

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
 Отделение материаловедения

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Генератор импульсов по схеме Маркса на основе биполярных транзисторов в лавинном режиме

УДК 621.382.032:621.373.14.027.3

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ71	Перевалов Никита Алексеевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ ИШНПТ	Мартемьянов Сергей Михайлович	К.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Кашук Ирина Вадимовна	К.Т.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ООД ШБИП	Романова Светлана Владимировна			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ ИШНПТ	Жгун Дмитрий Владимирович	К.Т.Н.		

Томск – 2019 г.

Планируемые результаты освоения ООП

Код	Результат обучения
Общие по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника»	
P1	Понимать и применять в профессиональной деятельности <i>основные принципы и методы</i> научно-технической деятельности, специфику научного мировоззрения, способы взаимодействия достижений науки и техники с другими областями духовной деятельности человека. Использовать методологические основы <i>научного познания и творчества</i> , синтезировать и критически резюмировать информацию.
P2	Использовать способы и принципы поиска, сбора, обработки научной и технической информации в развитии отрасли с использованием <i>современных информационных технологий</i> .
P3	<i>Применять иностранный язык</i> для академического и профессионального взаимодействия
P4	<i>Выполнять функции преподавателя</i> в образовательных учреждениях среднего профессионального и высшего профессионального образования
P5	<i>Совершенствовать</i> и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, добиваться <i>нравственного и физического совершенствования</i> своей личности, реализовывать приоритеты собственной профессиональной деятельности.
P6	Использовать <i>углубленные теоретические и практические знания</i> , применять новые технологии для <i>решения инженерных задач</i> в области электроэнергетики и высоковольтной электротехники; понимать основные научные принципы проблем в своей предметной области.
P7	<i>Формулировать цели и задачи научных исследований</i> в соответствии с тенденциями и перспективами развития <i>высоковольтной электротехники</i> , а также смежных областей науки и техники; Планировать, выполнять фундаментальные и прикладные работы поискового, теоретического и экспериментального характера; внедрять результаты исследований в производство; Уметь работать в научном коллективе в качестве члена команды, а также руководить командой.
P8	<i>Проектировать</i> конкурентоспособную наукоемкую продукцию в <i>сфере высоковольтной электротехники</i> , а также смежных областях науки и техники; <i>Проводить технико-экономическое обоснование</i> проектных решений; Применять на практике навыки и умения в <i>организации опытно-конструкторских работ</i> , использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности.
Профиль «Техника и физика высоких напряжений»	
P9	<i>Применять знания</i> физических и технологических основ генерирования высоких напряжений и сильных токов для <i>получения электрических и магнитных полей, электрических разрядов в диэлектриках</i> для решения научных и инженерных задач наукоемкого производства на мировом уровне.
P10	<i>Применять знания</i> физико-химических и технологических основ генерирования <i>мощных электронных, ионных пучков и потоков плазмы</i> для <i>модификации поверхности материалов, синтеза нанопорошков, обработки жидкостей и газов</i> для решения научных и инженерных задач наукоемкого производства на мировом уровне.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
 Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП

 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ
 на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
4ТМ71	Перевалов Никита Алексеевич

Тема работы:

Генератор импульсов по схеме Маркса на основе биполярных транзисторов в лавинном режиме	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	16.05.2019, № 3830/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	31.05.2019
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Рассмотрение возможности и целесообразности использования биполярных транзисторов в лавинном режиме для построения ГИН технологического назначения. Анализ режимов работы и возможных диапазонов перегрузки коммутаторов. Анализ возможных областей применения ГИН на твердотельных коммутаторах.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Литературный обзор 2. Моделирование 3. Экспериментальная часть 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение 5. Социальная ответственность
Перечень графического материала	Презентация в Microsoft PowerPoint

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Кащук Ирина Вадимовна
Социальная ответственность	Романова Светлана Владимировна
Разделы, выполненные на иностранном языке	Ажель Юлия Петровна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
3 Макетирование и экспериментальное исследование генератора	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	11.01.2019
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ ИШНПТ	Мартемьянов Сергей Михайлович	к.т.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ71	Перевалов Никита Алексеевич		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа новых производственных технологий
Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
Уровень образования: магистр
Отделение материаловедения
Период выполнения: осенний / весенний семестр 2018 /2019 учебного года

Форма представления работы:

магистерская диссертация

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	31.05.2019
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
27/02/2019	Литературный обзор	20
15/03/2019	Моделирование	20
08/04/2019	Экспериментальная часть	30
25/04/2019	Финансовый менеджмент	10
03/05/2019	Социальная ответственность	10
25/05/2019	Разделы, выполненные на иностранном языке	10
		Сумма: 100 баллов

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ ИШНПТ	Мартемьянов Сергей Михайлович	к.т.н		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ ИШНПТ	Жгун Дмитрий Владимирович	к.т.н.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа состоит из 101 страниц, 50 рисунков, 28 таблиц, 37 источников и 1 приложения.

Ключевые слова: БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР, ЛАВИННЫЙ ПРОБОЙ, ГЕНЕРАТОР МАРКСА, ИМПУЛЬС НАПРЯЖЕНИЯ, НАНОСЕКУНДНЫЙ ИМПУЛЬС.

Объектом исследования является генератор по схеме Маркса на основе биполярных транзисторов в лавинном режиме.

Цель работы: Анализ существующих генераторов Аркадьева-Маркса на лавинных транзисторах; проектирование и макетирование силовой и управляющей схем ГИН на лавинных транзисторах; изучение параметров ГИН.

В процессе работы были проведены расчет и моделирование генератора Маркса. Изготовлен драйвер управления силовым ключом с гальванической развязкой. Изготовлены на печатных платах и исследованы пяти- и десятиступенчатые генераторы Маркса.

ABSTRACT

Graduation qualification work consists of 101 pages, 50 drawings, 28 tables, 37 source and 1 applications.

Key words: BIPOLAR TRANSISTOR, AVALANCHE BREAKDOWN, MARX GENERATOR, VOLTAGE PULSE, NANOSECOND PULSE.

The object of the study is a generator according to Marx's scheme based on bipolar transistors in the avalanche mode.

Objective: Analysis of existing Marx generators on avalanche transistors; design and prototyping of power and control generator circuits on avalanche transistors; study of generator parameters.

In the process, the calculation and simulation of the Marx generator were carried out. Made driver control power switch with galvanic isolation. Manufactured on printed circuit boards and investigated five- and ten-step Marx generators.

Оглавление

Введение.....	10
1 Обзор и анализ литературных данных о генераторах на лавинных транзисторах	12
1.1 Генератор высоковольтных импульсов по схеме Маркса	12
1.2 Биполярный транзистор в лавинном режиме.....	14
1.3 Схемы и конструкции генераторов на биполярных транзисторах в лавинном режиме	16
2 Расчет и имитационное моделирование генератора.....	30
2.1 Выбор силовых ключей и расчет электрических компонентов	30
2.2 Имитационное моделирование генератора	32
3 Макетирование и экспериментальное исследование генератора.....	37
3.1 Драйвер управления генератором	37
3.2 Тестирование лавинного режима	42
3.3 Макетирование пятиступенчатого генератора.....	43
3.4 Макетирование десятиступенчатого генератора	47
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение...	54
4.1 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	55
4.2 SWOT – анализ	57
4.3 Планирование научно-исследовательской работы.....	60
4.4 Бюджет научного исследования	63
4.5 Анализ и оценка научно-технического уровня исследования	70
4.6 Определение ресурсноэффективности исследования	71
5 Социальная ответственность	76

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.	77
5.2 Производственная безопасность.....	79
5.3 Экологическая безопасность.....	91
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	93
Заключение	95
Список использованных источников	98
Приложение А	102

Введение

Цель работы: Анализ существующих генераторов Аркадьева-Маркса на лавинных транзисторах; проектирование и макетирование силовой и управляющей схем генератора импульсов напряжения (ГИН) на лавинных транзисторах; изучение параметров ГИН.

Задачи:

- конструирование и монтаж макета драйвера с широким частотным диапазоном;
- конструирование и монтаж макета ГИН;
- исследование характеристик макетов;
- испытание и отладка устройства в сборе;
- создание гальванической развязки (импульсный трансформатор).

Наносекундные и субнаносекундные импульсы используются во многих областях из-за очень широкого спектра применения, таких как наземный радиолокатор (GPR) [1], радиолокационная система [2], биомедицинские приборы [3], высокоскоростная фотография [4], сверхширокополосная связь [5], лазерные технологии [6] и обработка пищи [7]. Требуются компактные источники импульсов высокого напряжения. Один из способов генерации этих импульсов - использование генератора Аркадьева-Маркса. Они могут генерировать выходные импульсы с амплитудой, в n раз превышающей напряжение питания, при этом n равно числу ступеней [19]. Когда для подключения ступеней используются быстрые методы переключения, выходной импульс может достигать очень короткого времени нарастания. Традиционно, искровые разрядники используются из-за их способности быстрого переключения и регулируемого напряжения пробоя. Среда в искровом промежутке (например, воздух, масло) нуждается в достаточном времени для восстановления перед началом следующего цикла, что делает их менее подходящими для генераторов Маркса, работающих с высокой частотой повторения. Кроме того, они громоздки и не подходят для компактных

применений. Для решения данных задач, можно использовать другой тип переключателя: лавинные транзисторы. Они поставляются в небольших корпусах и, таким образом, позволяют создавать компактные твердотельные генераторы Маркса. Также твердотельные коммутаторы обладают в теории неограниченным ресурсом [8].

Для создания ГИН на лавинных транзисторах используются биполярные транзисторы, которые обладают рядом преимуществ перед MOSFET и IGBT:

- высокая граничная частота,
- быстрое переключение,
- высокая скорость нарастания тока/напряжения,
- низкая цена.

Недостатки:

- управление током;
- невысокая максимальная мощность.

При работе биполярных транзисторов в лавинном режиме управление осуществляется только одним транзистором.

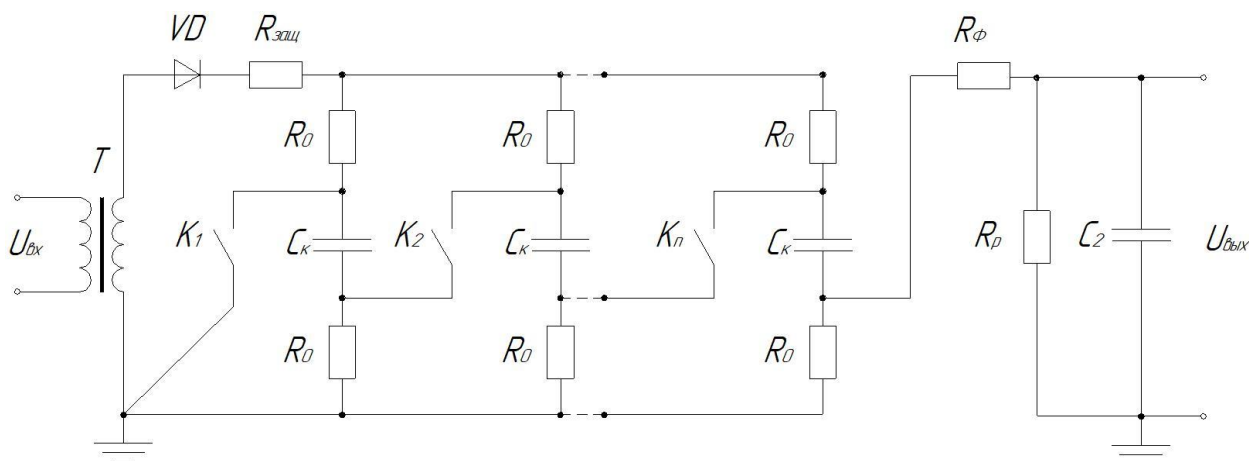
Далее будет представлен обзор уже существующих решений и экспериментальных образцов.

1 Обзор и анализ литературных данных о генераторах на лавинных транзисторах

1.1 Генератор высоковольтных импульсов по схеме Маркса

Принцип действия генераторов импульсного высокого напряжения основан на зарядке электрическим током соединённых параллельно (через резисторы) конденсаторов, соединяющихся после зарядки последовательно при помощи различных коммутирующих устройств (например, разрядников, триггатронов или полупроводниковых коммутаторов). Таким образом выходное напряжение увеличивается пропорционально количеству соединённых конденсаторов.

На рисунке 1 приведен вариант схемы генератора импульсных напряжений [10, 11, 12], рассматриваемого в этой работе.



T – трансформатор; VD – выпрямитель; $R_{защ}$, R_0 – защитное и токоограничивающие сопротивления; $R_ф$ – фронтовое сопротивление; C_2 – ёмкость нагрузки; K – полупроводниковый ключ; C_k – ёмкость ступени.

Рисунок 1 – Принципиальная электрическая схема ГИН

После зарядки конденсаторов запуск генератора производится подачей управляющего импульса на полупроводниковый коммутатор. После его срабатывания перенапряжение на остальных коммутаторах заставляет срабатывать их все практически одновременно (лавинный пробой), чем и производится последовательное соединение заряженных конденсаторов.

Отсутствие коммутатора на выходе генератора перед фронтовым сопротивлением обусловлено тем, что протекание тока через нагрузку до коммутации вызовет зарядку нагрузки до $\sim U_{\text{вх}}$, что в свою очередь никак не повлияет эксперименты.

Для заряда конденсатором используется выпрямленное или постоянное напряжение; чаще всего источник питания представляет собой выпрямительное устройство, состоящее из повышающего трансформатора, вентиля, пускорегулирующей, защитной и контрольной аппаратуры, системы заземления безопасности.

При разряде совокупность генератор-объект можно представить, как две емкости с последовательно соединенными успокоительными сопротивлениями, а также индуктивностью разрядной цепи.

Полная схема замещения разрядного контура ГИН представлена на рисунке 2а. На рисунке 2б упрощенная схема.

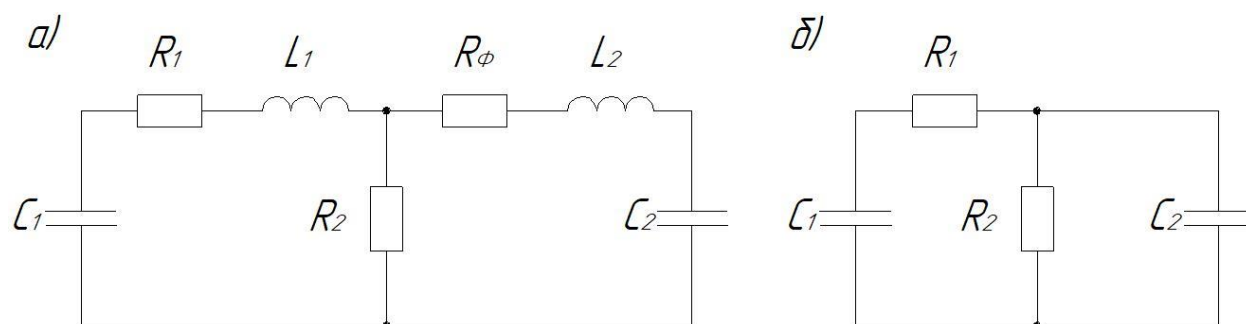


Рисунок 2 – Схемы замещения разрядной цепи

В этой схеме C_1 – емкость генератора в разряде; R_1 – суммарное активное сопротивление разрядной цепи ГИН и успокоительных сопротивлений для подавления высокочастотных колебаний в разрядной цепи; R_2 – разрядное сопротивление, предназначенное для регулирования длительности импульса; C_2 – сумма емкости объекта, паразитной емкости ГИН; L_1 и L_2 – индуктивность элементов ГИН и петли подсоединения объекта к ГИНу.

Ввиду небольшой длины соединительных проводников и, следовательно, малой их индуктивности, при расчетах ими можно пренебречь, упрощенная схема представлена на рисунке 2б.

Традиционно в качестве ключей в схеме Маркса используются газовые разрядники. Однако возможна коммутация с помощью полупроводниковых электрорадиоэлементов.

Преимущества твердотельных коммутаторов по сравнению с газовыми разрядниками:

- практически неограниченный ресурс;
- высокая стабильность срабатывания;
- небольшие габариты;
- высокий КПД;
- возможность работы на высокой частоте.

Недостатки:

- необходимость подачи управляющих импульсов;
- относительно малое напряжение (до 5 кВ у транзисторов).

1.2 Биполярный транзистор в лавинном режиме

Лавинный транзистор интересен прежде всего тем, что в отличие от обычных транзисторов рассчитан на работу в режиме лавинного пробоя. Однако этот режим не противопоказан и некоторым маломощным биполярным транзисторам. В основе его лежит ударная ионизация в р-п-переходах. когда она в предпробойной области принимает лавинообразный характер и приводит к очень резкому увеличению тока через переходы.

Если между базой и эмиттером транзистора включить резистор, сопротивление которого меньше сопротивления эмиттерного перехода при малых токах, то с увеличением напряжения на коллекторе обратный ток коллектора будет протекать в основном через этот резистор. При некотором напряжении наступает пробой коллекторного перехода. Однако при

лавинообразном увеличении тока увеличивается и падение напряжения на резисторе в цепи базы. В результате эмиттерный переход начинает открываться и все большая часть тока коллектора ответвляется в цепь эмиттера. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению его сопротивления. Но ведь коллекторный переход уже пробит, поэтому сопротивление участка коллектор-эмиттер определяется практически только проводимостью эмиттерного перехода. Для большинства транзисторов в момент пробоя оно составляет 2...50 Ом. Поэтому ток может достигать единиц и десятков ампер, что неизбежно приведет к тепловому пробую и выходу транзистора из строя. Ограничив этот ток до уровня, допустимого для данного транзистора, нетрудно избежать теплового пробоя и использовать в дальнейшем транзистор по своему прямому назначению. [25]

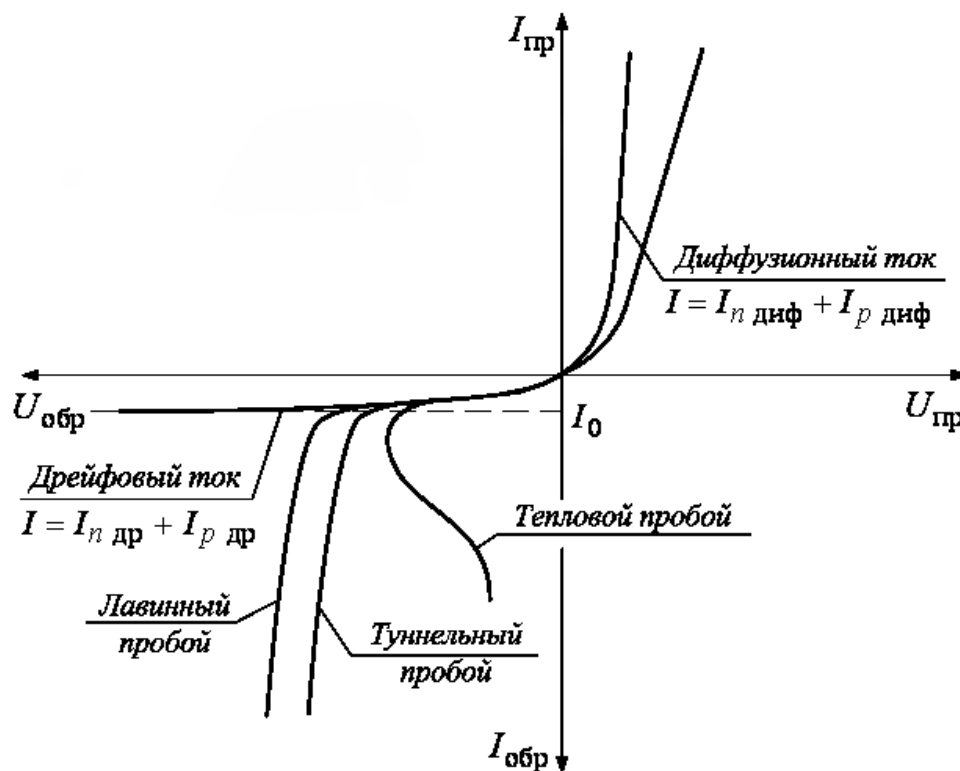


Рисунок 3 – Вольт-амперная характеристика биполярного транзистора

Иначе говоря, лавинный режим придает транзистору новые свойства (на вольтамперной характеристике появляется отрицательная ветвь).

1.3 Схемы и конструкции генераторов на биполярных транзисторах в лавинном режиме

Одним из главных достоинств генератора Маркса на лавинных транзисторах является управление, которое осуществляется только одним ключом в первой ступени, а пробой последующих имеет лавинный характер и достигается при определенном приложенном напряжении. В схемах с MOSFET или IGBT управление должно осуществляться над каждым транзистором, что во много раз усложняет и удорожает генератор.

Рассмотрим типовую схему генератора Маркса с использованием MOSFET (рисунок 4).

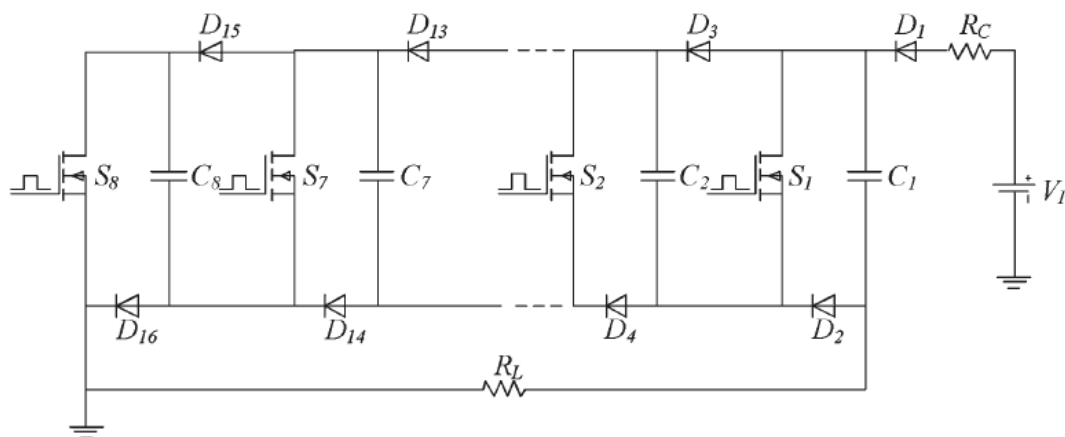


Рисунок 4 – Схема ГИН на MOSFET [9]

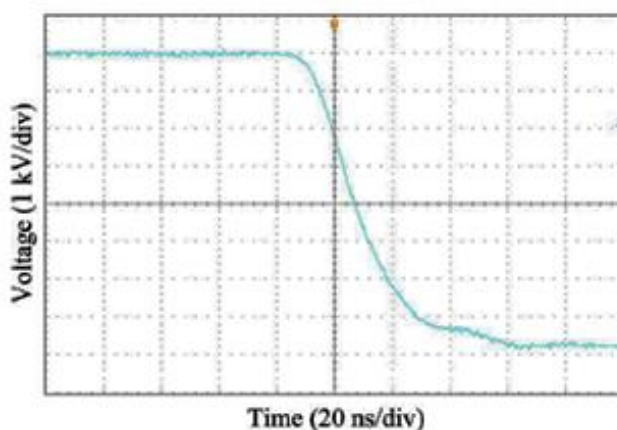


Рисунок 5 – Фронт на нагрузке [9]

Данный генератор [9] состоит из восьми ступеней, управление над каждым силовым ключом осуществляется при помощи драйвера с восьмью оптическими выводами. В таких решениях возникают проблемы синхронизации управляющих сигналов между собой. Из-за задержки сигналов между собой, может затягиваться фронт на нагрузке. Длительность фронта составляет около 40 нс, амплитуда напряжения на нагрузке 7,5 кВ, а сопротивление нагрузки 100-1000 Ом. Частота следования импульса 1 кГц. Рассмотренные далее генераторы на лавинных транзисторах обладают более резким фронтом, что является главным достоинством.

