

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 транзисторов MOSFET
УДК621.382.032-049.8:621.373.14.027.3

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ71	Исхаков Роман Фолурович		

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	Кащук 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		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО 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 <i>интеллектуальный и общекультурный уровень</i> , 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> 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 <i>в 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	Исхакову Роману Фолуровичу

Тема работы:

Генератор импульсов по схеме Маркса на основе транзисторов MOSFET	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	3830/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	25.05.2019
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Рассмотрение возможности и целесообразности использования транзисторов MOSFET 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. Расчетная часть 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:

Введение, генератор Аркадьева Маркса, экспериментальная часть.

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

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	Исхаков Роман Фолурович		

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 13.04.92 Электроэнергетика и электротехника
 Уровень образования магистр
 Отделение материаловедения
 Период выполнения _____ весенний семестр 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:	25.05.2019
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
28.01.2019	Исследование литературных источников по теме исследования	15
14.05.2019	Экспериментальные исследования характеристик генератора Маркса	10
15.05.2019	Финансовый менеджмент	10
24.05.2019	Социальная ответственность	5
27.05.2019	Разделы, выполненные на английском языке	10

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

Магистерская диссертация состоит из 109 страниц, 83 рисунков, таблиц 18, 24 источников и 1 приложения.

Ключевые слова: Генератор Аркадьева Маркса, генератор импульсного напряжения (ГИН), твердотельные коммутаторы, полупроводниковые транзисторы, MOSFET транзисторы.

Объектом исследования является генератор Аркадьева Маркса.

Цель работы – Рассмотрение возможности и целесообразности использования транзисторов MOSFET для построения ГИН технологического назначения. Анализ режимов работы и возможных диапазонов перегрузки коммутаторов. Анализ возможных областей применения ГИН на твердотельных коммутаторах.

В ходе работы было изготовлено оборудование с целью проведения необходимых экспериментальных исследований и проведен анализ полученных результатов.

Лабораторная установка включает в себя: ГИН, источник импульсов, систему управления и измерительную аппаратуру. Параметры установки: рабочее напряжение ГИН до 1 кВ, рабочее напряжение источника импульсов 20-100 В, длительность импульса варьируется до 100 нс.

Область применения: испытания в лабораториях, импульсная накачка лазеров, дезактивация бактерий, стерилизация.

Также в данной работе рассмотрены вопросы экономической эффективности проекта и социальной ответственности.

Содержание

Введение	9
1 Генератор по схеме Аркадьева Маркса	11
1.1 Обзор твердотельных коммутаторов	15
2. Литературный обзор	20
3. Расчет параметров генератора	51
4. Экспериментальная часть	57
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	75
5.1 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	76
5.2 SWOT – анализ	77
5.3 Планирование научно-исследовательской работы	79
5.4 Бюджет научного исследования	83
5.4.1 Сырье, материалы, специальное оборудование, покупные изделия	83
5.4.2 Основная заработная плата	85
5.4.3 Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала	87
5.4.4 Отчисления на социальные нужды	87
5.4.5 Амортизация	87
5.4.5 Накладные расходы	88
5.5 Анализ и оценка научно-технического уровня исследования	88
5.6 Определение ресурсоэффективности исследования	90
6 Социальная ответственность	95
6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	95
6.2 Производственная безопасность	96
6.3 Анализ вредных факторов производственной среды	97
6.4 Анализ опасных факторов производственной среды	98
6.5 Обоснование мероприятий по снижению воздействия	100
6.6 Экологическая безопасность	101
6.7 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	101
Заключение	103

Список использованных источников	105
Приложение А – Experimental part; Introduction	107

Введение

Генераторы импульсных напряжений (ГИН) служат для испытания изоляции электрооборудования грозowymi импульсами с целью координации электрической прочности изоляции с воздействующими на нее грозowymi перенапряжениями. Испытания проводятся полными стандартными импульсами 1,2/50 мкс, а также срезанными импульсами при предразрядном времени 2-3 мкс [1].

ГИН представляет собой батарею конденсаторов высокого напряжения, работающих в режиме заряд-разряд и обеспечивающих при разряде весьма высокие импульсные напряжения. Конденсаторы в зарядном режиме включены параллельно, а в разрядном – последовательно. Переключение конденсаторов осуществляется с помощью искровых разрядников (обычно шаровых). Кроме того ГИН включает в себя измерительное устройство и устройство для заземления и снятия остаточных зарядов с конденсаторов после окончания работы [2].

Цель: Определить возможность и целесообразность применения полупроводниковых коммутаторов для создания ГИН на емкостных накопителях.

Задачи:

1. Анализ существующих достижений в области создания ГИН на полупроводниках;
2. Программный и экспериментальный анализ технических возможностей ГИН на полупроводниках;
3. Создание макета ГИН на полупроводниках

Актуальность работы заключается в том, что ГИН является важнейшим составляющей испытательных лабораторий заводов, выпускающей оборудование предназначенной для передачи электрической энергии. Ведутся разработки по применению

твердотельных коммутаторов (транзисторов) в схемах ГИН вместо устаревших газовых разрядников.

1. Генератор по схеме Аркадьева-Маркса

¹Генератор Аркадьева-Маркса — генератор импульсного высокого напряжения, принцип действия которого основан на зарядке электрическим током соединённых параллельно (через резисторы) конденсаторов, соединяющихся после зарядки последовательно при помощи различных коммутирующих устройств (например, газовых разрядников или триггеров). Таким образом выходное напряжение увеличивается пропорционально количеству соединённых конденсаторов. На рисунке 1 приведен вариант схемы генератора импульсных напряжений:

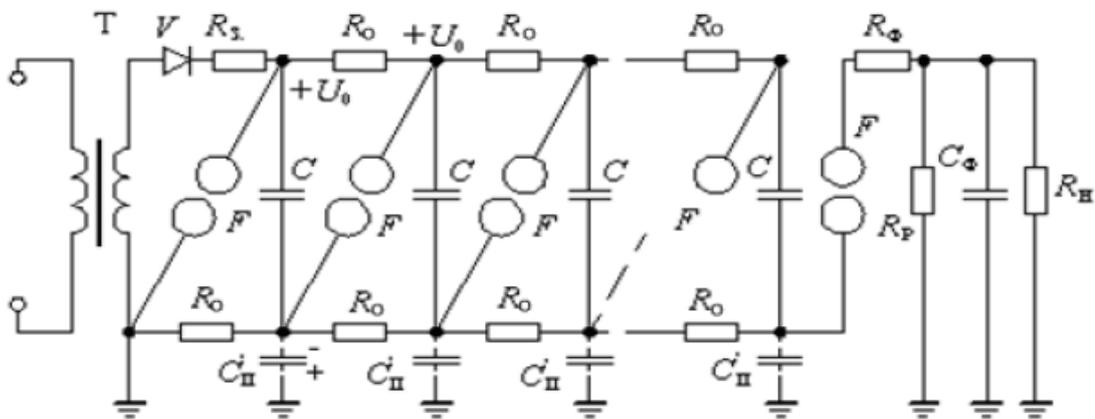


Рисунок 1 – Принципиальная электрическая схема ГИН

где:

T – трансформатор;

V – выпрямитель;

R_3, R_0 – защитное и разделительное сопротивления;

R_f, C_f – фронтовое сопротивление и емкость;

R_H – сопротивление нагрузки;

F – искровой промежуток;

C – ёмкость ступени.

После зарядки конденсаторов запуск генератора обычно производится после срабатывания первого разрядника. После его срабатывания перенапряжение на разрядниках заставляет срабатывать их все практически одновременно, чем и производится последовательное соединение заряженных конденсаторов. Генераторы Маркса позволяют получать импульсные напряжения от десятков киловольт до десятка мегавольт. Частота импульсов, вырабатываемых генератором Маркса, зависит от мощности генератора в импульсе — от единиц импульсов в час до нескольких десятков герц.

Опишем отдельно контур заряда и разряда генератора:

Для заряда конденсатором используется выпрямленное или постоянное напряжение; чаще всего источник питания представляет собой выпрямительное устройство, состоящее из повышающего трансформатора, вентилей, пускорегулирующей, защитной и контрольной аппаратуры, системы заземления безопасности. Так же можно применить уже готовые решения от производителей высоковольтного оборудования, что позволяет сочетать в себе небольшие габариты, требуемые параметры выходного напряжения и тока, а так же удешевляет стоимость зарядного контура. Стандартную схему замещения зарядной цепи можно представить на рисунке 2.

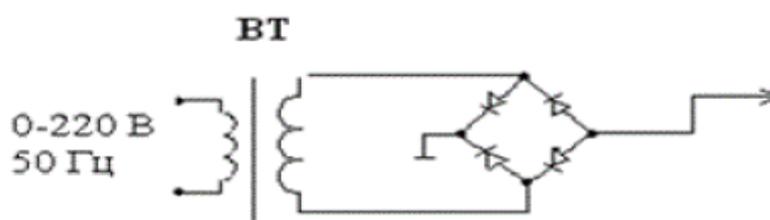


Рисунок 2 – Схема зарядного контура.

При разряде совокупность генератор-объект можно представить как одну две емкости с последовательно соединенными успокоительными сопротивлениями, а так же индуктивностью разрядной цепи. Полная схема

замещения разрядного контура ГИН представлена на рисунке 3а. На рисунке 3б упрощенная схема.

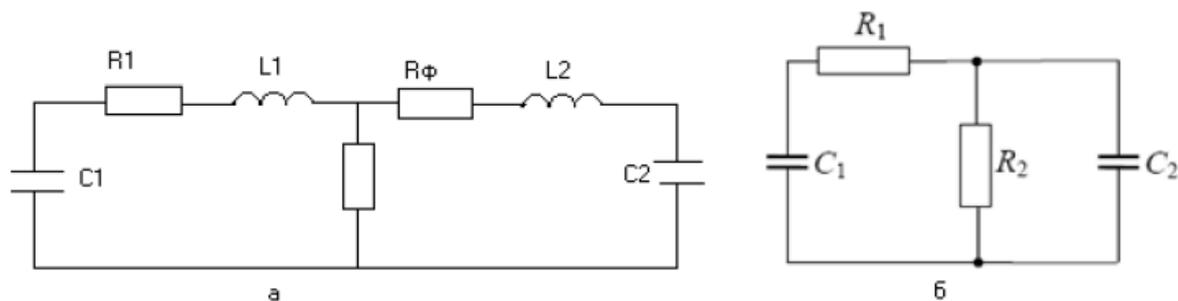


Рисунок 3 – Схемы замещения разрядной цепи

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 и специально включаемой емкости для регулирования длительности фронта импульса; L_1 и L_2 – индуктивность элементов ГИНа и петли подсоединения объекта к ГИНу. Ввиду не большой длины соединительных проводников и, следовательно, малой их индуктивности, при расчетах ими можно пренебречь, упрощенная схема представлена на рисунке 3б.

Так как в данной научно-исследовательской работе исследуется ГИН на полупроводниковых ключах, на транзисторах, схема замещения представлена на рисунке 4а и рисунке 4б:

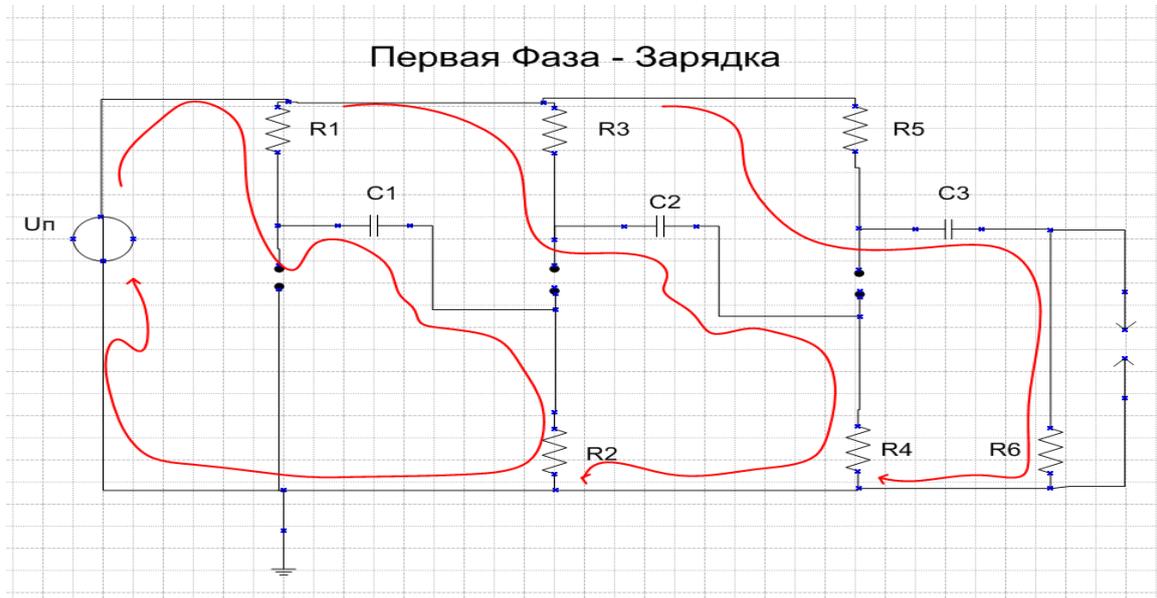


Рисунок 4а – Фаза заряда.

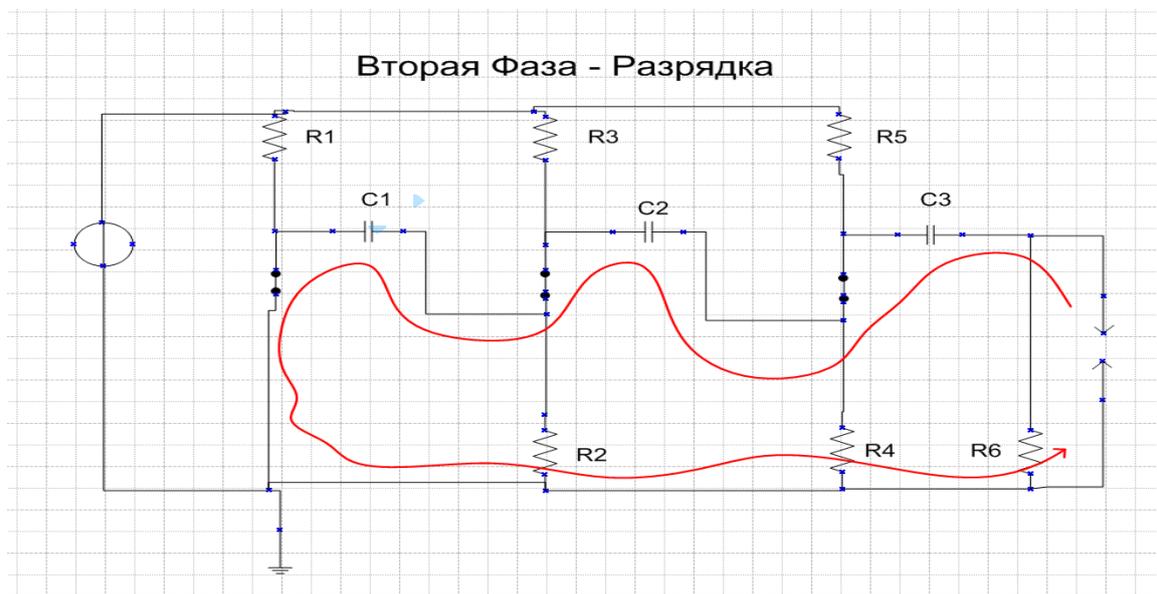


Рисунок 4б – Фаза разрядки.

1.1 Обзор твердотельных коммутаторов

Транзистор – полупроводниковый элемент с тремя выводами (обычно), на один из которых (коллектор) подаётся сильный ток, а на другой (база) подаётся слабый (управляющий ток). При определённой силе управляющего тока, как бы «открывается клапан» и ток с коллектора начинает течь на третий вывод (эмиттер). В современных электронных чипах, количество транзисторов исчисляется миллиардами. Используются они преимущественно для вычислений и состоят из сложных связей.

Полупроводниковые материалы, преимущественно применяемые в транзисторах это: кремний, арсенид галлия и германий. Также существуют транзисторы на углеродных нанотрубках, прозрачные для дисплеев LCD и полимерные (наиболее перспективные)[2].

Виды транзисторов [2]:

Биполярные – транзисторы в которых носителями зарядов могут быть как электроны, так и «дырки». Ток может течь, как в сторону эмиттера, так и в сторону коллектора. Для управления потоком применяются определённые токи управления.

Полевые транзисторы (MOSFET) – распространённые устройства в которых управление электрическим потоком происходит посредством электрического поля. То есть когда образуется большее поле – больше электронов захватываются им и не могут передать заряды дальше. То есть это своеобразный вентиль, который может менять количество передаваемого заряда (если полевой транзистор с управляемым p—n—переходом). Отличительной особенностью данных транзисторов являются высокое входное напряжение и высокий коэффициент усиления по напряжению.

Комбинированные – транзисторы с совмещёнными резисторами, или другими транзисторами в одном корпусе. Служат для различных целей, но в основном для повышения коэффициента усиления по току.

Биполярный транзистор - представляет собой трехслойную полупроводниковую структуру с чередующимися типом электропроводности слоев и содержит два р-п перехода. В зависимости от чередования слоев существуют транзисторы типов р-п-р и п-р-п (рисунок ниже). Их условное обозначение на электронных схемах показано на том же рисунке. В качестве исходного материала для получения трехслойной структуры используют германий и кремний.

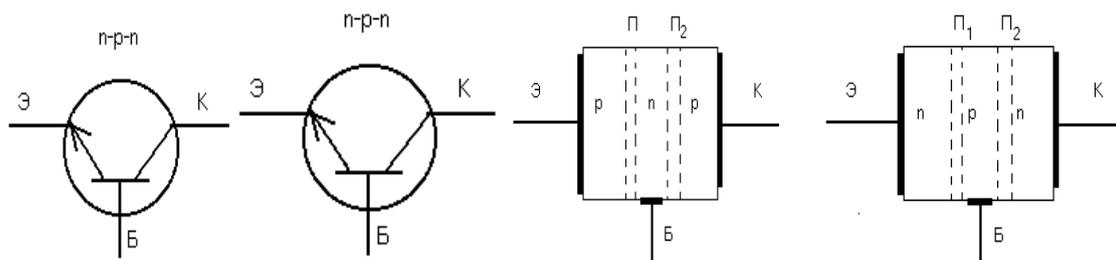


Рисунок 5 – Схема биполярного транзистора.

Достоинства биполярных транзисторов:

1. Хороший температурный и частотный диапазон;
2. Высокое допустимое напряжение коллектора;
3. Менее чувствительные к перегреву и скачкам напряжения, чем полевые транзисторы;
4. Высокое быстродействие при больших токах коллектора;
5. Низкая стоимость.

Недостатки биполярных транзисторов:

1. Малое усиление по току;
2. Малое входное сопротивление;
3. Инжекция неосновных носителей заряда в область проводимости
4. Не усиливает напряжение.

Полевыми транзисторами называют активные полупроводниковые приборы, в которых выходным током управляют с помощью электрического

3. Необходимость принимать меры предосторожности для предотвращения пробоя тонкого слоя диэлектрика между затвором и каналом под действием статических зарядов, скопившихся на затворе.

Биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) являются новым типом активного прибора, который появился сравнительно недавно. Его входные характеристики подобны входным характеристикам полевого транзистора, а выходные – выходным характеристикам биполярного.

По быстродействию они значительно превосходят биполярные транзисторы. Чаще всего IGBT-транзисторы используют в качестве мощных ключей, у которых время включения 0,2 - 0,4 мкс, а время выключения 0,2 - 1,5 мкс, коммутируемые напряжения достигают 3,5 кВ, а токи 1200 А.

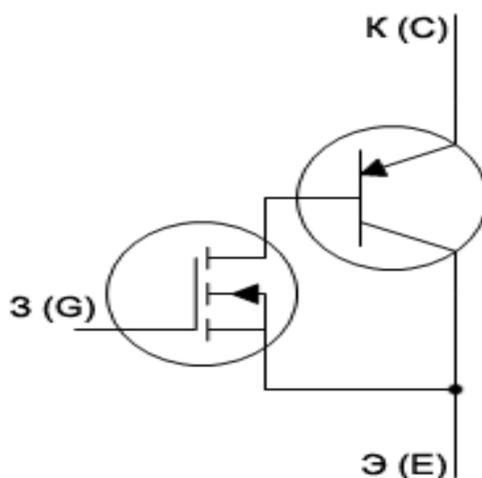


Рисунок 7 – Биполярный транзистор с изолированным затвором.

IGBT-транзисторы вытесняют тиристоры из высоковольтных схем преобразования частоты и позволяют создать импульсные источники вторичного электропитания с качественно лучшими характеристиками. IGBT-транзисторы используются достаточно широко в инверторах для управления электродвигателями, в мощных системах бесперебойного питания с напряжениями свыше 1 кВ и токами в сотни ампер. В какой-то степени это является следствием того, что во включенном состоянии при токах в сотни ампер падение напряжения на транзисторе находится в пределах 1,5 - 3,5В.

Достоинства IGBT-транзисторов:

1. Экономия площади кремниевого кристалла,
2. Улучшенные характеристики тока через биполярный коллектор.
3. Управление транзисторами IGBT идентично управлению полевыми МОП-транзисторами. Они имеют подобные характеристики управления затвором, а схема драйвера МОП-транзистора очень хорошо работает и с транзистором IGBT.

Недостатки IGBT-транзисторов:

1. Высокое напряжение насыщения из-за наличия двух последовательных р-п-переходов;
2. Длинный "хвост" выключения, который добавляется к потерям переключения;
3. "Хвостовые" потери ограничивают частоту переключения до менее, чем 20 кГц;
4. Высокая цена

2. Литературный обзор

В данном разделе будут рассматриваться достижения отечественных и зарубежных разработчиков для генератора Аркадьева-Маркса.

Перевод статей.

Авторы статьи [3] описывают многократный импульсный сумматор высокого напряжения на основе полупроводниковых переключателей с изолированной перезарядкой. В данной топологии все конденсаторы в модуляторе заряжаются отдельно через соответствующий трансформатор с магнитным сердечником с помощью обычного высокочастотного источника питания. Такая конфигурация схемы упрощает конструкцию и расположение изоляции. Данная схема подходит для высокочастотного импульсного разряда благодаря высокой эффективности зарядки. В то же время он сохраняет как встроенную защиту переключателя, так и твердотельный модулятор Маркса. В статье представлена работа 22-ступенчатого тестового модулятора, построенного и успешно работающего при выходном напряжении 20 кВ с частотой повторения 20 кГц, временем нарастания 150 нс и длительностью импульса 3 мкс. Первичные эксперименты подтверждают осуществимость системы.

На рисунке 8 изображена принципиальная схема четырехступенчатого импульсного сумматора. Конденсатор на каждой ступени заряжается до 1 кВ с помощью общего резонансного источника питания с высокой частотой 20 кГц через многопоточные магнитные кольцевые трансформаторы. Напряжение регулируется путем регулировки зарядного напряжения каждой ступени. Переключатель MOSFET используется на каждой ступени для управления разрядкой конденсатора. Переключатель MOSFET запускается общим триггерным сигналом через другой набор магнитных кольцевых трансформаторов для синхронной проводимости. Изоляция высокого напряжения между зарядной, пусковой цепью и конденсаторами осуществляется с помощью кольцевых магнитных трансформаторов, что упрощает изоляцию. Благодаря самозащите твердотельных переключателей эта схема работает надежно. Когда один переключатель на любой стадии не проводит, диод на соответствующей стадии будет обходить переключатель и конденсатор; другие нормальные переключатели устанавливаются последовательно и добавляют импульсное напряжение для нагрузки. Сборка прототипа системы показана на рисунке 9.

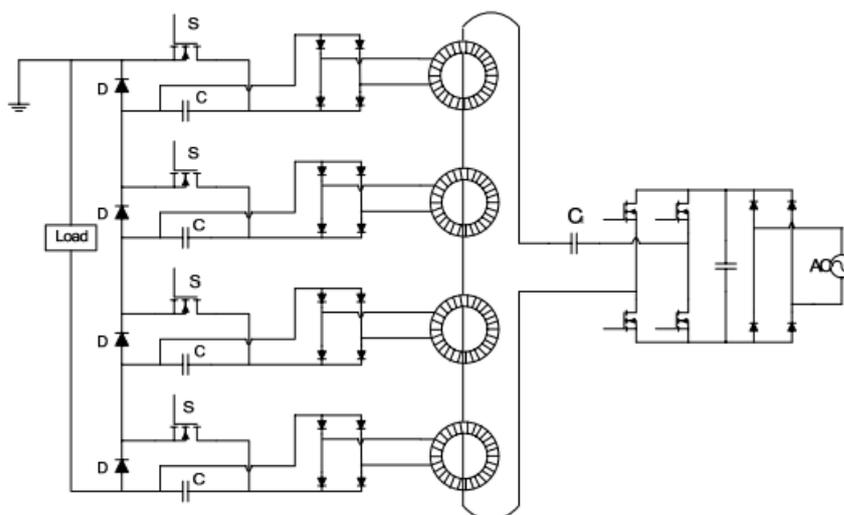


Рисунок 8 – Принципиальная схема четырехступенчатого сумматора.

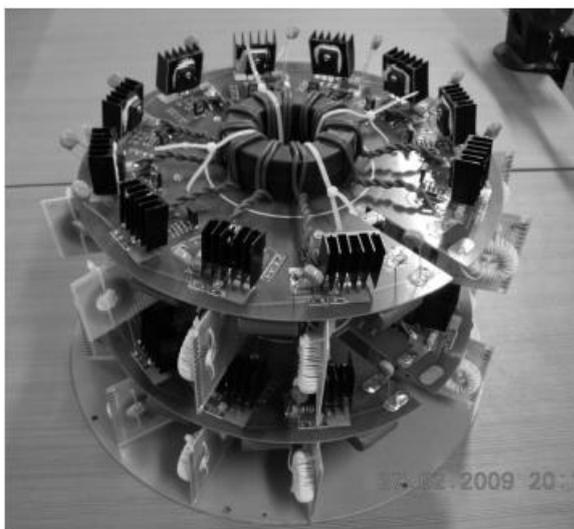


Рисунок 9 – Изображения прототипа сумматора.

