K^3 \quad (5.6)$$

Вычислим коэффициент Q_1 , подставляя расчётные данные в формулу (5.6):

$$\begin{aligned} Q_1 &= 0,1474 \cdot 868,6 - 0,2962 \cdot 10^{-3} \cdot 868,6^2 + 0,3127 \cdot 10^{-6} \cdot 868,6^3 \\ &= 140,5 \end{aligned}$$

Коэффициент, являющийся функцией удельной мощности нагретой зоны Q_2 , определяется по формуле:

$$Q_2 = 0,1390 \cdot q_3 - 0,1223 \cdot 10^{-3} \cdot q_3^2 + 0,0698 \cdot 10^{-6} \cdot q_3^3 \quad (5.7)$$

Получим данный коэффициент, подставляя данные в формулу (5.7):

$$\begin{aligned} Q_2 &= 0,1390 \cdot 1187,8 - 0,1223 \cdot 10^{-3} \cdot 1187,8^2 + 0,0698 \cdot 10^{-6} \cdot 1187,8^3 \\ &= 109,5 \end{aligned}$$

Коэффициент, зависящий от давления окружающей среды K_{H_1} определяется по формуле:

$$K_{H_1} = 0,82 + \frac{1}{0,925 + 4,6 \cdot 10^{-5} \cdot H_1} \quad (5.8)$$

где $H_1 = 1 \cdot 10^5$ – давление окружающей среды.

Подставляя справочные данные в формулу (5.8), получим:

$$K_{H_1} = 0,82 + \frac{1}{0,925 + 4,6} = 1$$

Коэффициент, зависящий от давления внутри корпуса K_{H_2} определяется по формуле:

$$K_{H_2} = 0,8 + \frac{1}{1,25 + 5,8 \cdot 10^{-5} \cdot H_2} \quad (5.9)$$

где $H_2 = 1 \cdot 10^5$ – давление внутри корпуса.

Подставляя справочные данные в формулу (5.9), получим:

$$K_{H_2} = 0,8 + \frac{1}{1,2 + 5,8} = 0,943$$

Перегрев корпуса Q_K определяется по формуле:

$$Q_K = Q_1 \cdot K_{H_1} \quad (5.10)$$

Подставим рассчитанные ранее коэффициенты по формулам (5.6) и (5.8) в формулу (5.10):

$$Q_K = 140,5 \cdot 1 = 140,5$$

Перегрев нагретой зоны Q_K определяется по формуле:

$$Q_3 = Q_K + (Q_2 - Q_1) \cdot K_{H_2} \quad (5.11)$$

Подставим рассчитанные ранее коэффициенты по формулам (5.10), (5.8), (5.6) и (5.9) в формулу (5.11):

$$Q_3 = 140,5 + (109,5 - 140,5) \cdot 0,943 = 111,27$$

Температуру корпуса T_K , °C определяем по формуле:

$$T_K = Q_K + T_C \quad [^\circ\text{C}]. \quad (5.12)$$

где $T_C = 40^\circ\text{C}$ – верхнее значение температуры окружающей среды.

Подставим полученные данные в формулу (5.12):

$$T_K = 140,5 + 40 = 180,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температуру нагретой зоны T_3 , °C определяем по формуле:

$$T_3 = Q_3 + T_c \quad [^{\circ}\text{C}]. \quad (5.13)$$

Подставим полученные данные в формулу (5.13):

$$T_3 = 111,27 + 40 = 151,27 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Средняя температура воздуха в блоке T_B , °C вычисляется по формуле:

$$T_B = T_c + v_B \quad [^{\circ}\text{C}]. \quad (5.14)$$

где v_B – средний перегрев воздуха в блоке, °C.

Коэффициент v_1 °C, в зависимости от удельной мощности корпуса определяется по рисунку 5.1.

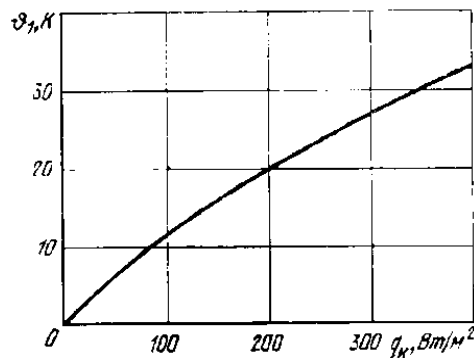


Рисунок 5.1 – Зависимость перегрева корпуса от удельной мощности

По графику коэффициент v_1 равен 70 °C.

Находим коэффициент v_2 °C, в зависимости от удельной мощности нагретой зоны блока по рисунку 5.2.

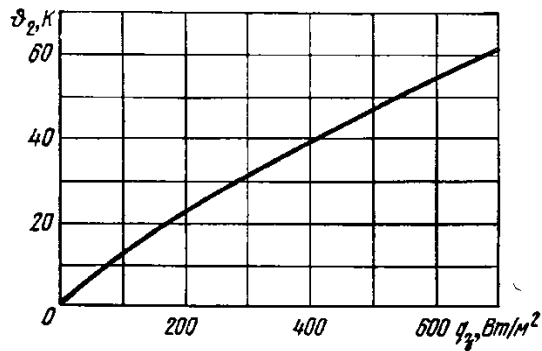


Рисунок 5.2 – Зависимость перегрева нагретой зоны от удельной мощности рассеивания

По графику коэффициент v_2 равен 110 °С.

Перегрев корпуса блока v_K °С, вычисляется по формуле:

$$v_K = v_1 \cdot K_{H_1} \text{ [°C]}. \quad (5.15)$$

Подставим полученные значения в формулу (5.15):

$$v_K = 70 \cdot 1 = 70 \text{ °С}.$$

Перегрев нагретой зоны v_3 °С, вычисляется по формуле:

$$v_3 = v_K + (v_2 - v_1) \cdot K_{H_2} \text{ [°C]}. \quad (5.16)$$

Подставим полученные значения в формулу (5.16):

$$v_3 = 70 + (110 - 70) \cdot 0,943 = 107,72 \text{ °С}.$$

Средний перегрев воздуха в блоке v_B , °С, вычисляется по формуле:

$$v_B = 0,5 \cdot (v_K + v_3) \text{ [°C]}. \quad (5.17)$$

Подставим рассчитанные ранее значения в формулу (5.17):

$$v_B = 0,5 \cdot (70 + 107,72) = 88,86 \text{ °С}.$$

Тогда, подставляя рассчитанное значение в формуле (5.17) в формулу (5.14), получим:

$$T_B = 40 + 88,86 = 128,86 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Результаты расчётов:

1. Температура корпуса $T_K = 180,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
2. Температура нагретой зоны $T_3 = 151,27 \text{ }^{\circ}\text{C}$
3. Средняя температура воздуха в блоке $T_B = 128,86^{\circ}\text{C}$

Минимальная площадь теплопередающей поверхности S_{min} , мм² определяется по формуле:

$$S_{min} \approx \left(\frac{50 \cdot P}{\Delta T} \right)^2 \quad [\text{мм}^2]. \quad (5.18)$$

где P – максимальная рассеиваемая мощность;

ΔT – разность между максимальной температурой нагрева корпуса и температурой окружающей среды.

Подставляя рассчитанные ранее данные в формулу (5.18), получаем:

$$S_{min} \approx \left(\frac{50 \cdot 408}{180,5 - 40} \right)^2 = 2,96 \text{ м}^2.$$

В главе 4.3 выдвинуто предположение о возможности применения естественного воздушного охлаждения, ввиду эксплуатации устройства на открытом воздухе.

Так как оказалось, что $S_{min} > S_K$, можно сделать вывод, что конструкция корпуса и нуждается в изменении и применении в ней системы принудительного воздушного охлаждения.

5.2 Расчет на механические воздействия

Все виды РЭС подвергаются воздействию внешних механических нагрузок, которые передаются к каждой детали, входящей в конструкцию. Механические воздействия имеют место в работающей РЭС, если она установлена на подвижном объекте, или только при транспортировке ее в нерабочем состоянии, как в случае стационарной и некоторых видов возимой РЭС. При разработке конструкции РЭС необходимо обеспечить требуемую жесткость и механическую прочность элементов.

Под прочностью конструкции понимают нагрузку, которую может выдержать конструкция без остаточной деформации или разрушения. Повышение прочности конструкции достигается усилением конструктивной основы: контролем болтовых соединений, повышение прочности узлов методами заливки и обволакивания. Во всех случаях нельзя допустить образование механической колебательной системы.

Так как создаваемый прибор относится к наземным РЭС, то при транспортировке, эксплуатации, случайных падениях он может подвергаться динамическим воздействиям.

Изменения обобщенных параметров механических воздействий на наземн РЭС находятся в пределах:

- Вибрации: $(10 \dots 70)$ Гц, виброперегрузка $n = (1 \dots 4)g$;
- Ударные сотрясения: $n_y = (10 \dots 15)g$, длительность $t = (5 \dots 10)g$;
- Линейные перегрузки: $n_{\text{л}} = (2 \dots 4)g$.

Расчет на вибропрочность несущих конструкций типа плат сводится к определению наибольших напряжений исходя из вида деформации, вызванной действием вибраций в определенном диапазоне частот, и сравнением полученных значений с допустимыми [55].

Этот расчет можно свести к нахождению собственной частоты колебаний f_0 , при которой плата с определенными размерами и механическими характеристиками имеет прогибы и напряжения в пределах допустимых значений. При этом частота колебаний платы не должна быть близка к ее резонансной частоте.

Если собственная частота вибрации превосходит частоту внешних воздействий, то условие вибропрочности выполнено. В противном случае необходимо принимать дополнительные меры по обеспечению виброзащиты.

Для расчёта частоты собственных колебаний платы с расположенными на ней ЭРЭ существенным является выбор характера её закрепления по контуру. В проектируемом устройстве плата закреплена на корпусе по углам в четырёх точках.

Для инженерных расчётов более удобно при таком способе закрепления платы собственную частоту f_0 , Гц определять по формуле:

$$f_0 = \frac{\pi}{2a^2} \cdot \left(1 + \frac{a^2}{b^2}\right) \cdot \sqrt{\frac{D}{M} \cdot a \cdot b} \quad [\text{Гц}]. \quad (5.19)$$

где a – длина платы, м ($150 \cdot 10^{-3}$ м);

b – ширина платы, м ($97 \cdot 10^{-3}$ м);

M – масса платы с ЭРЭ, кг ($270 \cdot 10^{-3}$ кг);

D – цилиндрическая жёсткость платы, Н · м, определяемая по формуле:

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \quad [\text{Н} \cdot \text{м}]. \quad (5.20)$$

где E – модуль упругости материала платы, Па ($E = 3,02 \cdot 10^{10}$ Па);

h – толщина платы, м ($h = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м);

ν – коэффициент Пуассона для материала платы ($\nu = 0,22$).