Авторы статьи [10] заявляют, что лавинные транзисторы обладают крайне высокой скоростью переключения (100 В/нс или лучше), и напряжение пробоя у таких транзисторов может быть более 300 В, и они могут выдерживать более 4×10^{11} непрерывных операций при импульсах пикового тока 60 А и длительности импульса 20 нс без сбоев. Также способны стабильно работать на частоте до десятков килогерц. В свете выше перечисленных фактов, авторы используют в качестве ключей биполярные транзисторы NPN серии FMMT417, которые созданы непосредственно для работы в лавинном режиме. В работе был представлен 16-ступенчатый генератор Маркса (рисунок 6), в котором зарядные резисторы расположены параллельно друг другу, для синхронного заряда конденсаторов, что в «классической» схеме, когда зарядные резисторы включены последовательно, недостижимо, так как постоянная времени τ заряда конденсаторов будет увеличиваться на каждой ступени.

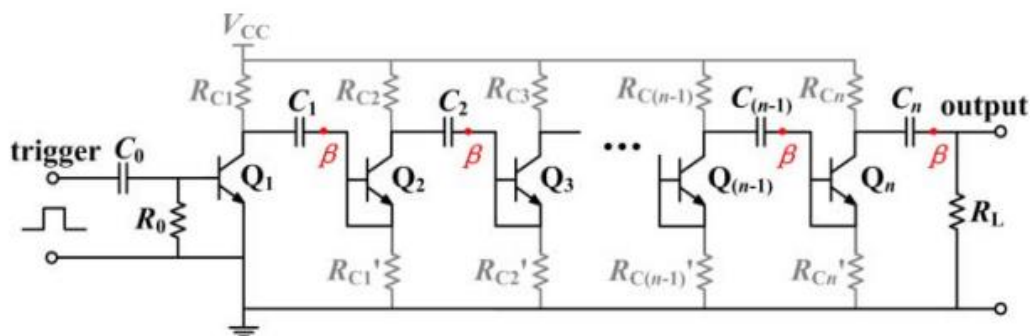


Рисунок 6 – Схема ГИН на лавинных транзисторах [10]

Управляющий импульс от драйвера управления подается между базой первого транзистора Q_1 и эмиттером (рисунок 6), который имеет общую точку с землей. Последующие транзисторы Q_2 - $Q_{(n-1)}$ подключены с коротко замкнутой базой на эмиттер. При подаче управляющего импульса на первый транзистор Q_1 происходит его открытие, в следствие чего конденсатор C_1 оказывается параллельно подключенным к зарядному сопротивлению R_{C1} , из-за чего ко второму транзистору Q_2 прикладывается удвоенное напряжение, и данный транзистор переходит в режим лавинного пробоя. Аналогично пробиваются последующие транзисторы, и конденсаторы оказываются последовательно подключены к нагрузке 50 Ом (рисунок 7).

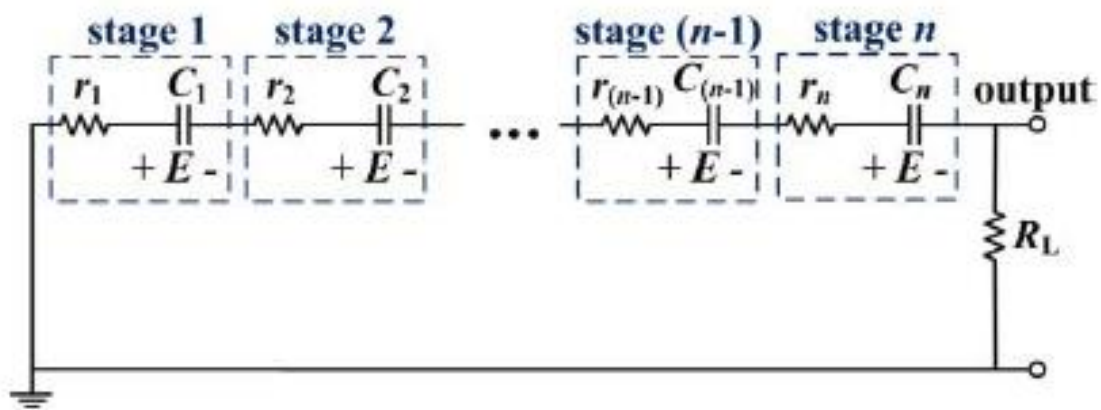


Рисунок 7 – Эквивалентная разрядная схема [10]

Данный генератор выполнен на печатной плате размером 12 x 4 см. Зарядные резисторы, как и лавинные транзисторы, выполнены в исполнении для планарного монтажа (рисунок 8). Также авторами были проанализированы различные конденсаторы (слюдяные, чип-конденсаторы, конденсаторы серии СВВ и керамические) и выбраны слюдяные конденсаторы из-за высокой производительности и низких диэлектрических потерь.

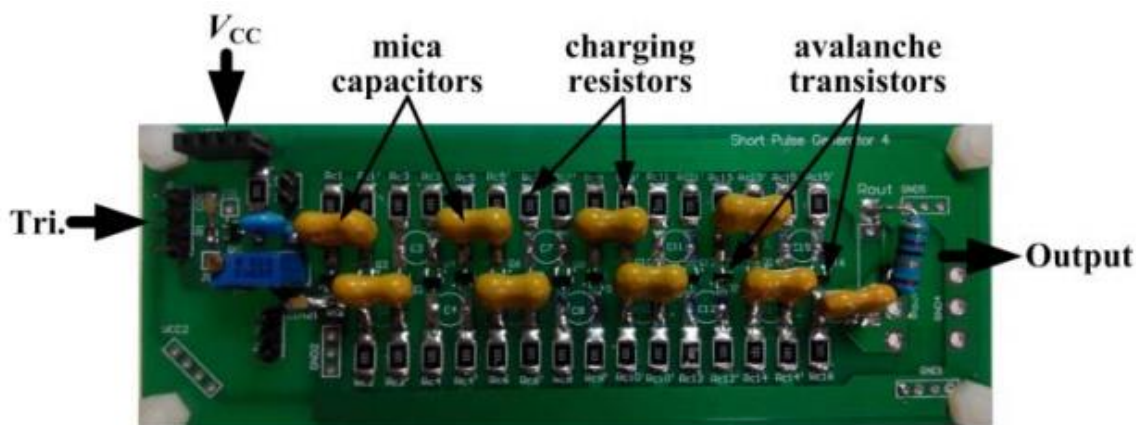


Рисунок 8 – Внешний вид генератора [10]

Сопротивление нагрузки $R_L = 50$ Ом было выбрано исходя из выходного сопротивления генератора Маркса $r_0 = 46$ Ом. Такое соотношение дает максимальную пиковую выходную мощность 125 кВт. Параметры импульса при таких параметрах получаются следующими: длительность импульса 6 нс; амплитуда на нагрузке в диапазоне от 1,5 кВ до 2,5 кВ при питающем напряжении от 180 В до 300 В, частота следования импульса при этом 10 кГц. Осциллограмма напряжения представлена на рисунке 9.

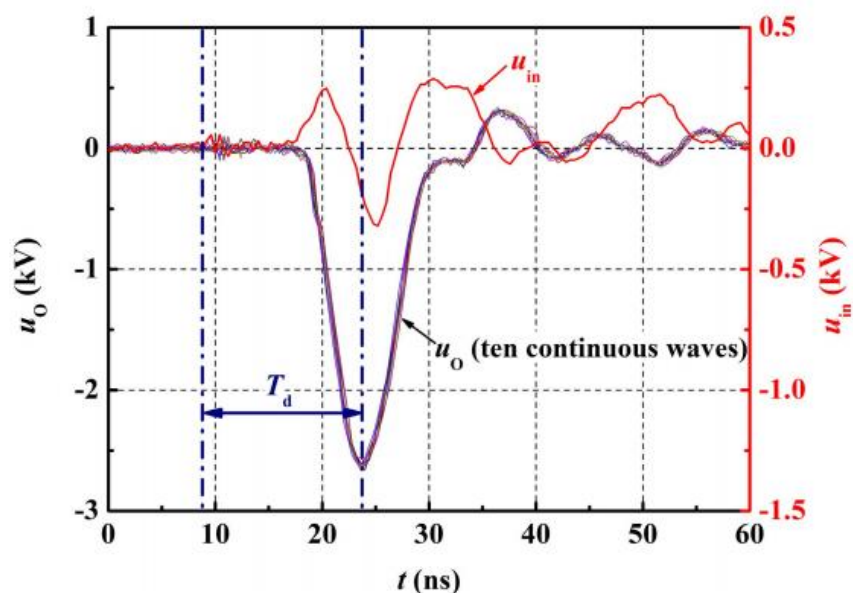


Рисунок 9 – Напряжение на нагрузке и инициирующий сигнал [10]

Схемы аналогичные вышепредставленной часто встречаются и в других статьях, например, в статье [11] генератор выполненный по данной типологии

(рисунок 10), так же работает на нагрузку 50 Ом и частота следования импульса 10 кГц, амплитуда напряжения 2,7 кВ, а длительность фронта 500 пс (рисунок 11). Но данный генератор имеет 25 ступеней, и как заявляют авторы, при достижении 16 ступеней амплитуда напряжения на выходе растет незначительно.

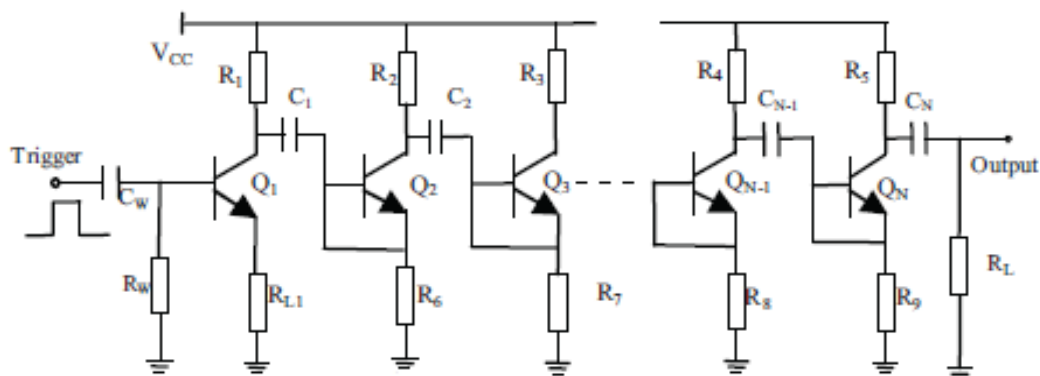


Рисунок 10 – Схема ГИН на лавинных транзисторах [11]

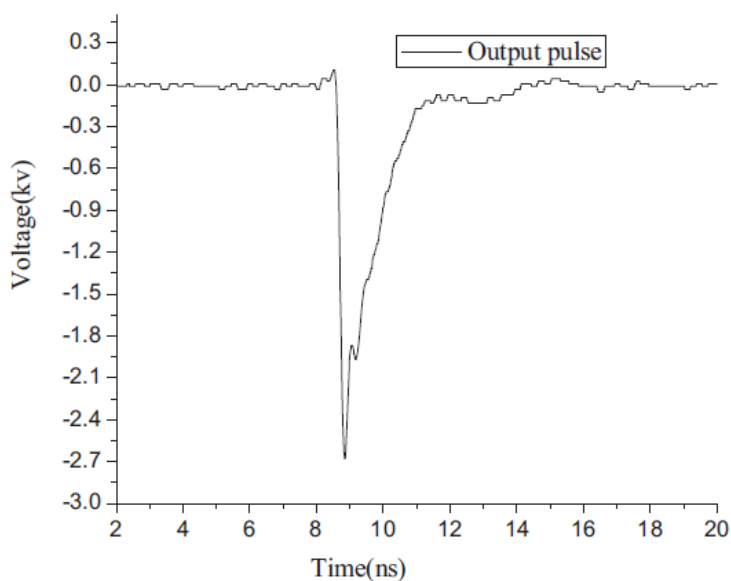


Рисунок 11 – Напряжение на нагрузке[11]

Данный генератор изготовлен на печатной плате (рисунок 12) и имеет схожие габариты с генератором на рисунке 8. Но информации о типе конденсаторов и серии транзисторов нет.

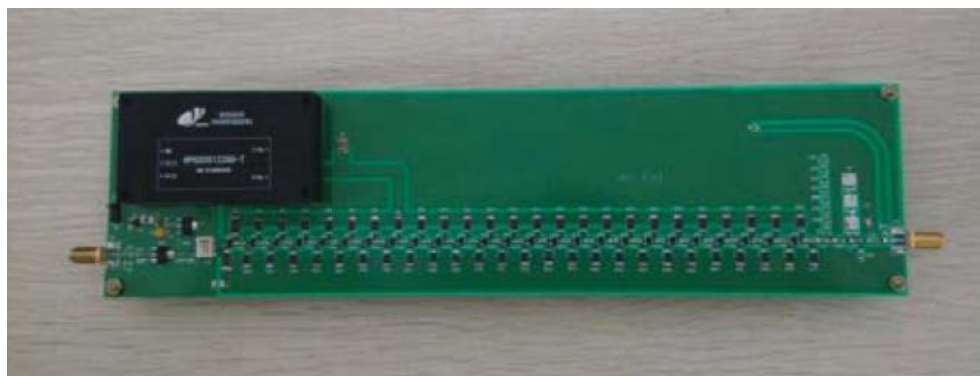


Рисунок 12 – Внешний вид генератора [11]

В статье [12] схема (рисунок 13) аналогична схемам [10] и [11], за исключением амплитуды (2,9 кВ) и длительности фронта (200 пс), частота следования импульса до 70 кГц. Импульс напряжения представлен на рисунке 14.

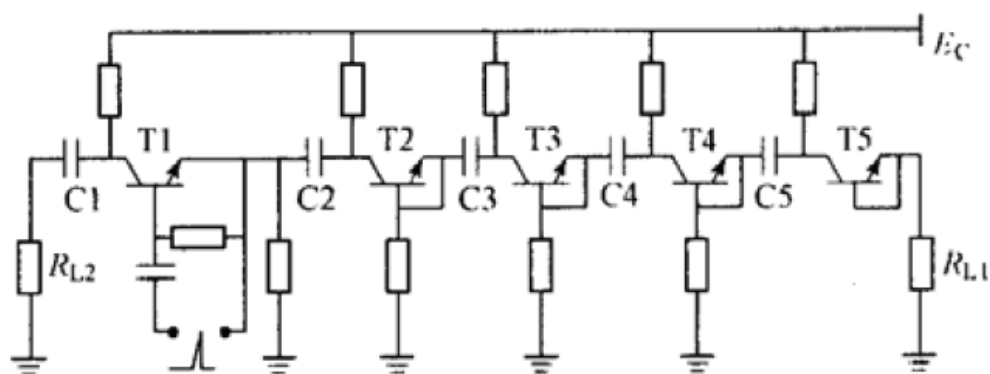


Рисунок 13 – Схема ГИН на лавинных транзисторах [12]

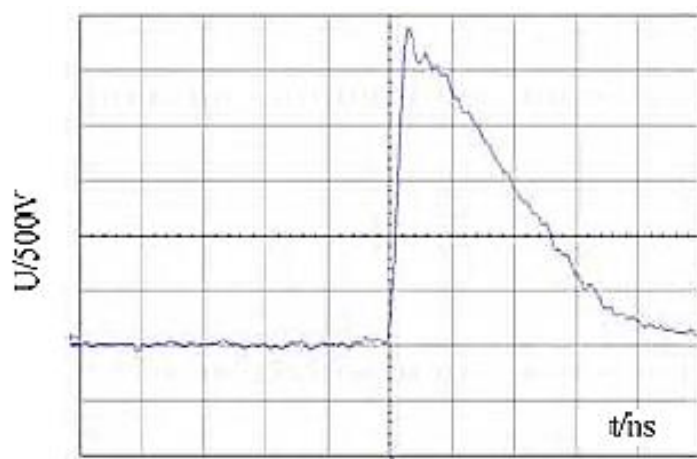


Рисунок 14 – Напряжение на нагрузке [12]

Схема [13], аналогичная нагрузке (50 Ом), амплитуда напряжения 1 кВ, длительность фронта 200 пс.

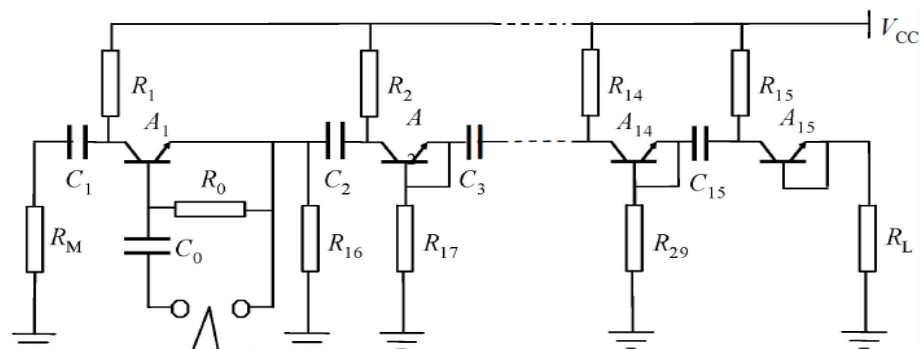


Рисунок 15 – Схема ГИН на лавинных транзисторах [13]

Схемы в статье [14] имеют классическую структуру с последовательно включенными зарядными резисторами (рисунок 16). Конечный вариант имеет 19 ступеней с параллельно включенными транзисторами BJT “ZTX415” к нагрузке. Данные транзисторы укорачивают импульс, как параллельно включенный разрядник к нагрузке в классическом генераторе.

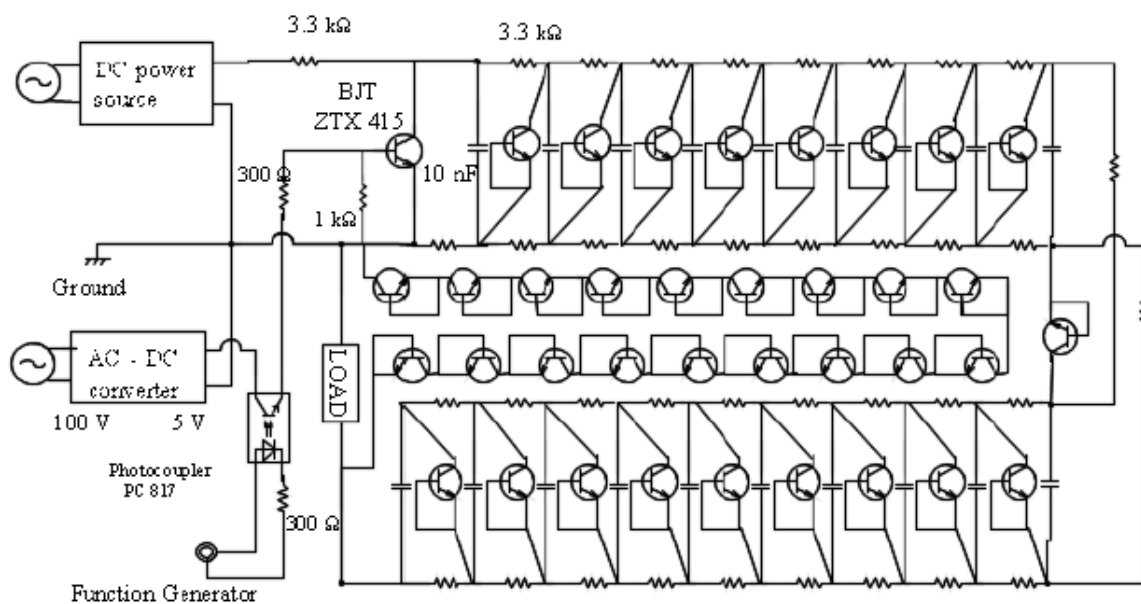


Рисунок 16 – Схема ГИН на лавинных транзисторах [14]

На рисунке 17 изображен импульс напряжения на нагрузке со следующими параметрами: амплитуда напряжения 5,2 кВ, длительность фронта 3 нс, а длительность импульса 7 нс.

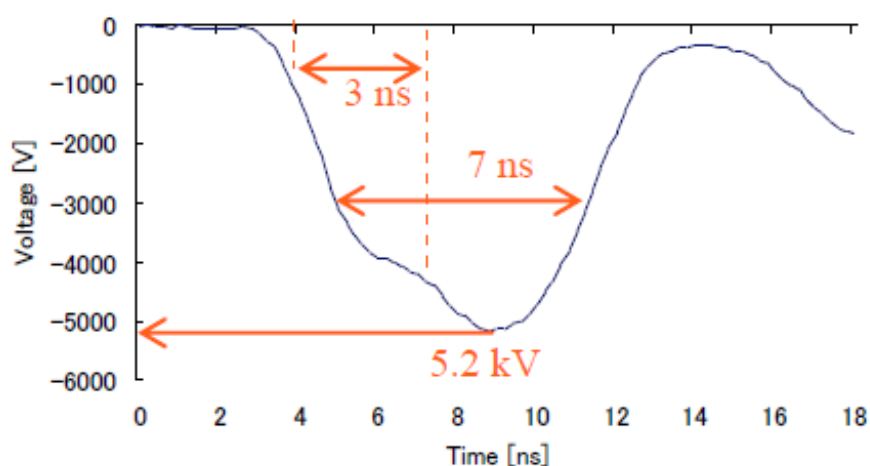


Рисунок 17 – Напряжение на нагрузке с параллельно включенными транзисторами [14]

Если отключить ранее упомянутые параллельно включенные транзисторы, то амплитуда напряжения вырастет до 6 кВ (рисунок 18), а длительность импульса будет 2,5 мкс.

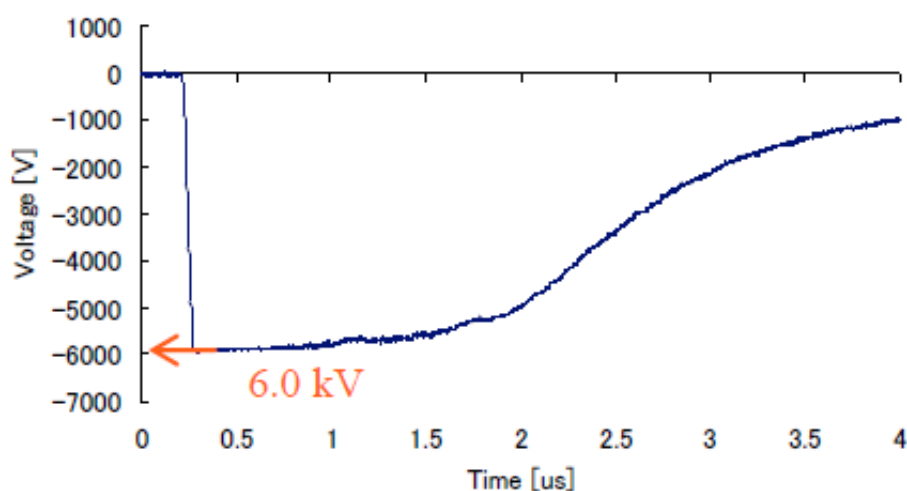


Рисунок 18 – Напряжение на нагрузке без параллельно включенных транзисторов [14]

Генератор выполнен на макетной плате и уместается в небольшом корпусе (10 см x 15 см), что и видно на рисунке 19.

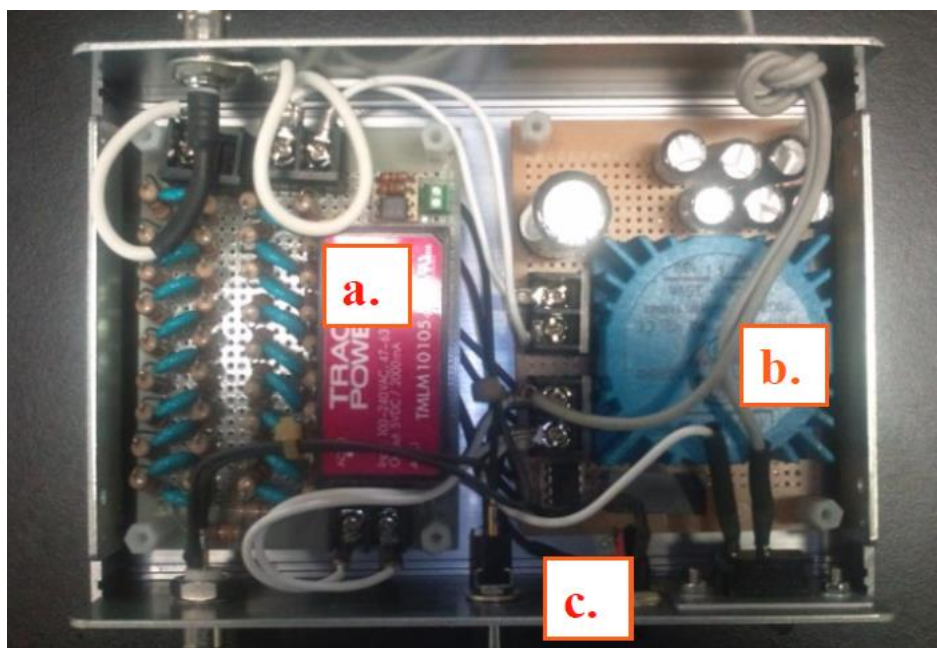


Рисунок 19 – Вид генератора в сборе [14]

Схема в статье [15] отличается отрицательным постоянным напряжением питания (рисунок 20), чтобы получить положительный импульс на нагрузке.