Упрощенная схема драйвера для полевого МОП-транзистора показана на рисунке 10. Один магнитный кольцевой трансформатор с несколькими выходами используется для изоляции 11 ступеней полевого МОП-транзистора и синхронного триггера. Инвертор постоянного тока обеспечивает сигнал возбуждения положительным и отрицательным импульсом от первичной обмотки за один оборот. Для надежной работы защита от перегрузки по току была рассмотрена в цепи драйвера. Когда ток в разрядной цепи больше, чем заданное значение, напряжение на резисторе R5 заставляет транзистор T проводить, а затем отключать управляющий сигнал. Поэтому он защищает все переключатели S от перегрузки по току. Сигнал драйвера показан на рисунке 11.

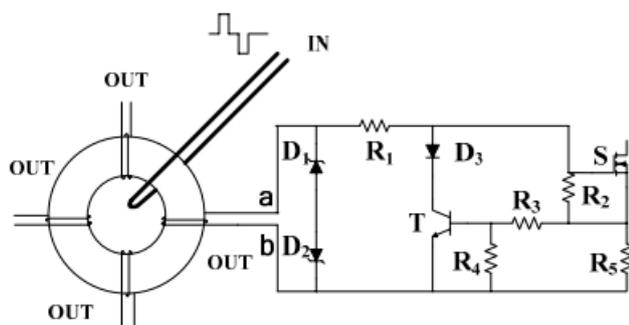


Рисунок 10 – Схема драйвера на МОП-транзисторах.

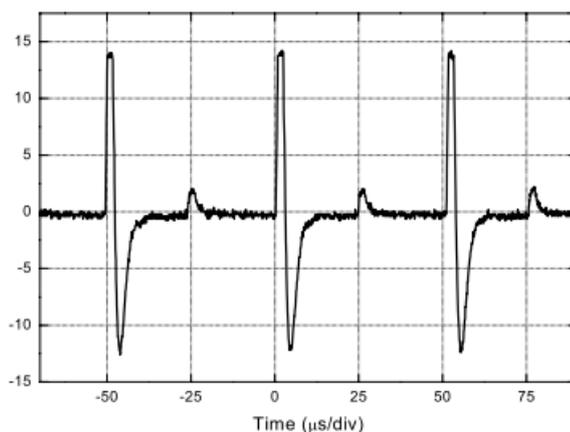


Рисунок 11 – Форма сигнала с драйвера.

В прототипе испытательного модулятора номинальный ток переключателя составляет 2,5 А. В качестве испытательной нагрузки используется сопротивление 20 кОм. Из экспериментов был получен импульсный выходной сигнал с плоской вершиной при 20 кВ и частоте повторения 20 кГц. Время нарастания выходного напряжения составляет около 200 нс. Формы выходного напряжения показаны на рисунке 12 и рисунке 13. Частота повторяющихся разрядов равна частоте зарядки. Благодаря характеристикам твердотельных переключателей, частота следования, ширина импульса и амплитуда выходного напряжения могут регулироваться соответствующим образом. В отличие от режима работы обычной импульсной системы питания, режим зарядки и разрядки в этой системе может работать одновременно, что позволяет ей работать с очень высокой частотой повторения и высокой средней мощностью.

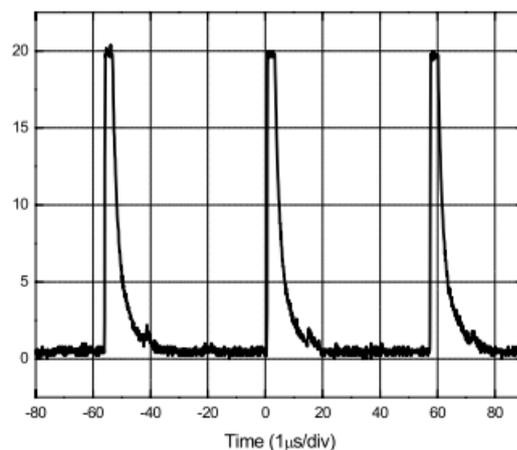


Рисунок 12 – Выходной сигнал на частоте 20 кГц.

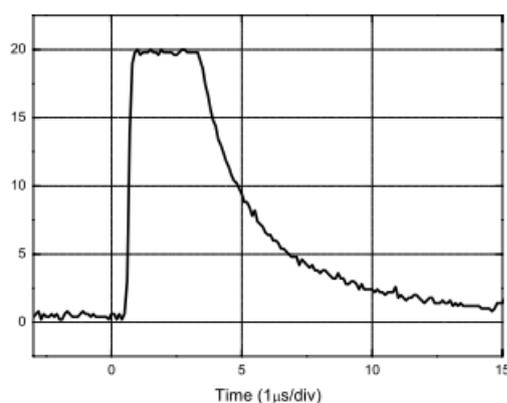


Рисунок 13 – Одиночный выходной сигнал.

Авторы данной работы [4] обращаются к проектированию компактного генератора Маркса, разработанного с использованием мощных полевых МОП-транзисторов в качестве переключателей. Цель исследователей – разработка повторяющегося, компактного, эффективного генератора коротких импульсов высокого напряжения для промышленного применения. Первоначальные испытания проводились с использованием 16 переключателей с выходной мощностью ~ 10 кВ и длительностью импульса ~ 250 нс при частоте повторения ~ 400 Гц.

Мощные МОП-транзисторы способны к высокоскоростному переключению, однако имеющиеся в продаже устройства MOSFET имеют относительно низкое рабочее напряжение (≤ 1 кВ). Для приложений, требующих более высокого рабочего напряжения, MOSFET должны использоваться в стеке из нескольких устройств.

Альтернативным подходом является схема генератора Маркса, показанная на рисунке 14. По сравнению с простой укладкой коммутационных

устройств схема Маркса имеет следующие преимущества: 1) Выходное напряжение умножается на зарядное напряжение на количество конденсаторов. 2) Снижается риск повреждения устройства из-за перенапряжения. 3) Схема драйвера каждого устройства повышается до высокого потенциала только временно (во время импульсного выхода), что упрощает электропитание и электрическую изоляцию для схемы драйвера.

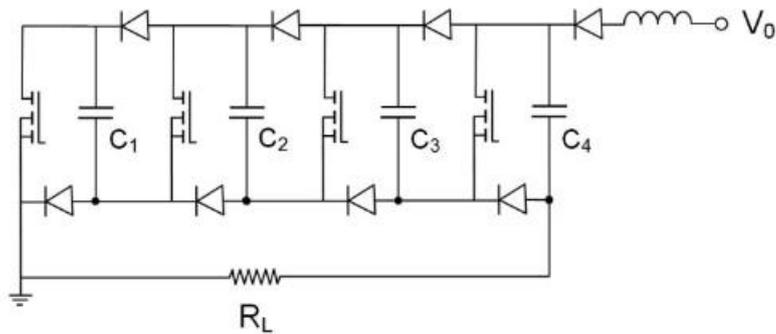


Рисунок 14 – Альтернативная схема генератора Маркса.

В данном эксперименте используется мощное устройство MOSFET Toshiba 2SK2611, показанное на рисунке 15. Он рассчитан на 900 В и 9 А (постоянный ток). Причиной выбора этого типа MOSFET является его популярность и низкая стоимость. Каждый коммутационный блок, состоящий из полевого МОП-транзистора и его схемы управления, выполнен по единой конструкции, обеспечивающей две важные функции: оптическое управление и электрическую изоляцию. Принципиальная схема показана на рисунке 16. Высокоскоростная ИС драйвера (Мах4429) используется для управления МОП-транзистором, а оптический модуль (HFBR-2412TZ) используется для преобразования оптического сигнала для электрического входа в ИС драйвера. Электроэнергия, необходимая для этих устройств, обеспечивается изолированными преобразователями постоянного тока. На рисунке 17 показана коммутационная ячейка.

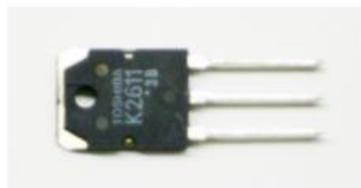


Рисунок 15 – МОП транзистор 2SK2611.

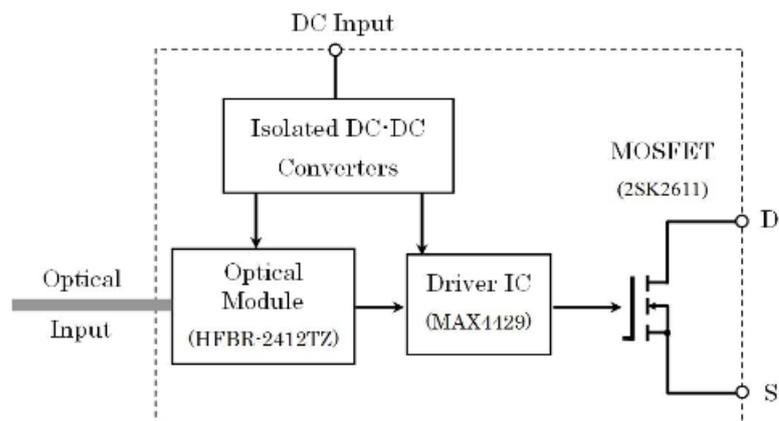


Рисунок 16 – Блок диаграмма цепи.

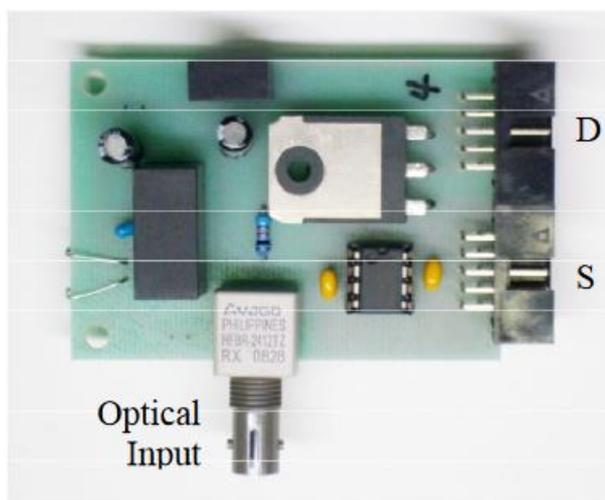


Рисунок 17 – Коммутационная ячейка.

Генератор Маркса с использованием 16 блоков переключения MOSFET показан на рисунке 18. Его размер составляет около 20 см×18 см×8 см. На рисунке не показаны генератор сигналов управления и оптические волокна.

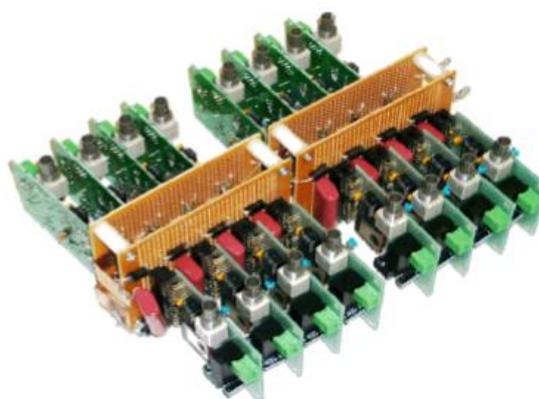


Рисунок 18 – Генератор Маркса на 16 блоках МОП-транзисторов.

На рисунке 19 показана форма выходного сигнала, полученная с помощью 16-ступенчатого генератора Маркса, показанного на рисунке 18, для приложенного напряжения 660 В. Пиковое выходное напряжение достигло 10 кВ со временем нарастания ~ 30 нс. Нагрузка представляет собой резистор с низкой индуктивностью 1 кОм.

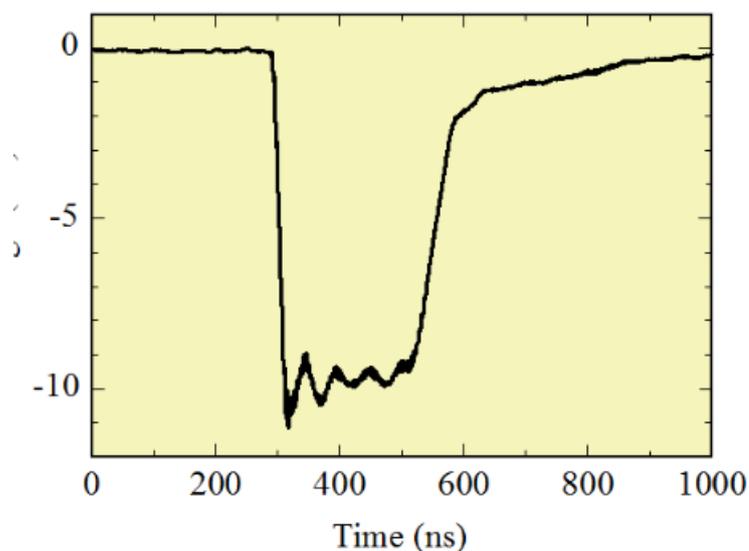


Рисунок 19 – Форма выходного сигнала.

Более подробный анализ производительности был выполнен для 8-ступенчатого генератора Маркса. На рисунке 20 показаны осциллограммы напряжения затвора MOSFET. Выходные сигналы 8 схем драйвера MOSFET были нанесены вместе с сигналами общего управляющего сигнала перед передачей через оптическое волокно. Исходный управляющий сигнал, который генерируется с помощью высокоскоростной логической ИС, имеет длительность импульса ~ 200 нс и время нарастания и спада ~ 5 нс. Этот управляющий сигнал преобразуется в оптический импульс и передается на каждый коммутационный блок через оптическое волокно. Затем он усиливается микросхемой драйвера и подается на затвор полевого транзистора.

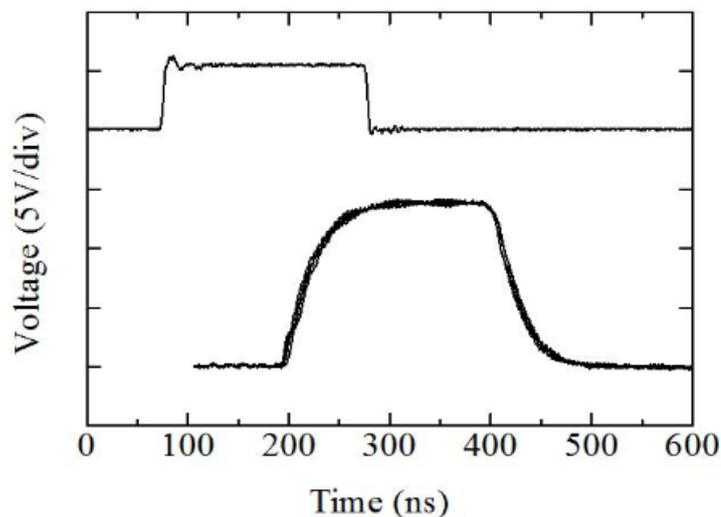


Рисунок 20 – Контрольный сигнал (сверху) и сигнал отпираания затвора (снизу).

Авторы статьи [5] выделяют в генераторе четыре части: мощность зарядки постоянного тока, твердотельная схема Маркса с использованием транзисторов с полевым эффектом металл-оксид-полупроводник, схема управления с использованием программируемой пользователем матрицы затворов и нагрузка. Данный генератор способен генерировать повторяющиеся импульсы с напряжением до 8 кВ, шириной импульса 200–1000 нс, временем нарастания 35 нс и частотой повторения 1–1000 Гц при различных резистивных нагрузках и входном напряжении постоянного тока 1 кВ. Полупроводниковая конструкция делает генератор компактным и надежным. Первоначальные эксперименты проводились исследователями для проверки работоспособности предлагаемого генератора.

Системная структура импульсного генератора

Полностью твердотельный генератор наносекундных импульсов состоит из четырех частей функционально различных модуляций: мощность зарядки постоянного тока, твердотельная схема Маркса, схема управления с использованием FPGA и нагрузка. Схема показана на рисунке 21. Когда схема управления FPGA получает команду от главного компьютера, она генерирует два управляющих сигнала. Одним из них является импульсный сигнал

управления в цепи Маркса, а другой отправляется на мощность зарядки постоянного тока. В это время параметры выходных импульсов измеряются, преобразуются и передаются в схему управления FPGA для управления с обратной связью в реальном времени.

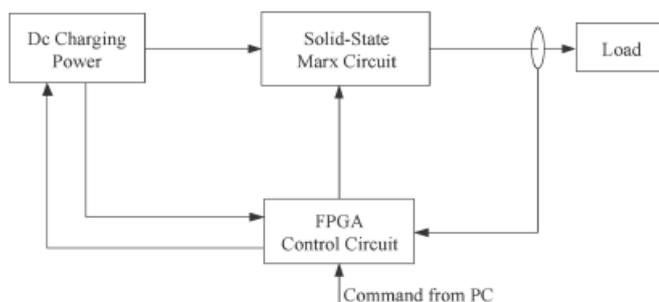


Рисунок 21 – Блок схема генератора Маркса.

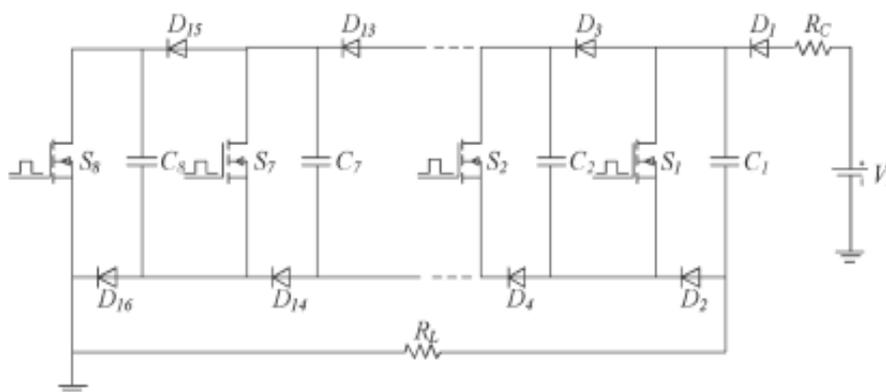


Рисунок 22 – Схема генератора Маркса

А: Зарядка постоянным током

В идеальном случае необходимая входная мощность P_i точно равна средней выходной мощности P_o . Итак, P_i соответствует следующему уравнению:

$$P_i = P_o = f \cdot \int V_o(t) I_o(t) dt$$

где f – частота следования импульсов, а $V_o(t)$ и $I_o(t)$ – напряжение и ток, подаваемые на нагрузку, соответственно. На самом деле происходит рассеяние

мощности, вызванное устройствами внутри генератора. Для учета размеров, стоимости и технических характеристик используется программируемая мощность зарядки постоянного тока SLM 3P300 (SpellmanCorporation) с выходной мощностью 300 Вт.

Б: Схема твердотельного генератора Маркса

Принцип. Предложенная схема Маркса для подачи повторяющихся высоковольтных выходных импульсов на нагрузку представлена на рисунке 22. Схема включает в себя восемь ступеней; каждая ступень состоит из конденсатора, двух диодов и полевого МОП-транзистора. По сравнению с традиционным генератором Маркса, резисторы для зарядки и разрядники для разрядки заменены на диоды и полевые МОП-транзисторы в твердотельной схеме Маркса. Параметры выходных импульсов контролируются твердотельными переключателями. Одна очевидная заслуга этой конфигурации заключается в том, что коммутаторы не будут повреждены неуправляемыми событиями.

Резистор R_c и диоды D1-D16 для зарядки конденсаторов в режиме зарядки и для целей изоляции в режиме разряда принимаются в этой схеме. На рисунке 23 показаны режимы работы и формы сигнала схемы, где все диоды и устройства считаются идеальными. В течение периода зарядки S1-S8 находятся в выключенном состоянии, D1-D16 действуют как тракт с низким импедансом, а S1-S8 заряжаются параллельно от мощности зарядки постоянного тока через RC.

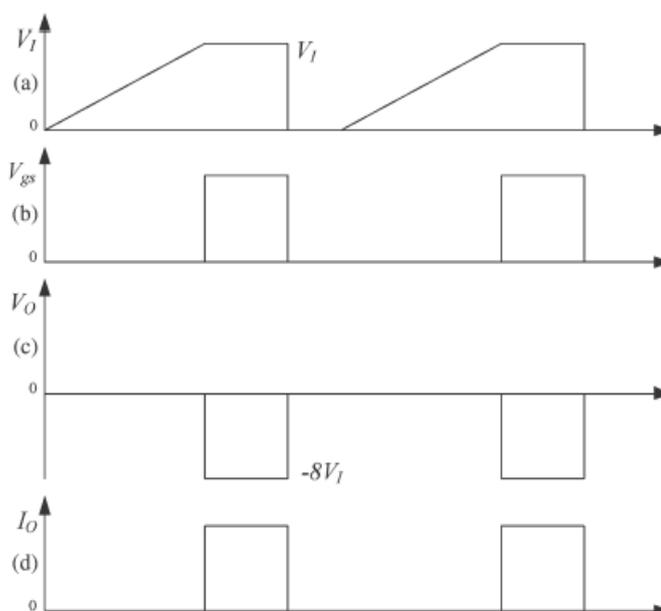


Рисунок 23 – Осциллограммы напряжения ГИН резистивную нагрузку а) входное напряжение U_1 б) напряжения затвора с полевого транзистора U_{gs} в) напряжения нагрузки U_0 д) Ток I_0

В течение периода разрядки конденсаторы заряжаются до требуемого входного напряжения V_I , а затем одновременно включаются S1-S8, D1-D16 обеспечивают высокоимпедансную изоляцию. C1-C8 соединяются последовательно, и напряжение U_0 , приложенное к нагрузке, пропорционально количеству последовательно соединенных конденсаторов ($- 8 U_I$). В это время РС становится изолятором между зарядной мощностью постоянного тока и цепью Маркса. Предлагаемая схема Маркса имеет модульную конструкцию. Каждая ступень построена на отдельной печатной плате, а затем уложена вертикально на материнскую плату. Это сделано для того, чтобы сделать его более компактным и модульным.

Драйвер MOSFET. Драйвер MOSFET необходим для зарядки емкости затвора MOSFET и быстрой ее разрядки, чтобы уменьшить потери при переключении и повысить эффективность.. Схема возбуждения затвора должна быстро разряжать емкость во время выключения, и поэтому она должна иметь очень низкий импеданс поглотителя. Эти условия гарантируют, что время

включения и выключения будет очень коротким, а потери при переключении будут, следовательно, небольшими.

В статье исследователи [6] описывают импульсное электрическое поле (PEF), являющееся важным методом обработки пищевых продуктов для инактивации микроорганизмов. Данный PEF является альтернативным методом, по сравнению с обычными термическими методами в пищевой стерилизации. Роль PEF заключается в поддержании вкуса пищевых продуктов в небольшом диапазоне температур для того, чтобы найти свежее качество питательных продуктов. Новая топология для силового электронного преобразователя с конфигурацией $Marx$ на основе PEF была предложена и разработана авторами статьи [6] с использованием MATLAB / Simulink. Результаты работы по моделированию проанализированы исследователями с целью определения работоспособности контуров при выполнении требуемых спецификаций для эффективной стерилизации жидких пищевых продуктов.

Технология PEF для инактивации микроорганизмов является одной из перспективных нетепловых энергоэффективных альтернатив и заменой традиционных методов термической пастеризации. Это работает благодаря применению PEF высокой интенсивности на образце пищи.

Выбрана базовая топология системы стерилизации жидких пищевых продуктов, как показано на рисунке 24. Полная принципиальная схема показана на рисунке 25. Эта система состоит из источника переменного напряжения, неконтролируемого выпрямителя с полным мостом, использующего диодную конфигурацию, повышающего преобразователя с помощью переключателей MOSFET (выбор переключателей MOSFET выбран благодаря хорошей производительности для быстрого переключения) и генератор Маркса, который также использует MOSFET в качестве переключателей с активной нагрузкой.

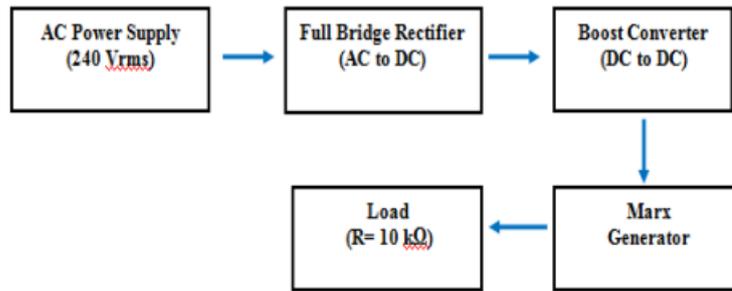


Рисунок 24 – Блок диаграмма топологии стерилизации пищевых продуктов.

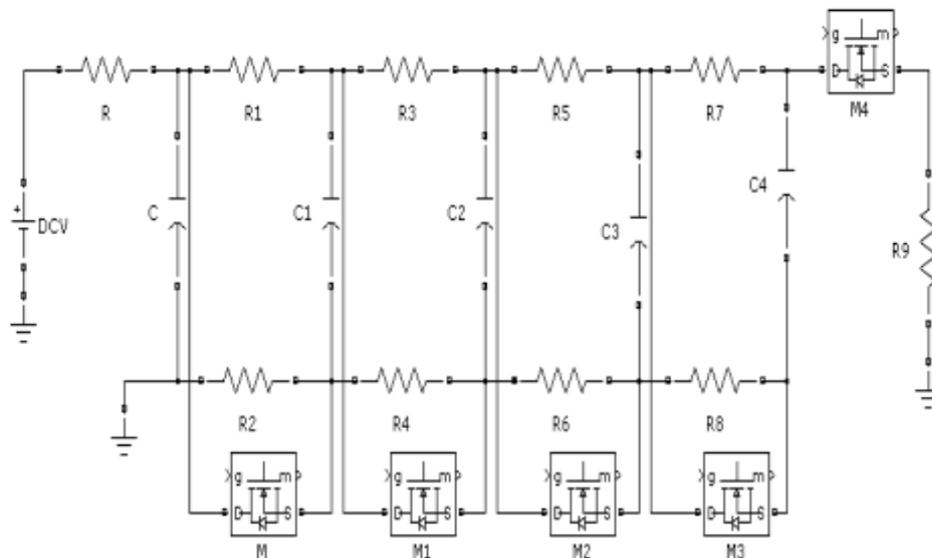


Рисунок 25 – Схема генератора Маркса в Simulink.