Подставляя значения габаритных размеров платы и механических характеристик материала платы в формулы (5.19) и (5.20), получим частоту собственных колебаний платы f_0 , Гц:

$$D = \frac{3,02 \cdot 10^{10} \cdot (1,5 \cdot 10^{-3})^3}{12 \cdot (1 - 0,22^2)} = 8,926 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

$$f_0 = \frac{\pi}{2 \cdot 0,15^2} \cdot \left(1 + \frac{0,15^2}{0,097^2}\right) \cdot \sqrt{\frac{8,926}{0,27} \cdot 0,15 \cdot 0,097} = 164 \text{ Гц}$$

Из расчётов видно, что частота собственных колебаний платы выше (в 2 раза), чем частота внешних воздействий (10...70 Гц), следовательно, защитные мероприятия проводить не требуется.

Таким образом расчет показал, что плата будет обладать достаточной усталостной долговечностью при воздействии вибрации.

5.3 Расчет конструктивно-технологических параметров печатных плат

Под компоновкой электронной аппаратуры понимается процесс размещения комплектующих модулей, изделий электронной техники и деталей на плоскости или в пространстве с определением основных геометрических форм и размеров, а также частичное определение массы изделия. На практике задача компоновки чаще всего реализуется путем размещения готовых элементов с заданными формами, размером и весом на плоскости с учетом электрических, магнитных, механических, тепловых и других видов связи [56].

Исходными данными для компоновочного расчета являются: перечень элементов, представленный в приложении Г, габаритные и установочные размеры ЭРЭ.

Расчет номинальной ширины проводника:

$$t = t_{\text{мд}} \cdot J_H \cdot h \cdot \rho \quad [\text{мм}]. \quad (5.21)$$

где $t_{\text{мд}}$ – минимально допустимая ширина проводника, мм (из таблицы);

J_H – ток нагрузки, А;

h – толщина проводника, мм (0,035 мм);

ρ – удельная плотность тока, А/мм²;

- для наклеенной фольги – 20 А/мм²;

- для гальванически осажденной – 15 А/мм².

Подставляя полученные данные в формулу (5.21) получаем:

$$t = 0,25 \cdot 5 \cdot 0,035 \cdot 20 = 0,85 \text{ мм}.$$

Расчёт диаметров монтажных отверстий d , мм проводится по следующей формуле:

$$d = d_{\text{э}} + r + |d_{\text{н0}}| \quad [\text{мм}]. \quad (5.22)$$

где $d_{\text{э}}$ – максимальное значение диаметра вывода навесного ИЭТ, устанавливаемого на печатную плату (для прямоугольного вывода за диаметр берется диагональ его сечения), мм;

$|d_{\text{н0}}|$ – нижнее предельное отклонение номинального значения диаметра отверстия, мм;

r – разность между минимальным значением диаметра отверстия и максимальным значением диаметра вывода (для прямоугольных – диагонали сечения, устанавливаемого ИЭТ), мм.

Допуски на расположение отверстий и контактных площадок для ПП 3 класса точности представлены в таблице 5.1 [55].

Таблица 5.1 – Допуски на расположение отверстий и контактных площадок

Параметры	Класс точности
	3
Допуск на отверстие Δd , мм, с металлизацией и оплавлением: $D > 1$ мм.	+0,05 –0,18
Допуск на ширину проводника Δb , мм: без покрытия.	$\pm 0,05$
Допуск на расположение отверстий δd , мм, при размере платы: менее 180 мм.	0,08
Допуск на расположение контактных площадок δp , мм, на ДПП при размере платы: менее 180 мм.	0,15
Допуск на расположение проводников δl , мм: на ДПП.	0,05
Расстояние от края просверленного отверстия до края контактной площадки, b_m , мм.	0,035

На плате присутствуют следующие монтажные отверстия:

- Микросхемы с корпусом типа DIP;
- Элементы (резисторы, конденсаторы) устанавливаемые методом штыревого монтажа
- переходные отверстия.

Расчёт диаметров монтажных отверстий:

$$d = 1,1 + 0,1 + 0,1 = 1,3 \text{ мм.}$$

Диаметр отверстий под переходные отверстия выбирается исходя из класса точности: $d = 0,5$ мм.

Так как диаметры отверстий под микросхемы и элементы (резисторы, конденсаторы) устанавливаемые методом штыревого монтажа оказались равными, расчёт контактных площадок для них можно вести совместно.

Расчёт диаметров контактных площадок D , мм производится по формуле:

$$D = (d + d_{BO}) + 2 \cdot b + \Delta t_{BO} + 2 \cdot \Delta d_{TP} + (T_d^2 + T_D^2 + \Delta t_{HO}^2)^{\frac{1}{2}} \text{ [мм]}. \quad (5.23)$$

где d – номинальное значение монтажного отверстия, мм

Δd_{BO} – верхнее предельное отклонение диаметра отверстия, мм;

Δd_{TP} – величина подтравливания диэлектрика, которая для ДПП принимается равной 0,03 мм.

b – минимальное значение гарантийного пояса, мм;

T_d – позиционный допуск расположения оси отверстия, мм;

T_D – позиционный допуск расположения центра контактной площадки, мм;

Δt_{BO} – верхнее предельное отклонение диаметра контактной площадки, мм;

Δt_{HO} – нижнее предельное отклонение диаметра контактной площадки, мм.

Подставляя справочные данные в формулу (5.23) получаем диаметр контактных площадок под:

$$D = 1,3 + 0,05 + 2 \cdot 0,2 + 0,05 + 2 \cdot 0,03 + (0,05 + 0,1^2 + 0,2^2)^{\frac{1}{2}} = 2,1 \text{ мм.}$$

Аналогично поступаем с расчётом и переходных отверстий:

$$D = 0,5 + 0 + 2 \cdot 0,2 + 0,05 + 2 \cdot 0,03 + (0,05 + 0,1^2 + 0,2^2)^{\frac{1}{2}} = 1,2 \text{ мм.}$$

Расчет наименьшего расстояния для прокладки n -го количества проводников L , мм проводится по формуле:

$$L = \frac{D_1 + D_2}{2} + t \cdot n + S \cdot (n + 1) + T_i \text{ [мм]}. \quad (5.24)$$

где D_1, D_2 – диаметры контактных площадок, мм;

t – предельное отклонение ширины элемента проводящего рисунка, мм;

n – количество печатных проводников, мм;

T_i – позиционный допуск расположения печатного проводника, который учитывается только при $n > 0$, мм;

S – минимальное расстояние между центрами проводников, мм.

Подставляя данные в формулу (5.8), получаем наименьшее расстояние для прокладки одного проводника:

$$L = \frac{2,1 + 2,1}{2} + 0,1 \cdot 8 + 0,25 \cdot (8 + 1) + 0,05 = 5,2 \text{ мм.}$$

Номинальное расстояние между проводником и контактной площадкой рассчитывается по формуле:

$$\begin{aligned} S_1 &= L_0 - \left[\left(\frac{D}{2} + \delta p \right) + \left(\frac{b}{2} + \delta l \right) \right] = \\ &= 2,6 - \left[\left(\frac{2,1}{2} + 0,15 \right) + \left(\frac{0,85}{2} + 0,05 \right) \right] = 0,925 \text{ мм}, \end{aligned} \quad (5.25)$$

где L_0 – расстояние между центрами рассматриваемых элементов;

δl – допуск на расположение проводников.

Номинальное расстояние между двумя контактными площадками рассчитывается по формуле:

$$S_2 = L_0 - D + \delta p = 0,65 \text{ мм}. \quad (5.26)$$

Номинальное расстояние между двумя проводниками рассчитывается по формуле:

$$S_3 = L_0 - D + \delta l = 0,55 \text{ мм}. \quad (5.27)$$

Таким образом, проведен расчет конструктивно – технологических параметров ПП. В результате которого рассчитаны элементы проводящего рисунка. Полученные значения печатного монтажа отвечают требованиям, предъявляемым к плате 3 класса точности.

5.4 Расчет электромагнитной совместимости

С уменьшением времени переключения (в микроэлектронных изделиях оно составляет единицы наносекунд) большое значение имеют степени влияния линий связи (сопротивления, емкости, индуктивности и т.д.) друг на друга (паразитная емкость, взаимоиנדуктивность и т.д.).

Постоянный ток в печатных проводниках распределяется равномерно по его сечению при условии, что материал проводника однороден и не имеет локальных посторонних включений других веществ.

В электронных средствах печатные проводники, электрически объединяющие те или иные элементы схемы, проходят на достаточно близком расстоянии друг от друга и имеют относительно малые размеры сечения. При

большом времени переключения и малых тактовых частотах параметры печатных проводников, соединяющие входы одних элементов со входами других, не оказывают существенного воздействия на быстродействие всей схемы в целом и на помехоустойчивость элементов.

Сопротивление проводника R , Ом рассчитывается по формуле:

$$R = \frac{\rho \cdot l_n}{b \cdot t_n} \text{ [Ом]}. \quad (5.28)$$

где ρ – удельное объемное электрическое сопротивление проводника, который равен 0,0175 мкОм/м;

l_n – длина проводника, мм;

b – ширина проводника, мм;

t_n – толщина проводника, мкм.

Расчёт будем вести самом длинном участке, на котором проводники параллельны друг другу. Подставляя данные в формулу (5.28), получим:

$$R = \frac{0,0175 \cdot 33}{0,6 \cdot 35} = 0,0275 \text{ Ом}.$$

Допустимый ток в печатном проводнике I_{max} , А находим по формуле:

$$I_{max} = \gamma_{\text{доп}} \cdot b \cdot t_n \text{ [А]}. \quad (5.29)$$

где $\gamma_{\text{доп}}$ – допустимая плотность тока, которая равна 48 А/мм²;

b – ширина проводника, мм;

t_n – толщина проводника, мм.

Вычисляем значение данного параметра, подставляя известные данные в формулу (5.29):

$$I_{max} = 48 \cdot 0,6 \cdot 0,035 = 1,008 \text{ А}.$$

Емкость C , пФ между двумя выбранными проводящими элементами определяется по формуле:

$$C = \frac{0,12 \cdot \xi_r \cdot l_n}{\log_{10} \left[\frac{2 \cdot a}{b + t_n} \right]} \text{ [пФ]}. \quad (5.30)$$

где l_n – длина участка, на котором проводники параллельны друг другу, мм;

a – толщина диэлектрика, мм;

b – ширина проводника, мм;

t_n – толщина проводника, мм;

ξ_r – диэлектрическая проницаемость среды между проводниками, расположенных на наружных поверхностях платы, покрытой лаком, определяется по формуле:

$$\xi_r = 0,5 \cdot (\xi_{\Pi} + \xi_{\text{Л}}) \quad (5.31)$$

где ξ_{Π} и $\xi_{\text{Л}}$ – диэлектрические проницаемости материала платы и лака (для стеклотекстолита $\xi_{\Pi} = 6$, для лака $\xi_{\text{Л}} = 4$).