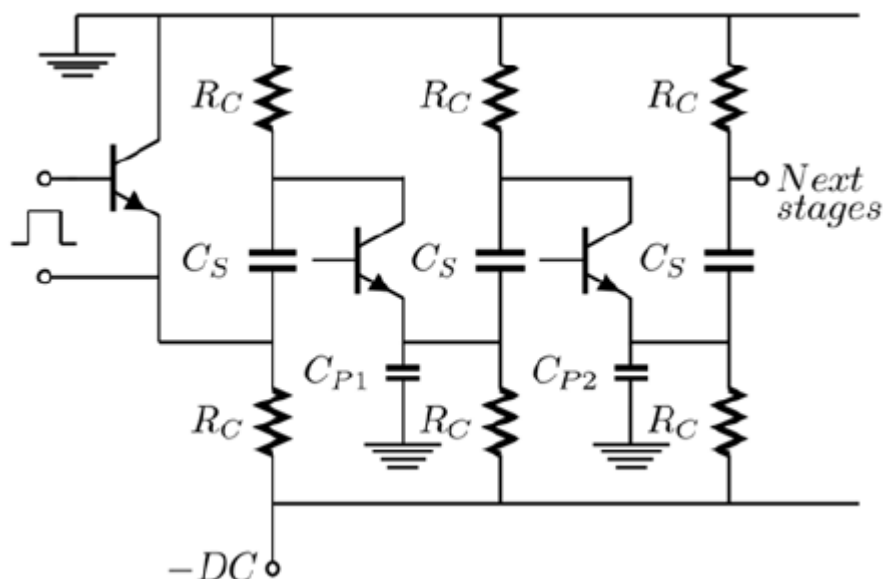


Рисунок 20 – Схема ГИН на лавинных транзисторах [15]

Помимо этого, в данной схеме используются биполярные транзисторы 2N5551 без сопротивления между базой и эмиттером, по утверждениям авторов, замыкание базы увеличивает напряжение на конденсаторе, что увеличивает импульс напряжения. Недостаток состоит в том, что рассеивание

увеличивается до 300 мВт, и, что наиболее важно, разница между напряжением на конденсаторе и лавинным напряжением увеличивается с 30 В до 150 В. При открытой базе меньше рассеивания во время импульса, при замкнутой сложнее переход транзисторов в лавинный пробой.

Также авторы установили опытным путем, что добавление конденсаторов между эмиттером и землей второго, третьего и десятого транзистора из пятнадцати способствует лавинному пробую, что в свою очередь обостряет фронт (1,94 нс). Импульс напряжения представлен на рисунке 21.

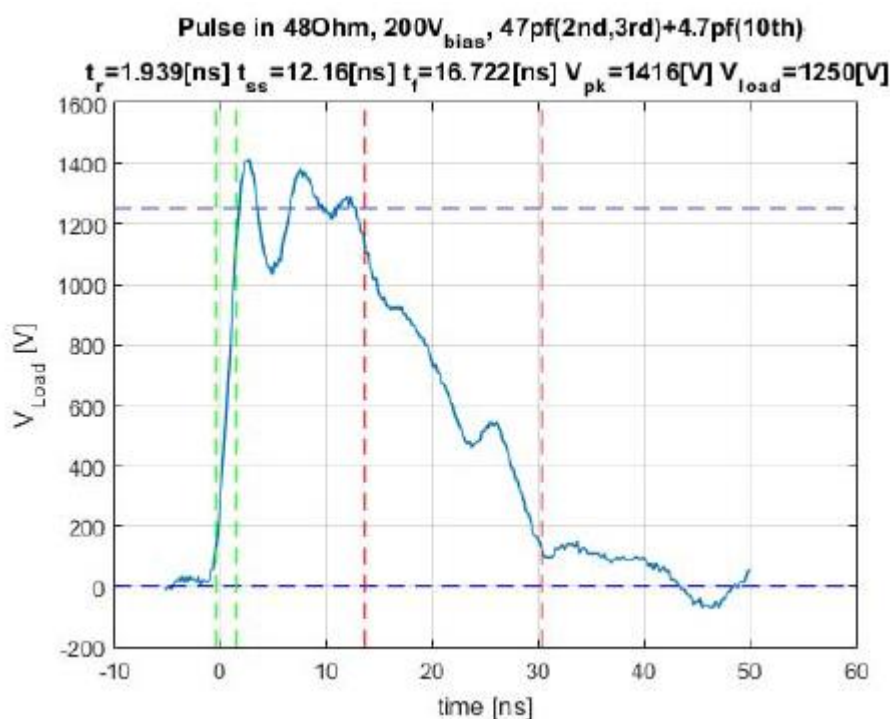


Рисунок 21 – Напряжение на нагрузке [15]

Для достижения плоской вершины и простоты измерения длительности фронта емкость конденсаторов была выбрана 3,3 нФ, а величина зарядных резисторов составила 8,2 кОм. Допустимая частота следования импульса составила при этом 3,7 кГц.

Вдобавок авторы получили зависимость амплитуды напряжения от нагрузки (рисунок 22). Амплитуда увеличиваясь вплоть до 3 кВ в условиях холостого хода и при небольшой емкостной нагрузке.

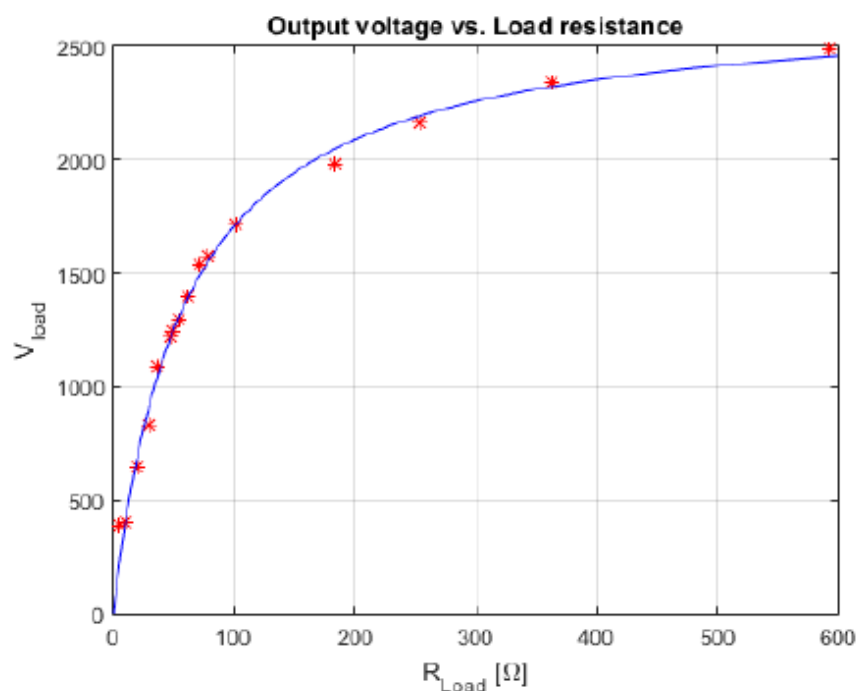


Рисунок 22 – Зависимость амплитуды напряжения от нагрузки

Помимо того, в схемах ГИН на лавинных транзисторах возможно использовать несколько транзисторов на одну ступень (рисунок 23) [18], для распределения напряжения между каждым, чтобы снизить нагрузку на один транзистор, другими словами, 6 транзисторов выдерживают питающее напряжение, а при открытии одного, уже 5 транзисторов пробиваются, с последующим пробоем следующих ступеней.

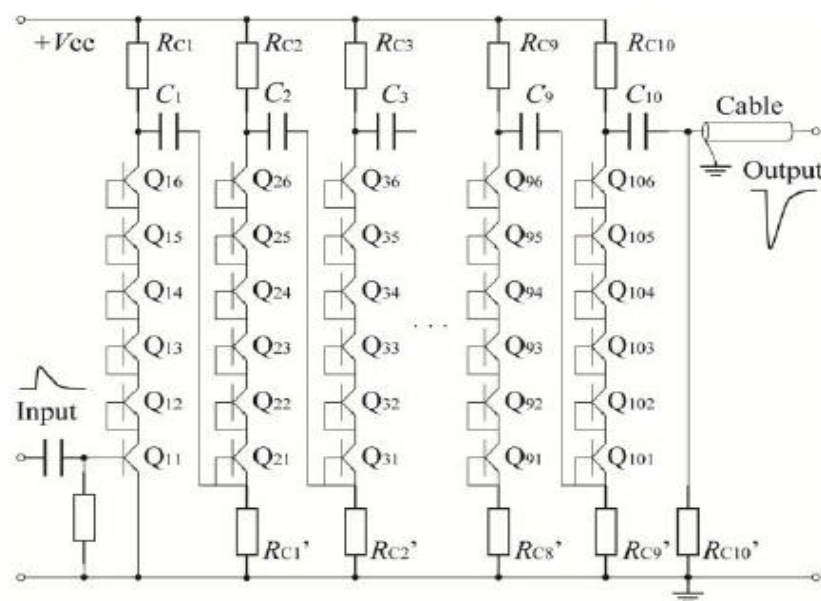


Рисунок 23 – Схема ГИН на лавинных транзисторах [18]

Данный генератор (рисунок 20) был разработан для двухступенчатого ГИН с разрядниками. Принципиальная схема такого генератора представлена на рисунке 24.

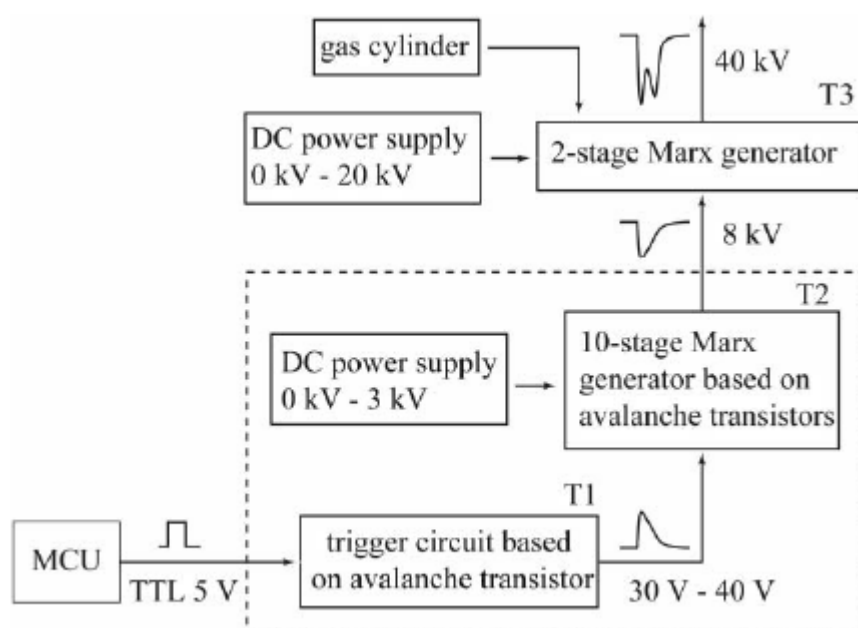


Рисунок 24 – Принципиальная схема ГИН [18]

Десятиступенчатый генератор Маркса Т2 (рисунок 24) на лавинных транзисторах FMMT417 выдает импульс запуска 8 кВ (рисунок 25), который используется для запуска тригatronного ключа внутри двухступенчатого генератора Маркса Т3. Конечная амплитуда напряжения двухступенчатого генератора Маркса составляет около 40 кВ.

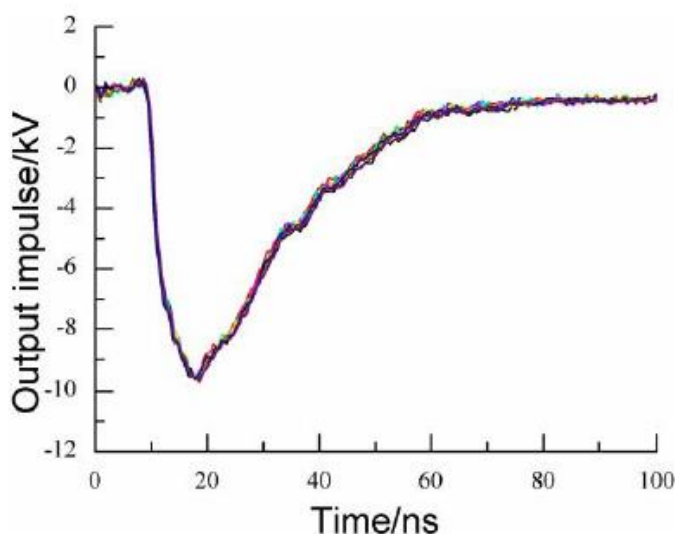


Рисунок 25 – Напряжение на выходе генератора Т2 [18]

Для удобства параметры генераторов из статей сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Параметры ГИН на лавинных транзисторах

Номер статьи	U _{пит} , кВ	U _{вых} , кВ	t _ф , нс	R _н , Ом	f, кГц	n	C, нФ	E, мкДж/имп
9	1	7,5	40	100-1000	1	8	-	86000
10	0,18-0,3	2,5	2,5	50	10	16	0,8	2,8*
11	0,3	2,7	0,5	50	10	25	0,47	0,84*
12	0,3	2,9	0,2	50	70	20	0,47	350
13	0,3	1	0,2	50	10	15	0,1	0,3*
14	0,3	5,2	3	220	0,1	19	10	24*
15	0,18-0,3	1,4	1,94	50	3,7	15	3,3	581
18	0-3	10,2	3	75	-	10	3	900*

**расчет производился по формуле $E = (C/n \cdot U^2)/2$, где C – емкость одного конденсатора, n – количество ступеней.*

Предложенные ранее конструкции ГИН на лавинных транзисторах используются в качестве опытных лабораторных образцов с перспективой использования в таких областях как: биомедицина, обработка пищи, радары, лазерные технологии, широкополосная связь. Данные генераторы имеют мощности несколько ватт, что несравнимо мало по отношению к классическим генераторам, но цели у таких генераторов разные. Длительность фронта у таких генераторов лежит в пределах от нескольких сотен пикосекунд до нескольких наносекунд. Частота следования импульса может доходить до нескольких десятков килогерц.

Альтернатива такому генератору – это генератор на звеньях сжатия с твердотельными коммутаторами (тиристоры, IGBT транзисторы). В последние годы такие генераторы представляют интерес в накачке лазеров. Имеют мощность на нагрузке до нескольких киловатт. Достигается импульс напряжения до десятков киловольт, с частотой следования этого импульса несколько килогерц. Длительность фронта составляет от десятков до сотен наносекунд. Достоинства такого генератора – большая мощность и амплитуда на выходе генератора. Главный недостаток – это наличие уникальных намоточных изделий, которые делают изделие более дорогим. Также длительность фронтов у таких генераторов на порядок больше.

Авторы приведенных статей отмечают, что генераторы Маркса с лавинными транзисторами компактны, стабильны и подходят для высокоскоростной генерации импульсов с высокой частотой повторения для условий с низким энергопотреблением. Также авторы отмечают, что необходимо согласовывать сопротивление нагрузки с сопротивлением генератора в ударе, иначе транзисторы начнут работать за пределами тепловых ограничений и начнут выходить из строя, из-за возрастающего тока при уменьшении нагрузки.

2 Расчет и имитационное моделирование генератора

2.1 Выбор силовых ключей и расчет электрических компонентов

Существуют лавинные транзисторы, выпускаемые промышленностью, созданные непосредственно для работы в режиме лавинного пробоя. Однако такие транзисторы достаточно дорогие и редкие. Впрочем, и существующие силовые транзисторы можно запустить в лавинном режиме. При этом возникает проблема: не каждый транзистор можно запустить в этом режиме, потому что существует тонкая грань между лавинным и тепловым пробоем, который разрушит кристалл транзистора.

Таким образом, на основании статьи [15] были выбраны силовые транзисторы серии 2N5551, для которых известна зависимость напряжения лавинного пробоя от сопротивления база-эмиттер (рисунок 35), и которые стабильно работают в лавинном режиме.

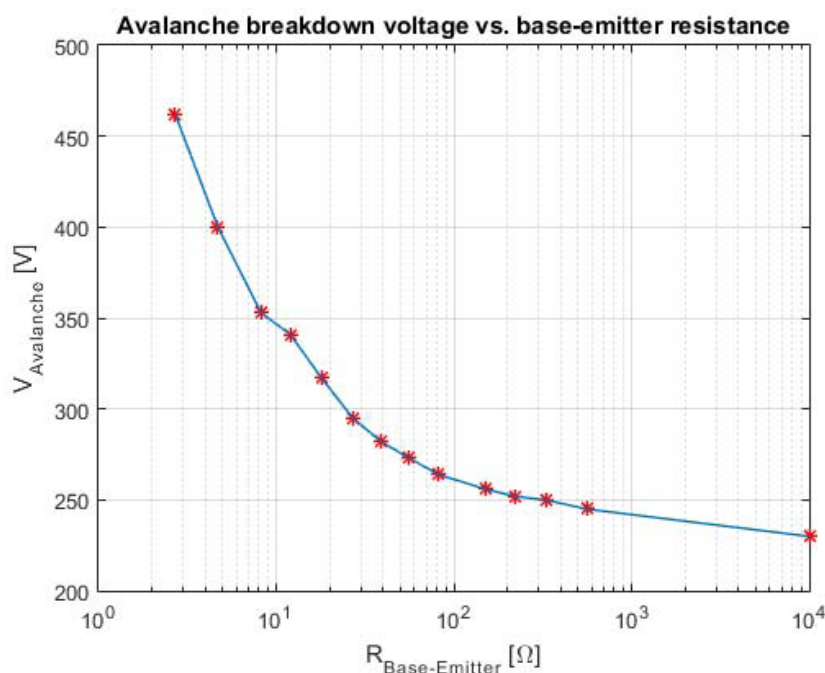


Рисунок 26 – Зависимость пробивного лавинного напряжения от сопротивления база-эмиттер [15]

Таблица 2 – Характеристики биполярного транзистора 2N5551

$V_{\text{CEO}}, \text{В}$	$V_{\text{CBO}}, \text{В}$	$V_{\text{ЕВO}}, \text{В}$	h_{fe}
160	180	6	200

В связи с выше сказанным, было выбрано сопротивление база-эмиттер $R_{бэ} = 100 \text{ кОм}$ (рисунок 27). Это сопротивление должно обеспечить напряжение лавинного пробоя на уровне 260 В. Напряжение питания должно находится в пределах $U_{лав.н} - 2 \cdot U_{лав.н}$, принимаем напряжение питания $U_{пит} = 300 \text{ В}$.

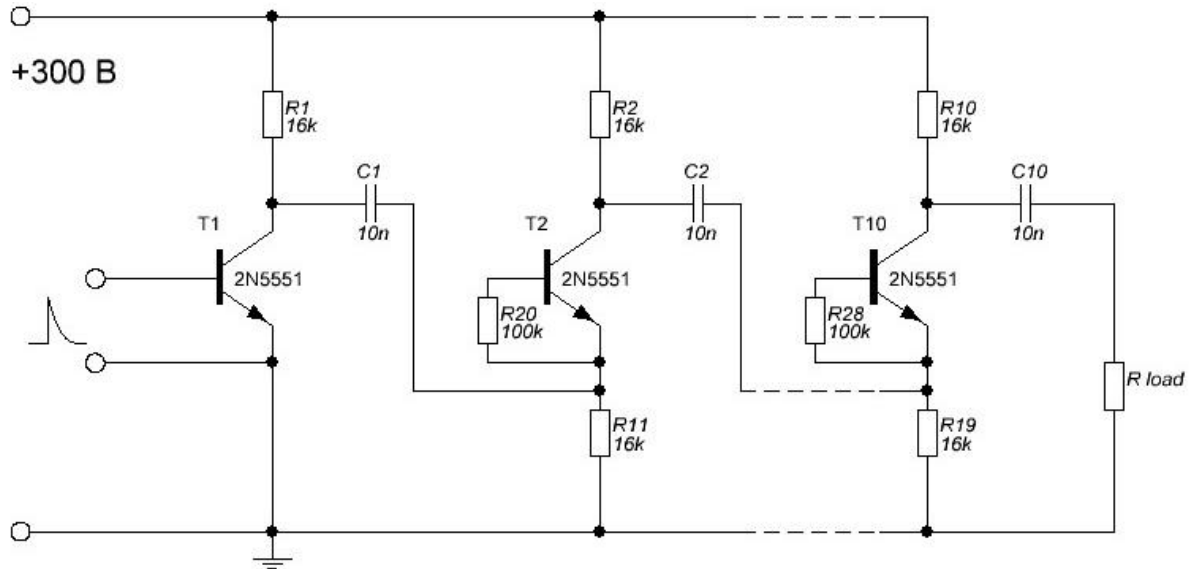


Рисунок 27 – Электрическая схема генератора

Емкость конденсаторов определяет энергию в импульсе на нагрузке, однако при весьма большой емкости произойдет нагрев кристаллов транзисторов, что приведет к их выходу из строя. Обзор генераторов из предыдущей главы показал, что емкость конденсатора не должна превышать 10 нФ. Принимаем емкость конденсатора равную $C = 10 \text{ нФ}$.

Одна из ключевых возможностей такого генератора – это его работа в высокочастотном режиме. Для этого необходимо обеспечить быструю зарядку конденсаторов, время которой определяется тремя постоянными времени

$$3 \cdot \tau = 3 \cdot R \cdot C. \quad (1)$$

Чтобы найти величину зарядного сопротивления, примем частоту следования импульсов равной $f = 1 \text{ кГц}$, период и постоянная времени будут равны

$$T = 3 \cdot \tau = \frac{1}{f} = \frac{1}{1000} = 1 \cdot 10^{-3} = 1 \text{ мс}, \quad (2)$$

$$\tau = \frac{T}{3} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{3} = 333,3 \cdot 10^{-6} = 333,3 \text{ мкс}. \quad (3)$$

Из формулы 1 следует, что зарядное сопротивление равно

$$R = \frac{\tau}{C} = \frac{333,3 \cdot 10^{-6}}{10 \cdot 10^{-9}} = 33,3 \cdot 10^3 = 33,3 \text{ кОм.} \quad (4)$$

Из стандартного ряда E24 выбираем зарядные резисторы $R = 16 \text{ кОм}$ по два на ступень. При этом резисторы подключены параллельно относительно каждой ступени, как показано на рисунке 27, чтобы обеспечить одинаковое время заряда конденсаторов. Частота, в свою очередь, с выбранными номиналами компонентов будет равна

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{3 \cdot \tau} = \frac{1}{3 \cdot 10 \cdot 10^{-9} \cdot 32 \cdot 10^3} = 1,04 \text{ кГц.} \quad (5)$$

В этом разделе были выбраны биполярные транзисторы $T1...T10$ (рисунок 27) серии 2N5551. Были выбраны емкость конденсаторов $C1...C10 = 10 \text{ нФ}$, сопротивления база-эмиттер $R20...R28 = 100 \text{ кОм}$ и напряжение питания $U_{um} = 300 \text{ В}$. Рассчитаны зарядные резисторы $R1...R19 = 16 \text{ кОм}$ и частота следования импульсов $f = 1,04 \text{ кГц}$.

2.2 Имитационное моделирование генератора

Целью данного раздела работы является исследование модели спроектированного генератора. Для выполнения поставленной задачи будет использоваться пакет прикладных программ MatLab.