Рисунок 26 изображает конечный результат системы стерилизации жидких пищевых продуктов, которая состоит из выходного напряжения, выходного тока и выходной мощности. Выходное напряжение 6 кВ было сгенерировано системой, как требуется для инактивации микроорганизмов в жидкой пище. Кроме того, были получены низкий выходной ток и мощность, которые составляют 0,6 А и 3,3 кВт соответственно. Импульс генерируется с частотой повторения 50 Гц (20 миллисекунд).

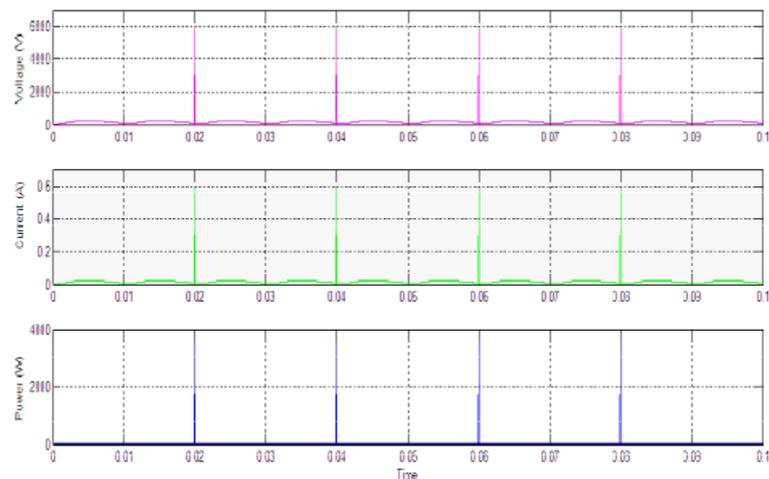


Рисунок 26 – Осциллограммы напряжения, тока и мощности.

Более четкое изображение ширины импульсов при 1 мкс показано на рисунке 27. Кроме того, благодаря преимуществу простой системы с легко контролируемыми параметрами, был получен униполярный EDP (импульс экспоненциального затухания) для целей электропорации.

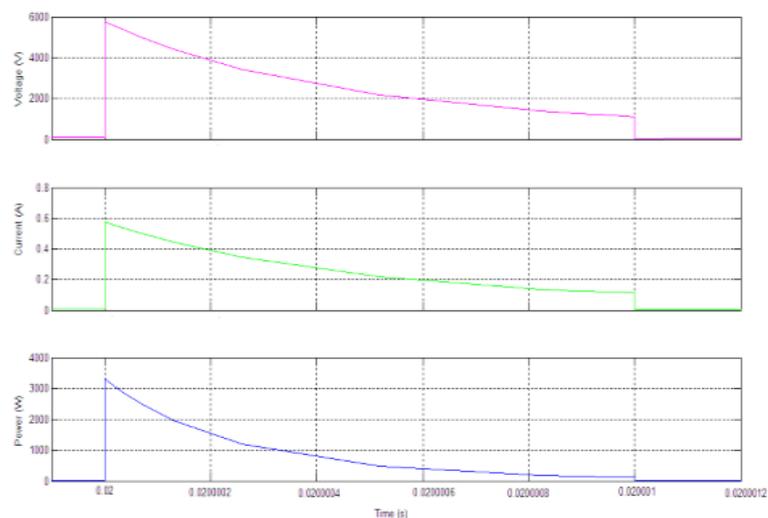


Рисунок 27 – Осциллограммы импульсов при 1 мкс.

Исследователи [7] описывают проектирование и разработку Генератора Маркса на основе полупроводников с высокой частотой повторения для системы с искровым разрядником. Эта система позволяет изучать явления скорости пробоя для различных материалов и поверхностей, РЧ-структур для предлагаемого Компактного линейного коллайдера (CLIC). Схема Маркса

основана на новых SiC-полевых МОП-транзисторах (полевых транзисторах на основе оксидов металлов и полупроводников) с 15 компактными каскадами, способными работать с нагрузками емкостного типа при нормальной работе, а также в режиме короткого замыкания при пониженной частоте повторения импульсов. В статье представлены экспериментальные испытания с фиктивными емкостями от 150 до 650 пФ, а также с реальной системой искровых разрядников: данные испытания и измерения подтверждают эффективность генератора Маркса для генерации импульсов с длительностью импульса от 200 нс до 100 мкс, до 10 кВ, с частотами до 1 кГц и время нарастания импульсного напряжения менее 100 нс при емкости нагрузки не более 150 пФ. Кроме того, представлены первые результаты пробоя, подтверждающие работу генератора Маркса во время пробоя.

Для генерации прямоугольных импульсов высокого напряжения с повторяющимися импульсами в различных условиях нагрузки целесообразно выбрать генератор Маркса на основе полупроводников. По сути, улучшения в технологии дискретных полупроводников привели к появлению нового поколения дискретных полупроводниковых устройств с переключающими свойствами, очень близкими к идеальному переключателю, что делает возможным использование традиционных топологий, но с улучшенными характеристиками. Одним из примеров этого являются новые SiC-переключающие МОП-транзисторы с более низкими потерями во включенном состоянии для работы в кВ-диапазоне, разумной импульсной способностью тока и высокой скоростью переключения. Упрощенная схема генератора Маркса показана на рисунке 28, где каждый каскад содержит накопительный конденсатор C_i 330 нФ, два набора диодов Da_i и Db_i , эталон BYG23T-M3 и полумост с двумя переключателями SiC MOSFETS, эталон C2M0280120D : МОП-транзисторы, помеченные Tr_i («i» на схеме - целое число), в верхней части полумоста прикладывают импульсы к нагрузке, а нижние МОП-транзисторы, обозначенные « T_{ci} », предназначены для зарядки конденсаторов C_i между импульсами и для разрядки нагрузочные емкости после импульса [4].

Из-за топологии полумоста переключателя между отключением переключателя и другим включением должно быть мертвое время, которое из-за емкостного характера нагрузки будет устанавливать минимальную ширину импульса, равную мертвому времени, По соображениям безопасности в триггерном сигнале переключателей T_{ri} и T_{ci} было введено время простоя 100 нс.

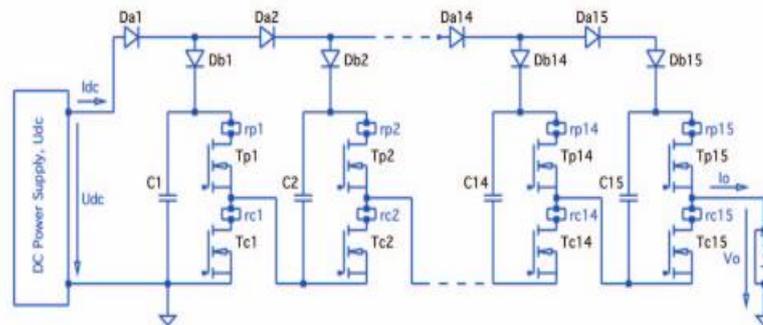


Рисунок 28 – Схема генератора Маркса.

Сначала генератор был подключен к емкости 150 пФ, результаты показаны на рисунке 29 с импульсом 10 кВ, 500 нс, 10 Гц. Наблюдаемые 5–95% подъема и спада составляют около 80 нс.

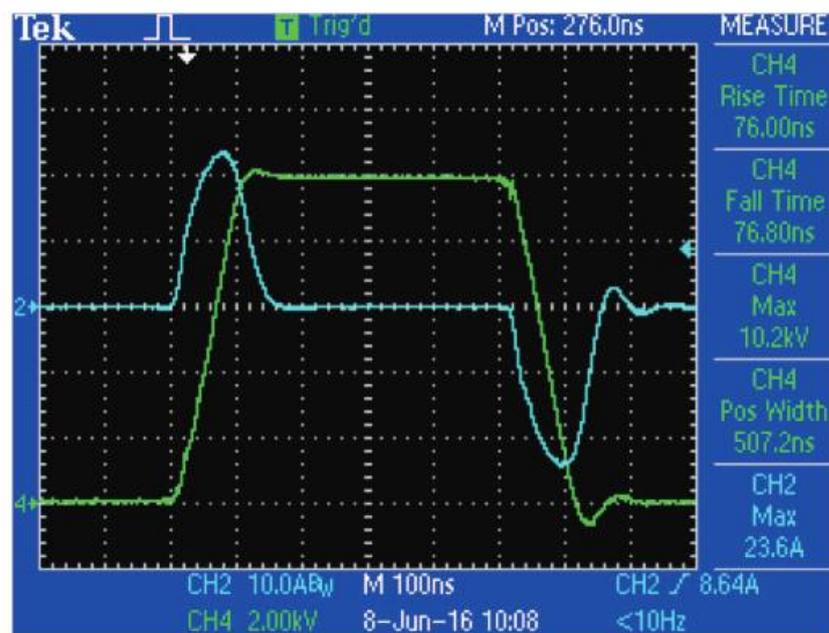


Рисунок 29 – Осциллограмма напряжения при подключении емкость 150

пФ

Чтобы подтвердить отсутствие перерегулирования, на рисунке 30 и рисунке 31 показаны импульсы выходного напряжения, соответственно, времена нарастания и спада, с амплитудой импульса 1200 В, с использованием двух разных калиброванных зондов для нагрузки 150 пФ. Фактически, результат на рисунке 30 подтверждает теоретическую оценку того, что нет превышения для 150 пФ при использовании последовательного сопротивления 99 Ом.

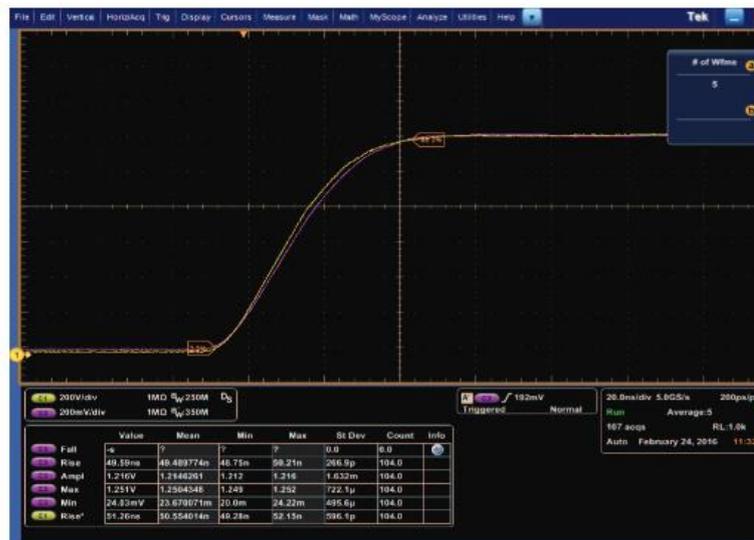


Рисунок 30 – Импульс выходного напряжения.

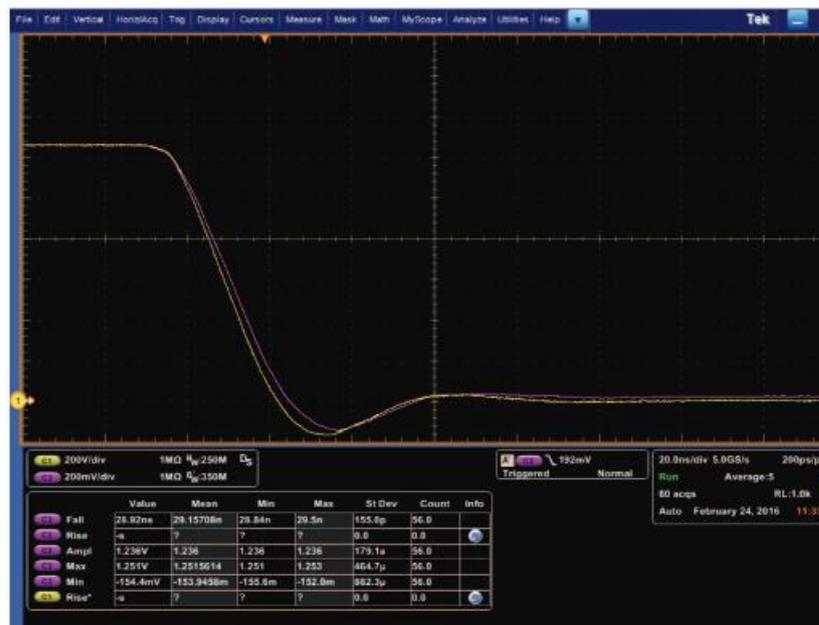


Рисунок 31 – Импульс выходного напряжения на 1200 В.

Принимая во внимание тот же протокол импульсов 10 кВ, на рисунке 29 показаны результаты увеличения емкости нагрузки со 150 пФ до 600 пФ, где наиболее очевидным различием, по сравнению с результатом 150 пФ, на рисунке 29 является увеличение на 5% до 95% времени нарастания и спада от 80 нс до, примерно, 200 нс, а соответствующие пиковые токи до, приблизительно, 32А.

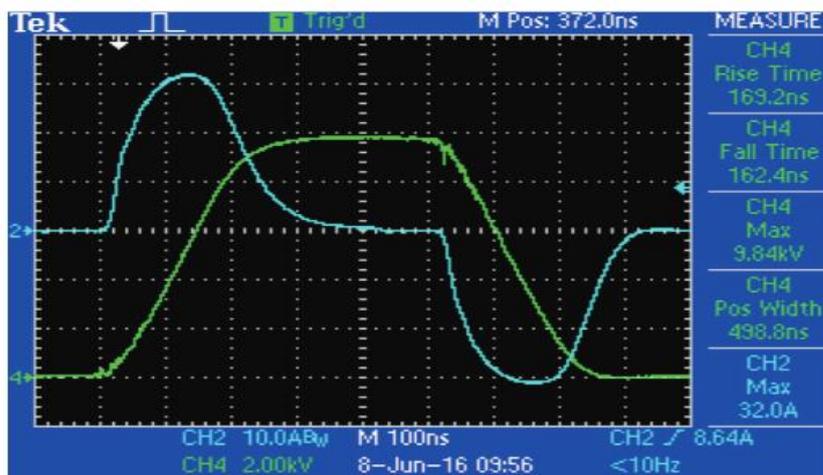


Рисунок 32 – Выходной импульс при нагрузке 600 пФ.

На рисунке 33 при входном напряжении 400 В можно видеть падение напряжения на первом конденсаторе Маркса во время импульса и ток на коротком замыкании, который достиг приблизительно 50 А, а затем уменьшается из-за падения на напряжение конденсаторов Маркса.



Рисунок 33 – Осциллограммы напряжения на входе при 400 В.

По сравнению с рисунком 33, на рисунке 34 входное напряжение было 700 В, но максимальный ток примерно такой же, 56 А. Это означает, что внутреннее динамическое поведение Маркса ограничивает выходной ток.



Рисунок 34 – Осциллограммы напряжения на входе при 700 В.

Авторы статьи [8] акцентируют внимание на ограниченном применении в настоящее время МОП-транзисторов и БТИЗ-транзисторов в приложениях с импульсивной мощностью высокого тока. Это связано с их более низкой плотностью мощности и сложностью, имеющей отношение к разработке массива этих устройств. В данной статье предлагается компактный модуль 600 В, 1 кА, использующий мощные полевые МОП-транзисторы со специально разработанными платами драйверов МОП-транзисторов и 8 параллельных полевых МОП-транзисторов. Предложенная установка предлагает более высокую удельную мощность, используя минимальное количество компонентов и сверхбыстрое повторное переключение. Экспериментальные результаты демонстрируют длительность импульса 100 нс и время переключения <10 нс при работе в режиме одиночной съемки и в режиме серийной съемки.

Импульсные системы питания могут быть усовершенствованы для различных спецификаций. Этот модуль LTD был спроектирован с начальной

точкой проекции прототипа системы 20 кВ, 1 кА. На рисунке 35 показаны характеристики модуля:

Table 1: Specifications for LTD module

Supply voltage V_D	600V- 1kV
Load current I_L	500A - 1kA
Pulse widths	60ns-100ns
Repetition rate	100KHz – 1MHz Burst
Rise and fall times	< 10 ns

Рисунок 35 – Характеристики LTD модуля.

На рисунке 36 показан предварительный дизайн платы водителя питания mosfet. Плата состоит из схемы генератора импульсов и усовершенствованной схемы драйвера MOSFET, управляющей четырьмя параллельно соединенными MOSFET.

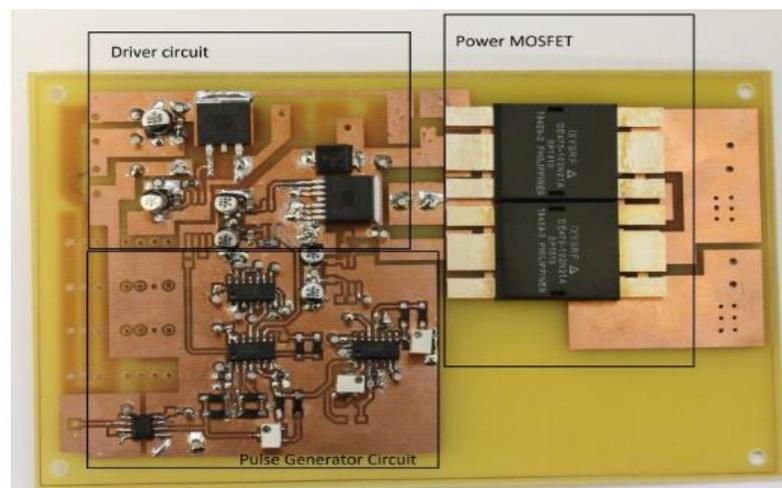


Рисунок 36 – Изображение макетной платы генератора.

Улучшенный драйвер ворот mosfet был специально предназначен для этого приложения. На рисунке 37 показана принципиальная схема схемы драйвера затвора. Основанный на модифицированной топологии наддува, этот драйвер использует индуктор в качестве источника высокой энергии для управления полевыми МОП-транзисторами. Способность драйвера генерировать высокие токи делает его идеальным для синхронного переключения нескольких усилителей.

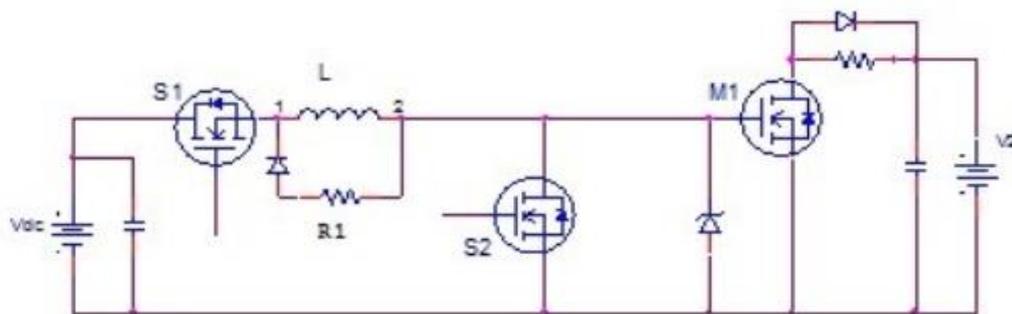


Рисунок 37 – Принципиальная схема драйвера.

Эксперимент был настроен на однократный и многоимпульсный режим. Напряжения нагрузки измерялись с использованием зонда Tektronix TPP0850 2,5 кВ 800 МГц и осциллографа с полосой пропускания 1 ГГц Tektronix MSO5104. Длина провода заземления зонда была минимальной, чтобы уменьшить влияние добавленных паразитов. На рисунке 38 показаны формы напряжения на затворе и соответствующее ему напряжение сток-исток. Время падения и нарастания AVDS 4,8 нс и 8,5 соответственно было зафиксировано при испытательном напряжении 400 В. Измерения идентичны для обеих пар устройств на одной плате. На рисунке 39 показаны формы сигналов напряжения сток-исток для двух плат. Видно, что два импульса синхронизированы с незначительными задержками, вызванными несоответствием длин проводов, подключенных к нагрузке. Задержка была измерена примерно до 1 нс. Однако эта задержка может быть скомпенсирована с использованием схемы управления синхронизацией. Модуль был протестирован при 600 Вв режиме одиночного выстрела. На рисунке 40 показана форма волны напряжения нагрузки для одиночной операции. Время нарастания напряжения $\sim 4,8$ нс и время спада $\sim 9,6$ нс были измерены. Также видно, что пиковое напряжение возрастает до 550 В при напряжении питания 600 В. Используя закон Ома, ток нагрузки можно рассчитать примерно на 585 А. Падение напряжения на восьми полевых МОП-транзисторах составляет 50 В. Следовательно, сопротивление устройств во включенном состоянии составляет $\sim 0,085$ Ом.

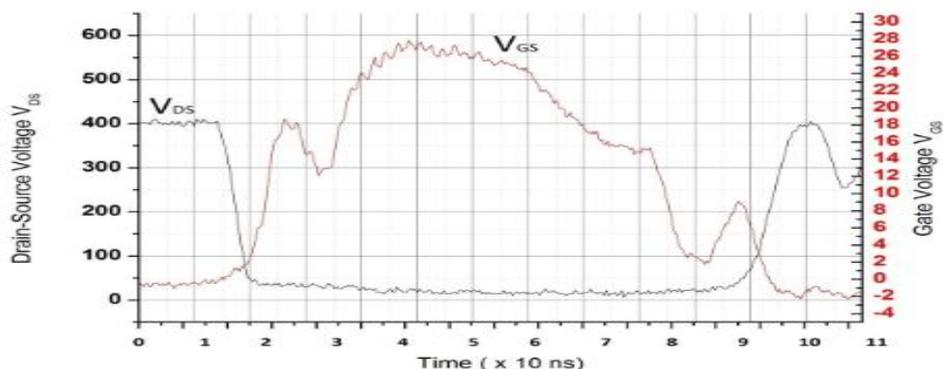


Рисунок 38 – Осциллограммы напряжения на затворе, стоке-истоке при 400 В

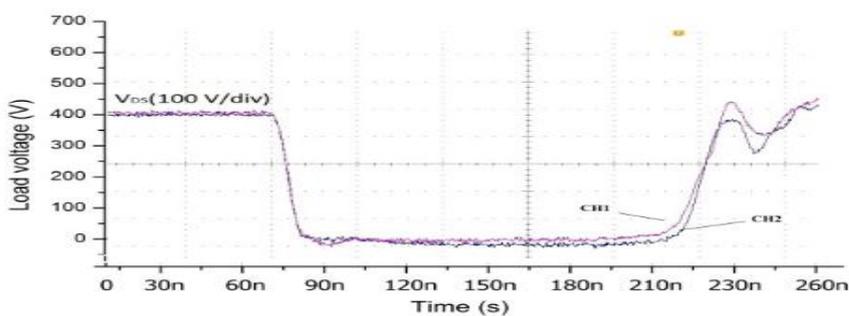


Рисунок 39 – Осциллограммы напряжения для двух плат.

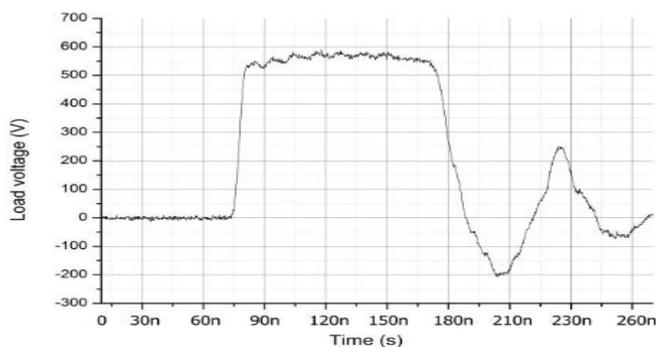


Рисунок 40 – Форма волны напряжения нагрузки для одиночной операции.

Авторы статьи [9] описывают эксперименты по электропорации микроводорослей с помощью прямоугольных импульсов с длительностью импульса 20 ... 100 нс и регулируемой амплитудой до 5 кВ. Импульсы доставляются кабельным генератором импульсов. Быстрое переключение уложенных полевых МОП-транзисторов заменяет ранее использовавшийся

искровой разрядник, чтобы обеспечить более точное управление моментом переключения и амплитудой. Коммутатор состоит из отдельных каскадов, которые рассчитаны на рабочее напряжение 800 В на коммутаторе и максимальное напряжение до 1 кВ. Каждый каскад включает в себя два полевых МОП-транзистора в параллельной конфигурации для улучшения возможностей тока, схемы управления и локального изолированного источника питания. Чтобы предотвратить условия перенапряжения для отдельных каскадов из-за задержки переключения, очень важна хорошая синхронизация ступеней. Следовательно, используется быстрорастущий триггерный сигнал, который распространяется на каскады с помощью импульсных трансформаторов. В документе описана настройка и тестирование коммутатора.