Подставим полученные значения в формулы (5.3) и (5.31), получим:

$$\xi_r = 0,5 \cdot (6 + 4) = 5.$$

$$C = \frac{0,12 \cdot 5 \cdot 10}{\log_{10} \left[\frac{2 \cdot 0,7}{0,6 + 0,035} \right]} = 17,5 \text{ пФ}.$$

Для расчета паразитной индуктивности проводников печатной платы, рассчитывается собственная индуктивность печатного проводника L , мкГн, по формуле:

$$L = 0,0002 \cdot l_n \cdot \left(\log_{10} \frac{2 \cdot l_n}{t_n + b} + 0,2235 \cdot \frac{t_n + b}{l_n} + 0,5 \right) [\text{мкГн}]. \quad (5.32)$$

где l_n – длина участка проводника, мм;

b – ширина проводника, мм;

t_n – толщина проводника, мм.

Подставим имеющиеся данные в формулу (5.32):

$$L = 0,0002 \cdot 33 \cdot \left(\log_{10} \frac{2 \cdot 33}{0,035 + 0,6} + 0,2235 \cdot \frac{0,035 + 0,6}{33} + 0,5 \right) = 0,0166 \text{ мкГн}.$$

Индуктивность двух параллельных печатных проводников, расположенных с одной стороны печатной платы с зазором и с противоположным направлением тока в них L , мкГн, рассчитывается по формуле:

$$L = 0,0004 \cdot l_n \cdot \left(\ln \frac{a+b}{t_n+b} - \frac{a-b}{l_n} + 0,2235 \cdot \frac{t_n+b}{l_n} + 1,5 \right) [\text{мкГн}]. \quad (5.33)$$

где l_n – длина участка, на котором проводники параллельны друг другу, мм;

b – ширина проводника, мм;

t_n – толщина проводника, мм;

a – толщина диэлектрика, мм.

Подставим имеющиеся данные в формулу (5.33):

$$L = 0,0004 \cdot 33 \cdot \left(\ln \frac{1+0,6}{0,035+0,6} - \frac{1-0,6}{33} + 0,2235 \cdot \frac{0,035+0,6}{33} + 1,5 \right) = 0,0319 \text{ мкГн}$$

Полученные значения паразитной ёмкости и индуктивности малы. Мы можем подтвердить предположения по поводу электромагнитной совместимости: влияние возможных внутренних помех, создаваемых печатными проводниками, не оказывает существенного воздействия на быстродействие всей схемы в целом и на помехоустойчивость элементов.

6. ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ПАКЕТОВ ПРИКЛАДНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ.

В настоящее время компьютеризация ускоренными темпами проникает в деятельность исследовательских и проектных организаций, поднимая проектную работу на принципиально новый уровень, при котором значительно ускоряются скорость и качество проектирования, сложные инженерные задачи решаются с большим обоснованием. Во многом этому способствует использование высокоэффективных специализированных программ, реализуемых как в виде самостоятельных программных продуктов, так и в виде надстроек и приложений к известным пакетам прикладных программ [60].

В наши дни все крупные научно-исследовательские и проектные институты, производственные предприятия и инжиниринговые фирмы в своей работе применяют компьютерные системы технологического моделирования, сменившие программы расчета технологических процессов. САМ/CAE-системы представляют собой «программные конструкторы», позволяющие достаточно быстро «собирать» практически любые процессы и технологические схемы, выполнять многовариантные расчеты технологических режимов функционирования, материальных и тепловых балансов, основных показателей качества сырья и продукции [61].

Для профессионального использования моделирования необходима разработка технологических моделей, адекватных реальным объектам и явлениям. Для этого модели предварительно настраивают с использованием результатов исследований потоков и параметров внутреннего состояния моделируемого объекта так, чтобы в процессе вычислительного эксперимента воспроизвести с высокой степенью точности количественные и качественные характеристики продукции, режимные параметры процесса. Качество проектирования и расчета новых технологических объектов зависит во многом от точности имеющейся информации о составе сырья. При этом модели разрабатываемых объектов необходимо настраивать на основании данных об эксплуатации аналогичных действующих объектов [61].

Существует большое количество программных пакетов для решения различного рода инженерных задач. Однако современные программные пакеты позволяют ускорить и упростить процесс моделирования, предоставляя при этом достаточно точные результаты.

Система автоматизированного проектирования *SolidWorks* для использования на персональном компьютере в операционной среде *Microsoft*

Windows. В *SolidWorks* используется принцип трехмерного твердотельного и поверхностного параметрического проектирования, что позволяет конструктору создавать объемные детали и компоновать сборки в виде трехмерных электронных моделей, по которым создаются двухмерные чертежи и спецификации в соответствии с требованиями [62].

С помощью программы *SolidWorks* можно увидеть будущее изделие со всех сторон в объеме и придать ему реалистичное отображение в соответствии с выбранным материалом для предварительной оценки дизайна. Обеспечивает разработку изделий любой степени сложности и назначения [63].

Решаемые задачи [64]:

- 3D-проектирование изделий (деталей и сборок) любой степени сложности с учётом специфики изготовления;
- Создание конструкторской документации в строгом соответствии с ГОСТ;
- Инженерный анализ (прочность, устойчивость, теплопередача, частотный анализ, динамика механизмов, газо/гидродинамика, оптика и светотехника, электромагнитные расчёты, анализ размерных цепей и пр.);
- Экспресс-анализ технологичности на этапе проектирования;
- Анализ технологичности конструкции изделия;
- Разработка технологических процессов и др.

ANSYS – это программный пакет конечно - элементного анализа, решающий задачи в различных областях инженерной деятельности, включая связанные multidисциплинарные задачи. *ANSYS* – это профессиональный конечно-элементный расчетный комплекс, позволяющий решать задачи прочности, теплообмена, электромагнетизма, гидрогазодинамики как по отдельности, так и совместно [65].

Altium Designer – комплексная система автоматизированного проектирования радиоэлектронных средств, разработанная австралийской компанией *Altium* и является самой распространённой системой проектирования электроники.

Данная САПР позволяет легко создавать проекты печатных плат с помощью интуитивно понятного и функционального интерфейса, который позволяет взаимодействовать со всеми аспектами процесса проектирования электроники [66].

Workbench – это единая интерактивная среда, интегрирующая различные программные продукты, разрабатываемые *ANSYS, Inc.* как друг с другом, так и с *CAD*-системами, имеющая модульную структуру и дающая новые воз-

возможности как в препроцессорной подготовке, так и в решении задач и обработке результатов. Основное призвание *Workbench* в том, чтобы максимально ускорить, упростить, повысить эффективность и унифицировать постановку задач вне зависимости от их принадлежности к той или иной физической дисциплине и используемого решателя [67].

Для работы с электронными чертежами на профессиональном уровне используется *Autodesk AutoCAD*. Создание чертежей в *AutoCAD* обладает многими преимуществами. Например, позволяет начертить чертеж любой геометрической фигуры с точно заданными размерами с последующей легкостью внесения корректировок. К тому же, с помощью программы можно легко уменьшить или увеличить размер чертежа [68].

ELCUT – это комплекс программ для инженерного моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач методом конечных элементов. Основные плюсы данного программного комплекса: дружественный пользовательский интерфейс, простота описания моделей, широкие аналитические возможности комплекса и высокая степень автоматизации всех операций. *ELCUT* это полноценное *Windows* приложение, которое разработано специально для этой платформы. Недостатки: двумерная геометрическая модель, а также отсутствует возможность одновременного решения полевых задач [69].

Анализируя исходные данные к проекту и опираясь на личный опыт работы выделены 3 программных обеспечения: *Autodesk AutoCAD*, *SolidWorks*, *Altium Designer*.

7. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

Разработка платы исследуемого устройства происходило в программе *Altium Designer*.

Altium Designer – комплексная система автоматизированного проектирования электронных модулей на базе печатных плат, которая позволяет выполнять полный спектр проектных задач: от создания концепции функционирования до выпуска полного комплекта конструкторских и производственных данных [66].

Altium Designer – самая распространенная система проектирования печатных плат среди инженеров и конструкторов электроники. Это доступное, эффективное и современное решение, с единым интерфейсом пользователя, под управлением простой и понятной системы лицензирования. Единая модель данных *Altium Designer* позволяет быстро и эффективно проектировать новые электронные изделия [66].

При построении модели можно выделить следующие этапы построения:

- выбор элементной базы модуля;
- создание библиотеки с условно - графическими обозначениями всех элементов и их посадочных мест;
- построение схемы электрической принципиальной;
- размещение элементов на плате исходя из нормативных документов и технического назначения;

Поэтапное создание будет представлено на одном элементе электронного модуля, условное графическое обозначение которого представлено на рисунке 7.1.

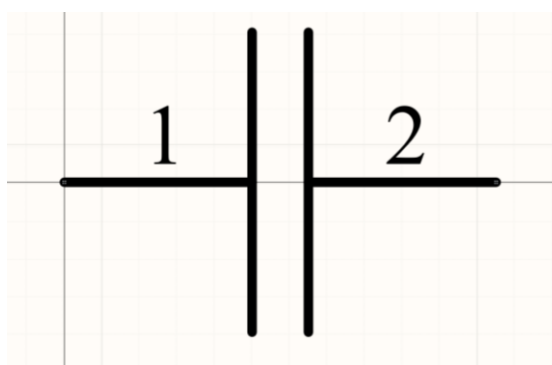


Рисунок 7.1 – Условное графическое обозначение керамического конденсатора типоразмера 0805

3. Создание контактной площадки для него в *Altium Designer* представлено на рисунке 7.2. Размеры и форма контактных площадок были выбраны таким образом, чтобы они полностью соответствовали выбранному конденсатору.