Для синтеза модели в MatLab используется метод визуального программирования на основе расширения Simulink.

Simulink – это графическая среда имитационного моделирования, позволяющая при помощи блок-диаграмм в виде направленных графов, строить динамические модели, включая дискретные, непрерывные и гибридные, нелинейные и разрывные системы.[23,24]

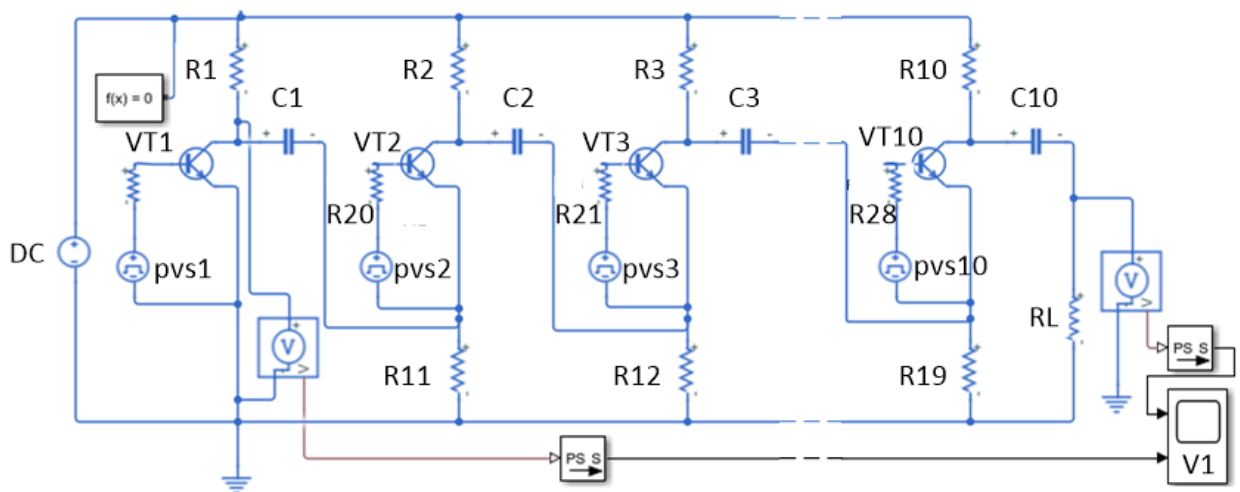
В процессе создания модели будут использоваться такие библиотеки как:

- Simulink – для создания измерительных блоков и дисплеев;
- Simscape – для реализации электрических элементов таких как: резистор, конденсатор, диод, pnp-транзистор.

План выполнения работ:

- произвести синтез схемы в среде MatLab Simulink;
- произвести анализ модели.

Модель генератора состоит из 10 ступеней, с параллельным подключением зарядных резисторов (рисунок 28). Питание генератора осуществляется источником постоянного напряжения (DC) 300 В. Управление транзисторов осуществляется источником (*pvs1...pvs10*) прямоугольных импульсов напряжения 10 В. Остальные элементы были выбраны в прошлом разделе. Генератор работает на омическую нагрузку (*RL*) 50 Ом – 100 кОм.



DC – источник постоянного напряжения 300 В; *pvs1...pvs10* – источник прямоугольных импульсов напряжения 10 В; *VT1...VT10* – биполярный транзистор 2N5551; *V* – блок вольтметра; *V1* – осциллограф;

R1...R19 – зарядный резистор 16 кОм; *C1...C10* – конденсатор 10 нФ;

RL – сопротивление нагрузки 50 Ом – 100 кОм

Рисунок 28 – Модель генератора

После компоновки генератора можно приступить к запуску модели, и произвести анализ влияния сопротивления нагрузки на амплитуду напряжения и длительность фронта. Импульс напряжения на нагрузке представлен на рисунке 29.

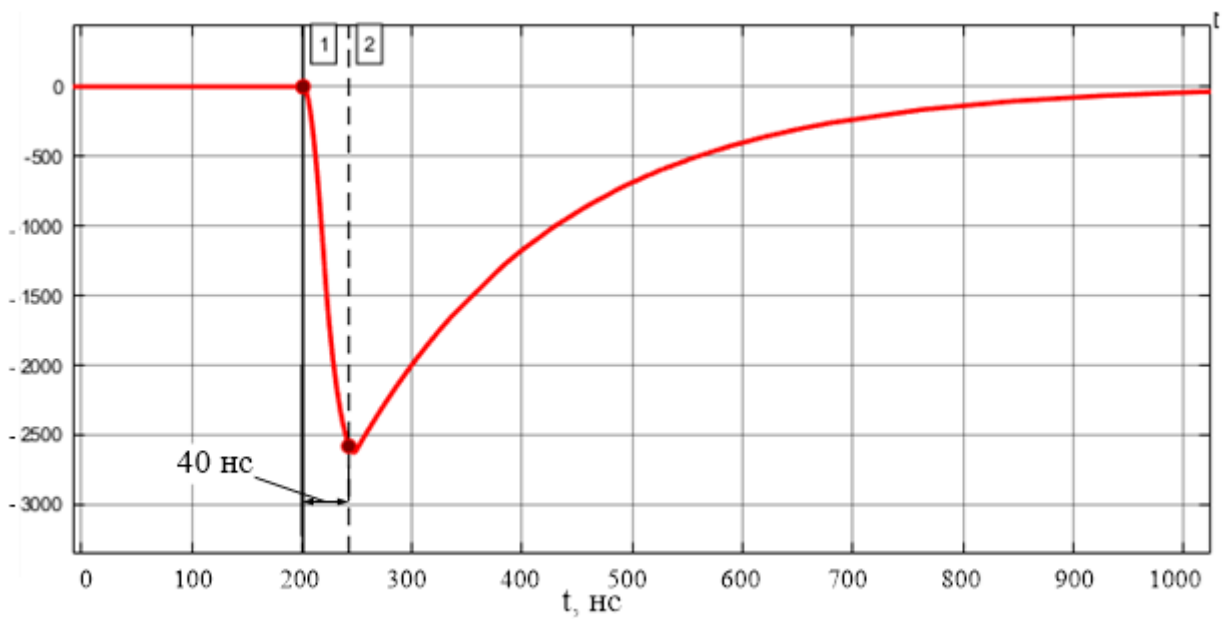


Рисунок 29 – Напряжение на нагрузке 500 Ом

На рисунке 30 представлено напряжение коллектор-эмиттер первого транзистора, при подаче управляющего напряжения происходит полное открытие транзистора, и падение напряжения становится равным нулю.

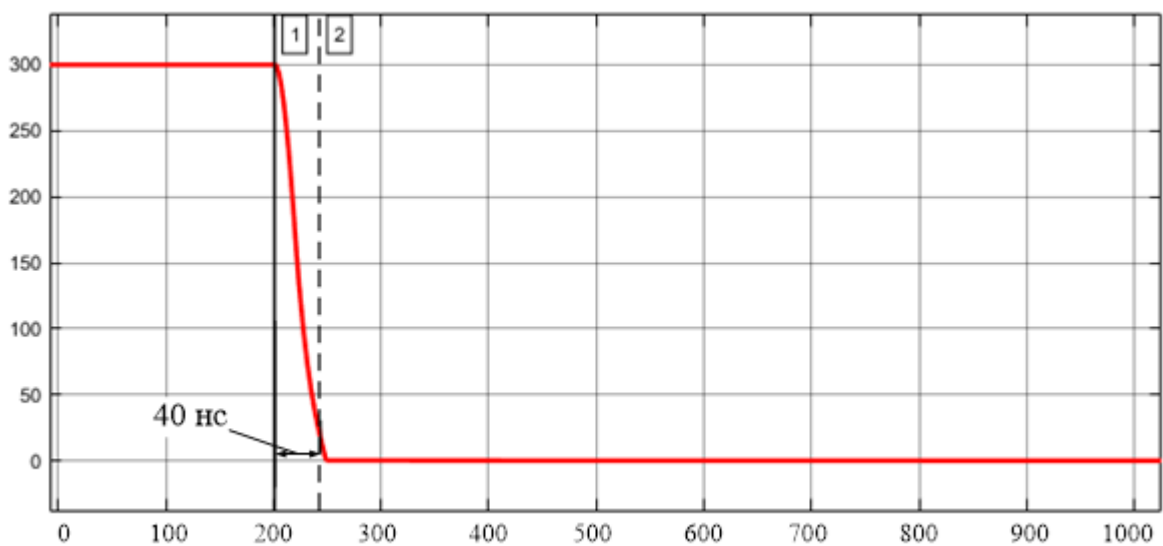


Рисунок 30 – Напряжение коллектор-эмиттер первого транзистора в момент открытия

Для дальнейшего анализа и получения данных применимых на практике были получены зависимости амплитуды напряжения $U_a(R_n)$ от нагрузки (рисунок 31, 1) и длительности фронта $t_f(R_n)$ от нагрузки (рисунок 31, 2).

Таблица 3 – Полученные результаты

R, кОм	t_f , нс	U_a , В
0,025	28	400
0,05	36	800
0,1	50	1550
0,2	40	2500
0,3	40	2600
0,5	40	2600
1	40	2700
2,2	40	2700
10	40	2750
25	40	2750
50	40	2750
100	40	2750
XX	40	2750

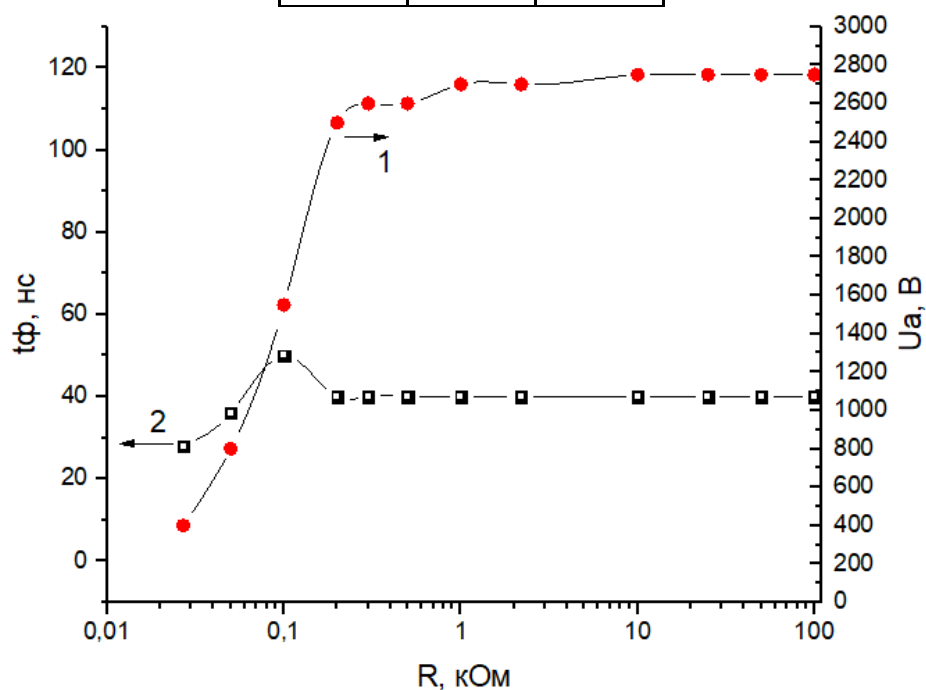


Рисунок 31 – Зависимости (1) – амплитуды напряжения $U_a(R_n)$ от нагрузки и (2) – длительности фронта $t_f(R_n)$ от нагрузки

Имитационное моделирование показало, что все транзисторы открываются и энергия, накопленная в конденсаторах, передается в нагрузку,

на которой в свою очередь оказывается импульс напряжения (от -400 В до -2750 В), кратно превышающий зарядное напряжение (300 В). Ключевым недостатком этой модели является отсутствие лавинного пробоя, так как это невозможно реализовать, как в этой среде, так и в аналогичных программных обеспечениях. Фронт импульса имеет длительность от 28 нс до 40 нс.

Значительного прироста к величине импульса на нагрузке не наблюдается, как при увеличении сопротивления нагрузки от 200 Ом, так и при увеличении количества ступеней генератора до $n = 15$.

Таким образом, учитывая данные из обзора лавинных генераторов и моделирования, можно решить, что оптимальное количество ступеней составляет $n = 10$ и оптимальная нагрузка 300 Ом. Полученные данные будут учтены в дальнейшем проектировании.

3 Макетирование и экспериментальное исследование генератора

3.1 Драйвер управления генератором

Драйвер представляет собой генератор и усилитель мощности управляющих импульсов и предназначен для непосредственного управления силовыми ключами. Схема драйвера определяется типом структуры ключевого транзистора (биполярный, MOSFET или IGBT) и типом его проводимости, а также расположением транзистора в схеме коммутатора («верхний», т.е. такой, оба силовых вывода которого в открытом состоянии имеют высокий потенциал, или «нижний», оба силовых вывода которого в открытом состоянии имеют нулевой потенциал). Драйвер должен усилить управляющий сигнал по мощности и напряжению, в случае необходимости обеспечить его потенциальный сдвиг. На драйвер также могут быть возложены функции защиты ключа. [16, 17]

Проектируя схему управления силовыми транзисторами сборками, нужно знать, что:

- необходимо обеспечить плавающий потенциал управления;
- крайне важно создать быстрое нарастание и спад управляющих сигналов, поступающих на затворы силовых элементов для снижения тепловых потерь на переключение;
- необходимо обеспечить высокую величину импульса тока управления силовых элементов для быстрого перезаряда входных (затворных) емкостей.

Также необходимо помнить, что проектируемый драйвер должен:

- обеспечивать регулирование частоты следования импульса в широком диапазоне;
- обеспечивать заданный уровень управляющего тока (для биполярного транзистора);
- обеспечивать требуемую длительность фронта и спада;

— обеспечивать гальваническую развязку на необходимое напряжение.

Структурная схема такого драйвера, который будет отвечать поставленным задачам, представлена на рисунке 32.

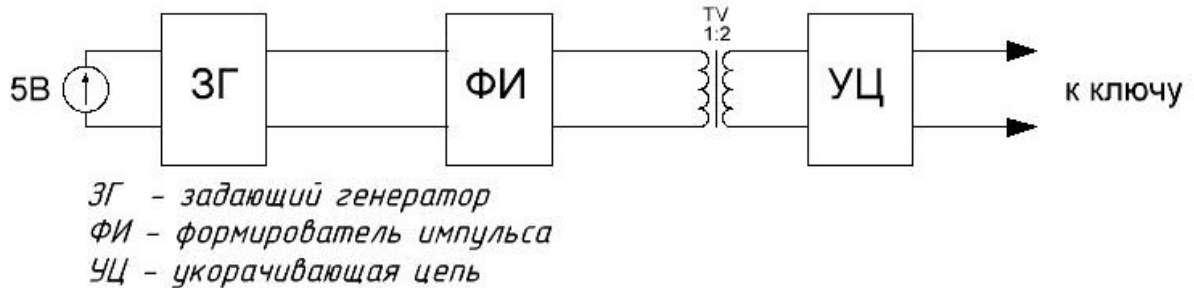


Рисунок 32 – Структурная схема драйвера

Задающий генератор (ЗГ) формирует прямоугольные импульсы напряжения с определенной частотой и скважностью. Затем сигнал поступает на вход формирователя импульсов (ФИ), который сглаживает фронт без изменения длительности фронта. Трансформатор (Т) служит гальванической развязкой, а также повышает напряжение. Укорачивающая цепь (УЦ) обеспечивает заданную длительность управляющего импульса для силового ключа. Электрическая схема драйвера представлена на рисунке 33.

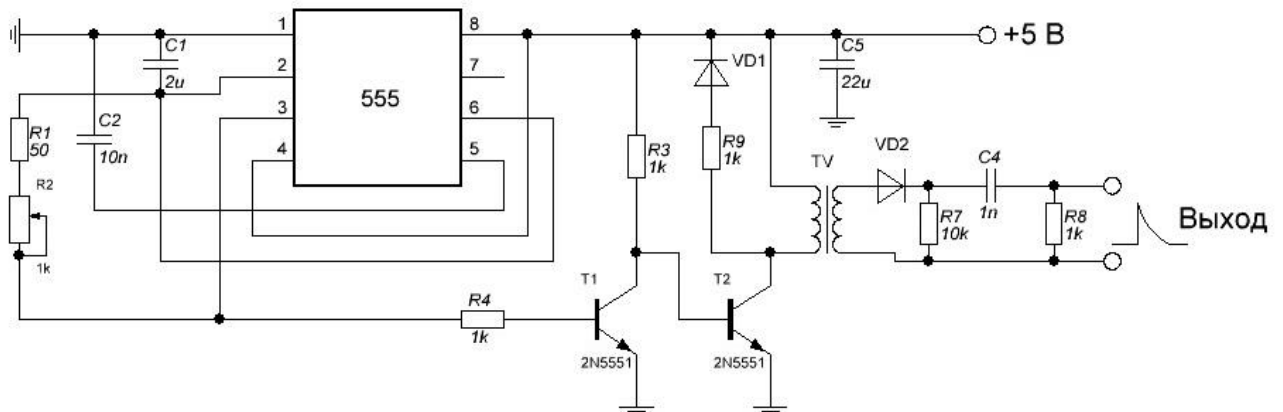


Рисунок 33 – Электрическая схема спроектированного драйвера

Задающий генератор реализован как автогенератор на таймере NE555 (рисунок 33), который способен работать в широком диапазоне частот с заданной скважностью. С помощью формул производителя [20] были рассчитаны пассивные элементы такие как: $R1 = 50 \text{ Ом}$, $R2 = 0 \div 1 \text{ кОм}$,

$C1 = 2 \text{ мкФ}$, $C2 = 10 \text{ нФ}$. Эти компоненты обеспечивают частоты следования импульсов в диапазоне $1 - 5 \text{ кГц}$. В качестве формирователя импульсов использовались два ключевых каскада на биполярных транзисторах 2N5551 из-за высокой граничной частоты.

Для гальванической развязки был рассчитан и изготовлен импульсный трансформатор, используя упрощенную методику, которая позволяет рассчитать основные параметры. [21]

Был использован магнитопровод 2000НМ 31х18,5х7 по ГОСТ 16541-76 [22], $S_c = 42,79 \text{ мм}^2$, $S_w = 268,8 \text{ мм}^2$.

Проверим габаритную мощность трансформатора

$$P_{\text{габ}} = \frac{S_c \cdot S_w \cdot f \cdot B}{150} = \frac{42,79 \cdot 10^{-2} \cdot 268,8 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 0,17}{150} = 1,3 \text{ Вт}, \quad (6)$$

где S_c — площадь поперечного сечения магнитопровода, см^2 ;

S_w — площадь окна сердечника, см^2 ;

$f = 1000 \text{ Гц}$ — частота следования импульса;

$B = 0,17 \text{ Тл}$ — допустимое значение индукции.

Расчет максимальной мощности трансформатора

$$P_{\text{max}} = 0,8 P_{\text{габ}} = 0,8 \cdot 1,3 = 1,04 \text{ Вт}. \quad (7)$$

Расчет минимального числа витков первичной обмотки $W1$. Минимальное число витков первичной обмотки $W1$ определяется максимальным напряжением на обмотке $U1$ и допустимой индукцией сердечника B_{max}

$$w1 = \frac{0,25 \cdot 10^4 \cdot U1}{f \cdot B \cdot S_c} = \frac{0,25 \cdot 10^4 \cdot 5}{1000 \cdot 0,17 \cdot 48,79} = 171,8. \quad (8)$$

принимаем $w1 = 170$.

Расчет эффективного значения тока первичной обмотке

$$I_1 = \frac{P_{\text{max}}}{U} = \frac{1,04}{5} = 0,21 \text{ А}. \quad (9)$$

Расчет диаметра провода в первичной обмотке

$$d_1 = 1,13 \sqrt{\frac{I_1}{j}} = 1,13 \sqrt{\frac{0,21}{7}} = 0,2 \text{ мм}, \quad (10)$$

где I_1 — эффективное значение тока в первичной обмотке, А ;
 $j = 7$ — плотность тока, А/мм².

$$I_2 = \frac{P_{\max}}{U_2} = \frac{1,04}{10} = 0,1 \text{ А.} \quad (11)$$

Количество витков вторичной обмотки

$$w_2 = \frac{w_1 \cdot U_2}{U_1} = \frac{170 \cdot 10}{5} = 340 . \quad (12)$$

Расчет диаметра провода во вторичной обмотке

$$d_2 = 1,13 \sqrt{\frac{I_2}{j}} = 1,13 \sqrt{\frac{0,1}{7}} = 0,14 \text{ мм.} \quad (13)$$

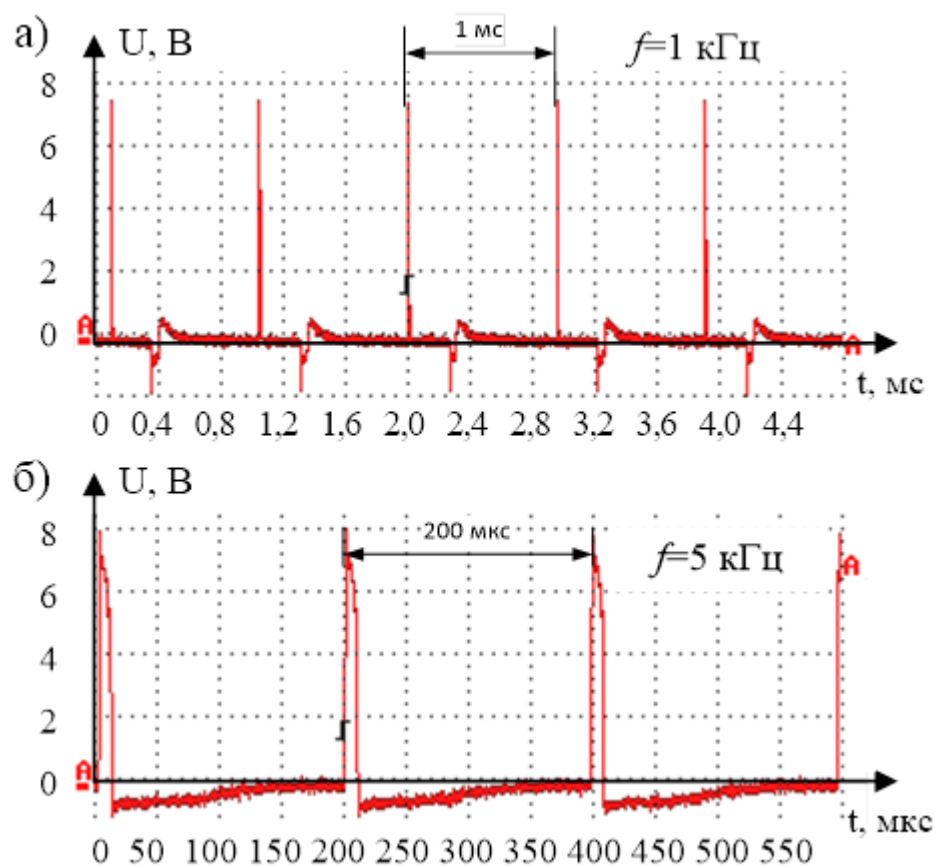
По результатам расчета был изготовлен импульсный трансформатор на основе кольцевого магнитопровода 2000НМ 31х18,5х7. Первичная обмотка выполнена проводом марки ПЭТВ-2 0,16 мм, количество витков – 170. Вторичная обмотка также выполнены проволокой марки ПЭТВ-2 0,16 мм – 340 витка. Межслоевая и внешняя изоляция выполнена лентой ФУМ.

Запуск транзистора производится коротким импульсом. Допустим длительность выходного импульса $3\tau = 3 \text{ мкс}$, где $\tau = RC$. Исходя из этого принимаем $R8 = 1 \text{ кОм}$, следовательно, $C4 = 1 \text{ нФ}$ (рисунок 33).

Фотография спроектированного драйвера представлена на рисунке 34.