На рисунке 41 показана фотография стека. Каждая ступень состоит из двух полевых МОП-транзисторов DE475-102N21A в параллельной конфигурации, чтобы увеличить возможности переключения тока. МОП-транзисторы управляются драйвером затвора DEIC420. Триггерный сигнал распределяется по ступеням посредством индуктивной связи. Высоковольтный кабель обеспечивает необходимую изоляцию к потенциалу земли. Он подается в петлю через катушку без сердечника на каждой ступени. Главное триггерное устройство подает триггерный сигнал со временем нарастания напряжения приблизительно 3 нс в контур триггера. Повышение тока в контуре триггера вызывает индуцированное напряжение в окружающих катушках триггера так же, как и в случае с В-зондом. Чтобы адаптировать уровень напряжения к электрической схеме, напряжение ограничивается быстрыми диодами для заземления и напряжения питания. Триггерный импульс имеет длительность приблизительно 10 нс, но мощные полевые МОП-транзисторы остаются включенными в течение интервала времени приблизительно 10 мкс с помощью локального таймера на каждой ступени, которого достаточно для полной разрядки линии формирования импульса. Дополнительная задержка позволяет согласовать время переключения ступеней таким образом, чтобы все стековые

МОП-транзисторы переключались одновременно. Задержка переключения встроенного драйвера затвора DEIC420 зависима от температуры. Следовательно, все драйверы затвора поддерживаются при повышенной температуре 45 °С с помощью системы отопления. Система нагрева состоит из двух полевых МОП-транзисторов на каждой стороне каждого затвора, двух резисторов NTC и схемы управления с обратной связью для управления током через полевые МОП-транзисторы. Вспомогательная энергия, необходимая для схемы привода затвора и системы отопления, передается на каждую ступень с помощью трансформаторов с ферритовыми сердечниками. Петля высоковольтного кабеля служит первичной обмоткой для всех трансформаторов. Источник тока подает первичный переменный ток $I_{eff} = 7$ А на частоте 100 кГц. На рисунке 42 показана мощность, подаваемая на источник переменного тока, и температура одного драйвера затвора с течением времени. Потребность в энергии уменьшается, поскольку температура драйвера достигает своего стационарного значения. Последовательное соединение ступеней было установлено с помощью металлических распорок, которые соединяют источники полевых МОП-транзисторов одной ступени с двумя сливами полевых МОП-транзисторов предыдущей ступени. Из-за скин-эффекта ток течет только внутри поверхностного слоя. Следовательно, длинная и плоская конструкция проставок способствует низкой индуктивности батареи. На рисунке 43 показана фотография проставок вместе с коаксиальным кабелем, подключенным к стеклу.

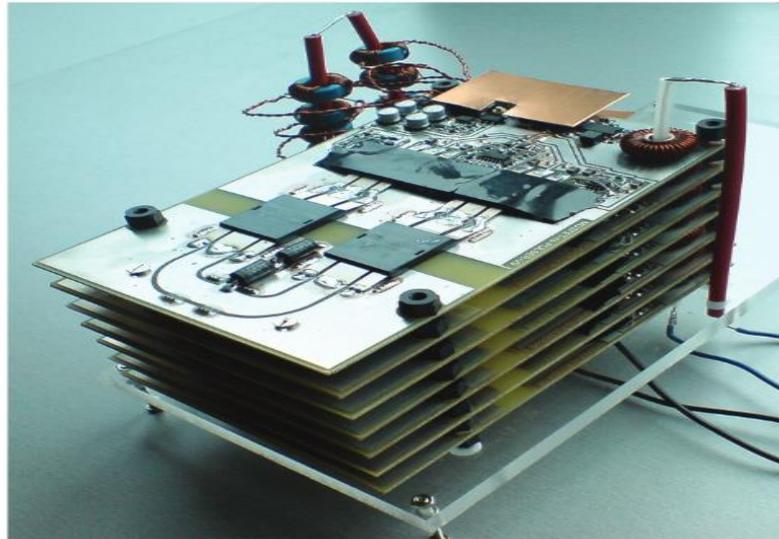


Рисунок 41 – Изображение стека.

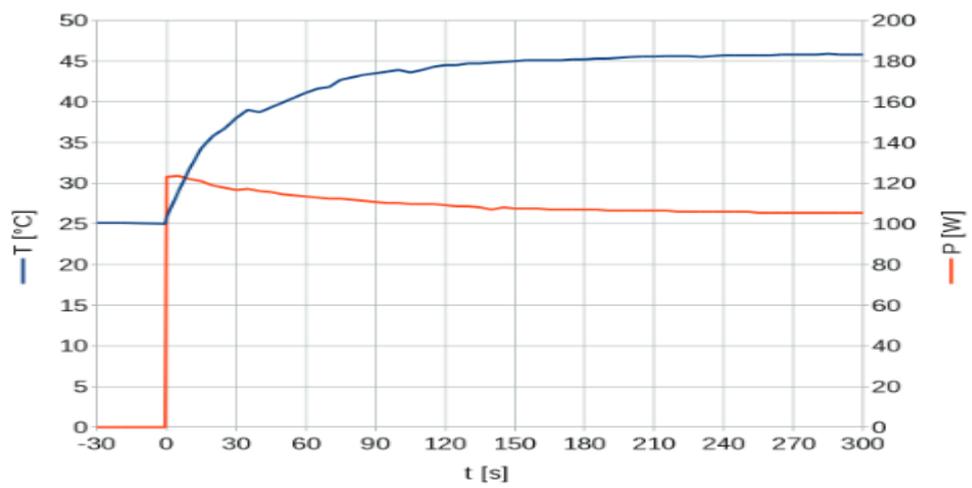


Рисунок 42 – Осциллограммы мощность и температуры от времени.

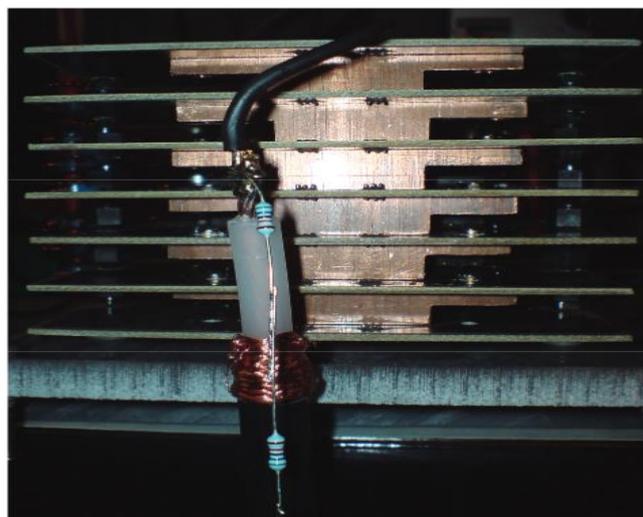


Рисунок 43 – Металлические проставки.

Стек из семи быстродействующих МОП-транзисторов был настроен и успешно протестирован. Общее напряжение до 5,6 кВ было подключено к нагрузке 50 Ом, что привело к току до 106 А при измеренном времени нарастания 6,4 нс.

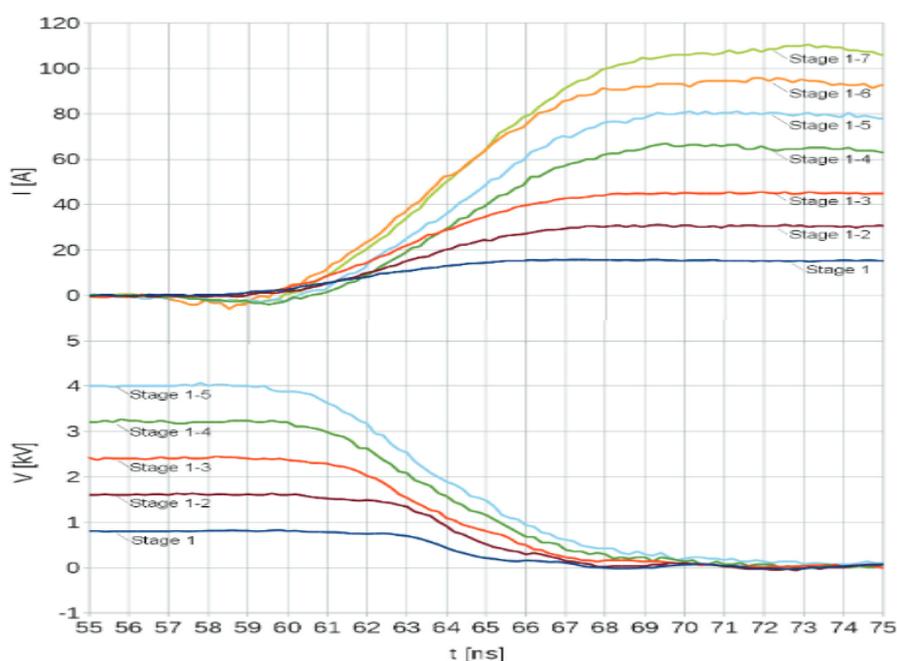


Рисунок 44 – Осциллограммы напряжения и тока через сложный MOSFET-переключатель в момент переключения.

Исследователи [10] доказывают, что биполярный импульс является более инновационным в лечении опухоли посредством устранения мышечных сокращений и эффекта для удаления неоднородной ткани. В этой статье предлагается новый тип модульного биполярного импульсного генератора на основе генератора Маркса с двойной зарядкой мощности. Авторы статьи акцентируют внимание на концепции данного генератора: она заключается в параллельной зарядке двух серий конденсаторов двумя источниками питания, а затем в последовательном соединении конденсаторов через твердотельные переключатели с различными стратегиями управления. Используя несколько быстрых твердотельных переключателей, конденсаторы могут быть соединены

последовательно с различной полярностью, так что импульс положительной или отрицательной полярности будет доставлен к нагрузке. Имитационные модели этого генератора были исследованы на платформе PSPICE, а лабораторный прототип был внедрен в лаборатории. Результаты моделирования и испытаний подтверждают работу предложенной топологии в различных режимах переключения. Разработка этого генератора импульсов обеспечивает аппаратную основу для исследования биологического эффекта без сокращения мышц при воздействии опухолей электрическим полем биполярного импульса.

Чтобы практически исследовать концепцию, семиступенчатая лабораторная установка прототипа реализована на основе топологии на рисунке 45. Главная схема высокочастотного составного генератора импульсов показана на рисунке 46. Модульная конструкция применяется к этому генератору. Каждая ступень состоит из накопительных конденсаторов (включая шесть конденсаторов емкостью 1 мкФ параллельно), двух MOSFET и двух схем возбуждения, которые управляются изолированным оптическим волокном, чтобы гарантировать синхронизацию MOSFET. Кроме того, последняя ступень этого генератора имеет только конденсатор, что может быть показано на схеме. Он может генерировать импульсы более высокого напряжения, увеличивая количество ступень.

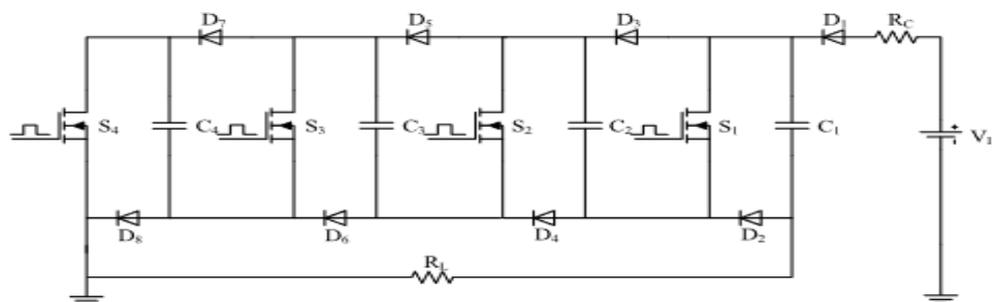


Рисунок 45 – Топология генератора Маркса.

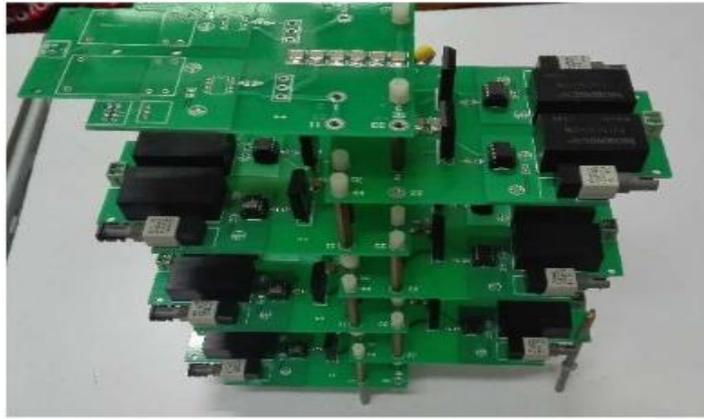


Рисунок 46 – Схема генератора.

В экспериментальном тесте зарядное напряжение постоянного тока составляет + 500 и 500 В. Таким образом, конденсаторы заряжаются до 500 В каждый. Затем в режиме разряда напряжение положительного импульса представляет собой сумму напряжений между C2, C3, C4, C5, C6 и C7, которая составляет около + 3 кВ. Напряжение отрицательного импульса составляет 3 кВ аналогичным образом. Как видно из типичной формы волны напряжения и формы тока на рисунке 47, эксперимент в этом месте исследования проводился с резистивной нагрузкой 200 Ом, а импульсное напряжение до ± 3 кВ, а импульсный ток ± 15 А. Ширина импульса составляет 400 нс, а время задержки между положительным импульсом и отрицательным импульсом составляет 2000 нс.

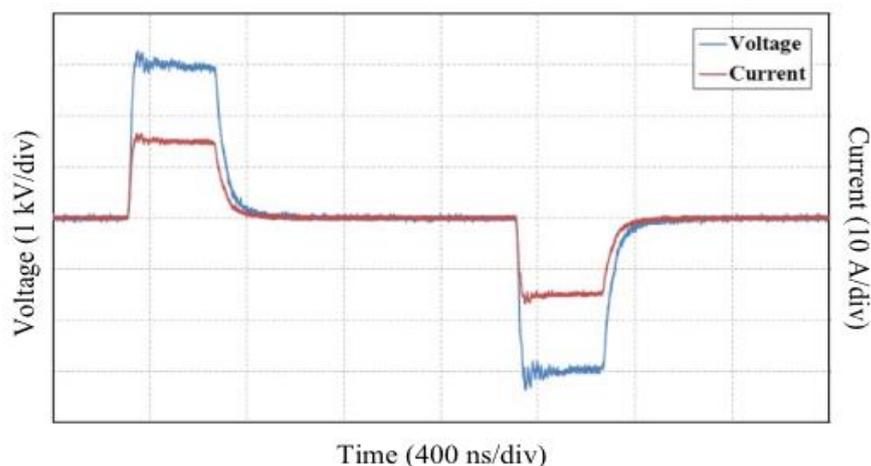


Рисунок 47 – Осциллограммы напряжения и тока.

Частично увеличенная форма напряжения и тока показана на рисунке 48, а время нарастания положительного и отрицательного импульсов на 10% - 90% составляет - 23 нс. На рисунке 49 показаны формы напряжения с различной шириной импульса на 200-омной нагрузке. Возможна длительность импульса в диапазоне от 100 до 1000 нс. С увеличением сопротивления нагрузки увеличивается время падения сигналов напряжения и тока, что видно на рисунке 50. Сопротивления нагрузки составляют 100, 500 и 1000. Время спада составляет более 300 нс, когда нагрузка равна 1000, но время спада практически постоянно. Частота повторения этого генератора составляет до 1 кГц, что проверено в эксперименте.

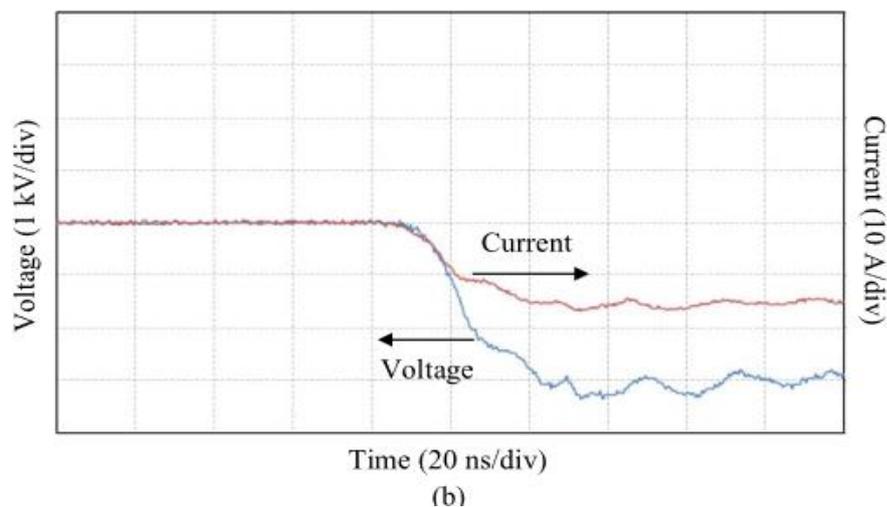


Рисунок 48 – Осциллограмма напряжения и тока.

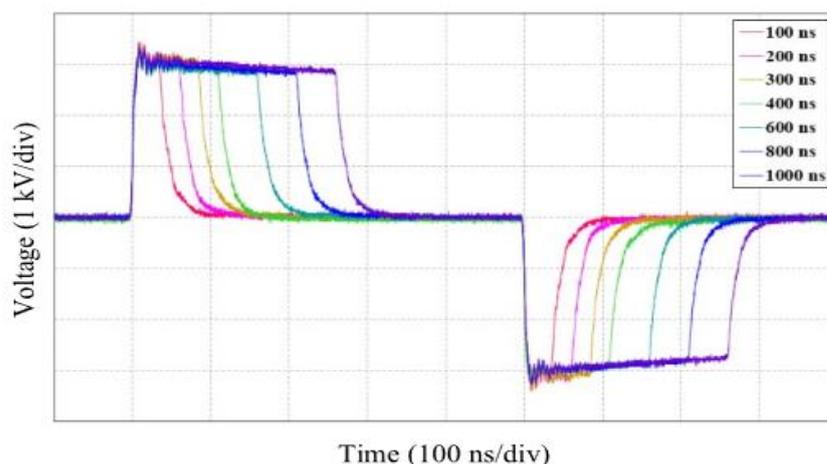


Рисунок 49 – Формы напряжения с разной шириной импульса.

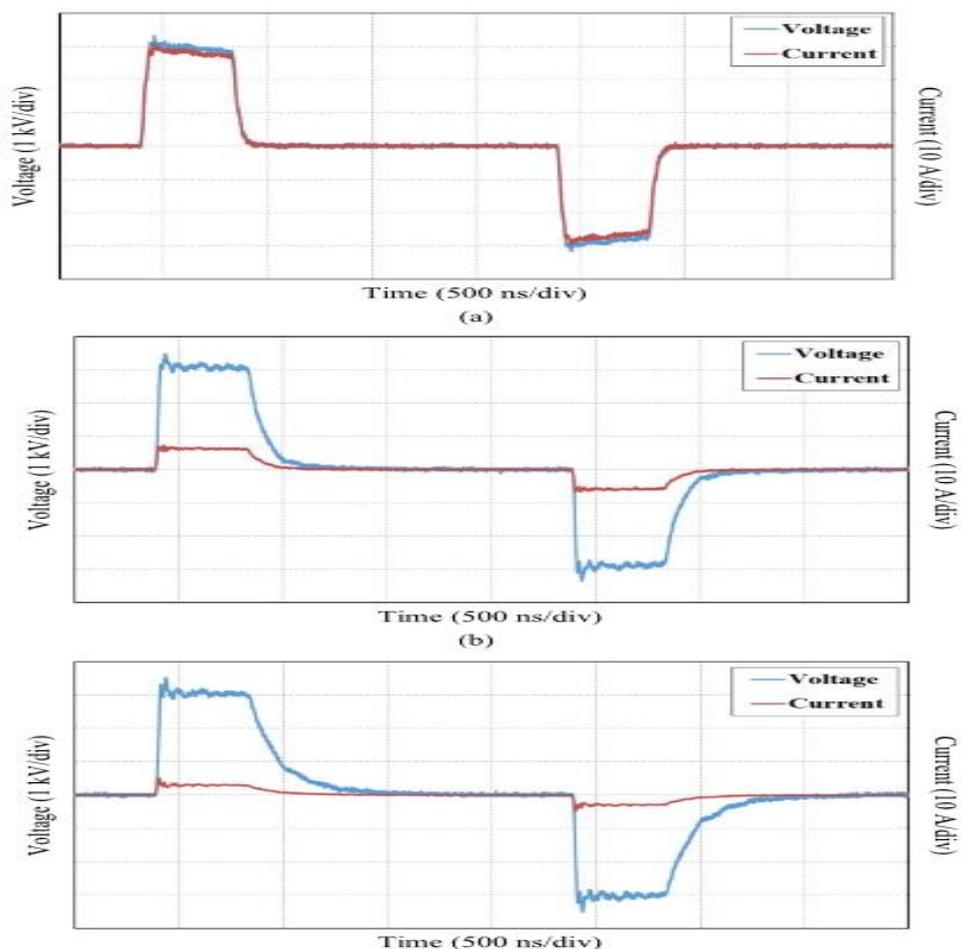


Рисунок 50 – Осциллограммы напряжения с увеличением нагрузки.

Вывод по разделу: Генератор импульсного напряжения является одним из основных устройств для проверки прочности изоляции, также его можно использовать для медицинских и производственных целей, таких как инактивация бактерий. В данных статьях указывается различное применение и различные топологии генераторов Маркса на твердотельных коммутаторах. В отличие от газовых разрядников, полупроводниковые транзисторы MOSFET занимают меньше места, у них меньший износ, и нет выделения ядовитого газа при разряде. Уровень напряжения в основном составляет от сотен до десятка киловольт, что и определяет сферу применения этих коммутаторов. В статье [3] представлена работа 22-ступенчатого тестового модулятора, построенного и успешно работающего при выходном напряжении 20 кВ с частотой повторения

20 кГц, временем нарастания 150 нс и длительностью импульса 3 мкс, который можно использовать в перспективе для испытаний. В статье [4] велась разработка мощного компактного генератора, в котором испытания проводились с использованием 16 переключателей с выходной мощностью ~ 10 кВ и длительностью импульса ~ 250 нс при частоте повторения ~ 400 Гц. Статья [5] демонстрирует генератор для биологического применения, который способен генерировать повторяющиеся импульсы с напряжением до 8 кВ, шириной импульса 200–1000 нс, временем нарастания 35 нс и частотой повторения 1–1000 Гц при различных резистивных нагрузках и входном напряжении постоянного тока 1 кВ. Статья [6] ведет разработки генератора для стерилизации жидкости и пищи с напряжением 6 кВ, током 0,6 А и мощностью 3,3 кВт соответственно. Статья [7] показывает генератор Маркса на основе полупроводников с высокой частотой повторения для системы с искровым разрядником для изучения скорости пробоя поверхностей, РЧ-структур для предлагаемого Компактного линейного коллайдера (CLIC) на емкости от 150 до 600 пФ в наносекундном диапазоне с напряжением 10 кВ. В статье [8] предлагается компактный модуль на 600 В и 1 кА, использующий мощные полевые МОП-транзисторы со специально разработанными платами драйверов МОП-транзисторов и 8 параллельных полевых МОП-транзисторов для испытаний. Авторы статьи [9] описывают эксперименты по электропорации микроводорослей с помощью прямоугольных импульсов с длительностью импульса 20-100 нс и регулируемой амплитудой до 5 кВ. Исследователи [10] доказывают, что биполярный пульс является более инновационным в лечении опухоли импульсным полем с параметрами генератора: импульсное напряжение до ± 3 кВ, а импульсный ток ± 15 А; ширина импульса 400 нс, а время задержки 2000 нс. Проанализировав эти статьи, можно сделать вывод о перспективности генератора Маркса для медицинских целей и отраслей промышленности, ведутся работы по увеличению параметров генератора, что делает исследования генератора на MOSFET транзисторах актуальными.

3. Расчет параметров генератора

Исходные данные:

- Длительность фронта $t_{\phi} = 80$ нс;
- Длительность импульса $t_{\text{в}} = 10$ мкс;
- Амплитуда выходных импульсов $U_{\text{исп}} = 1200$ В;
- Тип нагрузки: резистор сопротивлением 100 Ом;

3.1 Определение параметров нагрузки

В качестве нагрузки ГИНа выступает резистор сопротивлением 100 Ом.

Емкость нагрузки составляет паразитную емкость от резистора, подключаемого к осциллографу и равна 40 пФ.

3.2 Определение максимального значения коэффициента использования разрядной схемы и постоянных времени экспонент

Предельное значения коэффициента использования разрядной схемы находится в зависимости только от соотношения C_2 и C_1 . Коэффициент схемы можно выразить следующим образом:

$$\eta_{\text{сх}} = \frac{1}{2 \cdot \left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right)} + \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right)} - \frac{T_2}{T_1 \cdot \frac{C_2}{C_1}}}, \quad (1)$$

где T_1 и T_2 – постоянные времени, которые определяются по формулам

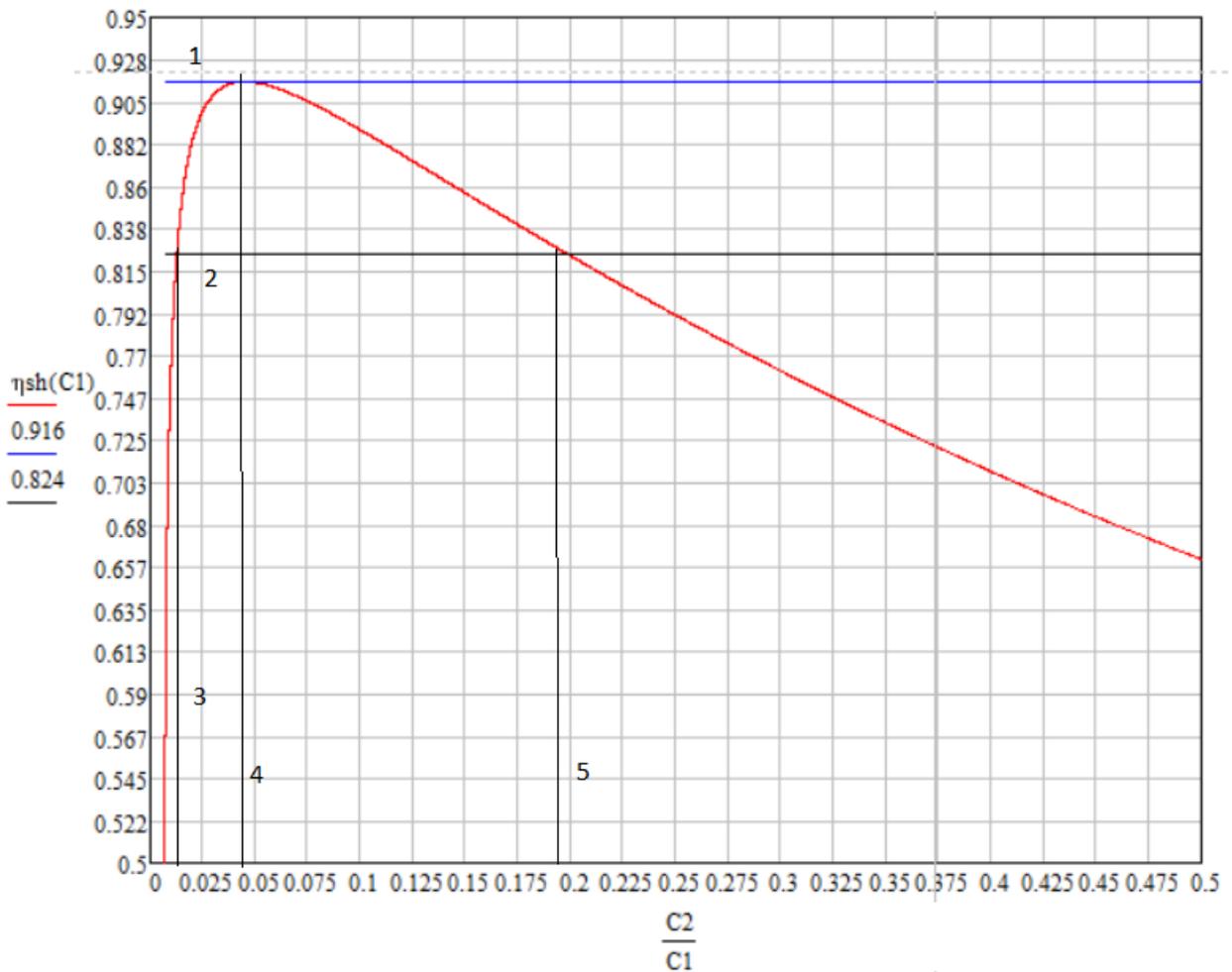
$$T_1 = \frac{t_{\text{в}}}{0,7} = \frac{10 \cdot 10^{-6}}{0,7} = 1,449 \cdot 10^{-5} = 14,49 \text{ мкс}; \quad (2)$$

$$T_2 = \frac{t_{\phi}}{3,25} = \frac{80 \cdot 10^{-9}}{3,25} = 2,462 \cdot 10^{-8} = 24,62 \text{ нс}. \quad (3)$$

Так как существующая методика предполагает значительную разницу между длительностью импульса $t_{\text{в}}$ и фронта t_{ϕ} , принимаем $t_{\text{в}} = 14,49$ мкс.