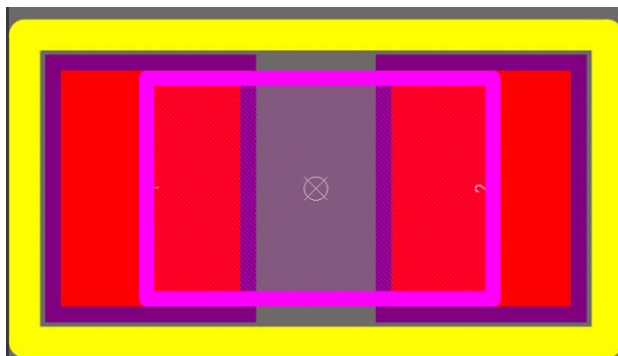


Рисунок 7.2 – Все слои посадочного места в *Altium Designer*

4. После создания библиотеки с УГО и библиотеки посадочных мест для всех элементов ПП в *Altium Designer* была создана схема электрическая принципиальная устройства идентификации объектов. Осуществлена проверка и компиляция электрической принципиальной схемы. После чего она была импортирована на печатную плату.

5. На печатной плате были размещены все компоненты устройства. Были созданы правила проектирования и определена область их действия.

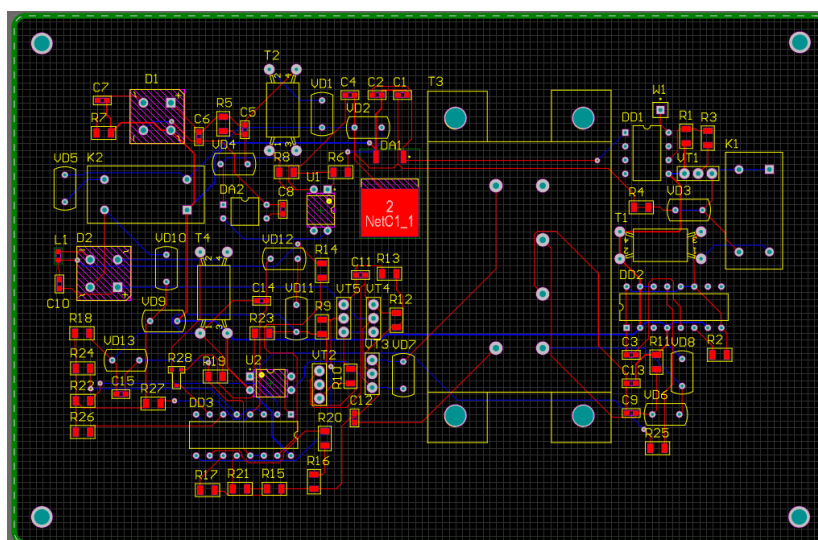


Рисунок 7.3 – Плата после трассировки

6. После размещения всех компонентов устройства идентификации объектов была осуществлена трассировка. Плата после трассировки представлена на рисунке 7.3. Заключительным этапом выполнена проверка соблюдения конструкторско-технологических ограничений.

Печатная плата крепиться к корпусу через монтажные отверстия с помощью винтов. В свою очередь корпус состоит из двух деталей, крепящихся друг к другу с помощью винтов. Соединение деталей корпуса показано на рисунке 7.4. В качестве материала корпуса выбрана нержавеющая сталь 08Х22Н6Т. Выбор нержавеющей стали в качестве материала корпуса обусловлен такими факторами как безопасность эксплуатации и техническими характеристиками. В связи с тем, что выходное напряжение устройства является не безопасным для человека, корпус должен быть заземлён. Также нержавеющая сталь имеет следующие преимущества по сравнению с другими сплавами:

- Простота обработки и изготовления;
- Высокий уровень антикоррозийных свойств, и износостойкости;
- Длительный срок эксплуатации без изменений внешнего вида;
- Хорошо сочетается с другими материалами — стеклом, пластиком, деревом, бетоном, металлом, мрамором, камнем, гранитом и кирпичом;
- Устойчивость к царапинам;
- Легко поддается свариванию и холодной штамповке;
- Не требует дополнительной обработки, например, покраски. Обладает прекрасным эстетическим видом;
- Возможность полной переработки;
- Высокие гигиенические свойства;
- Способность к восстановлению поверхности после повреждений;

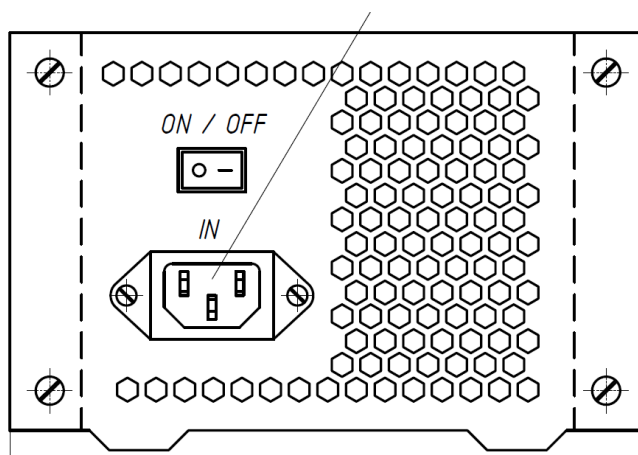


Рисунок 7.4 – Соединение деталей корпуса

Так как устройство требует принудительного воздушного охлаждения, в корпус устанавливается вентилятор, для обеспечения нормального теплового режима работы. Крепление вентилятора показано на рисунке 7.5.

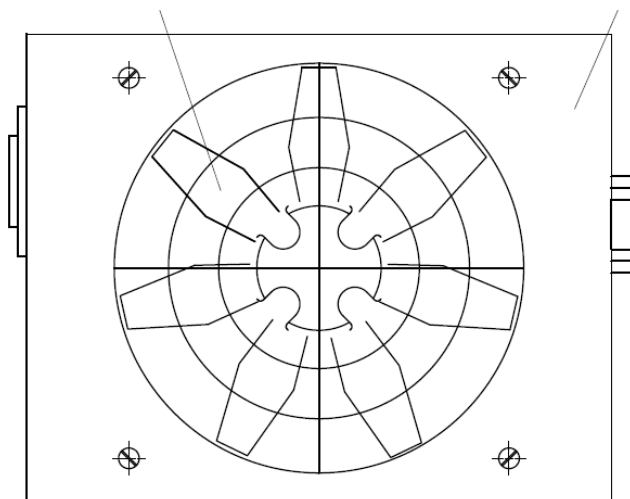


Рисунок 7.5 – Крепление вентилятора к корпусу

Сборочные чертежи корпуса и платы приведены в графической матери-
алах к дипломному проекту.

8. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ СБОРКИ ПРОЕКТИРУЕМОГО УСТРОЙСТВА.

Технологическая схема сборки определяет последовательность операций с указанием технологического оснащения и режимов проведения:

1. Подготовительная

На данном этапе производится подготовка всех необходимых инструментов, деталей, приспособлений, рабочих мест, а также подготовка некоторых материалов, таких как клей и паяльная паста.

2. Нанесение паяльной пасты

На автомате FLX2011 нанести паяльную пасту LF-5C-500 Union Sol Tek Group на контактные площадки согласно КД и ТТП-50.

После нанесения провести контроль нанесения паяльной пасты. Не допускаются: смещение пасты за пределы контактных площадок, переемы пасты между контактными площадками платы (размазывание).

3. Установка SMD-компонентов

На автомате FLX2011 установить компоненты L1, C1, C3, C5, C7...C9, C11...C13, C15, R1...R27 согласно КД и ТТП-50

4. Пайка в конвекционной печи

В печи конвекционного оплавления осуществить пайку SMD-элементов согласно режимам пайки, указанным в таблице 8.1

Таблица 8.1 – Режимы пайки

Термопрофиль	1-я зона	2-я зона	3-я зона
Температура (°C)	150	195	250
Скорость конвейера мм/мин	370		

5. Установка штыревых компонентов

На автомате Sencorp произвести установку следующих компонентов: C2, C4, C6, C10, C14, K1, K, D1, D2, T1...T4, VT1, VD1...VD13, VT1...VT5, DD1...DD3, DA1, DA2, U1, U2.

6. Пайка платы волной припоя

На автомате ETS – 330 осуществить пайку волной припоя SAC 305 Multicor Solders штыревых компонентов согласно следующему режиму: температура пайки 250 °C, время пайки от 2 до 4 с.

После пайки произвести контроль согласно ТТП-50.

7. Промывка модуля

На системе промывки ЛПП 901 произвести отмывку в промывочной жидкости ZESTRON VD.

8. Контроль визуальный

На рабочем месте визуального контроля VS-8 проверить модуль на отсутствие механических повреждений платы и ЭК и точность установки компонентов и качества паяных соединений.

9. Контроль электрический

При помощи автоматической системы электрического контроля Sencorp 500SL выполнить электрический контроль (проверить целостность цепей, отсутствие короткого замыкания).

10. Маркировка платы

На автомате ALLTEC LC3300 выполнить маркировку элементов, заводского номера и даты изготовления краской МКЭ1 чёрной ТУ29-02-859-78, шрифт 4-Пр3 по ГОСТ 26.020-80.

11. Нанесение защитного покрытия

На установке нанесения влагозащиты погружением DS101 осуществить нанесение лака УР-231 по всей поверхности платы.

12. Установка платы в основание корпуса.

13. Установка вентилятора в крышку корпуса.

14. Установка разъёмов.

15. Подключение разъёмов к плате.

16. Соединение деталей корпуса.

Технологическая схема сборки представлена в приложениях к дипломному проекту.

9. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ WI-FI МОДУЛЕМ

9.1 Анализ внутреннего строения модуля

Для осуществления дистанционного управления блоком питания СВЧ магнетрона средней мощности выбран *Wi-Fi* модуль *ESP-01S*, в основе которого лежит чип *ESP8266*.

Основные структурные части модуля показаны на рисунке 9.1.