Рисунок 34 – Фотография изготовленного макета драйвера



а) частота $f = 1 \text{ кГц}$; б) частота $f = 5 \text{ кГц}$

Рисунок 35 – Регулирование частоты на выходе

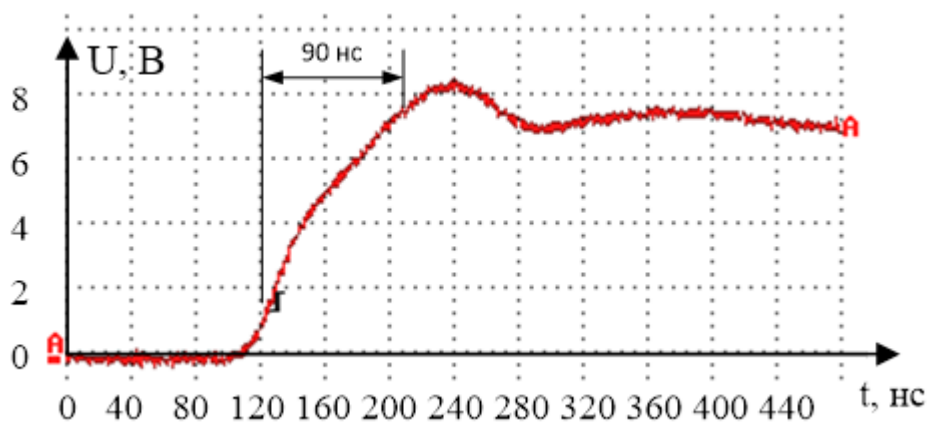


Рисунок 36 – Фронт управляющего импульса

Драйвер управления работает исправно и выполняет требуемые задачи, заложенные при проектировании.

3.2 Тестирование лавинного режима

Исходя из ранее представленной зависимости (рисунок 26) было выбрано сопротивление база-эмиттер 100 кОм. Проверка лавинного пробоя проводилась на схеме (рисунок 37). В качестве управляемого транзистора использовался MOSFET серии IRF740.

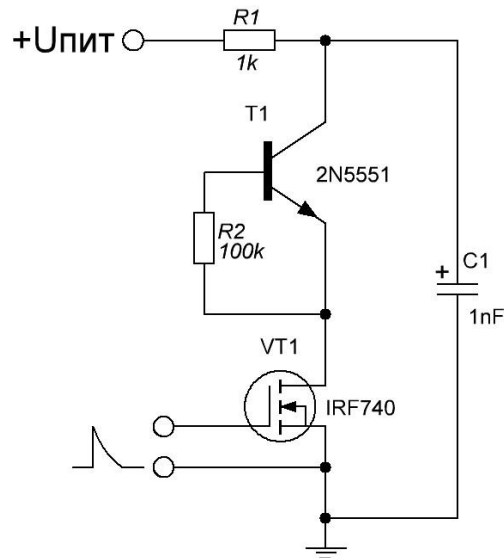
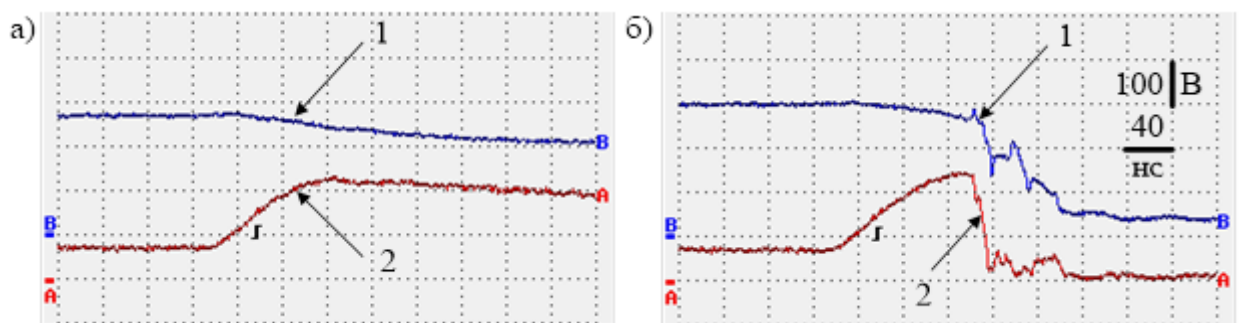


Рисунок 37 – Тестовая схема проверки лавинного пробоя
Результаты представлены на рисунке 38.



а) – до лавинного пробоя; б) – после лавинного пробоя

1 – напряжение на конденсаторе; 2 – напряжение коллектор-эмиттер
биполярного транзистора

Рисунок 38 – Осциллограммы проверки лавинного пробоя

Из полученных осциллограмм (рисунок 38) видно, что при достижении питающего напряжения 300 В, происходит пробой биполярного транзистора 2N5551. При открытии полевого транзистора IRF740 все

напряжение питания ($U_{пит} \approx 300 \text{ В}$) прикладывается к биполярному транзистору, из-за чего и происходит лавинный пробой.

3.3 Макетирование пятиступенчатого генератора

Полученные данные позволили произвести монтаж ГИН с тремя ступенями (рисунок 39) на беспаячной макетной плате, для исследования характеристик и параметров.

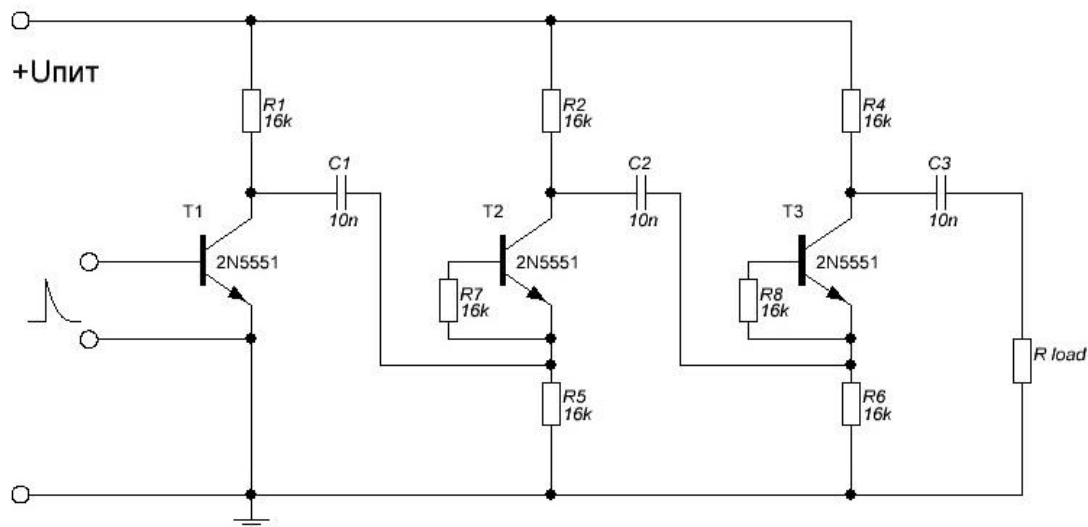


Рисунок 39 – Схема генератора Маркса с $n=3$

Благодаря данной схеме были получены зависимости длительности фронта и амплитуды напряжения от нагрузки (таблица 4 и рисунок 40).

Таблица 4 – Полученные результаты

R, кОм	tф, нс	Uа, В
0,027	5	100
0,05	20	500
0,1	18	520
0,2	15	780
0,3	15	600
0,5	20	560
1	35	800
2,2	45	400
10	120	480
25	80	400
50	70	440
100	60	460
XX	20	160

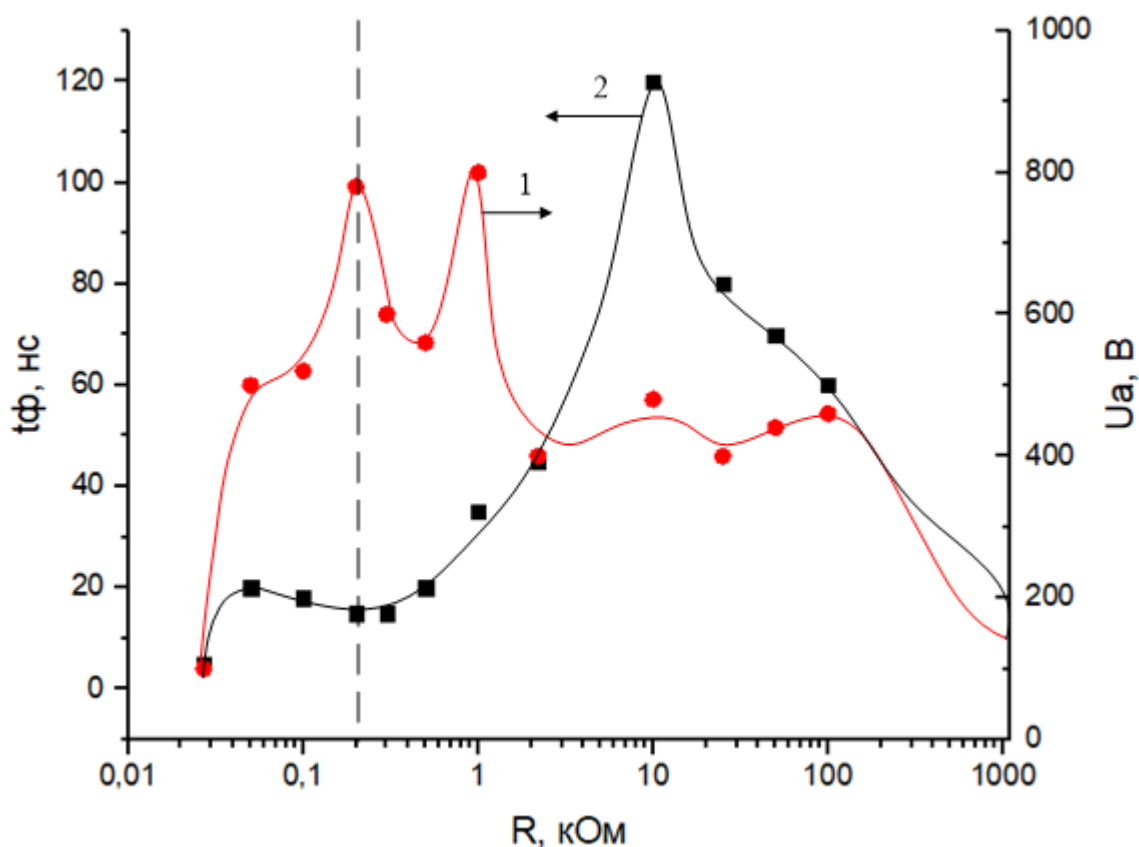


Рисунок 40 – Зависимости (1) – амплитуды напряжения $U_a(R_n)$ от нагрузки и (2) – длительности фронта $t_\phi(R_n)$ от нагрузки

Из графиков видно, что оптимальный режим работы генератора достигается при нагрузке 200 Ом. Осциллограмма данного режима представлена на рисунке 41.

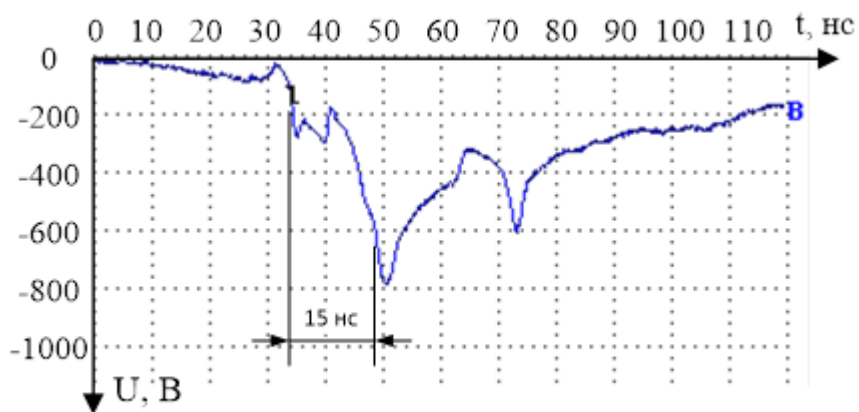


Рисунок 41 – Напряжение при $R = 200$ Ом и $C = 1$ нФ

Также были рассмотрены варианты схемы с зарядной емкостью $C = 10$ нФ и $C = 100$ нФ, осциллограммы представлены на рисунке 42.

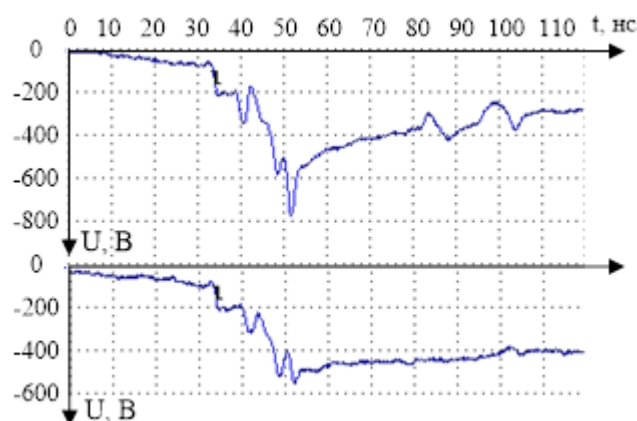
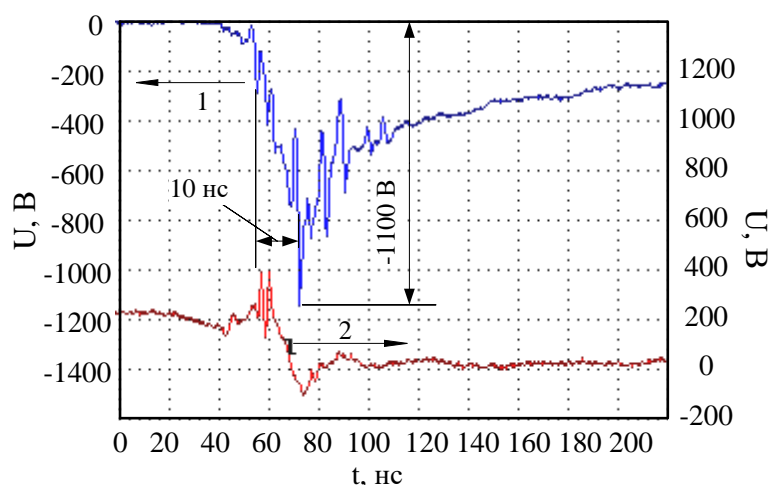


Рисунок 42 – Напряжение на нагрузке при емкости $C = 10$ нФ и $C = 100$ нФ

Из осциллограмм (рисунок 42) видно, что при бóльшей емкости конденсаторов происходит более долгий их разряд на нагрузку. Также уменьшилась амплитуда напряжения, длительность фронта осталось неизменной.

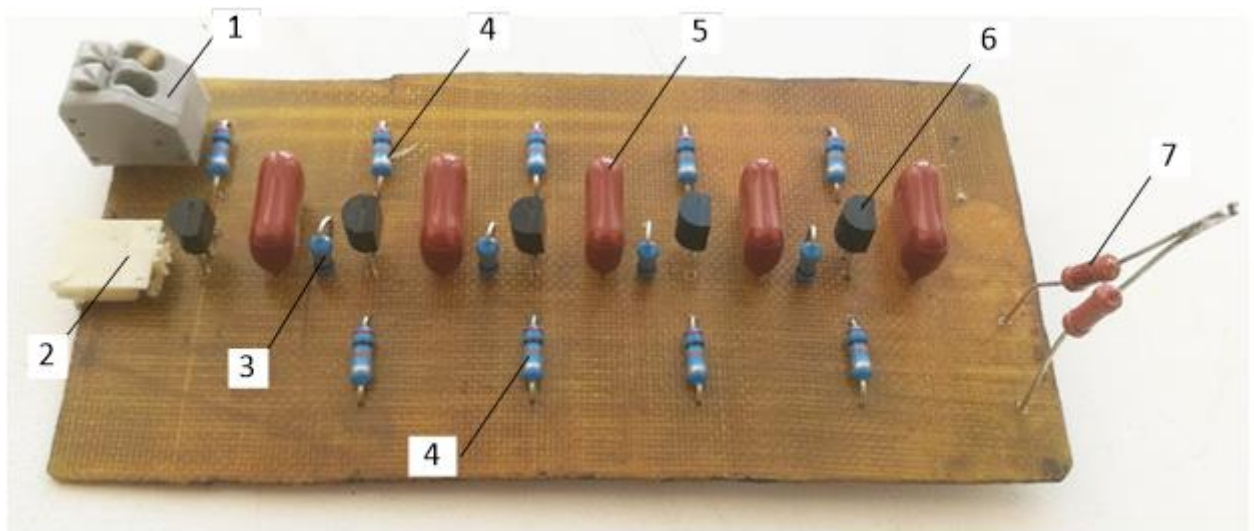
Далее была добавлена четвертая ступень к существующему генератору, а сопротивления база-эмиттер уменьшены до 20 кОм, при этом, как и ожидалось, амплитуда напряжения увеличилась до -1100 В, и длительность фронта составила 10 нс (рисунок 43).



1 – напряжение на нагрузке; 2 – напряжение коллектор-эмиттер первого транзистора

Рисунок 43 – Напряжение при $R_n = 200$ Ом, $C_k = 10$ нФ, $n=4$

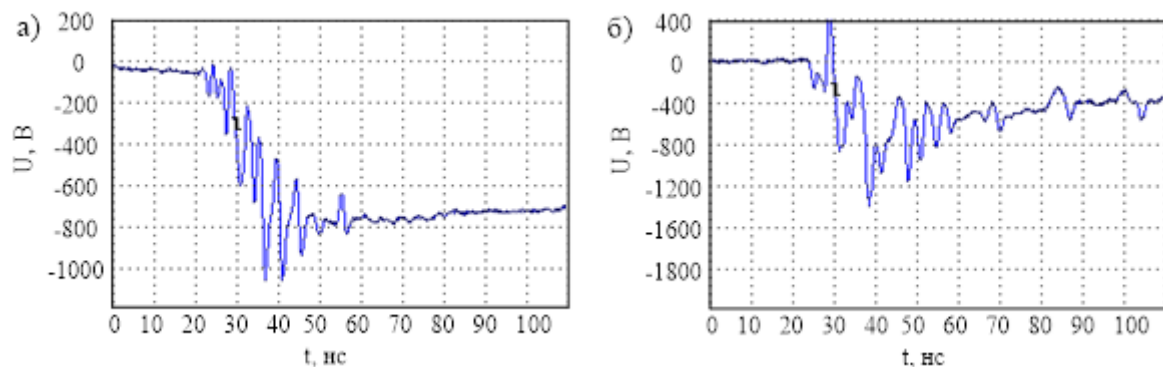
Дальнейший шаг в проведении экспериментов – это создание макета генератора на печатной плате с количеством ступеней $n = 5$ (рисунок 44).



1 – разъем питания; 2 – разъем управления; 3 – сопротивление база-эмиттер 20 кОм; 4 – зарядный резистор 16 кОм; 5 – пленочный конденсатор 10 нФ; 6 – биполярный транзистор 2N5551; 7 – нагрузочное сопротивление 200 Ом

Рисунок 44 – Макет генератора на печатной плате $n = 5$

В данном макете изначально были использованы пленочные конденсаторы К73-17 емкостью 10 нФ. Но результаты оказались хуже генератора на беспаячной макетной плате ($n = 4$), так как амплитуда напряжения уменьшилась до -1050 В (рисунок 45, а).

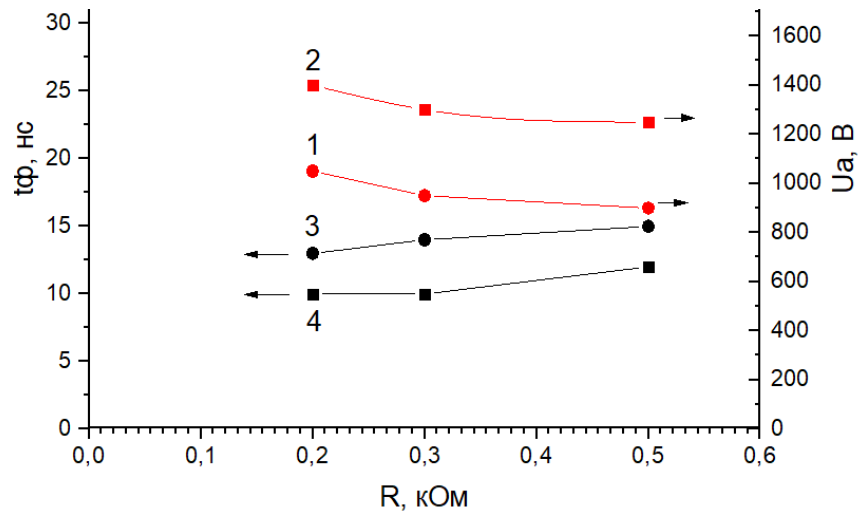


а) генератор с пленочными конденсаторами; б) генератор с керамическими конденсаторами

Рисунок 44 – Напряжение на нагрузке 200 Ом, $C_k = 10$ нФ, $n=5$

Замена конденсаторов на керамические позволило увеличить амплитуду на нагрузке до -1400 В (рисунок 45, б). Но при использовании пленочных

конденсаторов увеличивалась длительность импульса, что говорит о более длительном разряде конденсаторов.



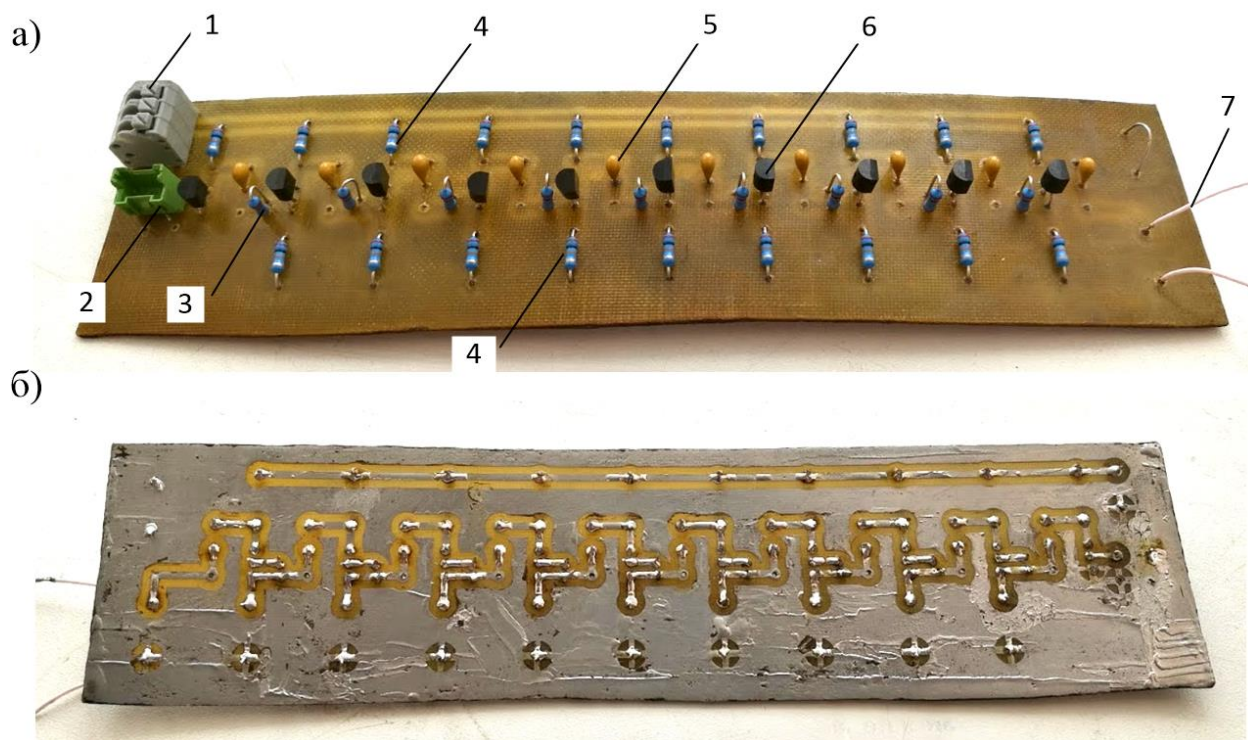
1, 3 – пленочные конденсаторы; 2, 4 – керамические конденсаторы

Рисунок 46 – Зависимости (1, 2) – амплитуды напряжения $U_a(R_n)$ от нагрузки и (3, 4) – длительности фронта $t_f(R_n)$ от нагрузки ГИН $n=5$

Полученные зависимости (рисунок 46) показывают, что генератор на основе керамических конденсаторов обладает более резким фронтом и бóльшей амплитудой напряжения на нагрузке. Помимо этого, при снятии данных характеристик было выявлено, что при работе генератора на нагрузку 100 Ом и ниже биполярные транзисторы имеют тенденцию выходить из строя.