Расчетный коэффициент разрядной схемы генератора должен быть не менее 0,9 от максимально возможного для заданных параметров импульса.

Минимальное и максимальное значение отношения C_2/C_1 задаем в интервале от 0,001 до 0,5 с шагом изменения равным 0,0001.



1 – η_{cxmax} ; 2 – $\eta_{cxрасч}$; 3 – $(C_2/C_1)_{min}$; 4 – $(C_2/C_1)_{opt}$; 5 – $(C_2/C_1)_{max}$

Рисунок 51 – Зависимость $\eta_{cx} = f(C_2/C_1)$

В большем ряде случаев при расчете генератора исключается возможность использовать максимальное значение коэффициента использования схемы генератора. Это связано с тем, что достаточно трудно определить паразитную емкость генератора, подобрать необходимую емкость конденсаторов из широкого выбора выпускаемых промышленностью. Вследствие этого, задается минимально допустимое отклонение коэффициента использования схемы от максимального значения и назначается допустимый интервал изменения отношения емкостей генератора и нагрузки.

$$\eta_{cx}^{мин} = 0,9 \cdot \eta_{cxmax} = 0,9 \cdot 0,916 = 0,824. \quad (4)$$

Отношение емкостей C_2/C_1 меняем, так чтобы η_{cx} не был меньше минимального.

Минимальное и максимальное отношение емкостей $(C2/C1)_{\min} = 0,015$ и $(C2/C1)_{\max} = 0,19$.

Из анализа рисунка 51 видно, что максимально возможное значение коэффициента составляет $\eta_{сх\max} = 0,916$. С этой точки опущенный перпендикуляр показывает значения оптимального отношения емкостей $(C2/C1)_{\text{опт}} = 0,04$.

3.3 Расчет коэффициента использования импульса напряжения и допустимых пределов изменения соотношения $C2/C1$

Расчет коэффициента использования волны:

$$\eta_{\text{в}} = e^{\frac{-P_1(\ln(\frac{P_2}{P_1}))}{P_2 - P_1}} - e^{\frac{-P_2(\ln(\frac{P_2}{P_1}))}{P_2 - P_1}}, \quad (5)$$

где $P1$ и $P2$ – корни характеристического уравнения.

Корни характеристического уравнения находятся по формулам

$$P_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{14,49 \cdot 10^{-6}} = 6,9 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}; \quad (6)$$

$$P_2 = \frac{1}{T_2} = \frac{1}{24,62 \cdot 10^{-9}} = 4,06 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}. \quad (7)$$

Полученные значения подставляем в формулу (5) и находим коэффициент волны.

$$\eta_{\text{в}} = e^{\frac{-6,9 \cdot 10^4 (\ln(\frac{4,06 \cdot 10^7}{6,9 \cdot 10^4}))}{4,06 \cdot 10^7 - 6,9 \cdot 10^4}} - e^{\frac{-4,06 \cdot 10^7 (\ln(\frac{4,06 \cdot 10^7}{6,9 \cdot 10^4}))}{4,06 \cdot 10^6 - 6,9 \cdot 10^4}} = 0,988 < 1$$

Таким образом, коэффициент использования волны равен 0,988.

3.4 Расчет основных параметров разрядной схемы генератора импульсов

После определения максимальных значение коэффициентов использования импульса разрядной схемы приступаем к расчету основных параметров генератора.

Выходное напряжение импульсного генератора определяется по формуле

$$U_{\text{вых}} = 0,9 \cdot N \cdot U_0 \cdot \eta_{\text{сх}}^{\text{реал}} \cdot \eta_{\text{в}}. \quad (8)$$

где $\eta_{\text{сх}}^{\text{реал}}$ – коэффициент схемы;

$\eta_{\text{в}}$ – коэффициент пропускания волны;

N – число ступеней генератора;

U_0 – зарядное напряжение, В.

Зарядное напряжение U_0 выбирается из условия максимально допустимого номинального напряжения силового транзистора. Оптимальным напряжением пробоя сток-исток или коллектор эмиттер будет 400 В, которое на 20% больше зарядного напряжения, для обеспечения продолжительной работы транзистора. Таким образом $U_0 = 320$ В. Преобразуя формулу (8) определяем количество ступеней генератора

$$N = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{0,9 \cdot U_0 \cdot \eta_{\text{СХ}} \cdot \eta_{\text{В}}} = \frac{1200}{0,9 \cdot 320 \cdot 0,916 \cdot 0,988} = 4,6 \quad (9)$$

Округляем полученное число до целого, таким образом, $N=5$.

Определим емкость генератора в ударе из отношений

$$C_{\Gamma_{\text{опт}}} = \frac{C_2}{\left(\frac{C_2}{C_1}\right)_{\text{опт}}} = \frac{40 \cdot 10^{-12}}{0,04} = 01 \cdot 10^{-9} = 1 \text{ нФ.}$$

$$C_{\Gamma_{\text{max}}} = \frac{C_2}{\left(\frac{C_2}{C_1}\right)_{\text{min}}} = \frac{40 \cdot 10^{-12}}{0,2} = 0,2 \cdot 10^{-9} = 0,2 \text{ нФ.}$$

$$C_{\Gamma_{\text{min}}} = \frac{C_2}{\left(\frac{C_2}{C_1}\right)_{\text{max}}} = \frac{40 \cdot 10^{-12}}{0,015} = 0,18 \cdot 10^{-9} = 2,667 \text{ нФ.}$$

Определим емкость конденсаторов:

$$C_{k_{\text{опт}}} = n \cdot C_{\Gamma_{\text{опт}}}; \quad (10)$$

Подставляя известные данные в (12), получим

$$C_{k_{\text{max}}} = 5 \cdot 0,2 \cdot 10^{-9} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ Ф} = 1 \text{ нФ};$$

$$C_{k_{\text{min}}} = 5 \cdot 2,667 \cdot 10^{-9} = 13,3 \cdot 10^{-9} \text{ Ф} = 13,3 \text{ нФ};$$

$$C_{k_{\text{опт}}} = 5 \cdot 1 \cdot 10^{-9} = 5 \cdot 10^{-9} \text{ Ф} = 5 \text{ нФ.}$$

По полученным данным на сайте производителя [11] выбираем конденсатор: МКР 416 to 420 Vishay – пленочный конденсатор, номинальное

напряжение постоянного тока $U_{\text{НОМ}} = 630$ В, емкость $C_{\text{НОМ}} = 5600$ пФ. Вид конденсатора представлен на рисунке 52.

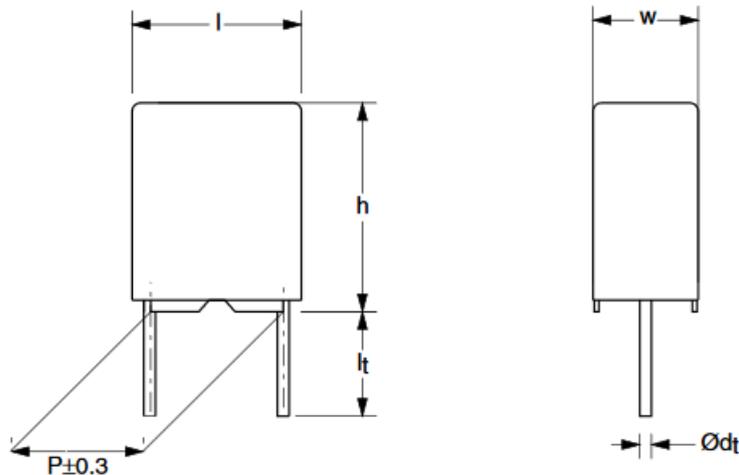


Рисунок 52 – Вид конденсатора

Далее, нужно провести проверку и пересчитать все параметры генератора с учетом реального значения номиналов конденсаторов.

Ёмкость генератора в ударе

$$C_{\Gamma}^{\text{расч}} = \frac{C_k^{\text{НОМ}}}{N}; \quad (11)$$

Подставляем данные в (11)

$$C_{\Gamma}^{\text{расч}} = \frac{5600 \cdot 10^{-12}}{5} = 1,12 \cdot 10^{-9} = 1,12 \text{ нФ.}$$

Тогда

$$\left(\frac{C_2}{C_{\Gamma}}\right)_{\text{расч}} = \frac{40 \cdot 10^{-12}}{1,12 \cdot 10^{-9}} = 0,37.$$

По формуле (11) найдем ёмкость генератора в заряде

$$C_{\Gamma_{\text{зар}}} = 5 \cdot 5600 \cdot 10^{-12} = 28 \cdot 10^{-9} \text{ Ф} = 28 \text{ нФ.}$$

Пересчитаем по формуле (1) коэффициент использования схемы с учетом получившихся результатов

$$\eta_{\text{сх}}^{\text{расч}} = \frac{1}{2 \cdot (1 + 0,37)} + \sqrt{\frac{1}{2 \cdot (1 + 0,37)} - \frac{24,62 \cdot 10^{-9}}{14,49 \cdot 10^{-6} \cdot 0,37}} = 0,965.$$

Подставим данные в (10) и получим расчётное выходное напряжение:

$$U_{\text{ВЫХ}}^{\text{расч}} = 0,9 \cdot 5 \cdot 320 \cdot 0,965 \cdot 0,988 = 1372,9 \text{ В.}$$

$U_{\text{ВЫХ}}^{\text{расч}} = 1372,9 \text{ В} > U_{\text{исп}} = 1200 \text{ В}$ – выбранные конденсаторы подходят.

Рассчитаем параметры схемы ГИНа.

Фронтное сопротивление, Ом:

$$R_{\phi} = \frac{t_{\phi}}{3,25 \cdot C_2 \cdot \eta_{\text{сх}}^{\text{расч}}} = \frac{80 \cdot 10^{-9}}{3,25 \cdot 40 \cdot 10^{-12} \cdot 0,965} = 637,7 \text{ Ом.} \quad (12)$$

Принимаем из ряда E24 $R_{\phi} = 680 \text{ Ом}$.

Сопротивление нагрузки составляет $R_{\text{Н}} = 100 \text{ Ом}$, необходимости в разрядном сопротивлении нет. Таким образом, длительность фронта составляет

$$\begin{aligned} t_{\phi} &= 3,25 \cdot R_{\phi} \cdot C_2 \cdot \eta_{\text{сх}}^{\text{расч}} = 3,25 \cdot 680 \cdot 40 \cdot 10^{-12} \cdot 0,965 = \\ &= 85 \cdot 10^{-9} = 85 \text{ нс,} \end{aligned} \quad (13)$$

Вывод по разделу: был произведен расчет параметров генератора Маркса на твердотельных коммутаторах под резистивной нагрузки. Были рассчитаны емкость генератора (1,12 нФ), паразитная емкость на нагрузке (40 пФ), коэффициенты схемы (0,965) и волны (0,968), фронтное сопротивление (637,7 Ом). Данный расчет выполнен по классической методике генератора Маркса на разрядный промежуток. В экспериментальной части, в силу возможностей лаборатории №123 ИНШПТ ТПУ были подобраны элементы, более подходящие по параметрам генератора.

4. Экспериментальная часть

В ходе экспериментальной части, было решено использовать техническую базу ОМ ИНШПТ ТПУ для проведения исследований.

План работ заключался в:

1. Подбор параметров схемы;
2. Пайка и сборка макета;
3. Сопряжение макета драйвера и макета ГИН;
4. Отладка устройства в сборе;
5. Анализ полученных результатов.

В силовой части ГИН были выбраны следующие элементы:

1. Резистор: сопротивление $R=100$ Ом, мощность $P=5$ Вт;
2. Транзистор IRF740: $U_{\text{сток-исток}}=400$ В, $I_{\text{имп.сток-исток}}=40$ А, $I_{\text{ном}}=10$ А;
 $t_{\text{задвкл.}}=14$ нс; $t_{\text{зад. выкл.}}=50$ нс; $t_{\text{фр}}=27$ нс; $t_{\text{спада}}=24$ нс.
3. Конденсатор электролитический $U=160$ В, $C=2,2$ мкФ

Было спроектировано одно звено силовой части ГИН (рисунок 53):

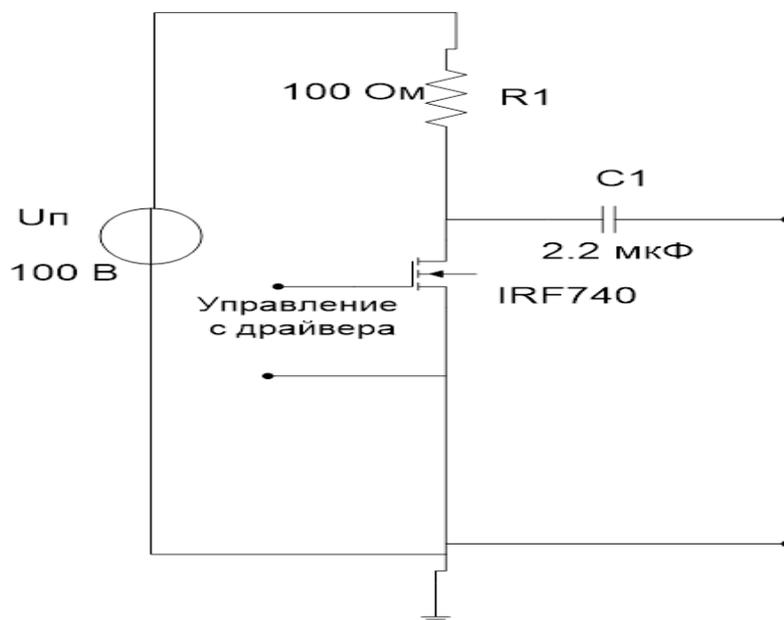


Рисунок 53 – одно звено макета ГИН.

Произведена пайка на макетной плате одного звена (рисунок 54):

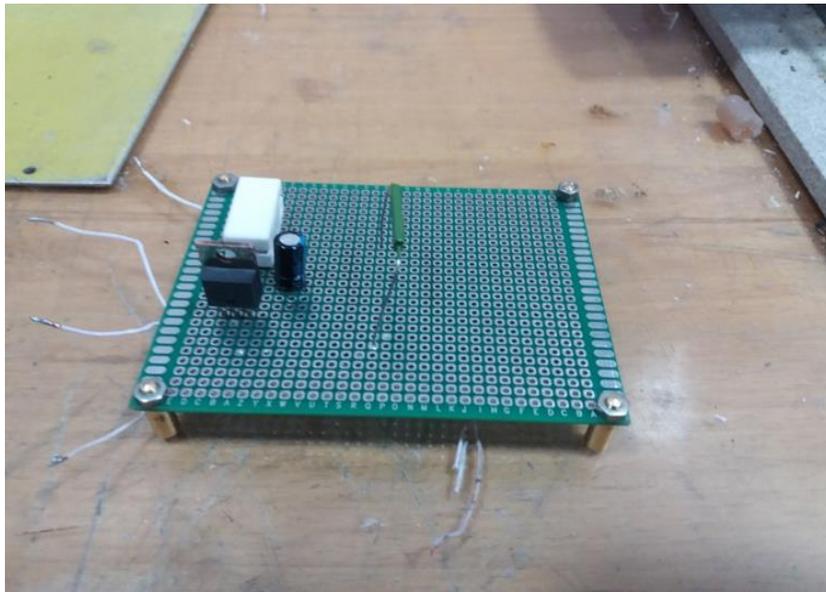


Рисунок 54 – Одно звено ГИН на макетной плате.

В ходе испытаний были получены осциллограммы напряжения на фронте и на нагрузке (рисунок 55):

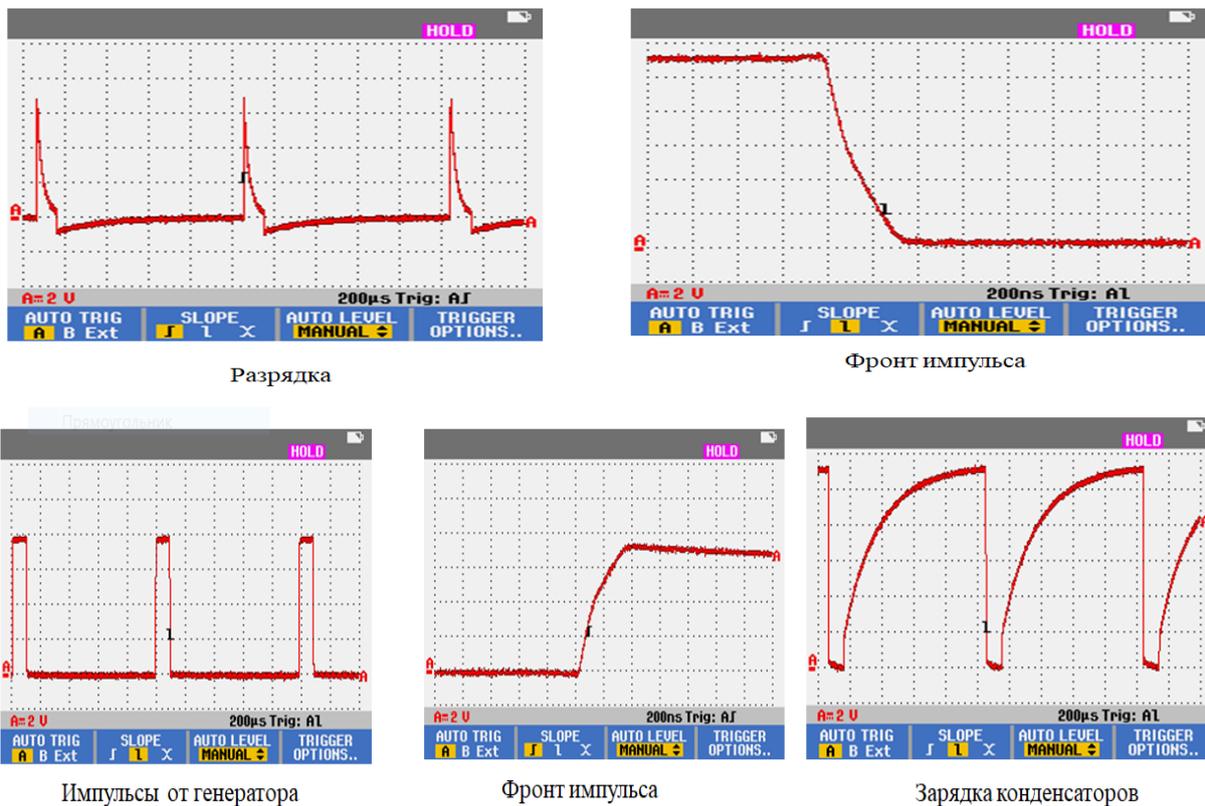


Рисунок 55 – Осциллограммы напряжения одного звена ГИН.

Фронт импульса на нагрузке составлял 250 нс, напряжение 11 В.

После испытаний, была спроектирована схема трехзвенного ГИН:

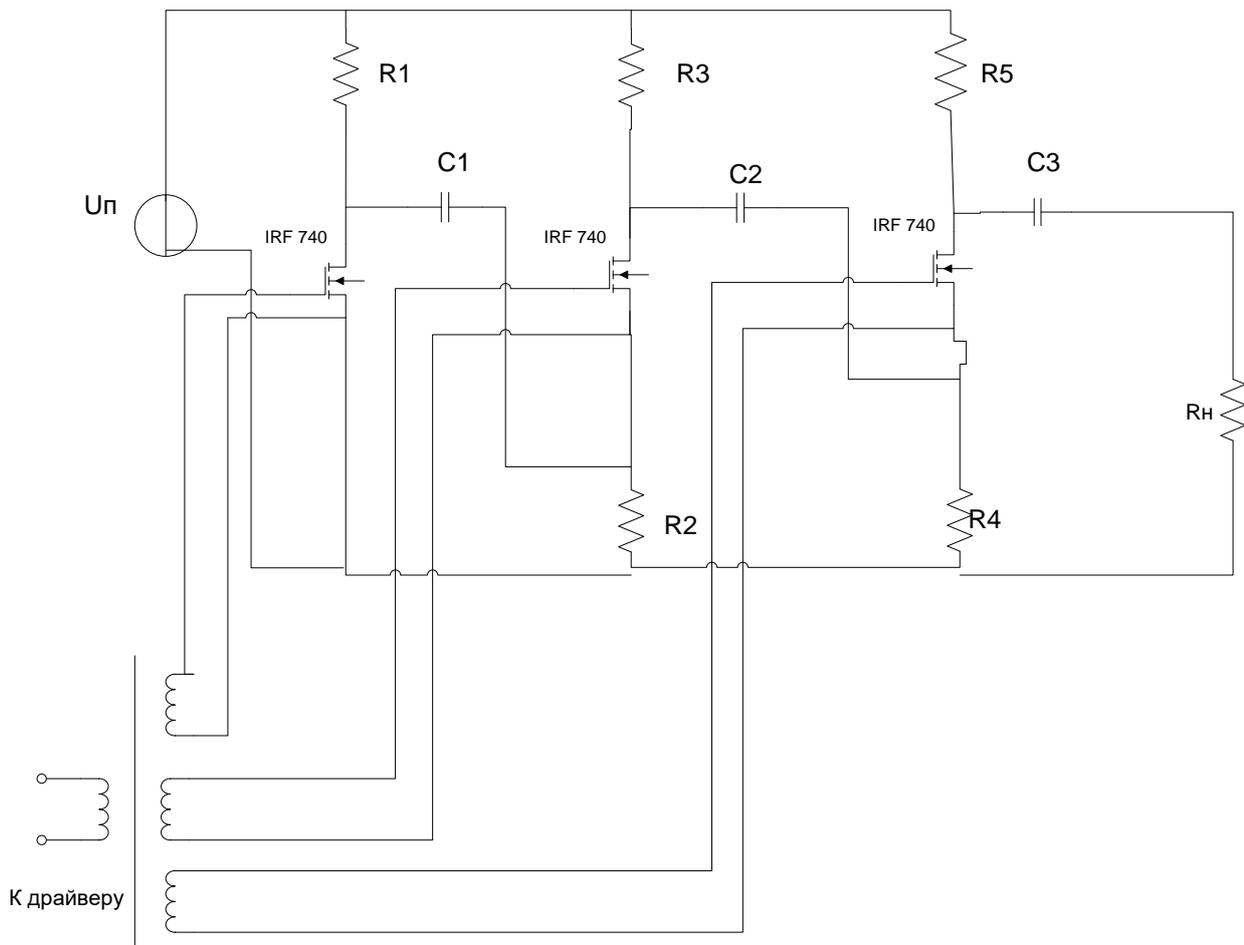


Рисунок 56 – Схема трехзвенного ГИН.

Гальваническую развязку драйвера от силовой части обеспечили трансформатором, а для его защиты от перенапряжений были использованы диоды.

Была произведена пайка макета трехзвенного ГИН и были получены осциллограммы напряжения:



Рисунок 57 – Макет трех звеньев ГИН.