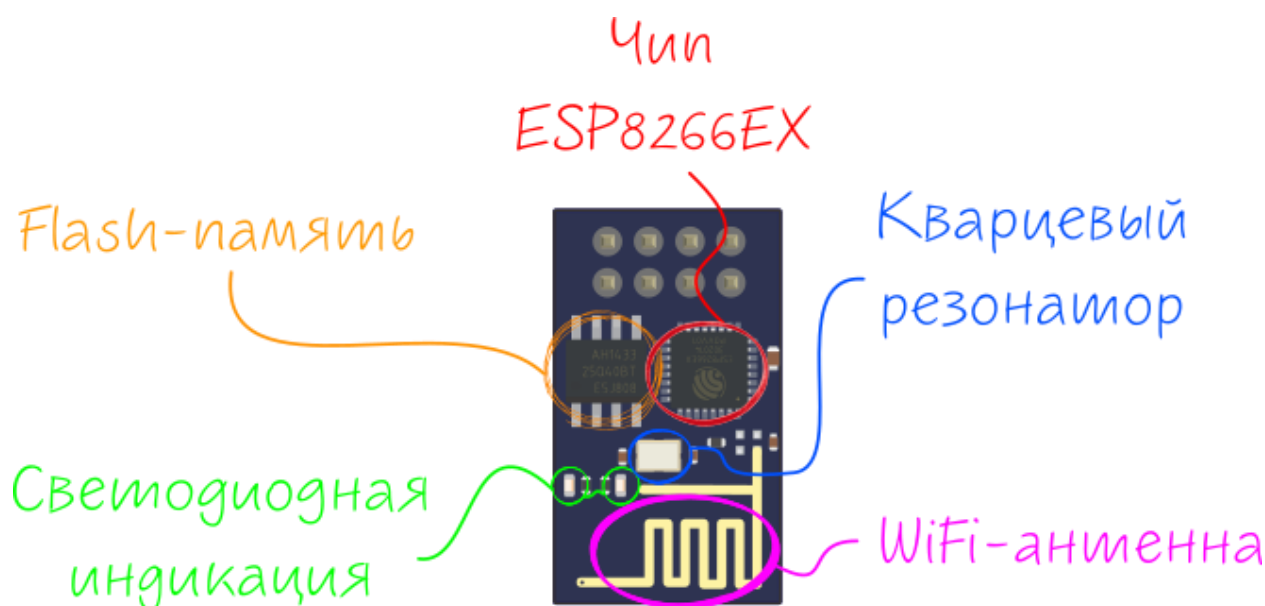


Рисунок 9.1 – структура модуля *ESP-01S*

Сердцем данного модуля является чип *ESP8266*, в который встроен 32-разрядный RISC-процессор *Tensilica L106*, обеспечивающий сверхнизкое энергопотребление и максимальную тактовую частоту 160 МГц. Операционная система реального времени (RTOS) и стек *Wi-Fi* позволяют использовать 80% вычислительной мощности для программирования и разработки пользовательских приложений [73].

Процессор включает в себя интерфейсы, перечисленные ниже.

- Программируемые интерфейсы RAM/ROM (iBus), которые могут быть связаны с памятью контроллер, а также может использоваться для посещения flash.
- Интерфейс ОЗУ данных (dBus), который может быть связан с контроллером памяти.
- Интерфейс АНВ, который можно использовать для посещения реестра.

ESP8266 содержит в себе контроллер памяти и блоки памяти, включая SRAM и ROM. Процессор может получить доступ к модулям памяти через интерфейсы iBus, dBus и AHB. Ко всем блокам памяти можно получить доступ по запросу, а арбитр памяти будет определять последовательность выполнения в соответствии со временем, когда эти запросы будут получены процессором.

Согласно нашей текущей версии SDK, пространство SRAM, доступное пользователям, назначается, как показано ниже.

- Размер оперативной памяти < 50 кБ, то есть, когда ESP8266 работает в режиме станции и подключается к маршрутизатору, доступное программируемое пространство в секции кучи + данных составляет около 50 кБ.

- В SoC нет программируемого ПЗУ, поэтому пользовательская программа должна храниться во внешней флэш-памяти SPI.

ESP8266 использует внешнюю флэш-память SPI для хранения пользовательских программ и поддерживает объем памяти до 16 МБ.

Кварцевый резонатор генерирует квадратурные тактовые сигналы 2,4 ГГц для приемника и передатчика. Все компоненты тактового генератора интегрированы в микросхему, включая все катушки индуктивности, фильтры, регуляторы и делители напряжения.

Кварцевый резонатор имеет встроенные схемы калибровки и самопроверки. Квадратурные фазы тактового сигнала и фазовый шум оптимизированы на кристалле с помощью запатентованных алгоритмов калибровки, чтобы гарантировать наилучшие характеристики приемника и передатчика.

Структурная схема модуля *ESP-01S* изображена на рисунке 9.2 [73].

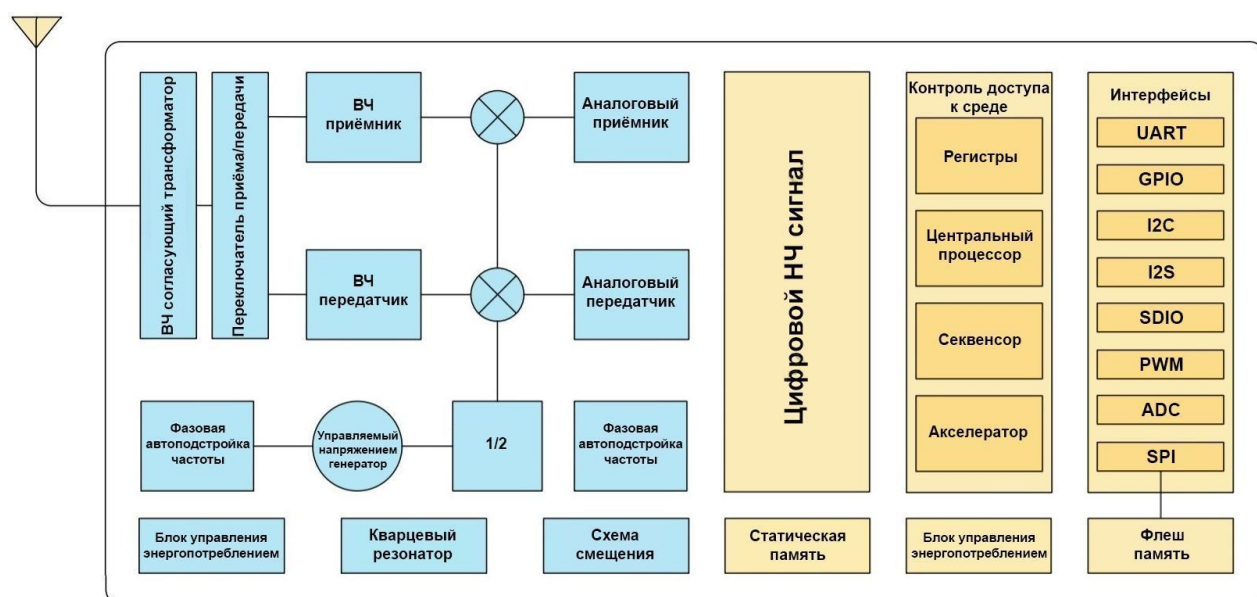


Рисунок 9.2 – структурная схема модуля *ESP-01S*

9.2 Разработка алгоритма работы программы.

Для управления блоком питания дистанционно, *Wi-Fi* модуль *ESP-01S* должен иметь в своей памяти алгоритм, программу для выполнения. Процесс записи алгоритма в память модуля называется прошивкой. Данная процедура осуществляется в среде *Arduino IDE*, при подключении модуля к компьютеру.

```
#include <ESP8266WiFi.h>

const char* ssid = "YOUR_SSID"; // для SSID точки доступа
const char* password = "YOUR_PASSWORD"; // для пароля к точке доступа

int ledPin = 2; // контакт GPIO2 на ESP8266
WiFiServer server(80); // порт веб-сервера

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    delay(10);

    pinMode(ledPin, OUTPUT);
    digitalWrite(ledPin, LOW);

    // подключаемся к Wi-Fi-сети:
    Serial.println();
    Serial.println();
    Serial.print("Connecting to "); // "Подключение к "
    Serial.println(ssid);

    WiFi.begin(ssid, password);

    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        delay(500);
        Serial.print(".");
    }
    Serial.println("");
    Serial.println("WiFi connected"); // "Подключение к Wi-Fi
                                     // выполнено"
    // запускаем сервер:
    server.begin();
    Serial.println("Server started"); // "Сервер запущен"

    // печатаем IP-адрес:
    Serial.print("Use this URL to connect: "); // "Используем этот URL
                                              // для подключения: "
    Serial.print("http://");
    Serial.print(WiFi.localIP());
    Serial.println("/");
}

void loop() {
    // проверяем, подключен ли клиент:
    WiFiClient client = server.available();
    if (!client) {
        return;
    }
}
```

```

// ждем, когда клиент отправит какие-нибудь данные:
Serial.println("new client"); // "новый клиент"
while(!client.available()){
    delay(1);
}

// считываем первую строку запроса:
String request = client.readStringUntil('\r');
Serial.println(request);
client.flush();

// обрабатываем запрос:
int value = LOW;
if (request.indexOf("/LED=ON") != -1) {
    digitalWrite(ledPin, HIGH);
    value = HIGH;
}
if (request.indexOf("/LED=OFF") != -1){
    digitalWrite(ledPin, LOW);
    value = LOW;
}

// выставляем значение на ledPin в соответствии с запросом:
//digitalWrite(ledPin, value);

// возвращаем ответ:
client.println("HTTP/1.1 200 OK");
client.println("Content-Type: text/html"); // "Тип контента:
                                           // text/html "
client.println(""); // не забываем это...
client.println("<!DOCTYPE HTML>");
client.println("<html>");

client.print("Led pin is now: "); // "Контакт сигнала теперь
                                // в состоянии: "

if(value == HIGH) {
    client.print("On"); // "Вкл"
} else {
    client.print("Off"); // "Выкл"
}
client.println("<br><br>");
client.println("Click <a href=\"/LED=ON\">here</a> turn the LED on pin 2 ON<br>");
// "Кликните тут, чтобы подать сигнал
// на контакте 2"
client.println("Click <a href=\"/LED=OFF\">here turn the LED on pin 2 OFF<br>");
// "Кликните тут, чтобы подать сигнал
// на контакте 2"

client.println("</html>");

delay(1);
Serial.println("Client disconnected"); // "Клиент отключен"
Serial.println("");
}

```

После загрузки данного кода в память *Wi-Fi* модуля *ESP-01S* и подключения блока питания к сети, блок питания автоматически подключиться к заданной сети *Wi-Fi*, с помощью логина и пароля заданных кодом. В среде разработки *Arduino IDE* можно узнать ссылку на локальный сервер, через который можно осуществлять дистанционное управление блоком питания. Блок-схема алгоритма работы программы приведена в графических материалах.

10 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЗРАБОТКИ И ПРОИЗВОДСТВА ДИСТАНЦИОННО УПРАВЛЯЕМОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ СВЧ МАГНЕ- ТРОНА СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

В рамках выполнения дипломного проекта проводится технико-экономическое обоснование. Основная цель – подтверждение коммерческой эффективности, целесообразности коммерциализации проектного решения, а также подтверждение актуальности разработки.

Экономическое обоснование разработки и производства нового изделия осуществляется на основе методики, изложенной в [71, стр. 26–36]. Подход, описанный в методике, является эффективным и применимым в реальных экономических условиях, поскольку при разработке методики учитывался и аккумулировался богатый опыт в экономическом обосновании принципиально новых проектов, а также правил по разработке бизнес-планов.