3.4 Макетирование десятиступенчатого генератора

На основе полученных данных был изготовлен более совершенный генератор с количеством ступеней $n=10$ и с использованием керамических конденсаторов ёмкостью 10 нФ (рисунок 47).

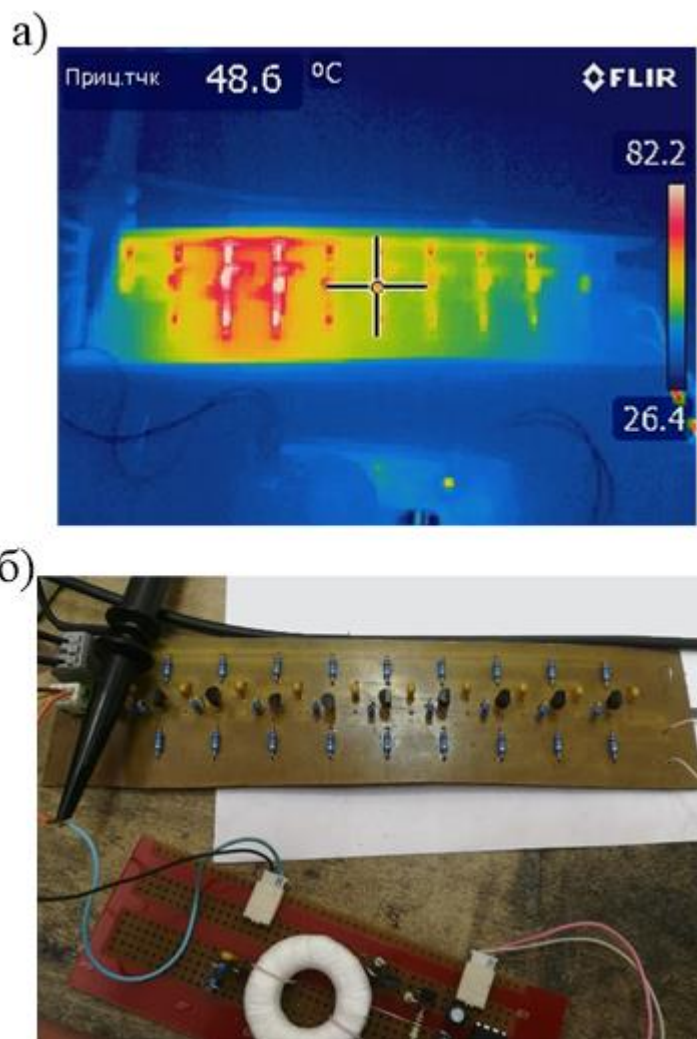


а) вид сверху; б) вид снизу

1 – разъем питания; 2 – разъем управления; 3 – сопротивление база-эмиттер 20 кОм; 4 – зарядный резистор 16 кОм; 5 – керамический конденсатор 10 нФ; 6 – биполярный транзистор 2N5551; 7 – к нагрузке

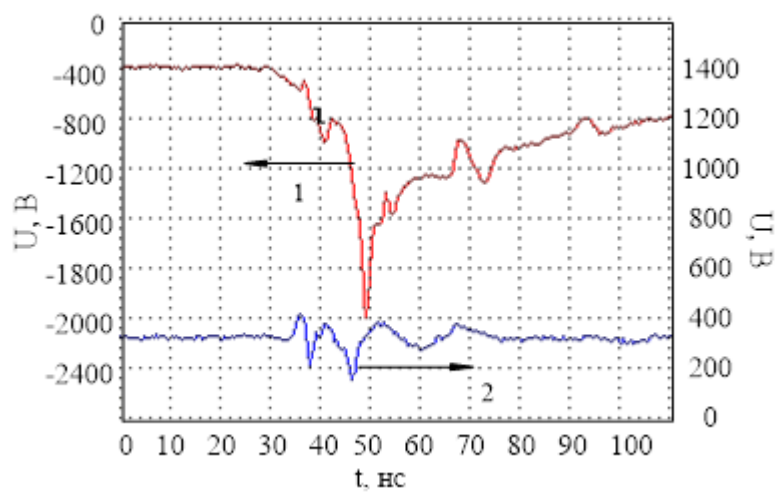
Рисунок 47 – Макет генератора на печатной плате $n = 10$

При первом включении генератора на омическую нагрузку 200 Ом удалось достигнуть импульсы с амплитудой до -3 кВ с частотой следования 1 кГц в течении нескольких секунд. Затем температура транзисторов увеличилась, и величина амплитуды напряжения снизилась до -2 кВ. Значительный нагрев, который составил 82 °С (рисунок 48), наблюдался на третьей и четвертой ступени. Дальнейшего увеличения температуры не наблюдалось, из чего можно сделать вывод, что генератор вышел на установившиеся режим работы. Импульс, полученный в таком режиме, представлен на рисунке 49.



а) – инфракрасная термограмма генератора; б) – фотография в видимом диапазоне

Рисунок 48 – Распределение температурных полей на элементах генератора



1 – напряжение на нагрузке; 2 – напряжение питания генератора

Рисунок 49 – Напряжение при $R_n = 200 \text{ Ом}$, $C_k = 10 \text{ нФ}$, $n=10$

В свою очередь были получены зависимости амплитуды напряжения $U_a(R_n)$ и длительности фронта $t_f(R_n)$ от нагрузки (рисунок 50). С увеличением нагрузки наблюдается рост длительности фронта импульса и падение амплитуды. Оптимальным режимом является работа на нагрузку 200 Ом, амплитуда в таком режиме составляет 2000 В, а длительность фронта 5 нс. Энергию импульса можно посчитать как

$$W = \frac{C \cdot U^2}{2} = \frac{10^{-9} \cdot 300^2}{2} = 45 \cdot 10^{-6} \text{ Дж} = 45 \text{ мкДж}$$

где C – ударная ёмкость генератора;

U –напряжение питания.

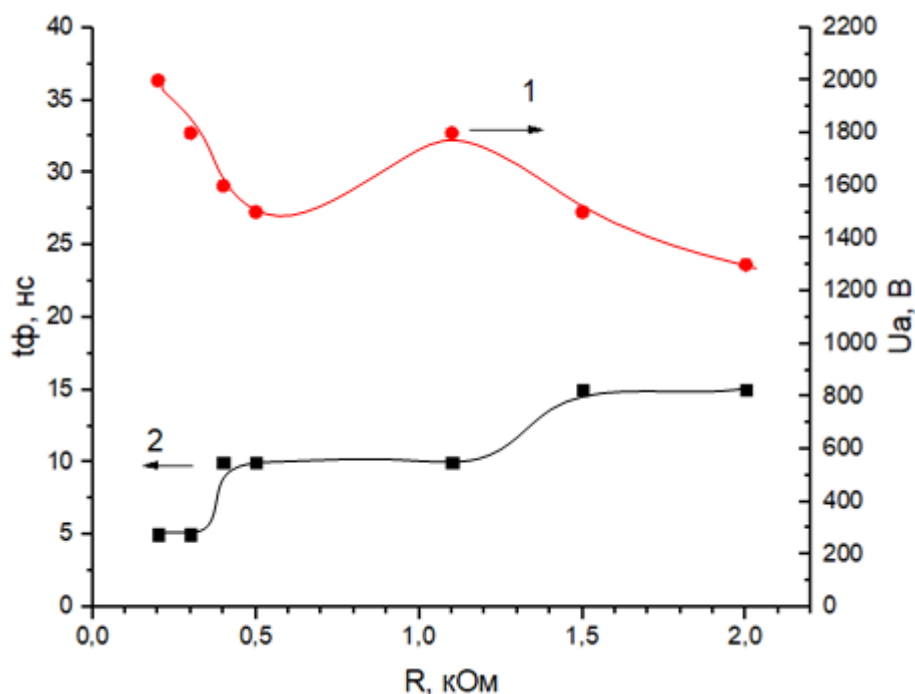


Рисунок 50 – Зависимости (1) – амплитуды напряжения $U_a(R_n)$ от нагрузки и (2) – длительности фронта $t_f(R_n)$ от нагрузки ГИН $n=10$

Таким образом, макетирование схемы показало, что создание генератора импульсов по схеме Маркса на основе биполярных транзисторов в лавинном режиме является вполне перспективной задачей. На выходе получаются короткие импульсы с резким фронтом (длительность фронта $t_f = 5$ нс). Амплитуда напряжения у такого генератора составила 2 кВ, что является 67% от теоретического максимума – 3 кВ ($n \cdot U_{пит}$). Такое снижение амплитуды

вызвано рассеиванием мощности в кристаллах транзисторов, что вызывает их нагрев и увеличение сопротивления в открытом состоянии. Из-за присутствующего разброса в открытии транзисторов часть накопленной энергии в конденсаторах разряжается на зарядные резисторы, что в свою очередь, опять же, приводит к снижению амплитуды напряжения на нагрузке. Вероятно, данный разброс в срабатывании транзисторов в разных звеньях также оказывает влияние на вид фронта, на котором появляются высокочастотные пульсации.

Вместе с тем, изготовленные генераторы были исследованы при работе на различную нагрузку в пределах от 50 Ом до 100 кОм. Были получены зависимости амплитуды напряжения $U_a(R_n)$ от нагрузки и длительности фронта $t_f(R_n)$ от нагрузки ГИН (рисунок 40, 46, 50). Наилучшей нагрузкой оказалось активное сопротивление 200 Ом. Такая нагрузка, скорее всего, является согласованной с сопротивлением генератора в ударе. Генератор, в свою очередь, работает с наилучшими показателями, что и видно из рисунков 49-50 ($t_f = 5$ нс, $U_a = -2000$ В).

При уменьшении сопротивления нагрузки транзисторы начинают выходить из строя. Когда сопротивление нагрузки опускается до 100 Ом происходит неполное закрытие транзисторов, через ступень начинает протекать ток. При сопротивлении 50 Ом транзисторы полностью приходят в негодность.

С увеличением сопротивления нагрузки вплоть до холостого хода увеличивается длительность фронта и уменьшается амплитуда напряжения. Таким образом можно сделать вывод, что генератор способен работать в режиме холостого, номинальной нагрузкой является 200 Ом. Меньшее сопротивление и режим короткого замыкания выведут транзисторы из строя, вследствие чего можно предположить, что данный генератор не предназначен для работы на разрядный промежуток.

Главным ограничением такого генератора является относительно малая величина амплитуды напряжения на выходе генератора, которая

ограничивается номинальным напряжением транзистора. Амплитуда напряжения классического генератора Аркадьева-Маркса достигает нескольких сотен киловольт. Амплитуды напряжения у ближайшего конкурента – генератора на звеньях сжатия с твердотельными коммутаторами (тиристоры, IGBT транзисторы) составляют десятки киловольт.

Достоинством такого генератора является его крайне резкий фронт (5 нс) и частота следования импульсов, которая свыше одного килогерца, и которая теоретически может быть повышена до десятков килогерц. Немаловажную роль играет и цена электрических элементов, в частности транзисторов серии 2N5551, стоимость которых не превышает пары рублей за штуку, в отличие от транзисторов серии FMMT417, стоимость которых выше на три порядка, и которые часто используют в зарубежных работах.

Габариты такого генератора также можно записать в достоинства. Генератор выполнен на печатной плате длиной 20 см и шириной 5 см, что является достаточно компактным решением.

Развитие полупроводниковой промышленности позволит создавать более совершенные транзисторы, способные работать при бóльших напряжениях, температурах и граничных частотах. А генераторы импульсов напряжения на основе таких транзисторов расширят область своего применения.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студент

Группа	ФИО
4ТМ71	Первалов Никита Алексеевич

Школа	ИШНПТ	Отделение школы (НОЦ)	Отделение материаловедения
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	При проведении исследования используется техническая база НПЛ ИПЭПТ, в исследовании задействованы 2 человека: научный руководитель и инженер
2. Использование систем налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные страховые фонды, которые составляют 30 %
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Анализ потенциального рынка и потребителей, анализ конкурентных технических решений, конкурентных преимуществ НИ, SWOT-анализ
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Планирование научно-исследовательских работ, определение действующих лиц, длительности и трудоемкости работ. Определение материальных затрат на проведение НИ, расчет основной заработной платы и накладных расходов.
3. Определение ресурсной, социально-экономической эффективности исследования	Расчет показателей: - Научно-технический уровень - Интегральный показатель ресурсоэффективности
Перечень графического материала:	
1. Оценка конкурентоспособности технических решений 2. Матрица SWOT 3. График проведения и бюджет НИ 4. Оценка ресурсной эффективности НИ	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения социально-гуманитарных наук	Кашук Ирина Вадимовна	Кандидат технических наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ71	Первалов Никита Алексеевич		

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Введение

В текущем разделе рассматривается перспективность научно-технического проекта, которая определяется высокотехнологичностью, ресурсоэффективностью, ресурсосбережением и коммерческой ценностью.

Научно-исследовательская работа заключается в проектировании и исследовании генератора импульсного напряжения (ГИН) на лавинных транзисторах.

В последние годы возрастает интерес к полупроводниковым импульсным генераторам для использования в радиолокаторах, радиолокационных системах, биомедицинских приборах, высокоскоростной фотографии, сверхширокополосной связи, лазерных технологиях и обработки пищи. Такой интерес к ГИН на полупроводниках вызван из-за ряда преимуществ: резкий фронт от сотен пикосекунд до нескольких наносекунд; теоретически неограниченный ресурс изделия; работа в частотном режиме.

Если стоит задача создания генератора с энергией импульса несколько джоулей и с частотой следования этого импульса в несколько килогерц, то использование типового решения – генератора Аркадьева-Маркса с разрядниками является нецелесообразным из-за проблем эксплуатации и предельной частоты до 10 Гц. Другое решение – генератор на основе импульсного трансформатора также не подходит из-за затяжного фронта до нескольких микросекунд и из-за дороговизны изготовления трансформатора. Прямым конкурентом является генератор на звеньях сжатия, который способен работать в частотном режиме с резким фронтом импульса на нагрузке, но в нем присутствуют намоточные изделия, которые также дороги в производстве и не унифицированы (каждая последующая ступень уникальна).

Из всего выше сказанного выходит, что перспективным решением является генератор высоковольтных импульсов по типу генератора

Аркадьева-Маркса на полупроводниковых коммутаторах, в составе которого могут быть применены дешевые компоненты и технологичная конструкция.

Задачи раздела:

- разработка общей экономической идеи проекта, формирование концепции проекта;
- организация работ по научно-исследовательскому проекту;
- планирование научно-исследовательских работ;
- оценки коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- определение ресурсосберегающей, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

4.1 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Поскольку рынки пребывают в постоянном движении, необходимо систематически проводить детальный анализ существующих конкурирующих разработок.

Благодаря такому анализу можно вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим конкурентам. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения проводится с помощью оценочной карты, приведенной в таблице 5.

Таблица 5 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Бф	Бк	Кф	Кк
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
Безопасность	0,1	3	3	0,3	0,3
Удобство в эксплуатации	0,2	5	2	1	0,4
Надежность	0,1	5	3	0,5	0,3
Материалоемкость	0,1	5	1	0,5	0,1
Энергоэкономичность	0,2	4	1	0,8	0,2
Экономические критерии оценки эффективности					
Конкурентоспособность продукта	0,1	5	2	0,5	0,2
Цена	0,1	2	4	0,2	0,4
Уровень проникновения на рынок	0,1	3	5	0,3	0,5
Итого	1	32	21	4,1	2,4

Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в таблице 6, подбираются, исходя из выбранных объектов сравнения с учетом технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации. Данная разработка сравнивается с традиционными технологиями. Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле 1

$$K = \sum_{i=1}^n B_i \cdot B_i, \quad (1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Анализ показал, что технические как и экономические критерии данного проекта на нынешний момент развития может заинтересовать

покупателей. Так же получилось определить критерии с которыми надо провести работы для более выигрышного положения на рынке.

4.2 SWOT – анализ

SWOT – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT- анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта [26].

Для того что бы найти сильные и слабые стороны проекта, и выявить возможности и угрозы для его реализации проведем SWOT–анализ.

Таблица 6 – Матрица SWOT

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Новая установка для проведения лабораторных работ. С2. Малые габаритные параметры С3. Создание установки из уже имеющихся комплектующих С4. Не требует сложных работ при монтаже и эксплуатации.	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Не новый метод получения импульсов Сл2. Не запатентованность устройства Сл3. Не разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки.
Возможности: В1. Сокращение энергозатрат В2. Применение для собственных нужд высоковольтного зала В3. Частичное использование установки для проведения других исследований В4. Публикации в научных журналах.	При совмещении сильных сторон и возможностей НИР улучшается энергоэффективность и производительность	Для проведения исследований и проведению экспериментов необходим персонал с определенным уровнем подготовки и знаний.

Окончание таблицы 6 – Матрица SWOT

Угрозы: У1.Отсутствие кадров для продолжения научно-исследовательской работы. У2.Недостаток теоретических знаний. У3. Недостаточное финансирование.	Монтаж и эксплуатация не требуют значительных затрат.	В случае отсутствия кадров для продолжения научно-исследовательской работы невозможно будет проводить измерения.
---	---	--

Интерактивные матрицы проекта

Таблица 7 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта					
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4
	B1	-	0	+	+
	B2	+	0	0	0
	B3	-	-	0	+
	B4	+	0	-	-

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие сильных сторон и возможностей: BC3C4, B2C1, B3C4, B4C1.

Таблица 8 – Интерактивная матрица проекта

Слабые стороны проекта				
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3
	B1	0	-	-
	B2	-	-	-
	B3	+	0	-
	B4	-	+	-

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие слабых сторон и возможностей: В3Сл1, В4Сл2.

Таблица 9 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта					
Угрозы проекта		С1	С2	С3	С4
	У1	-	0	-	-
	У2	+	-	+	-
	У3	+	-	+	-

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие сильных сторон и угроз: У2С1С3, У3С1С3.

Таблица 10 – Интерактивная матрица проекта

Угрозы проекта		Сл1	Сл2	Сл3
	У1	-	-	+
	У2	-	+	0
	У3	+	-	+

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие слабых сторон и угроз: У1Сл3, У2Сл2, У3Сл1Сл3.

Таким образом, в ходе SWOT-анализа удалось выявить наиболее важные проблемы, которые необходимо разрешить в процессе выполнения проекта: Анализ показал, что использование данной технологии значительно увеличивает энергоэффективность. Так как установка работает с высоким напряжением проведение экспериментов возможно только в лабораторных условиях. Результаты проведенного SWOT-анализа будут учтены при

разработке структуры работ, выполняемых в рамках научно-исследовательского проекта.

4.3 Планирование научно-исследовательской работы.

Планирование управления научно-техническим проектом заключается в составлении перечня работ, необходимых для достижения поставленной цели, определение сроков их выполнения.

Планирование этапов работ по выполнению НИР включает в себя составление перечня этапов и работ, а также распределение исполнителей по всем видам работ. В таблице 6 приведены основные этапы и содержание работ с распределением ответственных исполнителей.

Целесообразно применять линейное планирование с построением диаграммы Ганта, представленной в таблице 12. График строится с разбивкой по месяцам (30 дней) за период времени выполнения научного проекта. Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}$$

где T_{pi} — продолжительность одной работы, раб.дн.;
 T_{ki} — продолжительность одной работы в календарных днях, дн.;
 $k_{\text{кал}}$ — коэффициент календарности.

Коэффициент календарности рассчитывается по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}$$

где $T_{\text{кал}}$ — количество календарных дней году, дн.;
 $T_{\text{вых}}$ — количество выходных дней в году, дн.;
 $T_{\text{пр}}$ — количество праздничных дней в году, дн.

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 52 - 14} = 1.22$$

Таблица 11 – Календарный план проекта

Номер работы	Название работы	Исполнитель	Период работы научного руководителя		Период работы инженера	
			Начало, дата	Длительность, дни	Начало, дата	Длительность, дни
1	Постановка целей и задач, получение исходных данных	НР	09.01.2019	3	-	-
2	Составление и утверждение ТЗ	НР, И	12.01.2019	3	12.01.2019	3
3	Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	16.01.2019	1	16.01.2019	7
4	Разработка календарного плана	НР, И	17.01.2019	2	17.01.2019	2
5	Выбор структурной схемы устройства	НР, И	23.01.2019	1	24.01.2019	2
6	Выбор принципиальной схемы устройства	НР, И	25.01.2019	5	26.01.2019	5
7	Расчет принципиальной схемы устройства	И	-	-	31.01.2019	12
8	Разработка макета устройства	НР, И	03.03.2019	2	11.02.2019	24
9	Проведение экспериментальных исследований	НР, И	06.03.2019	15	06.03.2019	15
10	Разработка второго макета и проведение опытов	НР, И	22.03.2019	15	22.03.2019	15
11	Оформление расчетно-пояснительной записки	И	-	-	06.04.2019	20
12	Подведение итогов	НР, И	29.04.2019	3	29.04.2019	3

Таблица 12 – Календарный план-график проведения НИР.

Название работы	Исполнитель	T_{ki}	Продолжительность выполнения работ																	
			январь			февраль			март			апрель			май			июнь		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Постановка целей и задач, получение исходных данных	НР	3,66	▢																	
Составление и утверждение ТЗ	НР, И	3,66	▤																	
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	8,54	▥																	
Разработка календарного плана	НР, И	2,44	▦																	
Выбор структурной схемы устройства	НР, И	2,44	▧																	
Выбор принципиальной схемы устройства	НР, И	6,1	▨																	
Расчет принципиальной схемы устройства	И	14,64	▩																	
Разработка макета устройства	НР, И	29,28	▪			▪▪▪														

▨ - инженер

▨▨▨▨▨▨▨ - научный руководитель

4.4 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения.

4.4.1 Сырье, материалы, специальное оборудование, покупные изделия

Стоимость всех видов и материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ формируется исходя из приобретения и платы за транспортировку. Транспортно – заготовительные расходы принимаются в пределах от 3 до 5 % от цены материалов (в данной работе 3%). Стоимость сырья, материалов, специального оборудования, комплектующих изделий приведена в таблице 13.

Таблица 13 – Сырье, материалы, комплектующие изделия

Наименование	Единица Измерения	Количество	Цена за ед., руб	Сумма, руб
Электронные компоненты	шт.	1	2000	2000
Расходные материалы	шт.	1	1000	1000
Печатная бумага	упаков.	1	250	250
Канцелярские товары	шт.	1	100	100
Осциллограф	шт.	1	40000	40000
Источники питания	шт.	1	1000	1000
Мультиметр	шт.	2	1750	3500
Персональный компьютер	шт.	1	15000	15000
Паяльная станция	шт.	1	5000	5000
Набор инструментов	шт.	1	500	500
Всего за материалы				68350
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				2050,5
Итого по статье C_m				70400,5

4.4.2 Расчет затрат на электроэнергию

Одним из затрат при реализации исследовательского проекта является затраты на электроэнергию.

Используемое оборудование:

- осциллограф
- источник питания
- персональный компьютер
- паяльная станция
- настольная лампа

Для расчета используется следующая формула:

$$\mathcal{E}_{об} = P_{об} \cdot \mathcal{C}_э \cdot t_{об}$$

где

$\mathcal{E}_{об}$ — затраты на электроэнергию, потребляемую оборудованием, руб.;

$P_{об}$ — потребляемая мощность оборудования, Вт;

$\mathcal{C}_э$ — тарифная цена, кВт/ч;

$t_{об}$ — время работы оборудования, ч.

Время работы оборудования вычисляется исходя из календарного плана и учитывая время отведенное выполнению исследовательской работе. Затраты по электроэнергии заносится в таблицу 14.