Напряжения питания на трехзвенном макете $U_{пит}=25$ В. Были получены осциллограммы напряжения и фронт импульса на нагрузке ($t_{фронт}=2$ мкс):

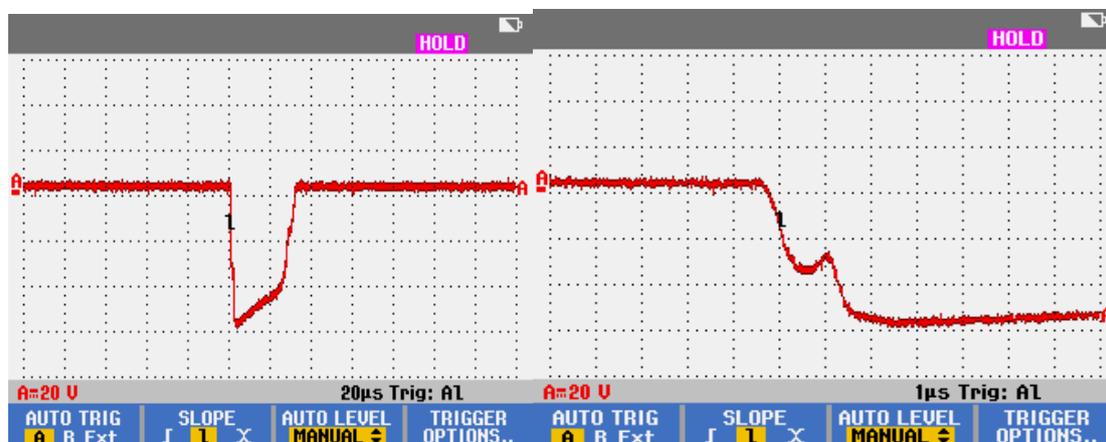


Рисунок 58 – Внешний вид импульса и фронт на нагрузке

Были сняты осциллограммы напряжения с каждого конденсатора:

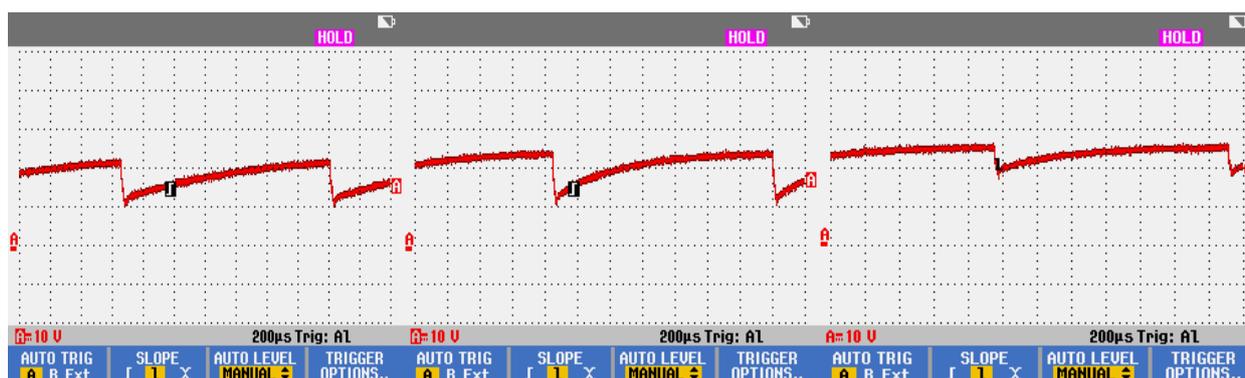


Рисунок 59– Напряжение на конденсаторе C1 C2 и C3 (слева направо)

Получены осциллограммы напряжения с каждого транзистора:

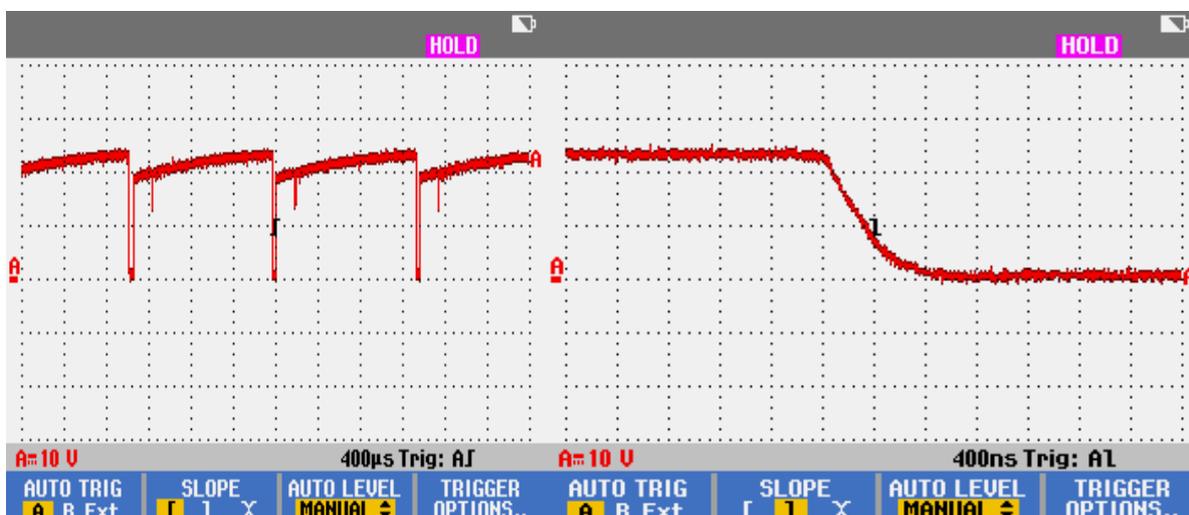


Рисунок 60 – Напряжение $U_{сн}$ первого транзистора и фронт импульса.

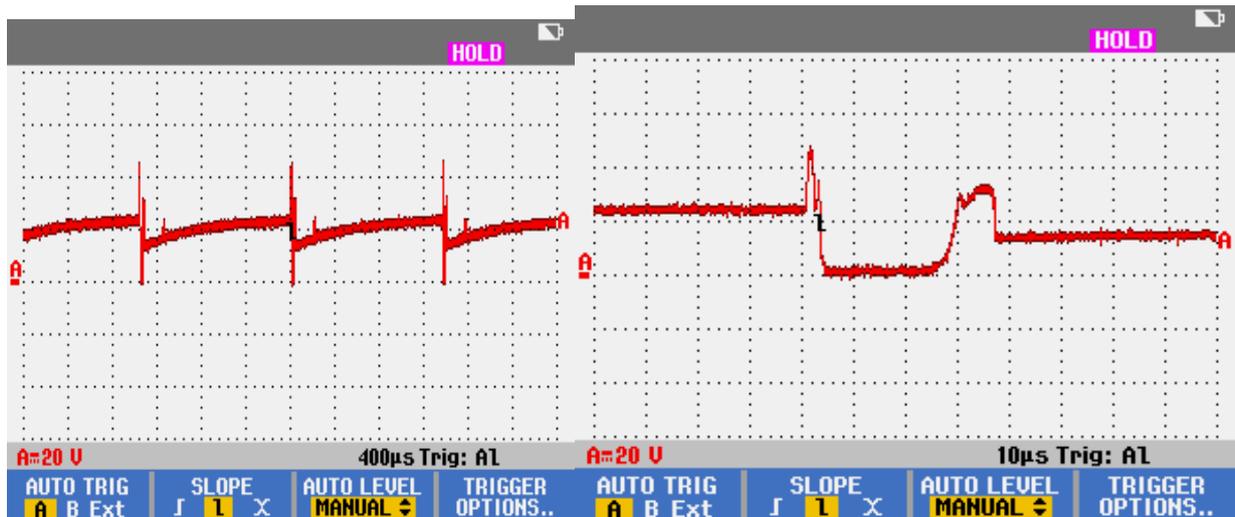


Рисунок 61 – Напряжение $U_{сн}$ второго транзистора и фронт.

На третьем транзисторе осциллограммы получились такими же, как и на втором. При срабатывании второго транзистора можно наблюдать всплеск напряжений. Это связано с тем, что при открытии второго транзистора первый транзистор еще не закрылся, а при закрытии второго уже открылся третий транзистор.

Далее были проведены испытания на напряжении питания $U_{пит}=60$ В и получены осциллограммы напряжений на нагрузке ($U_{вых}=150$ В):

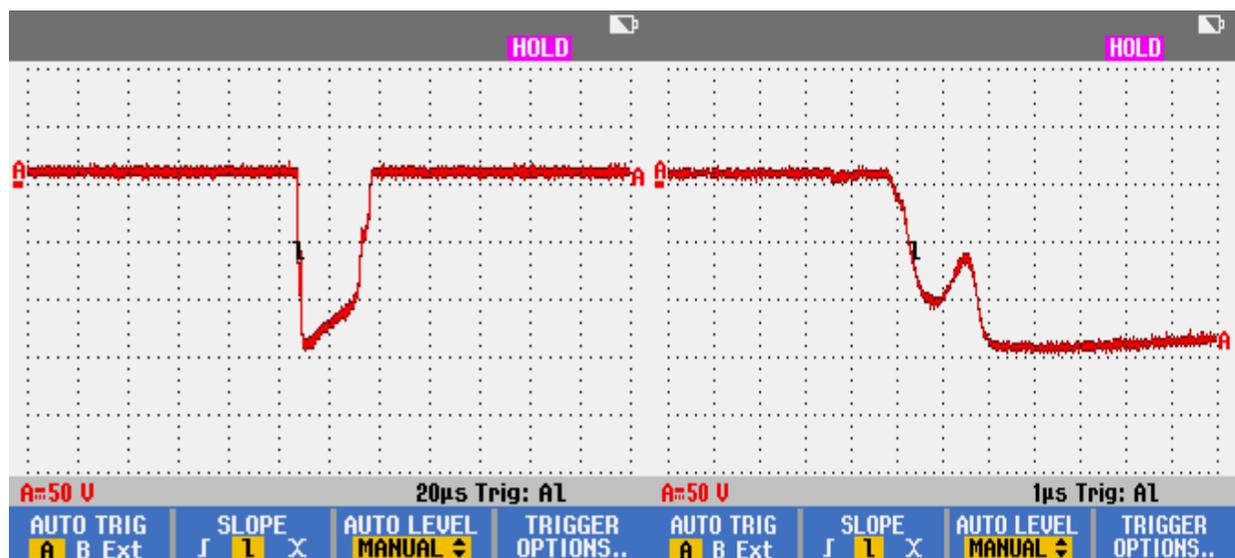


Рисунок 62 – Импульс и фронт на нагрузке

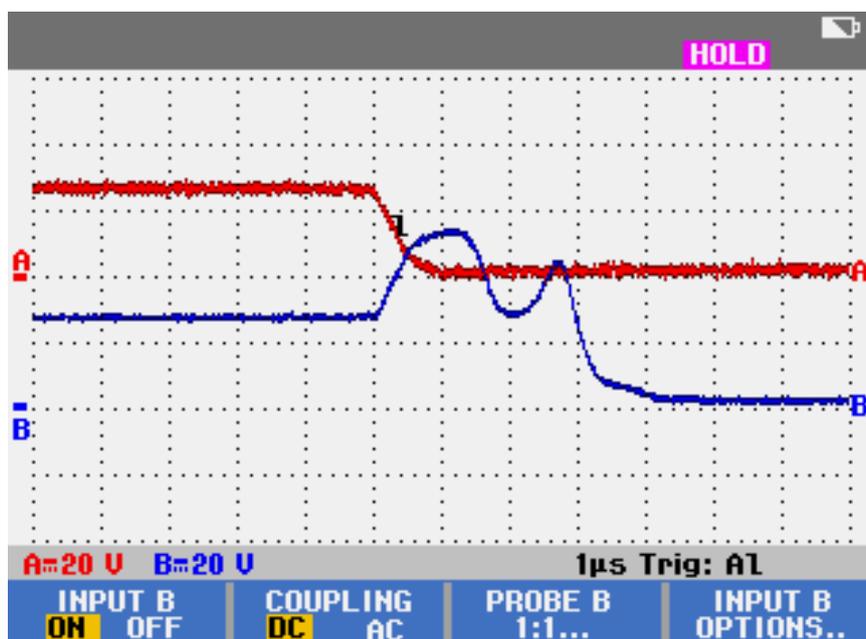


Рисунок 63 – напряжение $U_{си}$ на первом (вверху) и втором (внизу) транзисторе

Следующим шагом было спроектировать генератор импульсного напряжения на 6 MOSFET транзисторах типа IRF740, произвести пайку и сборку макета транзистора с системой управления (СУ). Схема транзистора представлена на рисунке 64:

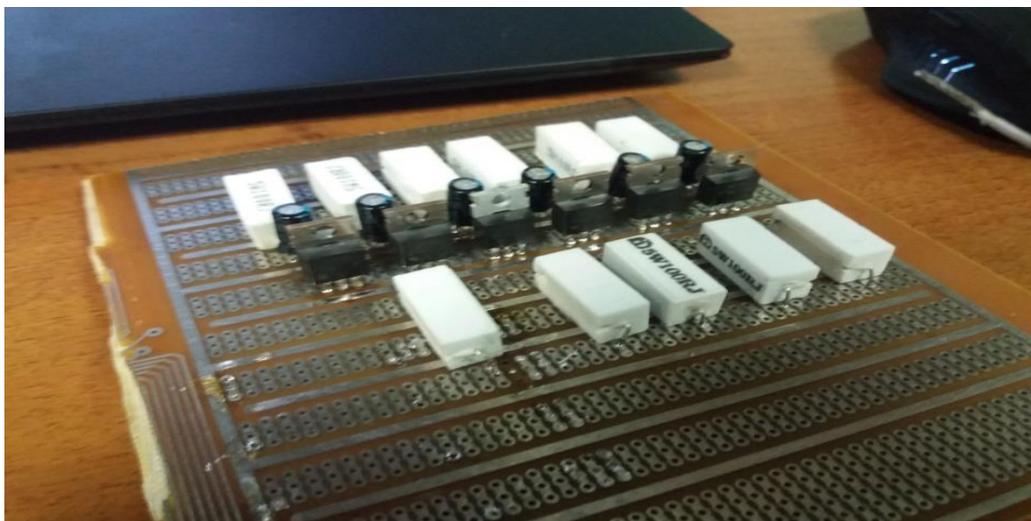


Рисунок 64 – схема ГИН на 6 MOSFET транзисторах

Также в систему управления был дополнительно включен трансформатор, дополнительно был поставлен регулятор длительности импульса и 12 разъемов для 6 вторичных обмоток.



Рисунок 65 – Внешний вид второго трансформатора и системы управления
(слева направо)

Были получены осциллограммы напряжения:

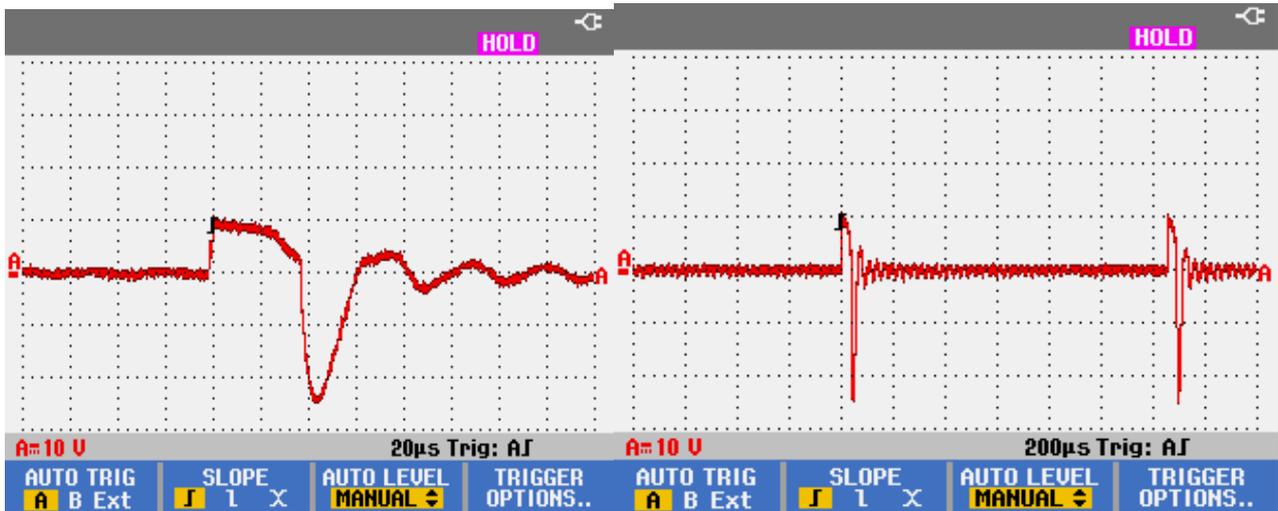


Рисунок 66 – напряжения затвор исток 1-го транзистора (в разных масштабах)

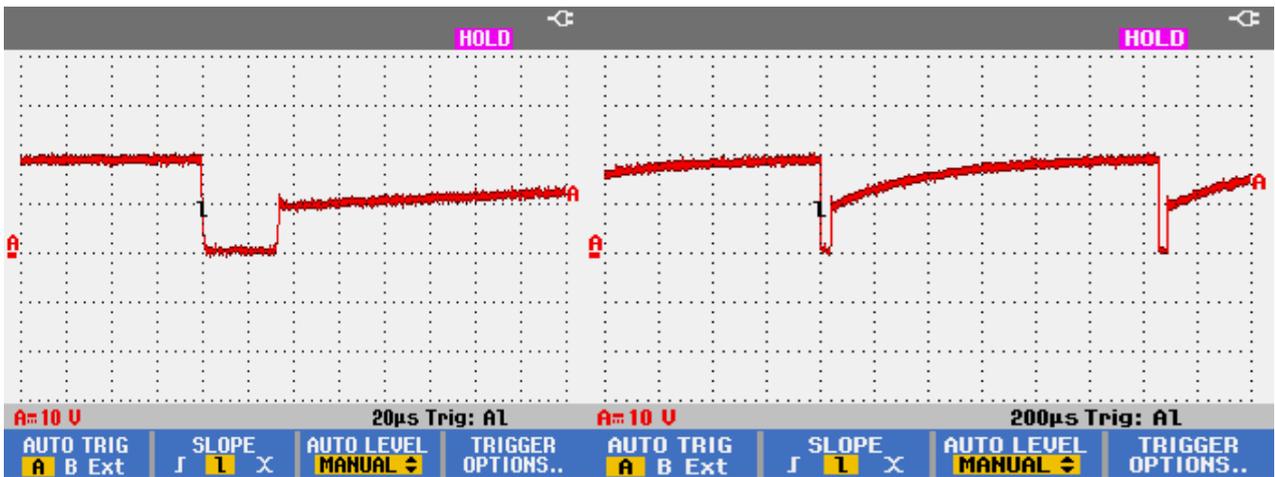


Рисунок 67 – напряжения сток исток 1-го транзистора (в разных масштабах)

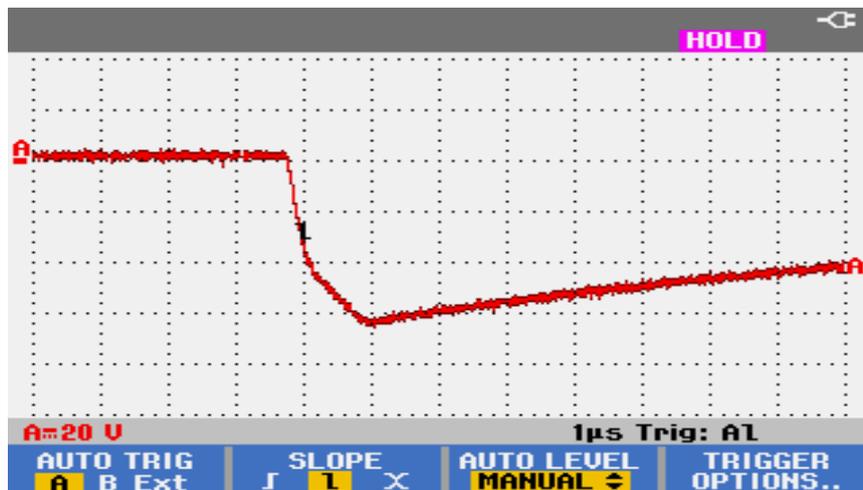
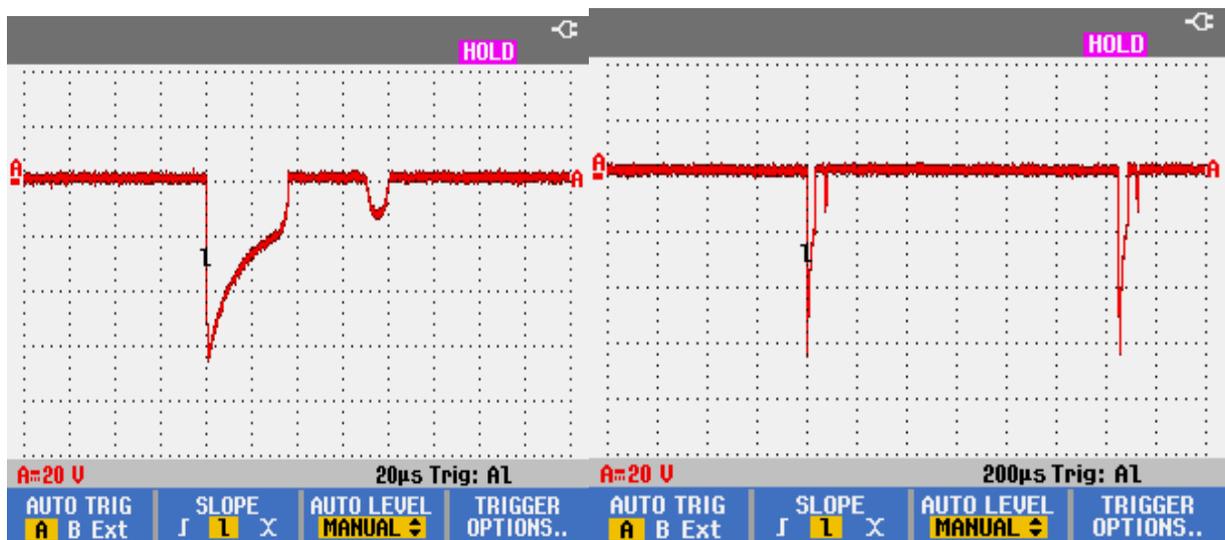


Рисунок 68– напряжения на нагрузке и фронт импульса 1,5 мкс (в разных масштабах)

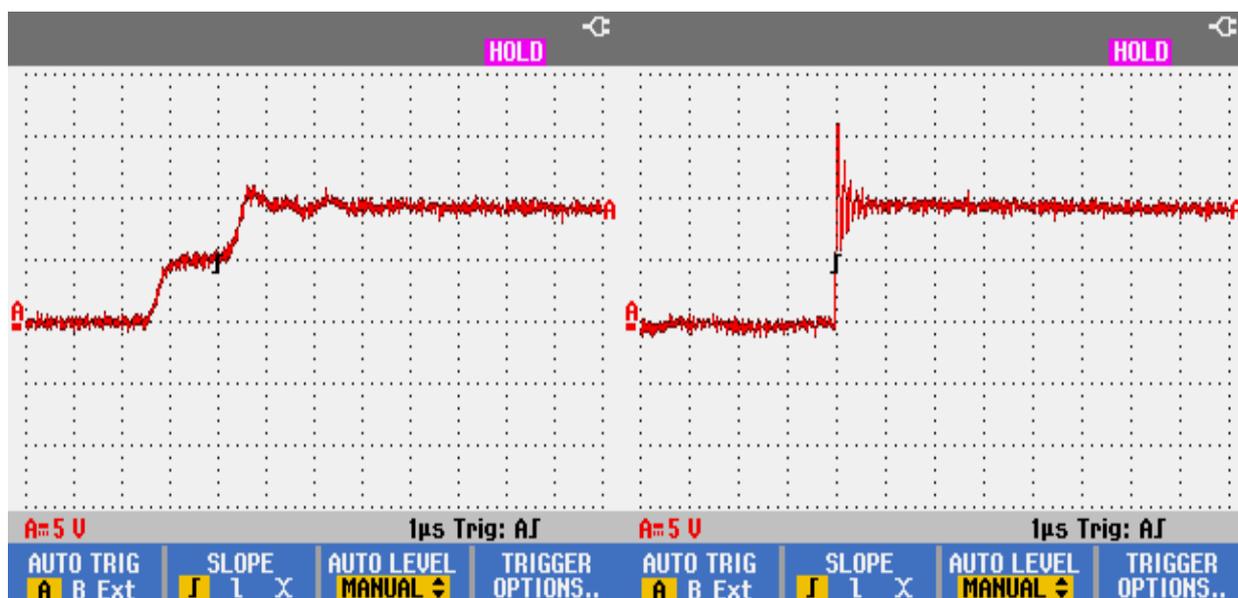


Рисунок 69 – фронт управления под нагрузкой (2 мкс) и без нагрузки (слева направо)

В связи с полученными данными можно установить, что напряжение на нагрузке умножается 3-х кратно, вместо 6-ти кратного увеличения, также получается достаточно длинный фронт напряжения 1,5 мкс. Проблема может заключаться в том, что транзисторы открываются медленно, конденсаторы разряжаются частично.

В связи с полученными проблемами было принято решение искать способы открытия МОП транзисторов, используя различные схемы быстрого включения драйвера для транзистора. В зависимости от конкретной ситуации можно использовать управление напрямую от контроллера, управление КМОП-логикой, эмиттерными повторителями, схемами управления с разделением цепей заряда и разряда входной емкости.

Напрямую от контроллера [12]:

Схема рассмотрена на рисунке 70. Не самый лучший вариант. Исключение составляют контроллеры со встроенным драйвером. R_G резистор ограничивает ток через контроллер и уменьшает пульсации. У полевых транзисторов есть собственная индуктивность, она небольшая, но при быстром нарастании/спаде возникают колебания как в LC контуре. При условии нескольких каскадов, резистор R_G придется ставить на каждый транзистор.

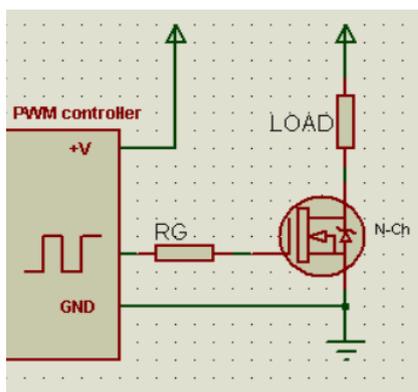


Рисунок 70 – Схема управления от микроконтроллера.

Схема двухтактного драйвера

Схема представлена на рисунке 71. В идеальном случае управляющие транзисторы нужно располагать как можно ближе к MOSFET транзистору, для уменьшения пути протекания тока. Важно добавить шунтирующий конденсатор между VGate и землей (в схеме не указан).

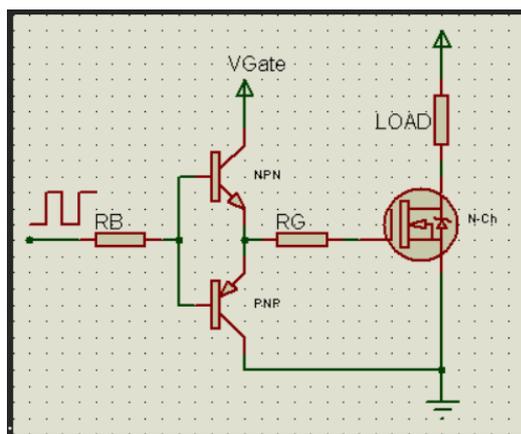


Рисунок 71 – Схема двухтактного драйвера.