В процессе выполнения обоснования разработки и производства дистанционно управляемого источника питания СВЧ магнетрона средней мощности и выполнении экономических расчётов, предлагаемых методикой, были использованы действующие цены на радиоэлектронные компоненты, действующие заработные платы разработчиков, технологов и нормоконтролёров, действующие ставки рефинансирования, а также ставки налогов и отчислений.

Для анализа и оценки экономической эффективности инвестиций в разработку и производство нового изделия необходимо:

- рассчитать экономический эффект (результат), полученный от производства нового изделия (прирост чистой прибыли);
- рассчитать инвестиции (затраты) в производство (разработку) нового изделия;
- рассчитать показатели экономической эффективности инвестиций в производство и реализацию нового изделия.

Основываясь на проведённом анализе устройств, предлагаемых рынком электронной техники, можно сделать вывод, что разрабатываемое в рамках дипломного проекта устройства в полной мере удовлетворяет требованиям рынка, а также потенциально должно обеспечить технический и коммерческий успех. Следовательно, проектное решение, является новым и актуальным, а также обладает широким спектром преимуществ, таких как:

- низкая цена в своём классе устройств;
- высокая надёжность устройства;

- безотказность – сохранение постоянной работоспособности в течение срока эксплуатации;
- функциональность – настройка выходной мощности в широком диапазоне и высокая стабильность сигнала дистанционного управления;
- долговечность;
- ремонтпригодность – приспособленность товара к ликвидации различных отказов и повреждений;
- сохраняемость – сохранение работоспособности после транспортировки или хранения;
- эргономичность – удобство и комфорт использования товара.

Формирование отпускной цены нового изделия, производство которого автоматизировано, осуществляется на основе расчета его полной себестоимости.

Расчёт затрат по статье «Основные и вспомогательные материалы», в которую включается стоимость необходимых для изготовления изделия основных и вспомогательных материалов в соответствии с представленной в конструкторской документации дипломного проекта номенклатурой, норм расхода на изделие и рыночных цен, осуществляется по формуле:

$$P_M = K_{\text{тр}} \cdot \sum_{i=1}^n H_{pi} \cdot C_{\text{отп}i} = 29,1 \text{ р.}, \quad (10.1)$$

где $K_{\text{тр}}$ – коэффициент транспортных расходов ($K_{\text{тр}} = 1,15$);

n – номенклатура применяемых материалов;

H_{pi} – норма расхода материала i -го вида на единицу изделия, нат. ед./шт.;

$C_{\text{отп}i}$ – цена за единицу материала i -го вида, р.

Результат расчета затрат на материалы приведен в таблице 10.1.

Таблица 10.1 – Расчёт затрат на основные и вспомогательные материалы

Наименование материала	Ед. изм.	Норма расхода	Цена, р.	Сумма, р.
Сталь нержавеющая <i>08X22H6T</i>	тн	0,001833	13 794,50	25,28
Прочие материалы	тн			
Итого		0,001833	13 794,50	25,28
Всего с учётом транспортных расходов (P_M)				29,1

Расчёт затрат по статье «Покупные комплектующие изделия, полуфабрикаты», в которую включается стоимость необходимых для изготовления изделия комплектующих изделий в соответствии с представленной в конструкторской документации дипломного проекта номенклатурой, количеством на изделие и рыночных цен, осуществляется по формуле:

$$P_k = K_{тр} \cdot \sum_{i=1}^m N_i \cdot C_{отпi} = 553,8 \text{ р.}, \quad (10.2)$$

где m – номенклатура применяемых комплектующих;

N_i – количество комплектующих i -го вида на единицу изделия, нат. ед./шт.

Результат расчета затрат на комплектующие изделия и полуфабрикаты приведен в таблице 10.2.

Таблица 10.2 – Расчёт затрат на комплектующие изделия и полуфабрикаты

Наименование комплектующего	Количество на изделие, шт.	Цена за единицу комплектующего, р.	Сумма, р.
1	2	3	4
1. Двусторонняя печатная плата	1	3,5	3,5
2. Диодный мост <i>KBPC5010</i>	2	5,2	10,4
3. Реле <i>SRD-05VDC-SL-C "SON-GLE"</i>	2	2,25	2,50
4. Оптрон <i>4N25</i>	2	1,9	3,8
5. Конденсатор <i>X7R 2220 0,1мкФ</i>	1	2,3	2,3
6. Конденсатор электролитический <i>X5R 10мкФ</i>	1	0,18	0,18
7. Конденсатор электролитический <i>ECAP 100мкФ</i>	1	3,8	3,8
8. Конденсатор керамический <i>NPO 0805 10пФ</i>	1	0,27	0,27
9. Конденсатор электролитический <i>ECAP 470мкФ</i>	1	4,70	4,70
10. Конденсатор керамический <i>X7R 2,2мкФ</i>	1	0,19	0,19
11. Конденсатор керамический <i>X7R 0,1мкФ</i>	1	0,59	0,59

Продолжение таблицы 10.2.

1	2	3	4
12. Конденсатор керамический X7R 5600пФ	1	0,09	0,09
13. Конденсатор керамический X7R 45мкФ	1	0,18	0,18
14. Конденсатор керамический X7R 0,1мкФ	1	0,59	0,59
15. Конденсатор керамический X7R 0,33мкФ	1	0,49	0,49
16. Конденсатор керамический X7R 8200пФ	1	0,09	0,09
17. Конденсатор керамический NPO 150пФ	1	0,17	0,17
18. Микросхема LD111 “STMICROELECTRONICS”	1	1,90	1,90
19. Микросхема TNY265 “All POWERINT”	1	24,50	24,50
20. Микроконтроллер EPS8266 “Espressif Systems”	1	50,70	50,70
21. ШИМ генератор XY-LPWM “Shenzhen Alisi Electronic Technol- ogy”	1	35,00	35,00
22. Микросхема TCA785HKLAI “SIEMENS”	1	25	25
23. Транзистор 2N7002	1	0,56	0,56
24. Транзистор KT819A	1	3,40	3,40
25. Транзистор IGBT GT60N321	1	35	35
26. Транзистор 2SC2785	2	1,85	1,85
27. Диод Шоттки 1N5819	2	0,42	0,84
28. Диод FR207	8	0,42	3,36
29. Диод SB3100	3	2,60	7,8
30. Трансформатор TI-EE16-1534 “FERDYSTER”	2	31,60	63,20
31. Трансформатор ALT3232M- 151-T001 “TDK”	1	5,70	5,70
32. Трансформатор F609ABA00GP	1	173,80	173,80

Продолжение таблицы 10.2.

1	2	3	4
32. Разъём <i>AS-208 (K2414), 220B IEC320</i>	1	5,00	5,00
33. Антенна <i>RP-SMA 2.4G 2DB</i>	1	31,00	31,00
34. Резистор 0805 10 кОм, 1%	1	0,03	0,03
35. Резистор 0805 3,6 кОм, 1%	1	0,03	0,03
36. Резистор 0805 2 кОм, 5%	1	0,03	0,03
37. Резистор 0805 1 кОм, 1%	1	0,03	0,03
38. Резистор 0402 200 кОм, 1%	1	0,02	0,02
39. Резистор 0805 100 кОм, 5%	1	0,03	0,03
40. Резистор 0805 15 кОм, 5%	1	0,03	0,03
41. Резистор 0805 10 кОм, 5%	1	0,03	0,03
42. Резистор 0805 10 Ом, 1%	1	0,03	0,03
43. Резистор 0805 10 кОм, 5%	1	0,03	0,03
44. Резистор 0805 2 кОм, 5%	1	0,03	0,03
45. Резистор 1206 100 кОм, 5%	2	0,04	0,08
46. Резистор 0805 1.5 кОм, 5%	1	0,03	0,03
47. Резистор 0805 56 кОм, 1%	1	0,03	0,03
48. Резистор 0805 91 кОм, 1%	1	0,03	0,03
49. Резистор 0805 240 Ом, 1%	1	0,03	0,03
50. Резистор 0805 110 кОм, 1%	1	0,03	0,03
51. Резистор 0805 56 кОм, 5%	1	0,03	0,03
52. Резистор 0805 82 кОм, 1%	6	0,03	0,18
53. Резистор подстроечный 3006P-1-501LF, 500 Ом	1	2,85	2,85
54. Винт А.М3×10	4	1,14	4,56
55. Шуруп 2,5×14	4	0,13	0,52
56. Ножка силиконовая	4	0,27	1,08
57. Провод <i>LiY 1*0.14</i>	1	0,35	0,35
Итого	88	460,25	481,57
Всего с учетом транспортных расходов (1,1–1,2) (Р _к)			553,8

Расчет накладных расходов проводится по формуле:

$$P_{\text{накл}} = \frac{(P_{\text{м}} + P_{\text{к}}) \cdot H_{\text{накл}}}{100} = \frac{(29,1 + 553,8) \cdot 54}{100} = 314,8 \text{ р.}, \quad (10.3)$$

где $P_{\text{м}}, P_{\text{к}}$ – расходы на материалы и комплектующие изделия, р.;

$H_{\text{накл}}$ – норматив накладных расходов, % ($H_{\text{накл}} = 54,0$ % для радиоэлектронной техники).

Полная себестоимость рассчитывается по формуле:

$$C_{\text{п}} = P_{\text{м}} + P_{\text{к}} + P_{\text{накл}} = 29,1 + 553,8 + 314,8 = 897,7 \text{ р.} \quad (10.4)$$

Расчет плановой прибыли проводится по формуле:

$$P_{\text{ед}} = \frac{C_{\text{п}} \cdot P_{\text{пр}}}{100} = \frac{897,7 \cdot 25}{100} = 224,4 \text{ р.}, \quad (10.5)$$

где $P_{\text{пр}}$ – рентабельность продукции, (15–40 %).

Отпускная цена рассчитывается по формуле:

$$C_{\text{отп}} = C_{\text{п}} + P_{\text{ед}} = 897,7 + 224,4 = 1122,1 \text{ р.} \quad (10.6)$$

Формирование отпускной цены нового изделия представлено в таблице 10.3.

Таблица 10.3. – Формирование отпускной цены нового изделия на основе полной себестоимости

Показатель	Расчет по формуле	Сумма, р.
1. Материалы	См. табл. 10.1	29,1
2. Покупные комплектующие изделия	См. табл. 10.2	553,8
3. Накладные расходы	Формула (10.3)	314,8
4. Полная себестоимость	Формула (10.4)	897,7
5. Плановая прибыль	Формула (10.5)	224,4
6. Отпускная цена изделия	Формула (10.6)	1122,1

Экономическим эффектом от производства и реализации новых изделий является прирост чистой прибыли, полученной от их реализации.

