

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
Оптимизация параметров высоковольтного субмикросекундного генератора на основе импульсного трансформатора

УДК 621.373.14.027.3:621.314.21

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ71	Цепляева Ирина Васильевна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Егоров Иван Сергеевич	к. т. н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кацук Ирина Вадимовна	к. т. н.		

По разделу «Социальная ответственность»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Техника и физика высоких напряжений	Жгун Дмитрий Владимирович	к. т. н.		

Планируемые результаты обучения ПО ООП

Код результата	Результат обучения
Универсальные компетенции	
P1	Способность <i>совершенствовать</i> и развивать свой <i>интеллектуальный и общекультурный уровень</i> , добиваться <i>нравственного и физического совершенствования</i> своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.
P2	Способность <i>использовать иностранный язык в профессиональной сфере</i> .
P3	Способность применять на практике <i>навыки и умения в организации</i> научно-исследовательских и производственных работ, в <i>управлении</i> коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности
P4	Способность использовать методологические основы <i>научного познания и творчества</i> , научную информацию в развитии отрасли, навыки проведения работ с использованием <i>современных информационных технологий</i> ; синтезировать и критически резюмировать информацию.
Профессиональные компетенции	
P5	Способность применять <i>углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания</i> в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.
P6	Способность <i>ставить и решать инновационные задачи</i> инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности
P7	Способность выполнять <i>инженерные проекты</i> с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.
P8	Способность выполнять инновационные <i>инженерные исследования</i> в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.
P9	Способность проводить <i>технико-экономическое обоснование</i> проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.
P10	Способность проводить <i>монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные</i> работы электроэнергетического и электротехнического оборудования.
P11	Способность осваивать <i>новое</i> электроэнергетическое и электротехническое оборудование; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.
P12	Способность разрабатывать <i>рабочую проектную и научно-техническую документацию</i> в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; <i>составлять оперативную документацию</i> , предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы

Министерство образования и науки 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) (ФИО)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
4ТМ71	Цепляева Ирина Васильевна

Тема работы:

Оптимизация параметров высоковольтного субмикросекундного генератора на основе импульсного трансформатора	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 3830/с от 16.05.2019

Срок сдачи студентом выполненной работы:	11.06.2019
------------------------------------------	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Литературные данные, результаты при проведении НИР
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке	1. Обзор литературы 2. Численная модель высоковольтного генератора 3. Оптимизация работы генератора 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	Кашук Ирина Вадимовна
Социальная ответственность	Романова Светлана Владимировна
Разделы, выполненные на иностранном языке	Ажель Юлия Петровна

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	24.01.2019
-------------------------------------------------------------------------------------------------	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Егоров Иван Сергеевич	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ71	Цепляева Ирина Васильевна		

Министерство образования и науки 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»
Уровень образования: магистр
Отделение материаловедения
Период выполнения: 2018/2019 учебный год

Форма представления работы:

магистерская диссертация

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	11.06.2019
------------------------------------------	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
11.03.2019	Литературный обзор	10
01.04.2019	Объект и методы исследования	10
13.04.2019	Исследование схемы замещения генератора	10
20.04.2019	Оптимизация параметров генератора	20
22.05.2019	Обработка экспериментальных данных	10
25.05.2019	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
31.05.2019	Социальная ответственность	15
08.06.2019	Разделы, выполненные на иностранном языке	10
		<i>Сумма: 100 баллов</i>

Составил руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Егоров Иван Сергеевич	к.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Жгун Дмитрий Владимирович	к.т.н.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа состоит из 104 страницы, 26 рисунков, 33 таблицы, 67 источников, 1 приложение.

Ключевые слова: УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ, ГЕНЕРАТОР ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ (ГВИ), ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ИМПУЛЬСА, ЭЛЕКТРОННЫЙ ПУЧОК, ИМПУЛЬС УСКОРЯЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ.

Объектом исследования выступает численная модель высоковольтного генератора ускорителя «АСТРА».

Цель этой работы - оптимизация параметров схемы высоковольтного генератора ускорителя с целью увеличения эффективности работы.

В процессе исследования проводился поиск оптимальных параметров высоковольтного генератора. Первым параметром выступала высоковольтная емкость, определяющая импульсную мощность генератора. Вторым параметром оптимизации выступало сопротивление нагрузки, которое определяет режим работы генератора (периодический или аperiodический разряд) и амплитуду напряжения импульса.

В результате исследования были определены диапазоны значений, удовлетворяющих установленным условиям моделирования. Результат моделирования позволил установить, что максимальная эффективность работы схемы генератора без учёта потерь достигается при эквивалентной высоковольтной ёмкости генератора 200 пФ (25 Дж) и сопротивлении нагрузки 200 Ом и выше. Максимальная накопленная энергия в генераторе при сохранении длительности импульса менее 1 мкс составит 140 Дж при амплитуде 387 кВ. Ускоритель с импульсом ~500 кВ на нагрузке 400 Ом будет обладать энергозапасом порядка 80 Дж. По результатам работы были построены семейства кривых, позволяющие производить настройку вакуумного диода существующего ускорителя по напряжению на нагрузке.