Напряжение питания КМОП инвертора может изменяться в широких пределах. В статическом состоянии и без нагрузки такой элемент потребляет очень малый ток, поскольку один из транзисторов в статическом состоянии всегда закрыт. Если на входе инвертора напряжение логического нуля U_0 , то T_1 открыт, а T_2 — закрыт, если напряжение логической единицы U_1 , то T_2 открыт, а T_1 — закрыт.

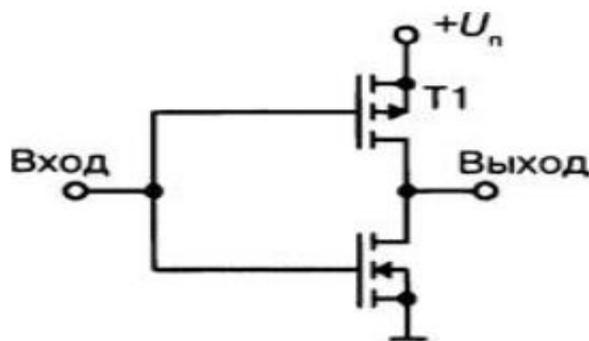


Рисунок 72 – Схема КМОП инвертора

На рисунке 73 показан пример организации управления MOSFET-транзистором T с помощью стандартного КМОП-инвертора. Схема управления мощным MOSFET с помощью КМОП логики является одной из самых простых, но такая схема эффективно работает при особо медленном переключении MOSFET.

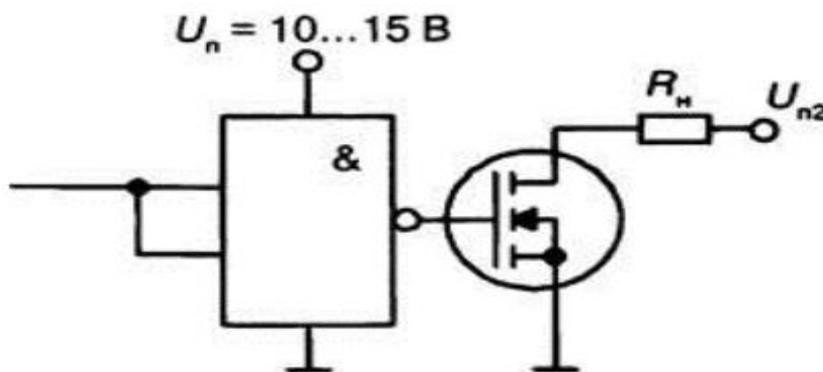


Рисунок 73 – Управление транзистором с помощью КМОП инвертора.

Эффективным способом сокращения времени включения и выключения мощного полевого транзистора T_3 является применение эмиттерных повторителей между логической схемой, ШИМ-контроллером и затвором транзистора, как показано на рисунке 82. При отпирании MOSFET включается транзистор T_1 верхнего плеча эмиттерного повторителя, который обеспечивает

протекание входного тока транзистора Т3. Резистор R3, включаемый между общей шиной и затвором мощного транзистора, необходим для устранения выхода из строя MOSFET (Т3) в случае, когда напряжение питания $+U_n$ не подано, а транзистор Т3 уже запитан. Емкость С необходима для снижения уровня помех на затворе транзистора Т3. Необходимо соблюдать следующее обязательное условие — элементы Т1, Т2, R2, R3 должны быть расположены на плате в непосредственной близости с транзистором Т3. При большой мощности, переключаемой MOSFET (в нагрузке 1,5 кВт и более), цепи заряда и разряда входной емкости С и транзистора Т3 следует полностью разделить, как это показано на рисунке 74, причем при выборе резисторов R2, R3 эмиттерного повторителя необходимо обеспечивать условие: R3 много меньше R2,

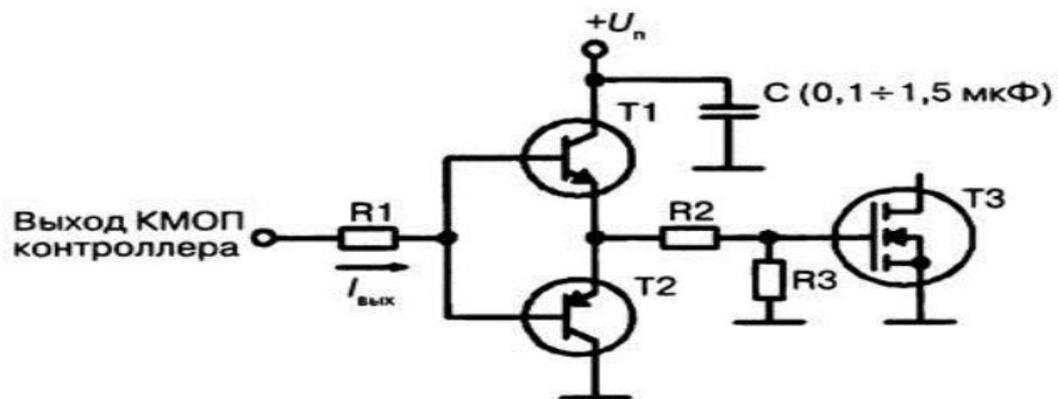


Рисунок 74 – Схема управления с эмиттерными повторителями

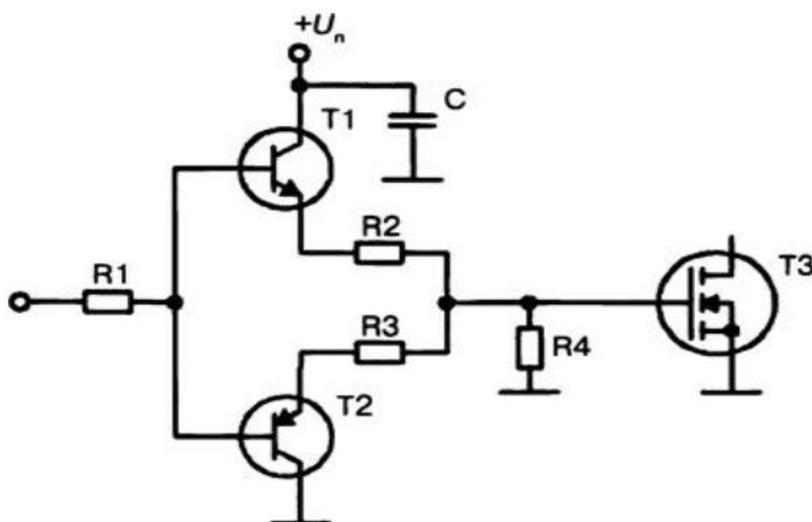


Рисунок 75 – Управление МОП транзистором с разделением цепей заряда и разряда

Отдельного внимания требует рассмотрение особенностей организации управления стойкой (полумостом) MOSFET и IGBT (рисунок 76), которая достаточно часто встречается на практике. Специальные устройства для управления MOSFET и IGBT могут непосредственно подавать напряжение на затвор, обеспечивая при этом необходимую величину тока заряда входной емкости. Дополнительный транзистор требуется в затворной цепи для обеспечения режима быстрого для быстрого запираания MOSFET.

Схема работает следующим образом. Два выходных сигнала от управляющего драйвера находятся в противофазе. При высоком напряжении на выводе DRV1A (по отношению к DRV1B) на выводе DRV2A имеет место низкое напряжение (по отношению к DRV2B), и наоборот. Резисторы R2 и R4 обеспечивают поддержание закрытого состояния транзисторов T1 и T2 при отсутствии сигналов на выходе драйвера. Низкоомные резисторы R1 и R3 ограничивают значения токов выходных каскадов драйвера. При отпирании одного из транзисторов (например, T1) высокое напряжение с выхода 1 (DRV1A) драйвера через диод D1 поступает на затвор T1. Транзистор T3 в интервале открытого состояния T1 оказывается запертым. Если напряжение на данном выходе драйвера близко к нулю, биполярный транзистор открывается, а входная емкость быстро разряжается через открытый р-п-р транзистор.

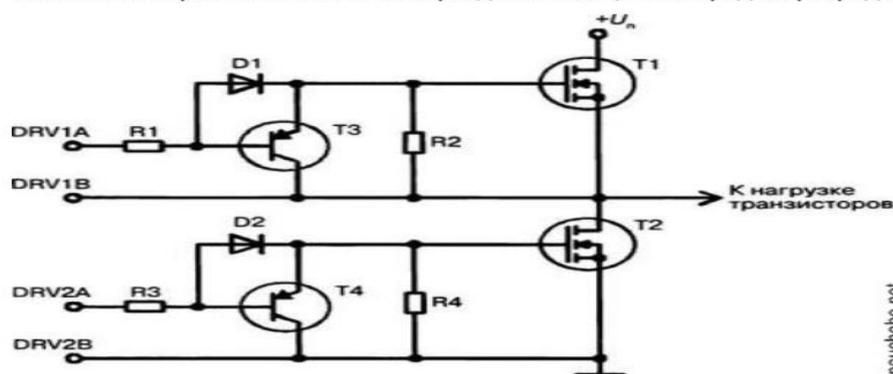


Рисунок 77 – Схема управления полумостом МОП транзистора.

В отдельных случаях применяется схема управления с помощью трансформатора, когда использование драйвера по каким-то причинам невозможно или когда нужна гальваническая развязка между ШИМ-контроллером и силовым ключом (рисунок 78). На представленной схеме

Таблица 1 – Характеристики питания и длительности фронта от величины нагрузки

$R_H, \text{ Ом}$	$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$ ($U_{\text{ПИТ}}=30 \text{ В}$, $U_{\text{ВЫХ.МАКС}}=180 \text{ В}$)	$t_{\text{ФР}}, \text{ нс}$
1000	75	50
500	68	50
200	63	60
100	58	60
50	50	60
36	28	70

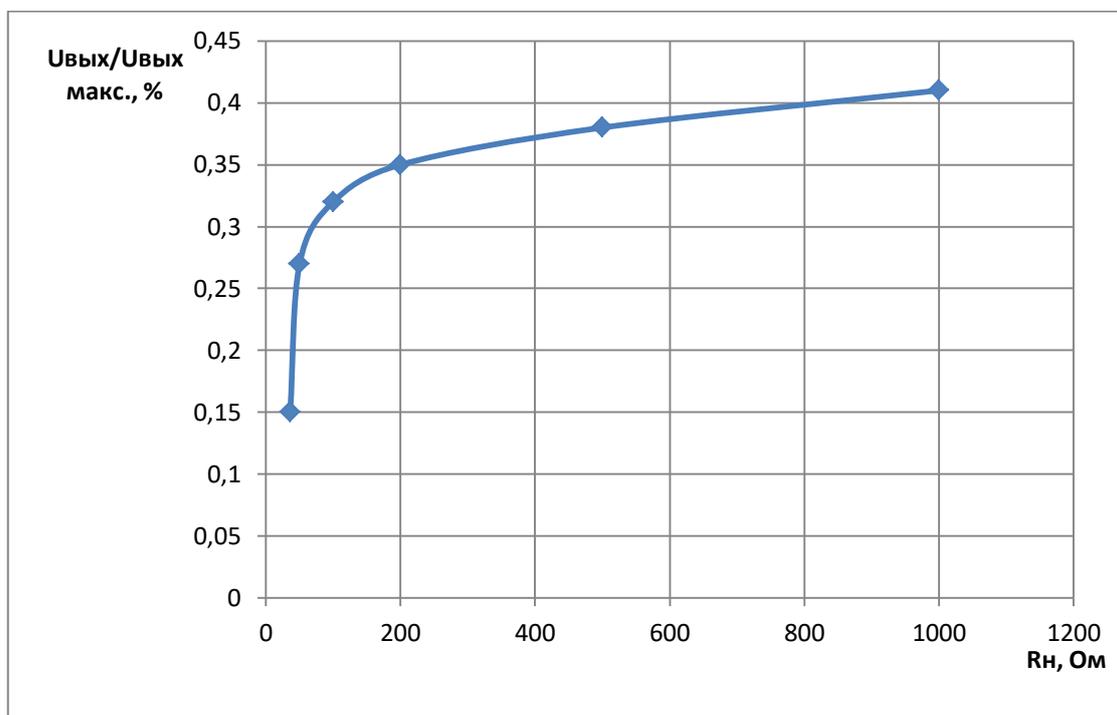


Рисунок 80 – Зависимость $U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВЫХ.МАКС}}$ от величины сопротивления.

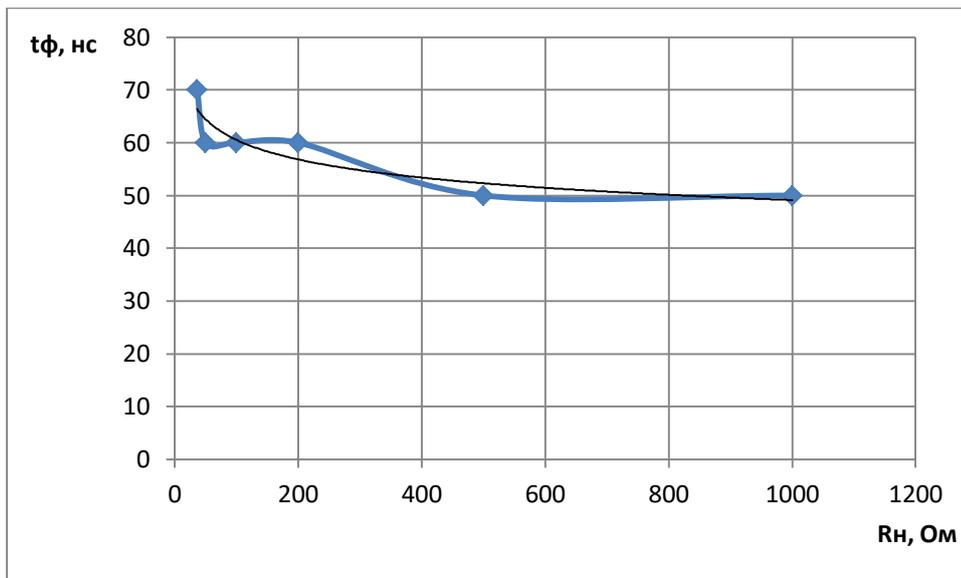


Рисунок 80 – Зависимость t_{ϕ} от величины сопротивления.

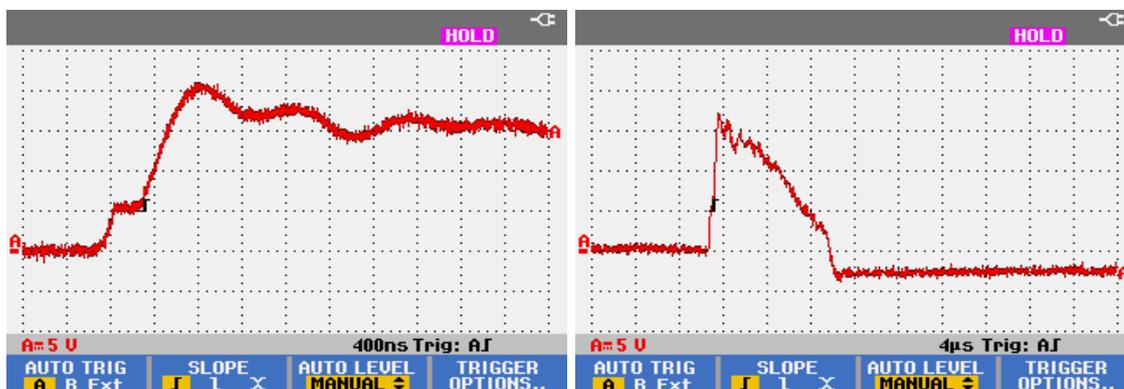


Рисунок 81 – Фронт управляющего импульса ($t_{\phi}=600$ нс) и управляющий импульс (слева направо).

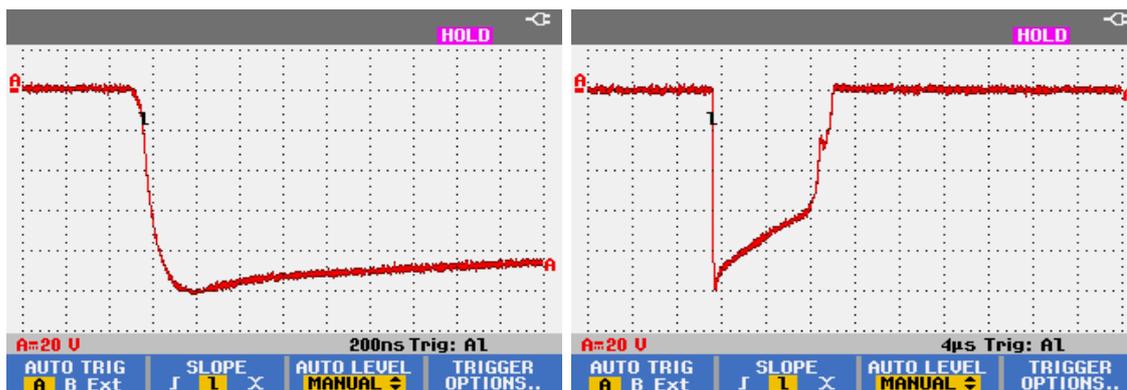


Рисунок 82 – Фронт выходного импульса ($t_{\phi}=200$ нс) и выходной импульс (слева направо).

При питающем напряжении в 30 В наблюдается значительное падение амплитуды выходного импульса практически в два раза. Связано это с тем, что конденсаторы разряжаются достаточно быстро и перезаряжаются.

При питающем напряжении 200 В (с помощью лабораторного трансформатора), напряжение на выходе равняется 480 В, а фронт импульса равняется 100 нс, что также связано с просадкой из-за разряжающихся конденсаторов (рисунок 83).

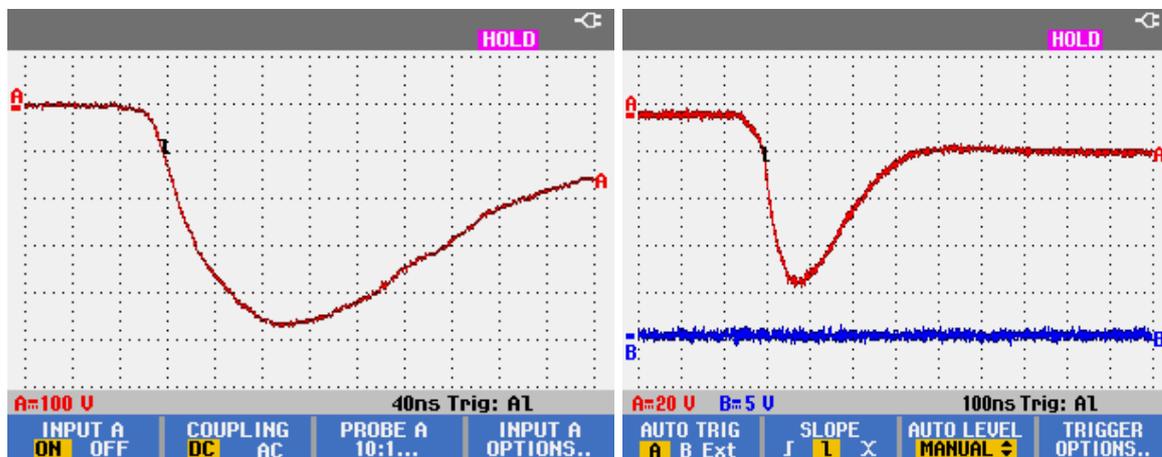


Рисунок 83 – Фронт выходного импульса ($t_{\phi}=100$ нс, $U_{\text{вых}}=480$ В) и импульс на нагрузке ($U_{\text{пит}}=30$ В) (слева направо).

Вывод: в экспериментальной части были подобраны электрические элементы для собираемого генератора Маркса с МОП транзисторами на макетной плате. Было собрано 3 схемы генератора на 1, 3 и 6 ступеней. Испытания показали, что на 1 и 3 ступенях генератор работает достаточно хорошо, фронт импульса находится в наносекундном диапазоне. На 6 ступенях наблюдается частичное закрытие полупроводниковых ключей (из-за разрядки конденсато, их несинхронизованность, фронт импульса составляет 1,5 мкс, что достаточно много для таких полупроводниковых ключей. Используемая схема управления подавала не достаточно короткие импульсы на МОП ключи. В литературе были проанализированы способы более быстрого открытия МОП и БТИЗ ключей, была использована схема с эмиттерным повторителем, удалось добиться результатов $t_{\phi}=100$ нс, $U_{\text{вых}}=480$ В, при питающем напряжении в 200 В.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
4ТМ71	Исхакову Роману Фолуровичу

Школа	ИНШПТ	Отделение школы (НОЦ)	Отдел материаловедения
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>В исследовании задействуется материально-техническая база лаборатории №103 ИНШПТ ТПУ. В исследовании задействованы 2 человека: научный руководитель и студент-дипломник.</i>
2. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Отчисления во внебюджетные фонды составляют 30%.</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала инженерных решений (ИР)</i>	<i>Анализ конкурентных технических решений, SWOT анализ</i>
2. <i>Формирование плана выполняемых работ и составление бюджета</i>	<i>Планирование научно-исследовательских работ, определение длительности работ. Определение материальных затрат на проведение исследования, расчет основной заработной платы, накладных расходов, амортизации.</i>
3. <i>Оценка ресурсной, финансовой, социальной, бюджетной, экологической эффективности ИР и потенциальных рисков</i>	1. <i>Расчет НТУ;</i> 2. <i>Оценка экологической эффективности и потенциальных рисков</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. <i>Оценка конкурентоспособности исследования</i>
2. <i>Матрица SWOT</i>
3. <i>График разработки и внедрения исследования</i>
4. <i>Оценка ресурсной эффективности исследования</i>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ71	Исхаков Роман Фолурович		

5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

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

Темой магистерской диссертации является исследование применения твердотельных коммутаторов в схемах генераторов высоковольтных импульсов. Генераторы импульсных напряжений (ГИН) служат для испытания изоляции электрооборудования грозowymi импульсами с целью координации электрической прочности изоляции с воздействующими на нее грозowymi перенапряжениями. Актуальность работы заключается в том, что ГИН является важнейшим составляющей испытательных лабораторий заводов, выпускающей оборудование предназначенной для передачи электрической энергии. Ведутся разработки по применению твердотельных коммутаторов (транзисторов) в схемах ГИН вместо устаревших газовых разрядников.

Цель: Определить возможность и целесообразность применения полупроводниковых коммутаторов для создания ГИН на емкостных накопителях.

Задачи раздела:

- 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

5.1 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 2.

Таблица 2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
Удобство в эксплуатации	0,1	4	4	3	0,4	0,4	0,3
Помехоустойчивость	0,1	4	3	4	0,4	0,3	0,4
Энергоэкономичность	0,1	4	5	4	0,4	0,5	0,4
Безопасность	0,2	4	5	4	0,4	0,5	0,4
Экономические критерии оценки эффективности							
Конкурентоспособность продукта	0,2	5	5	4	1	1	0,8
Цена	0,2	5	4	4	1	0,8	0,8
Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	4	4	4	0,8	0,8	0,8
Итого	1	28	30	27	4,4	4,3	3,9

5.2 SWOT – анализ

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

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

Таблица 3 – Матрица SWOT

	Сильные стороны научноисследовательского проекта: С1. Малые габаритные параметры С2. Создание установки из уже имеющихся комплектующих С3. Не требует сложных работ при монтаже и эксплуатации.	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Не новый метод применения генератора Сл2. Не запатентованность устройства Сл3. Не разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки.
Возможности: В1. Сокращение энергозатрат В2. Частичное использование установки для проведения других исследований В3. 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.
Угрозы: У1. Отсутствие кадров для продолжения научно-исследовательской работы. У2. Недостаток теоретических знаний. У3. Недостаточное финансирование.	Монтаж и эксплуатация измерительного модуля не требуют значительных затрат.	В случае отсутствия кадров для продолжения научно-исследовательской работы невозможно будет проводить измерения.

Интерактивные матрицы проекта

Таблица 3.1 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта				
Возможности проекта		С1	С2	С3
	В1	+	+	0
	В2	0	-	+
	В3	+	-	0

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие сильных сторон и возможностей: В1С2С3, В2С3, В3С1.

Таблица 3.2 – Интерактивная матрица проекта

Слабые стороны проекта				
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3
	В1	0	-	-
	В2	-	-	-
	В3	+	0	+

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие слабых сторон и возможностей: В3Сл1, В3Сл3.

Таблица 3.3 – Интерактивная матрица проекта

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

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие сильные стороны и угроз: У2С1С2, У2С3, У3С3.

Таблица 3.4 – Интерактивная матрица проекта

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

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие слабых сторон и угроз: У2Сл3, У3Сл1Сл3.

5.3 Планирование научно-исследовательской работы

Планирование работ необходимо для своевременного выполнения исследования. В команду, выполняющую работу, входят 2 человека научный руководитель и студент дипломник. Расчёт бюджета будет произведён, исходя из затрат на разработку.

Таблица 4 – Календарный план проекта

Номер работы	Название работы	Исполнитель	Период работы научного руководителя		Период работы инженера	
			Дата начала	Длительность, дни	Дата начала	Длительность, дни
1	Постановка целей и задач	НР	18.01.2019	3	-	-
2	Составление и утверждение технического задания	НР, И	25.01.2019	2	26.01.2019	2
3	Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	27.01.2019	1	28.01.2019	12
4	Разработка календарного плана	НР,И	29.01.2019	2	29.01.2019	2
5	Закупка элементной базы	НР, И	2.02.2019	4	3.02.2019	5
6	Пайка и сборка первого макета	И	-	-	8.02.2019	25
7	Испытания, измерение электрических характеристик, первого макета	НР, И	6.03.2019	2	6.03.2019	2
8	Пайка и сборка второго макета	И	-	-	9.03.2019	18
9	Испытания, измерение электрических характеристик второго макета	И	27.03.2019	2	27.03.2019	2
10	Описание результатов, оформление пояснительной записки	И	-	-	1.04.2019	35

Для удобства представления построим ленточный график проведения работ – диаграмму Ганта (таблица 5). График позволит наглядно оценить последовательность выполнения и временные рамки для каждой из основных частей.