Расчет прироста чистой прибыли у предприятия–производителя от реализации новых изделий (при формировании цены на основе полных затрат) осуществляется по формуле:

$$\Delta\Pi_{\text{ч}} = N_{\text{п}} \cdot \Pi_{\text{ед}} \left(1 - \frac{H_{\text{п}}}{100}\right) = 1000 \cdot 224,4 \cdot \left(1 - \frac{18}{100}\right) = 184008 \text{ р.}, \quad (10.7)$$

где $N_{\text{п}}$ – прогнозируемый годовой объём производства и реализации изделий, шт. Прогнозируемый годовой объём производства в рамках дипломного проекта – 1000 шт, т.к. это пробная партия.

$\Pi_{\text{ед}}$ – плановая прибыль, приходящаяся на единицу изделия, р.;

$H_{\text{п}}$ – ставка налога на прибыль согласно действующему законодательству, % (по состоянию на 01.01.2022 г. – 18 %).

Затраты в производство нового изделия включают в общем случае:

- инвестиции на его разработку;
- инвестиции в прирост основного капитала (затраты на приобретение необходимого для производства нового изделия оборудования, станков и т.п.);
- инвестиции в прирост собственного оборотного капитала (затраты на приобретение необходимых для производства нового изделия материалов, комплектующих, начатой, но незавершенной продукции и т.п.).

Инвестиции в разработку нового изделия могут быть оценены двумя альтернативными способами:

- по договорной цене разработчика, если разработка нового изделия осуществляется сторонней организацией (по смете разработчика);
- по затратам на разработку нового изделия инженерами предприятия–производителя, расчет которых осуществляется по методике, представленной ниже.

Основная заработная плата разработчиков рассчитывается по формуле:

$$Z_o = K_{\text{пр}} \sum_{i=1}^n Z_{\text{дни}i} \cdot T_i = 5543,53 \text{ р.}, \quad (10.8)$$

где $K_{\text{пр}}$ – коэффициент премий ($K_{\text{пр}} = 1,3$);

n – категории исполнителей, занятых разработкой усовершенствованного изделия;

$Z_{\text{дни}i}$ – дневная заработная плата исполнителя i -й категории, р.;

T_i – продолжительность участия в разработке исполнителя i -й категории, д.

Дополнительная заработная плата разработчиков рассчитывается по формуле:

$$З_д = \frac{З_о \cdot Н_д}{100}, = \frac{5543,53 \cdot 10}{100} = 554,35 \text{ р.}, \quad (10.9)$$

где $Н_д$ – норматив дополнительной заработной платы, (можно принять на уровне среднего по экономике 10–20 %).

Отчисления на социальные нужды рассчитываются по формуле:

$$Р_{\text{соц}} = \frac{(З_о + З_д) \cdot Н_{\text{соц}}}{100} = \frac{(5543,53 + 554,35) \cdot 34,6}{100} = 2109,87 \text{ р.} \quad (10.10)$$

где $Н_{\text{соц}}$ – ставка отчислений в ФСЗН и Белгосстрах (в соответствии с действующим законодательством по состоянию на 01.01.2020 г. – 34,6 %).

Расчет инвестиций на разработку нового изделия проводится по формуле:

$$З_p = З_о + З_д + Р_{\text{соц}} = 5543,53 + 554,35 + 2109,87 = 8207,75 \text{ р.} \quad (10.11)$$

Расчет заработной платы разработчиков нового изделия, рассчитанный по формуле (10.8) представлен в таблице 10.4.

Таблица 10.4 – Расчет заработной платы разработчиков нового изделия

Категория исполнителя	Численность исполнителей, чел.	Месячная заработная плата, р.	Дневная заработная плата, р.	Продолжительность участия в разработке, д.	Заработная плата, р.	Премия, (30–60 %)
1 Руководитель проекта	1	1900	90,47	21	2000,00	570
2 Инженер-конструктор	1	1570	74,76	15	1121,40	336,42
3 Инженер-технолог	1	1500	71,43	10	571,40	214,29
4 Нормоконтролёр	1	1200	57,14	7	571,40	119,99

5 Сборщик	1	900	42,85	3	219,05	38,57
Итого	5	7070	336,66	56	4264,25	1279,28

Дневная заработная плата разработчиков нового изделия определяется путём деления их месячной заработной платы (оклад плюс надбавки) на количество рабочих дней в месяце (21). Размер месячной заработной платы разработчика каждой категории соответствует установленному на предприятии–производителе фактическому ее размеру.

Результат расчета затрат на разработку нового изделия приведен в таблице 10.5.

Таблица 10.5 – Расчет инвестиций на разработку нового изделия

Наименование статьи затрат	Расчет по формуле (в таблице)	Сумма, р.
1. Основная заработная плата разработчиков	См. табл. 10.4	5543,53
2. Дополнительная заработная плата разработчиков	Формула (10.9)	554,35
3. Отчисления на социальные нужды	Формула (10.10)	2109,87
4. Инвестиции на разработку нового изделия	Формула (10.11)	8207,75

Инвестиции в прирост основного капитала не требуются, т. к. производство нового изделия планируется осуществлять на действующем оборудовании в связи с наличием на предприятии–производителе свободных производственных мощностей.

Расчёт инвестиций в прирост собственного оборотного капитала приведен ниже.

Годовая потребность в материалах определяется по формуле:

$$П_{\text{м}} = P_{\text{м}} \cdot N_{\text{п}} = 29,1 \cdot 1000 = 29100 \text{ р.} \quad (10.12)$$

Годовая потребность в комплектующих изделиях рассчитывается по формуле:

$$П_{\text{к}} = P_{\text{к}} \cdot N_{\text{п}} = 553,8 \cdot 1000 = 553800 \text{ р.} \quad (10.13)$$

Инвестиции в прирост собственного оборотного капитала в процентах от годовой потребности в материалах и комплектующих изделиях (исходя из среднего уровня по экономике: 20–30 %) рассчитываются по формуле:

$$\Delta I_{\text{сок}} = (0,2 - 0,3)(\Pi_{\text{м}} + \Pi_{\text{к}}) = 0,25 \cdot (29100 + 553800) = 145725 \text{ р.} \quad (10.14)$$

Оценка экономической эффективности разработки и производства нового изделия у предприятия-производителя зависит от результата сравнения инвестиций в производство нового изделия (инвестиции в разработку и прирост собственных оборотных средств) и полученного годового прироста чистой прибыли.

Сумма инвестиций меньше суммы годового экономического эффекта, то есть инвестиции окупятся менее чем за год, оценка экономической эффективности инвестиций в производство нового изделия осуществляется на основе расчета простой нормы прибыли (рентабельности инвестиций (затрат)) по формуле:

$$P_{\text{и}} = \frac{\Delta \Pi_{\text{ч}}}{I_{\text{пр}}} \cdot 100 \% = \frac{184008}{8207,74 + 145725} \cdot 100 \% = 119,54\%, \quad (10.5)$$

где $I_{\text{пр}}$ – инвестиции в производство нового изделия, р.

Таким образом, инвестиции в производство нового изделия будут экономически эффективными, т. к. рентабельность инвестиций превышает 100 % и составляет 119,54% (100 % плюс ставка по банковским долгосрочным депозитам), и, следовательно, разработка нового изделия является целесообразной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения дипломного проекта спроектирована конструкция дистанционно управляемого СВЧ магнетрона средней мощности, электрические параметры которого: $U_{\text{п}} - 220 \text{ В}$, $I_{\text{н max}} - 10 \text{ А}$, $I_{\text{а}} - 0,3 \text{ А}$, $P_{\text{max}} - 1 \text{ кВт}$, $U_{\text{ан}} - 3,8 \text{ кВ}$, $U_{\text{н}} - 3,3 \text{ В}$.

Проведены анализ литературно – патентных исследований, конструктивных и схемотехнических особенностей импульсных источников питания СВЧ магнетрона; проведено общетехническое обоснование разработки устройства, которое включает в себя анализ исходных данных и формирование основных технических требований; разработаны электрическая принципиальная и структурная схемы устройства.

Разработана конструкция дистанционно управляемого СВЧ магнетрона средней мощности. Осуществлен выбор и обоснование элементной базы; выбор типа электрического монтажа, элементов крепления и фиксации; выбор способов обеспечения нормального теплового режима устройства; выбор и обоснование метода изготовления печатной платы; проведен расчет конструктивно – технологических параметров проектируемого изделия, включающий расчет теплового режима, расчет на механические воздействия, расчет конструктивно-технологических параметров печатных плат, расчет электромагнитной совместимости.

Максимальная температура нагрева элементов устройства выходит за пределы диапазона рабочих температур элементов, устройство подвержено воздействию высоких температур. Решением является применения принудительного воздушного охлаждения, которое обеспечивает исправную работу устройства

Устройство обладает высокой вероятностью безотказной работы за 1000 часов, и хорошей гамма–процентной наработкой до отказа при $\gamma=95\%$.

Для проектирования устройства применены САПР: *Altium Designer*, *SolidWorks*, *AutoCAD*.

Спроектированная модель является адекватной и пригодной для использования при условии эксплуатации устройства в пределах допустимых значений воздействующих факторов.

Разработана технологическая схема сборки проектируемого устройства.

Разработано программное обеспечение для дистанционного управления источником питания.

Проведено технико-экономическое обоснование разработки и производства дистанционно управляемого СВЧ магнетрона средней мощности. Инвестиции в производство нового изделия будут экономически эффективными, т. к. рентабельность инвестиций превышает 100 % и составляет 119,54%, и, следовательно, разработка нового изделия является целесообразной.

Разработана графическая часть к дипломному проекту (6 чертежей А1 и соответствующая к ним документация).

Конструкторская документация оформлена с применением пакета прикладного программного обеспечения *AutoCAD*.

Результаты выполнения дипломного проекта могут быть использованы при разработке источника питания.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

[1] Алексеев В.Ф. Электронный ресурс по учебной дисциплине «Проектирование электронных модулей, устройств и систем». Комплекс для студентов специальности 1–39 02 01 «Моделирование и компьютерное проектирование РЭС» / В.Ф. Алексеев, Г.А. Пискун // ЭРУД БГУИР [Электронный ресурс] / БГУИР. – Минск, 2016.