Таблица 14 – Затраты электроэнергии

Оборудование	Время работы $t_{об}$ (ч.)	Потребляемая мощность $P_{об}$ (кВт.)	тарифная цен $\mathcal{C}_э$ (кВт/ч);	Затраты $\mathcal{E}_{об}$ (руб.)
Осциллограф	60	0,05	3,42	10,26
Источник питания	70	0,005		1,197
Персональный компьютер	400	0,4		547,2
Настольная лампа	400	0,01		13,68
Итого:	930	0,465		572,337

Итоговые затраты на электроэнергию составляют:

$$\mathcal{E}_{\text{общ}} = 572,337 \text{ руб.}$$

4.4.3 Основная заработная плата

Статья включает в себя основную и дополнительную заработную плату, а также премии и доплаты научных и инженерно-технических работников, непосредственно участвующих в выполнении данной работы. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ, уровня образования сотрудника, географического положения предприятия и действующей системы оплаты труда.

$$C_{\text{зн}} = \mathcal{Z}_{\text{осн}} + \mathcal{Z}_{\text{доп}}$$

где $\mathcal{Z}_{\text{осн}}$ — основная заработная плата, руб.;

$\mathcal{Z}_{\text{доп}}$ — дополнительная заработная плата, руб.;

Для начала необходимо рассчитать основную заработную плату:

$$\mathcal{Z}_{\text{осн}} = \mathcal{Z}_{\text{дн}} \cdot T_p$$

где $\mathcal{Z}_{\text{осн}}$ — основная заработная плата, руб.;

$\mathcal{Z}_{\text{дн}}$ — среднедневная заработная плата работника, руб.;

T_p — продолжительность работ, выполняемая работником, раб. дней.

Средняя заработная плата рассчитывается по формуле:

$$\mathcal{Z}_{\text{дн}} = \frac{\mathcal{Z}_m \cdot M}{F_d}$$

где \mathcal{Z}_m — месячный должностной оклад работника (руб.);

M — количество месяцев работы без отпуска в течение года;

при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя;

при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

F_d — действительный годовой фонд рабочего времени, раб. дней.

Таблица 15 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Научный руководитель	Инженер (студент)
Календарное число дней	110	110
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	20	32
- праздничные дни	3	3
Потери рабочего времени		
- отпуск	0	0
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	87	75

Месячный должностной оклад работника рассчитывается исходя из следующей формулы:

$$З_{\text{м}} = З_{\text{б}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}}$$

где $З_{\text{б}}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{\text{пр}}$ –премиальный коэффициент, равный (0,3);

$k_{\text{д}}$ –коэффициент доплат и надбавок (0,2-0,3);

$k_{\text{р}}$ – районный коэффициент (1,3 для Томска).

Расчет основной заработной платы приведен в таблице 16.

Таблица 16 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	$З_{\text{б}}$, руб.	$k_{\text{пр}}$	$k_{\text{д}}$	$k_{\text{р}}$	$З_{\text{м}}$, руб.	$З_{\text{дн}}$, руб.	$T_{\text{р}}$, раб. дн.	$З_{\text{осн}}$, руб.
Научный руководитель	26300	0,3	0,2	1,3	51285	6130,62	30	183918,60
Инженер	7500	0,3	0,2	1,3	14625	2028	75	152100

4.4.4 Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала

В данную статью включается сумма выплат, предусмотренных законодательством о труде. Дополнительная заработная плата рассчитывается

исходя из 10-15% от основной заработной платы работников, непосредственно участвующих в выполнении проекта.

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} * З_{\text{осн}}$$

где $З_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15);

$З_{\text{осн}}$ – основная заработная плата, руб.

В таблице 17 приведен расчет основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 17 – Заработная плата исполнителей НИР

Заработная плата	Научный руководитель	Инженер
Основная зарплата	183918,60	152100
Дополнительная зарплата	22070,23	18252
Зарплата исполнителя	205988,23	170352
Итого по статье $C_{\text{зн}}$	376340,23	

4.4.5 Отчисления на социальные нужды

В данном разделе будут рассчитаны отчисления во внебюджетные фонды, согласно законодательству РФ являются обязательными, а именно отчисления органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС).

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}})$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений во внебюджетные фонды.

Согласно пункту 1 ст. 58 федерального закона №212-ФЗ размер страховых взносов образовательных учреждений составляет 30%.

$$C_{\text{внеб}} = 0,3 \cdot 376340,23 = 112902,07 \text{ руб.}$$

4.4.6 Накладные расходы

В данную статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, содержание, эксплуатацию, ремонт оборудования, производственного инструмента и инвентаря.

Коэффициент накладных расходов составляет 16% от суммы основной и дополнительной заработной платы работников, непосредственно участвующих в выполнении проекта.

Накладные расходы рассчитываются по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}})$$

где $k_{\text{накл}}$ – коэффициент накладных расходов.

$$C_{\text{накл}} = 0,16 \cdot 376340,23 = 60\,214,43 \text{ руб.}$$

4.4.7 Амортизация

В данном разделе произведен расчет амортизации оборудования, которое используется в проекте.

Расчет нормы амортизации производится по формуле

$$K = \frac{1}{n} \cdot 100\%,$$

где n – срок полезного использования (СПИ), год.

Расчет амортизации производится по формуле

$$A = \frac{K \cdot И}{365} \cdot m,$$

где И – итоговая сумма, тысячи рублей,

m – срок использования, дни (принимаям 110 дней).

Таблица 18 – Расчет амортизации

Наименование	Количество	Общая стоимость, руб	СПИ, п	Норма амортизации, К	Амортизация, А
Осциллограф	1	40000	10	10,00	120,55
Источники питания	1	1000	10	10,00	3,01
Мультиметр	2	3500	7	14,29	15,07
Персональный компьютер	1	15000	3	33,33	150,68
Паяльная станция	1	5000	7	14,29	21,53
Итого					310,84

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости научно-исследовательской работы (таблица 19).

Таблица 19 – Калькуляция плановой себестоимости НИР

Наименование статей затрат	Сумма, руб.
Сырье, материалы, комплектующие изделия, специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	70400,5
Затраты электроэнергии	572,34
Основная заработная плата	336018,60
Дополнительная заработная плата	40322,23
Отчисления на социальные нужды	112902,07
Накладные расходы	301072,18
Амортизация	310,84
Итого себестоимость НИР	620 741,01

4.5 Анализ и оценка научно-технического уровня исследования

Необходимо рассчитать коэффициент научно-технического уровня. Коэффициент НТУ рассчитывается при помощи метода балльных оценок, в котором каждому из признаков НТУ присваивается определенное число баллов по принятой шкале. Общую оценку приводят по сумме баллов по всем показателям с учетом весовых характеристик. Общая оценка рассчитывается по формуле:

$$\text{НТУ} = \sum_{i=1}^n k_i \cdot \Pi_i$$

где k_i – весовой коэффициент i – го признака;

Π_i – количественная оценка i – го признака.

Таблица 20 – Весовые коэффициенты НТУ

Признаки НТУ	Весовой коэффициент
Уровень новизны	0.4
Теоретический уровень	0.2
Возможность и масштабы реализации	0.4

Таблица 21 – Шкала оценки новизны

Баллы	Уровень
1-4	Низкий НТУ
5-7	<u>Средний НТУ</u>
8-10	Сравнительно высокий НТУ
11-14	Высокий НТУ

Таблица 22 – Значимость теоретических уровней

Характеристика значимости теоретических уровней	Баллы
Установка законов, разработка новой теории	10
<u>Глубокая разработка проблем, многосторонний анализ, взаимозависимость между факторами</u>	8
Разработка алгоритма	6
Элементарный анализ связей между факторами (наличие гипотезы, объяснение версий, практические рекомендации)	2
Описание отдельных факторов (вещества, свойств, опыта, результатов)	0.5

Таблица 23 - Возможность реализации по времени и масштабам

Время реализации	Баллы
<u>В течение первых лет</u>	10
От 5 до 10 лет	4
Свыше 10 лет	2
Масштабы реализации	Баллы
Одно или несколько предприятий	2
<u>Отрасль</u>	4
Народное хозяйство	10

$$k_1 = 0,4, P_1 = 5, k_2 = 0,2, P_2 = 8, k_3 = 0,2, P_3 = 10, k_4 = 0,2, P_4 = 4$$

$$НТУ = 0,4 \cdot 5 + 0,2 \cdot 8 + 0,2 \cdot 10 + 0,2 \cdot 4 = 6,4$$

По полученным результатам расчета коэффициента научно-технического уровня можно сделать вывод, что данный проект имеет высокую значимость теоретического и практического уровня, и при этом используется в широком спектре отраслей.

Таким образом, анализируя результаты оценки, можно заключить, что проводимое исследование имеет высокую значимость теоретического и практического уровня, а также приемлемый уровень рисков. Это подтверждает целесообразность проводимого научного исследования.

4.6 Определение ресурсоэффективности исследования

Ресурсоэффективность исследования определяется при помощи интегрального критерия ресурсоэффективности.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i$$

где I_{pi} –интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

Таблица 24 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования	Весовой параметр коэффициента	Проект	Аналог
Критерии			
1. Способствует росту производительности и труда	0,25	4	4
2. Энергосбережение	0,1	4	3
3. Удобство в эксплуатации	0,2	5	3
4. Надежность	0,2	5	3
5. Материалоемкость	0,15	5	2
6. Помехоустойчивость	0,1	5	4
Итого	1	28	19

$$I_{\text{ппр}} = 0,25 \cdot 4 + 0,1 \cdot 4 + 0,2 \cdot 5 + 0,2 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 + 0,1 \cdot 5 = 4,65$$

$$I_{\text{ран}} = 0,25 \cdot 4 + 0,1 \cdot 3 + 0,2 \cdot 3 + 0,2 \cdot 3 + 0,15 \cdot 2 + 0,1 \cdot 4 = 3,2$$

Проведенная оценка ресурсоэффективности проекта дает хороший результат (4,65 из 5), что свидетельствует об эффективности реализации технического проекта. Ресурсоэффективность конкурирующего аналога имеет более низкую оценку (3,2 из 5).

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности проекта имеет важное значение при выполнении раздела «Ресурсоэффективность и финансовый менеджмент». Его высокое значение говорит об эффективности использования технического проекта. Высокие баллы безопасности и надежности, удобства в эксплуатации и предполагаемый срок эксплуатации позволяют судить о корректно выполненной разработке системы

В текущем разделе был выполнен следующий алгоритм:

- анализ и оценка научно-технического уровня проекта, который показал, что данный проект имеет высокую значимость теоретического и практического уровня.
- SWOT-анализ выявил наиболее важные проблемы, которые необходимо разрешить в процессе выполнения проекта. Одной из такой проблемы является привлечение в команду высококвалифицированных экономистов и маркетологов.
- разработан календарный план проекта и построен календарный план-график. В проектной деятельности участвуют двое сотрудников: научный руководитель и инженер.
- определена трудоемкость работ, которая составила 110 календарных дней.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Группа	ФИО
4ТМ71	Перевалов Никита Алексеевич

Школа	ИШНПТ	Отделение школы (НОЦ)	Отделение материаловедения
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Тема ВКР:

Генератор импульсов по схеме Маркса на основе биполярных транзисторов в лавинном режиме	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования: силовой блок генератора импульсов напряжения (ГИН). Область применения прибора: - радиотехнические устройства - исследовательская лаборатория
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	КоАП РФ № 195-ФЗ (ред. От 01.04.2019), СанПиН 2.2.4.1191-03; №123-ФЗ от 22.07.2008; «Трудовой кодекс Российской Федерации» от 30.12.2001 № 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019)
2. Производственная безопасность 2.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности: 2.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:	1.1. Анализ выявленных вредных факторов: - отклонение показателей микроклимата; - недостаток естественного света; -недостаточная освещенность рабочей зоны; - повышенный уровень электромагнитных излучений; -повышенная напряженность электрического и магнитного полей; - повышенный уровень шума на рабочем месте; - вредные вещества 1.2. Анализ выявленных опасных факторов: - поражение электрическим током - механические опасности - термические опасности - пожарная опасность
3. Экологическая безопасность:	Минимальное воздействие на гидросферу. Остатки после обработки материалов оказывают небольшое влияние на литосферу. При пайке выделяются вредные вещества в атмосферу. Пути утилизации при наличии отходов.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	В лабораторном помещении возможно возникновении ЧС типа: - ЧС природного характера (морозы). - ЧС техногенного характера (пожары, диверсии)

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	04.02.2019
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель отделения общетехнических дисциплин	Романова Светлана Владимировна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ71	Перевалов Никита Алексеевич		

5 Социальная ответственность

Введение

В данном разделе будет рассмотрена безопасность труда при создании и лабораторной эксплуатации генератора импульсного напряжения (ГИН) на лавинных транзисторах, выполненного на печатной плате.

В последние годы возрастает интерес к полупроводниковым импульсным генераторам для использования в радиолокаторах, радиолокационных системах, биомедицинских приборах, высокоскоростной фотографии, сверхширокополосной связи, лазерных технологиях и обработки пищи. Типовым решением является генератор высоковольтных импульсов по типу генератора Аркадьева-Маркса на полупроводниковых коммутаторах. Конденсаторы заряжаются в параллельном режиме и разряжаются в последовательном режиме. Переключение между обоими режимами осуществляется с помощью полупроводниковых ключей (биполярных или полевых транзисторах). Они могут генерировать выходные импульсы с амплитудой, в n раз превышающей напряжение питания, при этом n равно числу ступеней.

Изготовленный генератор представляет собой плату с распаянными на ней электрическими и электронными элементами. Питание этой платы осуществляется выпрямленным напряжением от лабораторного автотрансформатора. Генератор работает на омическую нагрузку, на которой возникает импульсное напряжение от 1,5 кВ до 3 кВ, частота следования импульса при этом может достигать до 5 кГц.

В течение проекта проводились работы в лаборатории 103 высоковольтного зала корпуса 11 как по изготовлению самого генератора с помощью паяльной станции, так и по анализу характеристик спроектированного генератора.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.

5.1.1 К общей части нормативно-правовых основ охраны труда относится: Трудовой кодекс Российской Федерации.

Контроль условий труда на предприятиях осуществляют специально созданные службы охраны труда совместно с комитетом профсоюзов. Данный контроль заключается в проверке состояния производственных условий для работающих, выявлении отклонений от требований безопасности, законодательства о труде, стандартов, правил и норм охраны труда, постановлений, директивных документов, а также проверке выполнения службами, подразделениями и отдельными группами своих обязанностей в области охраны труда. Этот контроль осуществляют должностные лица и специалисты, утвержденные приказом по административному подразделению. Ответственность за безопасность труда в первую очередь несет руководитель.

Службы охраны труда совместно с комитетами профсоюзов разрабатывают инструкции по безопасности труда для различных профессий с учетом специфики работы, а также проводят инструктажи и обучение всех работающих правилам безопасной работы.

5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.

Организация рабочего места заключается в обеспечении условий, исключающих утомляемость и профессиональные заболевания и выборе необходимой технической базы для обеспечения этих условий.

Помещение, в котором расположено рабочее место имеет большие и чистые окна. Большие окна дают необходимую освещенность на рабочем месте с естественным дневным светом. На окнах предусмотрены светлые шторы, которые позволяют создать белый рассеянный свет в яркий солнечный

день и предотвратить попадание прямых солнечных лучей на рабочее место и в лицо сотрудника, которые раздражающе действуют на человека.

Для обеспечения благоприятных условий микроклимата помещение оборудовано системой вентиляции.

Режим труда и отдыха предусматривает соблюдение определенной длительности непрерывной работы на ПК и перерывов, регламентированных с учетом продолжительности рабочей смены, видов и категории трудовой деятельности.

Трудовая деятельность в лаборатории относится к категории В – творческая работа в режиме диалога с ПК, третья категория тяжести.

Количество и длительность регламентированных перерывов, их распределение в течение рабочей смены устанавливается в зависимости от категории работ на ПК и продолжительности рабочей смены. Так как рабочая смена составляет около 8 часов, то перерывы происходят через 1,5- 2,0 часа от начала рабочей смены и через 1,5-2,0 часа после обеденного перерыва продолжительностью 20 минут каждый.

5.2 Производственная безопасность.

Опасные и вредные факторы при выполнении работ по разработке прибора приведем в таблице 25.

Таблица 25 – Опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ					Нормативные документы
	Расчет принципиальной схемы	Заготовка печатной платы	Сборка макета устройства	Эксперименталь- ные исследования	Окончательная сборка устройства	
1.Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	+	+	ГОСТ 12.1.003 – 2014 ССБТ; ГОСТ Р 12.1.019-2009; ГОСТ 12.2.003–91 ССБТ; ГОСТ 12.1.038–82 ССБТ; ГОСТ 12.1.007 – 76; СанПиН 2.2.4-548-96; СанПиН 2.2.4.1191–03; СН 2.2.4/2.1.8.562–96; СП 52.13330.2011;
2. Превышение уровня шума			+	+	+	
3.Отсутствие или недостаток естественного света	+	+	+	+	+	
4.Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	+	+	+	+	
5. Повышенный уровень электромагнитных излучений			+	+	+	
6. Вредные вещества		+	+			
7. Подвижные части обрабатывающего оборудования		+				
8. Электрический ток				+	+	
9. Термический ожог			+			
10. Повышенный уровень статического электричества				+	+	
11. Пожарная опасность	+	+	+	+	+	

5.2.1 Анализ выявленных вредных факторов.

5.2.1.1 Отклонение показателей микроклимата

Состояние здоровья человека и его работоспособности в большей степени зависят от микроклимата на рабочем месте. Рабочие не имея возможности эффективно влиять на протекающие в атмосфере климатообразующие процессы, располагают качественными системами управления факторами воздушной среды внутри производственных помещений.

Под микроклиматом понимают климат внутренней среды помещений, который определяется совместно действующими на организм человека относительной влажностью, температурой и интенсивности теплового излучения, а также температурой окружающих поверхностей согласно ГОСТ 12.1.005-88.

В соответствии с СанПиН 2.2.4.548-96, в зависимости от периода года и категории выполняемых работ по уровням энергозатрат, устанавливаются оптимальные и допустимые нормы параметров микроклимата, представленные в таблице 26, 27.

Таблица 26 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений (СанПиН 2.2.4.548-96)

Период года	Категория работ по уровням энергозатрат, ккал/ч	Температура воздуха, С°	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	ІБ (140-174)	21-23	40-60	0,1
Теплый	ІБ (140-174)	22-24		0,2

Таблица 27 – Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений (СанПиН 2.2.4.548-96)

Период года	Категория работ по уровням энергозатрат, ккал/ч	Температура воздуха, С°		Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
		Нижняя допустимая граница	Верхняя допустимая граница		Допустимая на постоянных рабочих местах
Холодный	ІБ (140-174)	20	24	20-80	≤ 0,2
Теплый	ІБ (140-174)	21	28	20-80	0,1-0,3

Основными мероприятиями по оптимизации микроклимата и состава воздуха на данном рабочем месте являются обеспечение системой вентиляции и отопления, тепловая изоляция воздухопроводов и гидротрубопроводов. На рабочем месте, соблюдая вышеперечисленные мероприятия, обеспечиваются благоприятные условия труда.

5.2.1.2 Недостаточная освещенность рабочей зоны

Свет – это один из важнейших факторов внешней среды, который оказывает разносторонне биологическое действие на организм и играющий важную роль в сохранении здоровья и высокой работоспособности. Повышенная производительность труда, высокий уровень работоспособности и положительное психологическое действие на человека в высокой степени зависит от правильно спроектированного освещения. Недостаточная, избыточная или нерациональная освещенность может стать причиной травм, снижения производительности труда, а также отразиться на качестве выполняемых работ. Основным нормативным документом в области освещенности в производственном процессе является СНиП 23-05-95 (СП 52.13330.2011).

На рабочей поверхности должны отсутствовать резкие тени, которые создают неравномерное распределение поверхностей с различной яркостью в поле зрения, искажает размеры и формы объектов различия, в результате повышается утомляемость и снижается производительность труда.

Лаборатория, в которой проводились работы обладает следующими габаритными размерами: длина помещения $A = 8$ м, ширина $B = 4,5$ м, высота $H = 3,5$ м. Высота рабочей поверхности над полом $h_p = 0,8$ м.

Согласно СНиП 23-05-95* (СП 52.13330.2016), в процессе выполнения экспериментальной части выпускной квалификационной работы, производились зрительные работы, относящиеся к 3 разряду, соответственно, была обеспечена освещенность не ниже 200 лк, которая создавала комфортные условия для напряженной зрительной работы.

5.2.1.3 Повышенный уровень шума.

На рабочем месте шум возникает при работе ламп импульсного нагрева, вентиляции персонального компьютера и при воздействии внешних

факторов, таких как: шум от передвижения мостового крана в высоковольтном зале; шум от разрядов ГИН; шум от станков.

Шум неблагоприятно воздействует на организм человека, вызывает психические и физиологические нарушения, снижение слуха, работоспособности, создают предпосылки для общих и профессиональных заболеваний и производственного травматизма, а также происходит ослабление памяти, внимания, нарушение артериального давления и ритма сердца.

Уровни шума не должны превышать значений установленных в ГОСТ 12.1.003 – 2014, и их проверка должна проводиться не реже двух раз в год.

Основной характеристикой шума является предельно допустимый уровень (ПДУ) шума. Соблюдение ПДУ шума не исключает нарушения здоровья у сверхчувствительных лиц.

По ГОСТ 12.1.003 – 2014 нормируются параметры шума и при проведении работ уровень шума должен быть не более 82 Дб;

При значениях выше допустимого уровня необходимо предусмотреть средства индивидуальной защиты (СИЗ) и средства коллективной защиты (СКЗ) от шума.

Средства коллективной защиты:

- устранение причин шума или существенное его ослабление в источнике образования;
- изоляция источников шума от окружающей среды (установка экранов, звукопоглощающих строительных материалов);
- применение средств, снижающих шум и вибрацию на пути их распространения;

Средства индивидуальной защиты:

- применение спецодежды и защитных средств органов слуха: наушники, беруши, антифоны.

Применяя всё из выше перечисленного, на рабочем месте обеспечиваются комфортные условия труда, согласно нормам.

5.2.1.4 Повышенный уровень электромагнитных излучений.

Основными источниками электромагнитных излучений являются персональный компьютер, лабораторный источник питания и осциллограф. Разрабатываемое устройство является маломощным, поэтому существенного влияния на организм человека не несет.

Минимальное влияние среди всех источников являются осциллограф и лабораторный источник питания, так как в нем используется экранирование материалом с большой магнитной проницаемостью, поэтому большого вреда он не принесет.

В процессе работы с компьютером необходимо соблюдать правильный режим труда и отдыха. В противном случае у персонала отмечаются значительное напряжение зрительного аппарата с проявлением жалоб на неудовлетворенность работой, головные боли, раздражительность, нарушение сна, усталость и болезненные ощущения в глазах, в пояснице, в области шеи и руках.

Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03-временные допустимые уровни электромагнитных полей (ЭМП), создаваемых ПЭВМ, составляют:

- напряженность электрического поля в диапазоне частот 5 Гц - 2кГц – 25 В/м;
- напряженность электрического поля в диапазоне частот 2 кГц - 400кГц – 2,5 В/м;
- плотность магнитного потока в диапазоне частот 5 Гц - 2кГц – 250 нТл;
- плотность магнитного потока в диапазоне частот 2 кГц - 400кГц – 25 нТл;
- электростатический потенциал экрана видеомонитора – 500 В.

Защита человека от воздействия электромагнитного излучения осуществляется с помощью СИЗ и СКЗ.

Средства коллективной защиты:

- экранирование источника излучения и рабочего;

- установление санитарно-защитной зоны;
- уменьшение излучения от источника;
- уменьшение образования зарядов статического электричества;

Средства индивидуальной защиты:

- Очки и специальная одежда.

Вышеперечисленные средства применяются на рабочем месте, что обеспечивает защиту от электромагнитных излучений согласно нормам.

5.2.1.5 Вредные вещества в воздухе рабочей зоны.

Процесс изготовления печатной платы сопровождается удалением лишнего медного покрытия. Травление меди преимущественно осуществляется при помощи раствора хлорного железа. Данный раствор относится к третьему классу опасности в соответствии с ГОСТ 12.1.007 – 76. При попадании на человека может вызвать кожную аллергическую реакцию и повреждение глаз.