Для построения графика длительность каждого из этапов будет представлена в календарных днях. Для перевода продолжительности из рабочих дней в календарные дни воспользуемся 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 5 – Диаграмма Ганта

Научный руководитель –  инженер – 

Вид работ	Исполнитель	$T_{кi}$	Продолжительность выполнения работ														
			январь			февраль			март			апрель			май		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Постановка целей и задач	НР	3,66															
Составление и утверждение технического задания	НР, И	2,44															
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	14,64															
Разработка календарного плана	НР,И	2,44															
Закупка элементной базы	НР, И	6,1															
Пайка и сборка первого макета	И	30,5															
Испытания, измерение электрических характеристик первого макета	НР, И	2,44															
Пайка и сборка второго макета	И	21,96															
Испытания, измерение электрических характеристик второго макета	И	2,44															
Описание результатов, оформление пояснительной записки	И	42,7															

5.4 Бюджет научного исследования

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

5.4.1 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 6.

Таблица 6 – Сырье, материалы, комплектующие

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб	Сумма, руб
Макетная плата	шт	2	100	200
Транзистор	шт	15	65	975
Резистор	шт	20	20	600
Конденсатор	шт	20	25	500
Диод	шт.	10	10	100
Печатная бумага	упак.	1	300	300
Ручка	шт.	6	45	260
Всего за материалы				2935
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				88
Итого по статье C_M				3023

5.4.2 Основная заработная плата

В данную статью входит основная и дополнительная заработная плата, 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.

$$C_{зп} = З_{осн} + З_{доп}$$

где $З_{осн}$ – основная заработная плата, руб.;

$З_{доп}$ – дополнительная заработная плата, руб.

Для начала необходимо рассчитать основную заработную плату:

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot T_p$$

где $З_{осн}$ – основная заработная плата, руб.;

$З_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.;

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{дн} = \frac{З_m \cdot M}{F_d}$$

где $З_m$ – 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 7 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Научный руководитель	Инженер
Календарное число дней	124	124
Количество нерабочих дней - выходные дни - праздничные дни	14 3	14 3
Потери рабочего времени - отпуск - невыходы по болезни	0	0
Действительный годовой фонд рабочего времени	107	107

Месячный должностной оклад работника рассчитывается исходя из следующей формулы:

$$Z_m = Z_b \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p$$

где Z_b – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

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

k_d – коэффициент доплат и надбавок (0,2);

k_p – районный коэффициент (для Томска составляет 1,3).

Расчет основной заработной платы приведен в таблице 7.

Таблица 8 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	Z_b , руб.	$k_{пр}$	k_d	k_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Научный руководитель	26300	0,3	0,2	1,3	51285	4984,7	18	89724,8
Инженер	7000	0,3	0,2	1,3	13600	1321,9	107	141347

5.4.3 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 работы:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}}$$

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

$k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы

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

В таблице 9 приведен расчет основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 9 – Заработная плата исполнителей НИР

Заработная плата	Научный руководитель	Инженер
Основная зарплата	89724,8	141347
Дополнительная зарплата	13458,7	21112
Зарплата исполнителя	103189,5	162459
Итого по статье $C_{зп}$	265448,5	

5.4.4 Отчисления на социальные нужды

Данная статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды, 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%.

$$C_{\text{внеб}} = 0,3 \cdot 265648,5 = 79694,6 \text{ руб.}$$

5.4.5 Амортизация

Амортизация – это процесс переноса начальной стоимости основного средства на производственные или общехозяйственные расходы.

Расчет нормы амортизации производится по формуле

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

где n – срок полезного использования, год.

Расчет амортизации производится по формуле

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

где $И$ – общая стоимость, руб.,

m – срок использования, дн.

Таблица 10 – Расчет амортизации

Наименование	Стоимость, руб	Срок использования n , лет	Норма амортизации K	Время использования m , дн	Амортизация A , руб
ПК	20000	5	0,2	107	1172,6
Паяльный аппарат	400	5	0,2	30	6,57
Осциллограф	320000	10	0,1	10	876,71
Итого по статье					2055,9

5.4.6 Накладные расходы

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

Накладные расходы рассчитываются по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (C_{\text{зп}} + C_{\text{м}} + C_{\text{внеб}})$$

где $k_{\text{накл}}$ – коэффициент накладных расходов (16%).

$$C_{\text{накл}} = 0,16 \cdot (265648,5 + 3023 + 79694,6) = 55738,6 \text{ руб.}$$

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составим бюджет работы по исследованию (таблица 10).

Таблица 11 – Бюджет.

Наименование статей затрат	Сумма, руб.
Сырье, материалы, комплектующие изделия, специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	3023
Основная заработная плата	231071,8
Дополнительная заработная плата	34570,7
Отчисления на социальные нужды	79694,6
Амортизация	2055,9
Накладные расходы	55738,6
Итого	406154,6

5.5 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:

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

где k_i – весовой коэффициент i – го признака;

Π_i – количественная оценка i – го признака.

Таблица 12 – Весовые коэффициенты НТУ

Признаки НТУ	Весовой коэффициент
Уровень новизны	0,4
Теоретический уровень	0,3
Возможность и масштабы реализации	0,3

Таблица 13 – Шкала оценки новизны

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

Таблица 14 – Значимость теоретических уровней

Характеристика значимости теоретических уровней	Баллы
Установка законов, разработка новой теории	10
Глубокая разработка проблем, многосторонний анализ, взаимозависимость между факторами	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 15 - Возможность реализации по времени и масштабам

Время реализации	Баллы
В течение первых лет	10
От 5 до 10 лет	4
Свыше 10 лет	2
Масштабы реализации	Баллы
Одно или несколько предприятий	2

Отрасль	4
Народное хозяйство	10

$$k_1 = 0,4; \Pi_1 = 5; k_2 = 0,2; \Pi_2 = 0,5; k_3 = 0,4; \Pi_3 = 10; k_4 = 0,4; \Pi_4 = 4$$

$$НТУ = 0,4 \cdot 5 + 0,2 \cdot 8 + 0,2 \cdot 10 + 0,4 \cdot 4 = 7,2$$

По полученному коэффициенту научно-технического уровня можно сделать вывод, что проект имеет высокую значимость теоретического и практического уровня, что подтверждает целесообразность проводимого научного исследования.

5.6 Определение ресурсоэффективности исследования

Ресурсоэффективность генератора Маркса на твердотельных проводниках зависит от социальной, экологической эффективности и потенциальных рисков.

Ввиду того, что зарубежные аналоги не предоставляют затраты, посчитать ресурсоэффективность с точки зрения финансовой эффективности не представляется возможным.

С точки зрения социальной эффективности, генератор Маркса на твердотельных полупроводниках станет более простым, надежным, что повлечет за собой обеспечение надлежащего уровня жизни работников; создание условий для реализации и развития индивидуальных способностей сотрудников, снижение уровня ущерба, наносимого здоровью работников; создание благоприятного психологического климата в коллективе.

С точки зрения экологической эффективности, выбросов и отходов в окружающую среду в воздушный бассейн не будут, без выделения ядовитого газа при работе на твердотельных полупроводниках.

Таблица 16 – Оценка экологической эффективности исполнения проекта

Критерий	Весовой параметр коэффициента	Балл
1. Выбросы и отходы в окр.среде	0,25	5
2. Влияние объекта на экологическую емкость территории	0,15	5
3. Экологический риск	0,2	5
4. Безотходность	0,25	4
5. Приближение к биосферосовместимому типу технологии	0,15	4
Итого	1	

Цель проведение анализа риска - дать потенциальному партнеру, инвестору необходимые данные для принятия решений о целесообразности участия в проекте и предусмотреть меры по защите от возможных финансовых потерь.

Таблица 17 – Оценка потенциальных рисков

Критерий	Весовой параметр коэффициента	Балл
1. Производственный риск	0,25	5
2. Финансовый риск	0,25	5
3. Инвестиционный риск	0,25	4
4. Рыночный риск	0,25	4
Итого	1	

Оценка показателей ресурсоэффективности и потенциальных рисков показала, что данный технический проект имеет хорошие показатели, что свидетельствует об эффективности реализации проекта.

В разделе были решены следующие задачи.

1 Проведён анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности, который подтвердил конкурентоспособность разработки .

2 Выполнен SWOT-анализ, который позволил выявить потенциал проведённого исследования и определить наиболее эффективные пути развития.

3 Разработан календарный план проекта и построен календарный план-график. Общая длительность всех работ составила 107 рабочих дней.

4 Рассчитан суммарный бюджет исследования, который составил 406154,6, включив в себя материальные расходы, основную и дополнительную заработную плату, отчисления во внебюджетные фонды и накладные расходы.

5 Определён научно-технический уровень, показавший высокую теоретическую и практическую значимость исследования. Проведена оценка ресурсоэффективности, что демонстрирует хорошую реализацию проекта.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
4ТМ71	Исхакову Роману Фолуровичу

Школа	ИНШПТ	Отделение (НОЦ)	Отдел материаловедения
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Тема магистерской диссертации:

Применение твердотельных коммутаторов в схемах генераторов высоковольтных импульсов	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования – генератор Аркадьева-Маркса (медь, изоляционные материалы, макетные платы), области его применения – испытания в лабораториях и производственных цехах. Рабочая зона – высоковольтный зал корпуса №11 ИНШПТ ТПУ, помещение для сборки и исследования генератора – аудитория 103.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	ГОСТ 22614-77. Система «Человек-машина». Выключатели клавишные и кнопочные. Общие эргономические требования. ГОСТ 12.4.011-88. Инструктаж по технике безопасности. «Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 №197-ФЗ (вступил в силу с 01.04.2019)».
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Вредные факторы, возникающие при работе генератора Аркадьева-Маркса, к таковым относятся: – повышенный уровень электромагнитного излучения/поля – недостаточная освещенность. – электрическое поле промышленной частоты (ПЧ); Опасные факторы: – повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека;
3. Экологическая безопасность:	Экологическая безопасность генератора Аркадьева-Маркса заключается в утилизации объекта после истечения срока эксплуатации. Вреда для атмосферы и

	гидросферы нет.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Типичная ЧС – пожар.

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

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ71	Исхаков Роман Фолурович		

6. Социальная ответственность

В данном разделе будут рассмотрены опасности, возникающие при использовании генератора Аркадьева-Маркса. К ним относятся недостаточная освещенность, воздействие электрического и электромагнитного поля, вероятность поражения током и пожар. В лаборатории проводилась сборка и пайка макета генератора Аркадьева-Маркса.

Научно-исследовательская работа заключается в исследовании работы генератора Маркса на твердотельных коммутаторах, под действием импульсного электрического поля. Такие коммутаторы применяются при более низких напряжениях, чем газовые разрядники, практически нет износа материала и в перспективе они могут стать основными для генераторов импульсного напряжения на низкие мощности. При сборке генератора использовались макетная плата, электротехнические элементы (конденсаторы, транзисторы, резисторы, смотанные вручную трансформаторы), паяльная станция. При испытаниях использовался генератор на лабораторном стенде.

Также, в обязательном порядке, в раздел входит информация о мерах защиты для профилактики возникновения опасных ситуаций работы генератора Аркадьева-Маркса.

Наконец, раздел включает действия, необходимые для устранения возникшей опасности.

6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Эксплуатируемое оборудование должно быть в полной исправности. Ограждения или защитные устройства должны быть установлены на место и соответствующим способом укреплены. Работать на неисправном оборудовании или неисправном ограждении запрещается. Обслуживающий персонал должен иметь не ниже 2-ой группы допуска.

ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ «Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты».

ГОСТ 22614-77. Система «Человек-машина». Выключатели клавишные и кнопочные. Общие эргономические требования.

ГОСТ 12.4.011-88. «Инструктаж по технике безопасности».

Работник обязан соблюдать:

- 1) Должностные инструкции;
- 2) Трудовой кодекс РФ;

6.2 Производственная безопасность

Научно-исследовательская работа проводилась в высоковольтном зале в 11 корпусе ИНШПТ ТПУ. Рабочая зона – лаборатория 103, дополнительно служащая для хранения инструментов лаборатории и оборудования. В ходе работы установки можно столкнуться с рядом вредных и опасных факторов (таблица 18).

Таблица 18 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разрабо тка	Изготов ление	Эксплу тация	
1.Повышенный уровень электромагнитного излучения/поля	-	-	+	ГОСТ Р50648-94 «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к магнитному полю промышленной частоты. Технические требования и методы испытаний»
2. Электрическое поле промышленной частоты (ПЧ)	-	-	+	
3.Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	+	+	СНиП 23-05-95 «"Естественное и искусственное освещение» ГОСТ 12.1.038–82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.

				ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ «Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты».
4.Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	+	+	+	ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

6.3 Анализ вредных факторов производственной среды

Основными источниками вредных факторов в лаборатории 103 ИНШПТ ТПУ являются недостаточная освещенность, электромагнитное излучение, электрическое поле промышленной частоты (50 Гц).

Повышенный уровень электромагнитного излучения/поля.

Электромагнитное поле образуется в результате работы генератора Маркса. В результате длительного воздействия поля на организм человека, могут появиться некоторые последствия, такие, как нарушение нормального ритма нервной и сердечно-сосудистой системы человека. Вследствие чего у персонала могут появиться частые головные боли, сонливость или общая бессоница, головокружение, рассеянность и т.д. Для защиты персонала от воздействия волн электромагнитного излучения применяются экраны, которые отражают или поглощают электромагнитную энергию; ограничение персонала в зоне действия генератора Маркса – ГОСТ Р 50648-94 .

Электрическое поле промышленной частоты (ЭП ПЧ)

ЭП ПЧ создаётся в рабочей зоне вследствие работы высоковольтного трансформатора.

В результате длительного воздействия электрического поля на организм человека могут развиваться нарушения в деятельности сердечно-сосудистой и центральной нервной системы (ЦНС), органов дыхания и пищеварения, возможно изменение состава крови и др. Нормативно установленный уровень напряженности воздействующего ЭП составляет 25 кВ/м. Если величина напряженности ЭП более 25 кВ/м, то пребывание в этой зоне без применения средств защиты не допускается. Защитой от действия ЭП ПЧ являются применение специальных поглощающих экранов и заземлений – ГОСТ 12.1.002-84 ССБТ.

Недостаточная освещенность рабочей зоны

Свет предоставляет благоприятные условия для жизни человека, необходимые для сохранения здоровья и высокой производительности труда, и является основным анализатором в зрительной работе.

Для реализации испытаний генератора импульсного напряжения применяется совмещенное освещение.

Естественное освещение создается природными источниками света солнечными лучами и светом небосвода, проникающим через боковые светопроемы (окна) в наружных стенах.

Искусственное освещение в рабочей зоне осуществляется люминесцентными лампами, находящиеся на стенах помещения на уровне около 4 метров.

Необходимые уровни освещенности – 500-750 лк (люкс) по СНиП 23-05-95. В лаборатории уровень освещенности соответствует нормам СНиП и составляет 550 лк.

6.4 Анализ опасных факторов производственной среды

Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека.

Поражение электрическим током возникает при соприкосновении с электрической цепью, с активными частями электрооборудования и электроустановки, где наблюдается напряжение способное вызвать протекание тока по попавшей части тела.

В отсутствии специализированных средств, человек не способен установить наличие электрического тока, собственно, что и обуславливает большой риск поражения электрическим током при прикосновении к токоведущим частям. Величина чувствительная для человеческого организма при протекании тока составляет более 1 мА и 0,8 В – ГОСТ 12.1.038–82 ССБТ.

В процессе протекания электрического тока через организм человека, наблюдается различные воздействия: термические, биологические, электролитические, химические и механические повреждения.

Термическое воздействие тока выражается ожогами отдельных участков тела, почернением и обугливанием кожи; нагревом до значительной температуры органов, находящихся на пути протекания тока.

Электролитическое воздействие тока обуславливается разложением жидкостей организма на ионы, нарушающие их состава.

Химическое влияние тока выражается в появлении химических реакций в крови, лимфе, с возникновением новых веществ, не свойственных организму.

Биологическое воздействие оказывает раздражение и возбуждение живых тканей организма, появлению судорог, остановке дыхания, изменению режима сердечной деятельности

Механическое воздействие тока проявляется в сильном сокращении мышц, вплоть до их разрыва, переломе костей, расслоении тканей.

Находящаяся вокруг среда (влажность, температура, присутствие заземленных металлических систем) оказывает вспомогательное воздействие на условия электробезопасности.

Вероятность поражения электрическим током находится в зависимости от плотности и площади прикосновения человека с токоведущими частями.

Для обеспечения электробезопасности в условиях нормального режима работы установок применяются следующие средства защиты:

- применение всевозможных измерительных приборов;
- ограждение токоведущих частей;
- изоляция электрооборудования и электроустановок;
- индивидуальные средства защита (основные и дополнительные).

В испытательной лаборатории рабочая зона относится к классу помещений без повышенной опасности.

6.5 Обоснование мероприятий по снижению воздействия

Для обеспечения техники безопасности проектом предусмотрено:

1. Меры по электробезопасности с учетом категории помещения по степени опасности поражения электрическим током;
2. Обучение людей безопасным приемам работы.

Для обеспечения электробезопасности проектом предусмотрено:

- надежная изоляция токоведущих частей оборудования (0,5 Ом по ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ «Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов»);
- устранение опасности поражения при проявлении напряжения на корпусах оборудования за счет зануления в соответствии с ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. «Защитное заземление, зануление».

- обеспечение надежной электрической защиты блоков питания от перегрузок, исключение возможности короткого замыкания;
- системы автоматического отключения, АСТРО УЗО;
- применение исправного рабочего инструмента с изолированными ручками;
- применение понижающего трансформатора (40В) для питания электроинструментов.

Основным административным мероприятием по технике безопасности людей является инструктаж по безопасным методам работы с токоограничивающим реактором, использование индивидуальных средств защиты в соответствии с ГОСТ 12.4.011-89 «Система стандартов безопасности труда. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация».

На рабочем месте также предусмотрены: местное освещение для сборки и эксплуатации генератора Маркса.

6.6 Экологическая безопасность

Для обеспечения защиты литосферы проектом предусмотрено:

- утилизация отходов производства (конденсаторы, резисторы, транзисторы, макетные платы, изоляция);
- сдача, учет, хранение, правильная транспортировка вышедших из строя изоляций, а также дальнейшая утилизация (сдача на пункты переработки).

6.7 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

При анализе чрезвычайных ситуаций выявлено, лаборатория может подвергаться пожарам.

Для предупреждения возникновения пожаров, в соответствии с ГОСТ 12.1.004-91 «Пожарная безопасность. Общие требования», проектом предусмотрены мероприятия и средства защиты при чрезвычайных ситуациях:

- при строительстве помещения предусмотрено наличие запасных выходов, наружных лестниц, негоряемых перегородок;
- в помещении установлена правильно рассчитанная и работоспособная вентиляция;
- предусмотрено наличие на сборочном участке в местах легкого доступа углекислотных огнетушителей ОУ-3 в количестве 2 штук;
- профессиональный осмотр и ремонт электрооборудования, системы вентиляции, отопления, кондиционеров и осветительных установок.

Согласно СНИП 2.09.02-85 «Производственные здания» и 2.01.02-85 «Противопожарные нормы» для обеспечения быстрой эвакуации людей в случае пожара проектом предусмотрен эвакуационный выход со сборочного участка, наименьшая величина проходов -1м, коридоров -1,2м, дверей - 0,6м, лестничной площадки-1,05м.

Вывод по разделу. В разделе «Социальная ответственность» дипломного проекта был рассмотрен ряд вопросов по технике безопасности, экологичности работы генератора Аркадьева-Маркса.

Был проведен анализ:

1. Потенциальной опасности исследуемого объекта для людей и окружающей среды;
2. Мероприятий и средств по обеспечению безопасности на рабочем участке;
3. Мероприятий и средств по обеспечению безопасности в чрезвычайных ситуациях.
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.

В целом условия труда помещении соответствует общепринятым нормам.

Поэтому, генератор Маркса можно использовать для работы, не опасаясь возникновения непредвиденных ситуаций, но быть готовым к их немедленному устранению.

Заключение

В данной работе был проведен анализ, расчет, проектирование, сборка реального макета генератора Маркса на твердотельных MOSFET-транзисторах. В части литературного обзора были рассмотрены различные схемы и схемные решения, направленные на увеличении выходного напряжения, а также рассмотрены различные способы применения этих генераторов в промышленной отрасли. Произведён расчет ключевых параметров генератора, было собрано 3 схемы генератора Маркса с различным количеством ступеней, произведена сборка и сопряжение силовой части ГИН и системы управления (СУ). Были рассмотрены различные схемные решения для увеличения быстродействия между силовой частью и драйвером генератора. Итоговые результаты получились на схеме с 6 ступенями ГИН, где выходное напряжение составило 480 В, фронт импульса на нагрузке составил 100 нс, для уменьшения длительности фронта была использована схема с эмиттерным повторителем, что укоротило длительность фронта с 1,5 мкс до 400 нс. В связи с активностью отечественных и зарубежных ученых, направленные на способы увеличения напряжения и быстродействия срабатывания транзисторов, можно сделать вывод, что генератор Маркса на твердотельных ключах актуален, более экологичный, достаточно компактен, в отличие от газовых разрядников на определенный тип напряжения.

При выполнении экономической части составлен полный список работ и их трудоемкость, построен календарный план-график выполнения работ, выполнено определение участников каждой работы, установлены продолжительности работ, построен график по временным показателям, подсчитан бюджет для проведения научно-технического исследования, проведена оценка эффективности научного проекта со стороны ресурсосбережения.

Рассмотрены влияния вредных и опасных факторов при эксплуатации генератора Аркадьева-Маркса, рассмотрена возможность утилизации тяжелых металлов, содержащихся в конденсаторах генератора, выбраны средства пожаротушения для оснащения помещения, в котором происходит использование генератора, также описаны обязанности работодателя в отношении персонала и правила охраны труда при эксплуатации электроустановок.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Б.Ю. Семенов. Силовая электроника: от простого к сложному. – М.: Солон-Пресс, 2005. – 416 с.: ил.
2. Б.Ю. Семенов. Силовая электроника: профессиональные решения. – М.: Солон-ПРЕСС, 2011. – 416 с.: ил. (Серия «Компоненты и технологии»)
3. A Repetitive High Voltage Pulse Adder Based on Solid State Switches – Kefu Liu, Yan Luo and JianQiu – Institute of Electrical Light Sources, Fudan University, Shanghai, 20043, China – IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 16(4):1076 - 1080 · September 2009.
4. MARX GENERATOR USING POWER MOSFETS – W. Jiang, W. Diao, and X. Wang – Tsinghua University, Beijing, China – 2009 IEEE Pulsed Power Conference.
5. FGPA-Controlled All-Solid-State Nanosecond Pulse Generator for Biological Applications – Chenguo Yao, Member, IEEE, Ximing Zhang, FeiGuo, Shoulong Dong, Yan Mi, and Caixin Sun – IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 40, NO. 10, OCTOBER 2012/
6. Power Electronics Converter with Marx Generator Configuration based PEF for Liquid Food Sterilization – S.A.Ghani, W.I. Ibrahim, M.R.Ghazali – Faculty of Electrical & Electronics Engineering Universiti Malaysia Pahang – International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering 2011 (InECCE)/
7. Solid-State Marx Generator for the Compact Linear Collider Breakdown Studies – M. J. Barnes, S. Calatroni and W. Wuensch – ABT, VSC and RF Groups, TE and BE Departments CERN – Conference: 2016 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC).
8. A 600V, 1KA compact LTD module using Power MOSFETs – PravinIyengar, T.C.Lim, S.J.Finney, B.W.Williams and M.A.Sinclair –

- University of Strathclyde, Department of Electronic and Electrical Engineering, Glasgow, United Kingdom – Conference: 2012 IEEE international power modulator and high voltage conference, At San diego, CA.
9. SETUP AND TESTING OF A FAST STACKED-MOSFET SWITCH – M. Sack, M. Hochberg, G. Mueller – Karlsruhe Institute of Technology, for Pulsed Power- and Microwave Technology, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1 – Conference: Pulsed Power Conference (PPC), 2013 19th IEEE
 10. A Novel Configuration of Modular Bipolar Pulse Generator Topology Based on Marx Generator With Double Power Charging – Chenguo Yao, Member, IEEE, Shoulong Dong, Student Member, IEEE, Yajun Zhao, Yan Mi, and Chengxiang Li IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 44, NO. 10, OCTOBER 2016.
 11. Metallized Polypropylene Film Capacitors MKP Radial Potted Type (Электронный ресурс) URL: <https://ru.mouser.com/datasheet/2/427/mkp41642-1211348.pdf> (дата обращения 1.05.2019).
 12. Управление Mosfet-транзисторами (Электронный ресурс) URL: <https://vasilisks.wordpress.com/2013/01/07/%D1%83%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5-mosfet-%D0%B0%D0%BC%D0%B8-1/> (Дата обращения 1.05.2019)
 13. Схемы управления MOSFET и IGBT – Полупроводниковая силовая электроника (Электронный ресурс) URL: <http://nauchebe.net/2015/04/sxemy-upravleniya-mosfet-i-igbt-poluprovodnikovaya-silovaya-elektronika/> (Дата обращения 1.05.2019)
 14. СНиП 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение»
 15. ГОСТ 12.1.038–82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
 16. ГОСТ 12.1.010–76 ССБТ. Взрывобезопасность. Общие требования.

17. ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ «Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты».
18. ГОСТ 22614-77. Система «Человек-машина». Выключатели клавишные и кнопочные. Общие эргономические требования.
19. ГОСТ 12.4.011-88. «Инструктаж по технике безопасности».
20. СНИП 2.09.02-85 «Производственные здания»
21. СНИП 2.01.02-85 «Противопожарные нормы»
22. ГОСТ 12.1.004-91 «Пожарная безопасность. Общие требования»
23. ГОСТ 12.4.011-89 «Система стандартов безопасности труда. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация»
24. ГОСТ Р 50648-94 «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к магнитному полю промышленной частоты. Технические требования и методы испытаний»