[2] Патентные исследования: виды, порядок и стоимость проведения [Электронный ресурс]– Режим доступа: <https://patentural.ru/zhurnal/patentnii-issledovania/>

[3] Источник питания для магнетрона [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.freepatent.ru/patents/2575166>

[4] Источник питания магнетрона [Электронный ресурс]– Режим доступа:

https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&II=2&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20211116&CC=CN&NR=214736058U&KC=U

[5] Блок питания магнетронов непрерывного генерирования [Электронный ресурс]– Режим доступа: <http://allpatents.ru/patent/2450414.html>

[6] Блок питания магнетронов непрерывного генерирования [Электронный ресурс]– Режим доступа: [http://apelvac.com/catalog/groups/27/]

[7] Магнетрон [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа: https://www.elremont.ru/svch/bt_rem23.php

[8] Магнетрон [Электронный ресурс]– Режим доступа: <http://electricalschool.info/spravochnik/eltehustr/1247-kak-ustroen-i-rabotaet-magnetron.html>

[12] ГОСТ 18953-73. Источники питания электрические. Общие технические требования. – Введ. 1974–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 9 с.

[13] ГОСТ 15150–69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. – Введ. 1971–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1969. – 58 с.

[14] ГОСТ 11487–88 «Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Нормы и методы испытаний на воздействие внешних механических и климатических факторов». – Введ.– 1989–07–01– М.: Изд-во стандартов, 1988. – 40 с.

[15] ГОСТ 12.2.007.0-75 «Изделия электротехнические. Общие требования безопасности» – Введ.– 1978–01–01– М.: Стандартинформ, 2008. – 55 с

[16] ГОСТ 29254-91 «Совместимость технических средств электромагнитная. Аппаратура измерения, контроля и управления технологическими процессами. Технические требования и методы испытаний на помехоустойчивость» Введ.– 1993–01–01– М.: Изд-во стандартов, 1992. – 57 с

[17] ГОСТ 21317-87 «Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Методы испытаний на надежность». Введ.– 1989–01–01– М.: Изд-во стандартов, 1990. – 74 с

[18] ГОСТ 28002–88. Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Общие требования по защите от электростатических разрядов и методы испытаний. – Введ. 1991–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1989.– 42 с.

[19] ГОСТ Р 51317.6.1-99 «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых в жилых, коммерческих зонах и производственных зонах с малым энергопотреблением. Требования и методы испытаний». – Введ. 2002–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 2000 - 48 с.

[20] ГОСТ 27.003–90. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. – Введ. 1990–29–12. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 19 с.

[21] ГОСТ 12.2.007.0 – 75. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Изделия электротехнические. Общие требования безопасности. – Введ. 1978–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 11 с.

[22] ГОСТ 22782.0 – 81. Электрооборудование взрывозащищенное. Общие технические требования и методы испытаний. – Введ. 1982–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 1982.

[23] ГОСТ Р 51515-99 Совместимость технических средств электромагнитная. Помехоустойчивость радиовещательных приемников, телевизоров и другой бытовой радиоэлектронной аппаратуры. Требования и методы испытаний. [Электронный ресурс]. – 2022 – Режим доступа: <http://www.normacs.ru/Doclist/doc/143F.html>

[24] ГОСТ 27570.0–87. Безопасность бытовых и аналогичных электрических приборов. Общие требования и методы испытаний. – Введ. 1988–01–07. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 88 с.

[25] ГОСТ 12.2.049–80. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Оборудование производственное. Общие эргономические требования. – Введ. 1982–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 88 с.

[26] ГОСТ 15.009–91. Система разработки и постановки продукции на производство (СРПП). Непродовольственные товары народного потребления. Введ. 1991–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 6 с.

[27] ШИМ генератор сигналов [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://freedelivery.company/p/1207518159-generator-shim-signala-signalov-zhk-1gc-150kgc-3-3-30v-xy-lpwm/>

[28] Схема электрическая принципиальная [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://monitor.espec.ws/files/inv_sch_680.png

[29] Выходная характеристика диодного моста [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://electroandi.ru/elektronika/vypriamiteli/diodnyj-most-printsip-raboty-i-skhema.html>

[30] Конструирование и технология электронных систем: пособие к курсовому проектированию для студентов специальности «Электронно–оптические системы и технологии» / А. А. Костюкевич [и др.]. – М. БГУИР, 2011. – 119 с.

[31] *Chipdip* // Конденсатор керамический (SMD) 0805 [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <https://www.chipdip.by/product/grm2165c1h1r1c>

[32] *Chipdip* // Конденсатор электролитический [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <https://www.chipdip.by/product/0/9000188149>

[33] *Chipdip* // Диодный мост [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <https://www.chipdip.by/product/kbpc5010-yangjie>

[34] *Chipdip* // Регулятор напряжения [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <https://www.chipdip.by/product/ld1117as33tr>

[35] *Chipdip* // Импульсный регулятор напряжения [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <https://www.chipdip.by/product/tny264pn>

[36] *Chipdip* // Микросхема управления питанием [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <https://www.chipdip.by/product/tca785>

[37] Трансформатор импульсный [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <https://www.tme.eu/by/ru/details/ti-ee16-1534/transformatory-pcb/feryster/>

[38] *Chipdip* // Чип резистор (SMD) [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <https://www.chipdip.by/product/0.125w-0805-1-om-5>

[39] *Chipdip* // Резистор подстроечный [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <https://www.chipdip.by/product/3006p-1-501>

[40] *Chipdip* // Трансформатор импульсный [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <https://www.chipdip.by/product/alt3232m-151-t001-2>

[41] *Chipdip* // Трансформатор [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: https://www.transled.ru/catalog/transformers/open/TPA_20/

[42] *Chipdip* // Транзистор, N-канал [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <https://www.chipdip.by/product/2n7002-fairchild>

[43] *Chipdip* // Биполярный транзистор [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <https://www.chipdip.by/product/kt819a-2>

[44] *Chipdip* // Транзистор IGBT [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <https://www.chipdip.by/product/gt60n321>

[45] *Chipdip* // Транзистор NPN [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <https://www.chipdip.by/product/2sc2785>

- [46] *Chipdip* // Диод Шоттки [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <https://www.chipdip.by/product/1n5819-2>
- [47] *Chipdip* // Диод импульсный [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <https://www.chipdip.by/product/fr207>
- [48] *Chipdip* // Диод Шоттки [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <https://www.chipdip.by/product/sb3100>
- [49] Электротехнические материалы. Диэлектрики [Электронный ресурс]. – 2022. – Режим доступа: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/4637/EHlektrotekhnicheskie_materialy_Dielektriki.pdf;jsessionid=B6E70A46454B344ABCBBD62CF0A61B917?sequence=1
- [50] ГОСТ 26246.5-89. Материал электроизоляционный фольгированный нормированной горючести для печатных плат на основе стеклоткани, пропитанной эпоксидным связующим. Технические условия – Введ. 1991–01–01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002
- [51] Радиоэлектронная аппаратура и основы ее конструкторского проектирования: учебно–методическое пособие для студентов спец. «Моделирование и компьютерное проектирование РЭС» и «Проектирование и производство РЭС» / Н. И. Каленкович [и др.]. – М.: БГУИР, 2008. – 200 с.
- [52] ГОСТ Р 55693-2013. Платы печатные жесткие. Технические требования – Введ. 2014-06-01. – М.: Стандартинформ, 2014
- [53] Пирогова, Е.В. Проектирование и технология печатных плат: учебник / Е.В. Пирогова. – М.: Изд - во ФОРУМ, 2005. – 560 с.
- [54] Монтаж электронных модулей. Варианты реализации [Электронный ресурс]. – 2022. – Режим доступа: http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/01_05/stat_80.htm.
- [55] Роткоп, Л. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры/ Л. Роткоп. – М. : Сов. радио, 1976.–232с.
- [56] ГОСТ 23751–86. Платы печатные. Основные параметры конструкции. Введ. 1989–01–04. – М.: Изд-во стандартов, 1986. –7 с.
- [57] ГОСТ 10317–79. Платы печатные. Основные размеры. Введ. 1980–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1985. –3 с.
- [58] Комбинированные методы изготовления печатных плат [Электронный ресурс]. – 2022. – Режим доступа: <https://pcbdesigner.ru/sposobi-izgotovleniya-pechatnih-plat/kombinirovannye-metody-izgotovleniya-pechatnyh-plat.html>
- [60] Алексеев В.Ф. Электронный ресурс по учебной дисциплине «Программное обеспечение инженерного моделирования физических процессов».

Комплекс для студентов специальности 1–39 02 01 «Моделирование и компьютерное проектирование РЭС» / В.Ф. Алексеев, Н.А. Голубов, А.П. Горбач // ЭРУД БГУИР [Электронный ресурс] / БГУИР. – Минск, 2016.

[61] Информационные технологии в моделировании и проектировании технических объектов [Электронный ресурс] – 2021. – Режим доступа: <https://www.tstu.ru/book/elib3/mm/2017/maistrenko/t4.html>.

[62] Система автоматизированного проектирования *SolidWorks* [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа: <https://seniga.ru/sapr/ssapr/62-solidworks.html>

[63] Преимущества *SOLIDWORKS Simulation* [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа: <https://www.solidworks.com/ru/product/solidworks-simulation>

[64] *SolidWorks* // [Электронный ресурс] – 2021. – Режим доступа: <https://SolidWorks.com/product/solidworks>.

[65] Программный пакет *ANSYS* [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа: https://studbooks.net/2194693/tehnika/opisanie_podsistemy_ansys_workbench

[66] *Altium* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.altium.com/altium-designer/ru>.

[67] Описание подсистемы *ANSYS Workbench* [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа: <https://www.autodesk.ru/solutions/finite-element-analysis>.

[68] *Autodesk* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.autodesk.ru>.

[69] *Elcut* [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа: <https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82:Elcut>.

[70] Инспекционный конвейер ЕТА SC-50 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.etasmt.com.sg/viewproduct.aspx?pid=30>.

[71] Загрузчик печатных плат КАУО-50Р [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kayosmt.ru/catalog/oborudovanie-dlya-transportirovki-plat-v-linii/kayo-50p>.

[72] Разгрузчик печатных плат КАТО-50S [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kayosmt.ru/catalog/oborudovanie-dlya-transportirovki-plat-v-linii/kayo-50p>.

[73] *ESP01S* [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1179098/ETC2/ESP-01.html>

[74] Горюшкин, А.А. Техничко-экономическое обоснование дипломных проектов (работ): метод. Указания для студ. техн. спец. / А.А. Горюшкин, А.В. Грицай, В.Г. Горовай. – Минск, 2020. – 86 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Справка о литературно-патентном поиске

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
(обязательное)
Спецификации

ПРИЛОЖЕНИЕ В
(обязательное)
Перечень элементов

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(обязательное)

Отчет о проверке на заимствования в системе «Антиплагиат»

ПРИЛОЖЕНИЕ Д
(обязательное)
Ведомость дипломного проекта