Исследуемое устройство состоит из множества электронных компонентов. Электрическое соединение компонентов на печатной плате проводится при помощи пайки. Пайка осуществляется оловянно-свинцовым и оловянно-свинцово-кадмиевыми припоями с использованием канифоли. Процессы пайки или лужения оловянно-свинцовыми и оловянно-свинцово-кадмиевыми припоями могут сопровождаться выделением токсичных веществ: свинца и окиси кадмия, которые в соответствии с ГОСТ 12.1.007 – 76 относятся к веществам 1 -го класса опасности. Поступление вредных веществ в организм человека в условиях изготовления и использования припоев возможно при вдыхании загрязненного воздуха, а также с водой и пищей при несоблюдении работниками личной гигиены.

Действие свинца на организм человека заключается в поражении нервной системы, крови, сосудов. Кадмий поражает органы дыхания, желудочно-кишечный тракт, внутренние органы, скелетную мускулатуру и костную ткань, вызывает раздражение кожных покровов.

В таблице 28 приведены вещества, которые выделяются при пайке, а также класс опасности и предельно-допустимые концентрации (ПДК) для припоев.

Таблица 28 – Класс опасности и ПДК припоев

Вещество	Класс опасности	ПДК в воздухе рабочей зоны мг/м ³
ПОС 40; ПОС 61(припой)	1	Менее 0, 1
ПОЦ 10; ПОЦ 55(припой) FeCl ₃	3	1,1-10

где класс опасности по степени воздействия на организм:

- 1 - чрезвычайно опасные;
- 3 - умеренно опасные

Лаборатория оснащена вытяжной вентиляцией, а исследователь использует индивидуальные средства защиты (резиновые перчатки, очки, спецодежда) и соблюдает правила личной гигиены. Данные меры создают безопасные условия труда.

5.2.2 Анализ выявленных опасных факторов.

5.2.2.1 Повышенная напряженность электрического поля.

Степень безопасности обслуживания электрических установок во многом зависит от условий эксплуатации и характера среды помещений, в которых электрооборудование установлено. Агрессивная, сырая, пыльная и подобные им среды не только ухудшают условия работы электрооборудования, но и повышают опасность электроустановок для обслуживающих людей.

В зависимости от возможности поражения электрическим током помещения подразделяют на три группы:

- без повышенной опасности;
- с повышенной опасностью;
- особо опасные.

К помещениям без повышенной опасности относятся сухие, непыльные помещения с нормальной температурой воздуха и изолирующими полами.

Помещения с повышенной опасностью характеризуются наличием в них одного из следующих условий, создающих повышенную опасность:

- Сырость (относительная влажность воздуха длительно превышает 75%) или токопроводящая пыль;
- Токопроводящие полы (металлические, железобетонные, кирпичные и т.п.);
- Высокая температура;
- Возможность одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей металлоконструкциям зданий, технологическим аппаратам и т.п., с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования – с другой.

Особо опасные помещения характеризуются наличием в них одного из следующих условий:

- Особая сырость (относительная влажность воздуха близка к 100%);
- Химически активная или органическая среда;
- Одновременное выполнение двух или более условий повышенной опасности.

Лаборатория относится к помещению с повышенной опасностью поражения электрическим током. В помещении применяются следующие меры защиты от поражения электрическим током. Недоступность токоведущих частей достигается путем их надежной изоляции, применения защитных ограждений (кожухов, крышек, сеток и т.д.), расположения токоведущих частей на недоступной высоте.

Каждому необходимо знать меры медицинской помощи при поражении электрическим током. В любом рабочем помещении необходимо иметь медицинскую аптечку для оказания первой медицинской помощи.

Поражение электрическим током чаще всего наступает при небрежном обращении с приборами, при неисправности электроустановок или при их повреждении.

Для освобождения пострадавшего от токоведущих частей необходимо использовать непроводящие материалы. Если после освобождения пострадавшего из-под напряжения он не дышит, или дыхание слабое, необходимо вызвать бригаду скорой медицинской помощи и оказать пострадавшему доврачебную медицинскую помощь:

- обеспечить доступ свежего воздуха (снять с пострадавшего стесняющую одежду, расстегнуть ворот);
- очистить дыхательные пути;
- приступить к искусственной вентиляции легких (искусственное дыхание);
- в случае необходимости приступить к непрямому массажу сердца.

Любой электроприбор должен быть немедленно обесточен в случае:

- возникновения угрозы жизни или здоровью человека;
- появления запаха, характерного для горящей изоляции или пластмассы;
- появления дыма или огня;
- появления искрения;
- обнаружения видимого повреждения силовых кабелей или коммутационных устройств.

5.2.2.2 Механическая безопасность.

Процесс подготовки печатной платы к монтажу включает в себя рихтовку, формовку, обрезку, лужение, сверление отверстий, а также заготовка самой печатной платы. Травмы могут быть вызваны движущимися, вращающимися частями, режущими острыми кромками, колющими острыми выступами, заусеницами, недостаточной устойчивостью изделия. Поэтому, во

избежание несчастного случая необходимо быть предельно аккуратным, а также использовать индивидуальные средства защиты (хлопчатобумажные перчатки, спецодежда, обувь). Перед работой со станком рабочий проходит проверку знаний и инструктаж по безопасности.

5.2.2.3 Повышенная температура поверхностей оборудования, материалов.

При пайке компонентов можно получить серьезный ожог. Чтобы исключить такой случай, необходимо соблюдать технику безопасности при работе с паяльником. Коротко сформулированы следующие правила:

- проверить исправность паяльника;
- держать паяльник только за ручку, избегая прикосновения к жалу;
- при пайке не наклоняться над паяльником ближе 20 см. во избежание попадания брызг олова и горячих паров газа;
- не работать вблизи легковоспламеняющихся предметов;
- в перерывах между работой ставить паяльник на подставку;
- в перерывах между работами выключать паяльник;
- при выключении не тянуть провод.

5.2.2.4 Повышенный уровень статического электричества.

Суть электризации заключается в том, что нейтральные тела, не проявляющие в нормальном состоянии электрических свойств, при определенных условиях способны накапливать электрические заряды. Опасность возникновения статического электричества проявляется в возможности образования электрической искры и вредном воздействии его на организм человека (нарушения центральной нервной системы, головные боли, раздраженность), причем не только при непосредственном контакте с зарядом,

но и за счет действия электрического поля, возникающем при заряженном поле.

Основные способы защиты от статического электричества на рабочем месте, следующие: заземление оборудования, увлажнение окружающего воздуха.

5.2.2.5 Пожарная опасность.

При создании прибора может возникнуть чрезвычайная ситуация пожарного характера.

Пожарная безопасность предусматривает обеспечение безопасности людей и сохранения материальных ценностей предприятия на всех стадиях его жизненного цикла. Основными системами пожарной безопасности являются системы предотвращения пожара и противопожарной защиты, включая организационно-технические мероприятия.

По взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В1-В4, Г и Д, а здания на категории А, Б, В, Г и Д.

Согласно НПБ 105-03 лаборатория относится к категории В – горючие и трудногорючие жидкости, твердые горючие и трудногорючие вещества и материалы, вещества и материалы, способные при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом только гореть, при условии, что помещения, в которых находится, не относятся к категории наиболее опасных А или Б.

По степени огнестойкости данное помещение относится к 1-й степени огнестойкости по СНиП 2.01.02-85 (выполнено из кирпича, которое относится к трудно сгораемым материалам).

Возникновение пожара при работе с электронной аппаратурой может быть по причинам как электрического, так и неэлектрического характера.

Причины возникновения пожара неэлектрического характера:

а) халатное неосторожное обращение с огнем (курение, оставленные без присмотра нагревательные приборы, использование открытого огня);

Причины возникновения пожара электрического характера: короткое замыкание, перегрузки по току, искрение и электрические дуги, статическое электричество и т. п.

Для устранения причин возникновения пожаров в помещении лаборатории должны проводиться следующие мероприятия:

- а) использование только исправного оборудования;
- б) проведение периодических инструктажей по пожарной безопасности;
- в) назначение ответственного за пожарную безопасность помещений;
- г) издание приказов по вопросам усиления пожарной безопасности
- д) отключение электрооборудования, освещения и электропитания по окончании работ;
- е) курение в строго отведенном месте;
- ж) содержание путей и проходов для эвакуации людей в свободном состоянии.

Для локализации или ликвидации загорания на начальной стадии используются первичные средства пожаротушения. Первичные средства пожаротушения обычно применяют до прибытия пожарной команды.

Огнетушители водо-пенные (ОХВП-10) используют для тушения очагов пожара без наличия электроэнергии. Углекислотные (ОУ-2) и порошковые огнетушители предназначены для тушения электроустановок, находящихся под напряжением до 1000В. Для тушения токоведущих частей и электроустановок применяется переносной порошковый огнетушитель, например ОП-5.

Тушение электроустановок нужно производить на расстоянии не менее 1 метра (имеется в виду расстояние от сопла огнетушителя до токоведущих частей). Зарядку порошковых огнетушителей следует производить один раз в пять лет. Также необходимо проводить проверки параметров огнетушащего

вещества раз в год. При возникновении необходимости ремонта или зарядки, следует обращаться в специализированные фирмы.

В общественных зданиях и сооружениях на каждом этаже должно размещаться не менее двух переносных огнетушителей. Огнетушители следует располагать на видных местах вблизи от выходов из помещений на высоте не более 1,35 м. Размещение первичных средств пожаротушения в коридорах, переходах не должно препятствовать безопасной эвакуации людей. Лаборатория полностью соответствует требованиям пожарной безопасности, а именно, наличие охранно-пожарной сигнализации, плана эвакуации, изображенного на рисунке 50, порошковых огнетушителей с поверенным клеймом, табличек с указанием направления к запасному (эвакуационному) выходу.



Рисунок 51 – План эвакуации

5.3 Экологическая безопасность

5.3.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду

Охрана окружающей среды - это комплексная проблема и наиболее активная форма её решения - это сокращение вредных выбросов промышленных предприятий через полный переход к безотходным или малоотходным технологиям производства. В научно-исследовательской работе проектируется прибор, состоящий из множества микросхем,

электрическое соединение которых производится при помощи пайки. Пайка осуществляется оловянно-свинцовым припоем. Свинец является одним из токсичных металлов и включен в списки приоритетных загрязнителей окружающей среды. Поэтому в последние годы человечество отказывается от свинцовых припоев и покрытий, что ведет к изменению технологии пайки и инфраструктуре сборочных средств. Происходит корректировка режимов пайки и, как следствие, доработка технологического оборудования.

5.3.2 Анализ «жизненного цикла» объекта исследования.

Использование лабораторного генератора требует решения таких важных вопросов, как утилизация отходов (микросхемы с содержанием цветных металлов, платы, провода). Утилизация проходит в несколько этапов. В первую очередь, специалисты по утилизации разбирают прибор на детали. Полученные компоненты сортируют по видам вторичного сырья (лом черных и цветных металлов, электронный лом) и отправляются на переработку.

Электронные компоненты отправляют на аффинажный завод. При этом оформляется паспорт по извлеченным драгоценным металлам (ДРМ). Все драгоценные металлы, полученные в процессе аффинажа, по закону, должны быть сданы государству. В противном случае утилизация может быть расценена как незаконный оборот драгметаллов. Поэтому при передаче компьютеров очень важно правильно оформить всю сопутствующую документацию. Это позволит избежать проблем с контролирующими органами.

В процессе расчета схемы остается макулатура. Сбор и сдача макулатуры в приемные пункты – это не только очищение офиса или дома, но и благородное занятие, поскольку тонны бумажного мусора валяющиеся на улицах города, - путь к самому настоящему экологическому бедствию.

Картриджи в своем составе содержат сажу, оксиды железа, алюминия, титана, продукты сополимеризации этилена и других мономеров, винилацетат. Данные вещества вредны для здоровья человека, т.к. могут стать

причиной ряда заболеваний. В связи с содержанием опасных веществ утилизация картриджей для принтеров должна проводиться определенным образом.

В настоящее время утилизация осуществляется двумя способами:

- Переработка. Отработанные детали принтеров отправляются на перерабатывающие предприятия, где картриджи чистят, ремонтируют и вновь заправляют с целью последующей продажи;
- Механическое и термическое разложение;

Люминесцентные лампы содержат ртуть и поэтому должны утилизироваться на специальных полигонах токсичных отходов.

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.

5.4.1 Чрезвычайная ситуация природного характера

Лаборатория, в которой проводится научно-исследовательская работа, находится в г. Томск с резко-континентальным циклоническим климатом. Природные явления (землетрясения, наводнения, засухи, ураганы и т. д.), в данном городе отсутствуют за исключением сильных морозов.

Достижение критически низких температур и огромного количества осадков снега приведет к авариям систем теплоснабжения, водоснабжения, электрических сетей. В случае разморозки труб должны быть предусмотрены запасные обогреватели, запас питьевой воды, а также электрогенераторов, в случае аварии электрических сетей. Их количества и мощности должно хватать для того, чтобы работа на производстве не прекратилась. Во время сильных снегопадов, которые приводят к затруднениям или полной остановке общественного транспорта, необходимо иметь личный транспорт или транспорт от организации.

5.4.2 Чрезвычайная ситуация техногенного характера

Чрезвычайные ситуации, возникающие в результате диверсий, возникают все чаще. Для предупреждения вероятности осуществления

диверсии предприятие необходимо оборудовать системой видеонаблюдения, круглосуточной охраной, пропускной системой, надежной системой связи, а также исключения распространения информации о системе охраны объекта, расположении помещений и оборудования в помещениях, системах охраны, сигнализаторах, их местах установки и количестве. Должностные лица раз в полгода проводят тренировки по отработке действий на случай экстренной эвакуации.

Заключение

В выпускной квалификационной работе был произведен анализ схем и параметров генераторов Маркса на лавинных транзисторах, а также продемонстрированы типовые решения таких генераторов. Такие генераторы обладают сравнительно небольшой амплитудой напряжения на нагрузке, чем классические генераторы Маркса на разрядниках, но способны работать в частотном режиме, с частотой следования импульса вплоть до 100 кГц, что несомненно является главным достоинством.

Были выбраны биполярные транзисторы серии 2N5551 из-за существующей зависимости напряжения лавинного пробоя от сопротивления база-эмиттер. Произведенный расчет позволил выбрать номиналы электрических компонентов. Полученные данные были применены в пакете программ MatLab Simulink.

Имитационное моделирование показало, что все транзисторы открываются и энергия, накопленная в конденсаторах, передается в нагрузку, на которой, в свою очередь, оказывается импульс напряжения, кратно превышающий зарядное напряжение. Ключевым недостатком этой модели является отсутствие лавинного пробоя, так как это невозможно реализовать, как в этой среде, так и в аналогичных программных обеспечениях.

Моделирование позволило выяснить, что значительного прироста к величине импульса на нагрузке не наблюдается, как при увеличении сопротивления нагрузки от 200 Ом, так и при увеличении количества ступеней генератора до $n = 15$.

Спроектирован и изготовлен драйвер управления с гальванической развязкой, способный работать в широком диапазоне частоты следования импульса ($f = 1 \text{ кГц} \div 5 \text{ кГц}$). Длительность фронта управления 90 нс, и амплитуда напряжения 8 В.

Был исследован макет ГИН на лавинных транзисторах, с количеством ступеней $n = 5$. Получены зависимости амплитуды напряжения $U_a(R_n)$ и длительности фронта $t_f(R_n)$ от нагрузки, и произведен анализ влияния типа

конденсаторов на эти параметры. С керамическими конденсаторами достигается более острый фронт и бо́льшая амплитуда. Найдена оптимальная величина сопротивления нагрузки $R_n = 200 \text{ Ом}$, при которой амплитуда напряжения $U_a = -1400 \text{ В}$ и длительности фронта $t_\phi = 10 \text{ нс}$.

Также в ходе работы был изготовлен и исследован десятиступенчатый генератор. Было отмечено влияние температуры элементов, в частности транзисторов, на амплитуду напряжения. Зависимости амплитуды напряжения $U_a(R_n)$ и длительности фронта $t_\phi(R_n)$ от нагрузки показали, что и в этом случае нагрузка 200 Ом оказалось оптимальной для данного генератора, были достигнуты амплитуда напряжения на нагрузке $U_a = -2 \text{ кВ}$ и длительность фронта $t_\phi = 5 \text{ нс}$.

При уменьшении сопротивления нагрузки транзисторы начинают выходить из строя. Когда сопротивление нагрузки опускается до 100 Ом происходит неполное закрытие транзисторов, через ступень начинает протекать ток. При сопротивлении 50 Ом транзисторы полностью приходят в негодность.

С увеличением сопротивления нагрузки вплоть до холостого хода увеличивается длительность фронта и уменьшается амплитуда напряжения. Меньшее сопротивление и режим короткого замыкания выведут транзисторы из строя, вследствие чего можно предположить, что данный генератор не предназначен для работы на разрядный промежуток.

Главным ограничением такого генератора является относительно малая величина амплитуды напряжения на выходе генератора, которая ограничивается номинальным напряжением транзистора. Амплитуды напряжения у ближайшего конкурента – генератора на звеньях сжатия с твердотельными коммутаторами (тиристоры, IGBT транзисторы) составляют десятки киловольт.

Достоинством такого генератора является его крайне острый фронт (5 нс) и частота следования импульсов, которая выше одного килогерца, и которая теоретически может быть повышена до десятков килогерц.

Немаловажную роль играет и цена электрических элементов, в частности транзисторов серии 2N5551, стоимость которых не превышает пары рублей за штуку, в отличие от транзисторов серии FMMT417, стоимость которых выше на три порядка, и которые часто используют в зарубежных работах.

Бурное развитие полупроводниковой промышленности приводит к созданию более совершенных транзисторов, способных работать при бóльших напряжениях, мощностях, температурах и граничных частотах. Таким образом, генераторы импульсов напряжения на основе таких транзисторов расширяют область своего применения.

Список использованных источников

1. Shangbang Luo, Pengju Tang, Chao Li, "A circuit design of UWB GPR transient source based on avalanche transistor," Applications and Student Innovation (iWEM), vol. A247, pp. 1-2, 2012.
2. Yunqiang Yang, Fathy, A. "Design and Implementation of a Low-Cost Real-Time Ultra-Wide Band See-Through-Wall Imaging Radar System," Microwave Symposium, 2007. IEEE/MTT-S International, pp. 1467-1470, 2007.
3. Sanders, J.M. Kuthi, A. Vernier, P.T. Yu-Hsuan Wu, "Scalable, compact, nanosecond pulse generator with a high repetition rate for biomedical applications requiring intense electric fields," Pulsed Power Conference, 2009. PPC '09. IEEE pp. 1418-1421, 2009.
4. Chien-Sheng Liu, Cheng-Hsien Lin, Chia-Hsu Chen, Po-Heng Lin, "Novel colored pulse laser photography for high speed imaging," Nano/Molecular Medicine and Engineering (NANOMED), 2009 IEEE International Conference on, pp. 133-137, 2007.
5. Goyal, V. Dhaliwal, B.S. "Optimal Pulse Generation for the improvement of ultra wideband system performance," Engineering and Computational Sciences (RAECS), 2014 Recent Advances in, pp. 1-6, 2014.
6. Sethian, J.D. Myers, M. Giuliani, J.L., Jr. Hegeler, F. Friedman, "Electra: A Repetitively Pulsed, Electron Beam Pumped KrF Laser to Develop the Technologies for Fusion Energy," Pulsed Power Conference, 2005 IEEE, pp. 8-15, 2005.
7. Redondo, L. M., & Pereira, M. T. (2015). 25 kV bipolar solid-state Marx generator for industrial food applications. 2015 IEEE Pulsed Power Conference (PPC). doi:10.1109/ppc.2015.7297020
8. Пичугина М.Т. Высоковольтная электротехника. - Томск: Изд-во ТПУ, 2011. - 136с.
9. FPGA-Controlled All-Solid-State Nanosecond Pulse Generator for Biological Applications Chenguo Yao, Member, IEEE, Ximing Zhang, Fei

Guo, Shoulong Dong, Yan Mi, and Caixin Sun. IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 40, NO. 10, OCTOBER 2012

10. Theoretical Analysis and Experimental Study on an Avalanche Transistor-Based Marx Generator Jiangtao Li, Member, IEEE, Xu Zhong, Jianhao Li, Zheng Liang, Wenzhong Chen, Zheng Li, and Tao Li. IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 43, NO. 10, OCTOBER 2015
11. Zhiyuan Huang, Qi Fu, Peizhe Chen, Hongchun Yang, & Xiaolin Yang. (2014). High power pulse generator based on avalanche transistor Marx circuit. 2014 IEEE International Conference on Communication Problem-Solving. doi:10.1109/iccps.2014.7062282
12. Xuelin, Y., Zhenjie, D., Qingsong, H., Jianguo, Y., Bo, Z., & Long, H. (2010). High-repetition and -stability all-solid state pulsed Marx circuit. 2010 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. doi:10.1109/icmmt.2010.5525248
13. Yi-Long Guo, Ning-Ning Yan, Shen-Hui Guo, & Gang Zeng. (2013). 500 ps/1 kV pulse generator based on avalanche transistor Marx circuit. 2013 International Workshop on Microwave and Millimeter Wave Circuits and System Technology. doi:10.1109/mmwcst.2013.6814636
14. Inokuchi, M., Akiyama, M., Sakugawa, T., Akiyama, H., & Ueno, T. (2009). Development of Miniature Marx Generator using BJT. 2009 IEEE Pulsed Power Conference. doi:10.1109/ppc.2009.5386197
15. Huiskamp, T., Borrias, T., & Pemen, A. J. M. (2016). 15-Stage compact Marx generator using 2N5551 avalanche transistors. 2016 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC). doi:10.1109/ipmhvc.2016.8012841
16. Б.Ю. Семенов. Силовая электроника: от простого к сложному. – М.: Солон-Пресс, 2005. – 416 с.: ил.

- 17.Б.Ю. Семенов. Силовая электроника: профессиональные решения. – М.: Солон-ПРЕСС, 2011. – 416 с.: ил. (Серия «Компоненты и технологии»)
- 18.A Subnanosecond Jitter Trigger Generator Utilizing Trigatron Switch and Avalanche Transistor Circuit. Weidong Ding, Member, IEEE, Yanan Wang, Chuan Fan, Yang Gou, Zhong Xu, and Lanjun Yang. IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 43, NO. 4, APRIL 2015
- 19.J. Mankowski and M. Kristiansen “A Review of Short Pulse Generator Technology,” IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 28, no. 1, pp. 102–108, Feb. 2000.
20. Texas Instruments Incorporated. [Электронный ресурс]. –URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/na555.pdf> (Дата обращения: 19.12.2018)
- 21.Сайт для радиолюбителей. Расчет импульсного трансформатора двухтактного преобразователя. [Электронный ресурс]. –URL: <http://rcl-radio.ru/?p=35540> (Дата обращения: 15.18.2018).
- 22.ГОСТ 16541-76 Сердечники кольцевые из магнитомягких ферритов. Основные размеры
- 23.Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб:КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.
- 24.Чучалин А.И. Математическое моделирование в электромеханике. Учебное пособие для студентов заочной формы обучения. – Томск: Изд. ТПУ, 2001. – 100 с.
- 25.М. Линник, «Простые Конструкции На Транзисторе В Лавинном Режиме», Радио №2. – М.: ДОСААФ СССР, 1982. – 86 с.
- 26.Гаврикова Н.А., Тухватулина Л.Р., Видяев И.Г., Серикова Г.Н., Шаповалова Н.В.. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение. –Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – 73 с.

- 27.ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
- 28.СанПиН 2.2.4.548-96.Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
- 29.СНиП 23-05-95 (СП 52.13330.2011). Свод правил. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95.
- 30.ГОСТ 12.1.003 – 2014. ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.
- 31.СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы»
- 32.ГОСТ 12.1.007 – 76. ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования к безопасности.
- 33.ГОСТ 12.1.033 – 81. ССБТ. Пожарная безопасность. Термины и определения.
- 34.НПБ 105-03. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.
- 35.СНиП 2.01.02-85* Противопожарные нормы.
- 36.ГОСТ Р 12.1.019-2009. ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
37. ГОСТ 12.1.030-81. ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление.

Приложение А
(Обязательное)

Chapter 3

Breadboarding and experimental researching of generator

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4TM71	Перевалов Никита Алексеевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ ИШНПТ	Мартемьянов Сергей Михайлович	к.т.н.		

Консультант отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Ажель Юлия Петровна			