Обозначения и сокращения

В настоящей работе использованы следующие обозначения и сокращения:

ГИН – генератор импульсных напряжений

ГВИ – высоковольтный генератор

ИП – источник питания

ЛУЭ – линейный ускоритель электронов

НТИ – научно-технические исследования

ППТ – полупроводниковые прерыватели тока

СВЧ – сверхвысокая частота

ЭДС – электродвижущая сила

Оглавление

Введение	10
1. Импульсные электронные ускорители. Литературный обзор	11
1.1 Существующие схемы генерации импульсов ускоряющего напряжения .	12
1.2 Импульсный ускоритель электронов «АСТРА»	18
2. Вычислительная модель генератора ускорителя АСТРА	19
2.1 Принципиальная схема импульсного ускорителя электронов	19
2.2 Параметры схемы замещения выходной цепи генератора	20
3. Определение пределов моделирования	25
3.1 Моделирование заряда высоковольтной ёмкости	25
3.2 Режим короткого замыкания	27
3.3 Анализ длительности импульса	28
3.4 Анализ амплитуды импульса напряжения	37
4. Исследование эффективности передачи энергии в электронный пучок	38
Заключение	43
5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение....	46
5.1 Введение	46
5.2 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	46
5.2.1 Потенциальные потребители результатов исследования	46
5.2.2 Анализ конкурентных технических решений	47
5.2.3 SWOT-анализ	48
5.3 Планирование научно-исследовательских работ	50
5.3.1 Структура работ в рамках научного исследования.....	50

5.3.2	Разработка графика проведения научного исследования.....	51
5.4	Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	56
5.4.1	Расчет материальных затрат НТИ.....	56
5.4.2	Основная заработная плата	57
5.4.3	Дополнительная заработная плата исполнителей темы	59
5.4.4	Амортизация оборудования, используемого для проектирования	60
5.4.5	Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	60
5.4.6	Накладные расходы	61
5.4.7	Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	62
5.5	Определение ресурсной (ресурсосберегающей) и социальной эффективности исследования.....	62
6.	Социальная ответственность	67
6.1	Введение	67
6.2	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	67
6.3	Производственная безопасность	70
6.3.1	Анализ выявленных вредных производственных факторов	71
6.3.2	Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов	77
6.4	Экологическая безопасность	79
6.5	Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	80
6.6	Заключение по разделу «Социальная ответственность»	81
	Список литературы	83

Введение

Ускоритель частиц - это машина, которая ускоряет элементарные частицы, такие как электроны или протоны с энергиями от десятков кэВ до 700 МэВ [1]. На базовом уровне ускорители создают пучки заряженных частиц, которые могут использоваться для различных практических и исследовательских целей. Наибольшее распространение для прикладного использования получили ускорители электронов. На сегодняшний день спектр практического применения электронных ускорителей включает [2]:

- очистка природной воды, сточных вод, дымовых газов;
- утилизация бытовых отходов;
- переработка полимеров [3] ;
- медицина [4];
- применение в досмотровых комплексах [5,6];
- дефектоскопия изделий [7]

Разнообразие применений говорит о том, что создание ускорителей для практического использования является актуальной задачей на сегодняшний день. В научной и технической литературе [8-18] показано множество принципиальных схем импульсных ускорителей и их конструктивных исполнений. Вне зависимости от конструктивного исполнения требуется оптимизация режима работы ускорителя в соответствии с текущей задачей. Для практического использования – режим максимальной эффективности, определяемой как отношение энергии, перенесённой электронным пучком к энергии, запасённой в накопителе. Режим с предельными параметрами (максимальная амплитуда импульса напряжения, тока, требуемая длительность импульса). Первый способ оптимизации - аппаратная оптимизация. Под аппаратной оптимизацией понимается подбор элементов в реальной электрической схеме. Но данный метод требует больших материальных и временных ресурсов. Использование вычислительной модели схемы ускорителя позволяет произвести расчет электрической схемы в определенной программной среде. Такая оптимизация позволяет без больших материальных

затрат и времени обеспечить подбор оптимальных параметров схемы под определённые задачи и требования.

Цель настоящей работы – оптимизация параметров схемы генератора ускорителя с целью увеличения эффективности работы.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Создание уточненной эквивалентной схемы ускорителя.
2. Создание вычислительной модели эквивалентной схемы ускорителя.
3. Верификация модели.
4. Определение влияния каждого элемента схемы на формирование импульса ускоряющего напряжения.
5. Определение диапазонов параметров элементов эквивалентной схемы, критериев оптимизации.
6. Поиск оптимального диапазона параметров элементов по заданным критериям.

1. Импульсные электронные ускорители. Литературный обзор

Возникновение линейных ускорителей электронов (ЛУЭ) связано с развитием техники получения высоких напряжений, необходимых для разгона заряженных частиц. Первое устройство, позволявшее получать напряжения в несколько миллионов Вольт – резонансный трансформатор – было создано и запатентовано Н. Теслой в 1896 г. [19]. В 1919 г. швейцарский физик Г. Грейнахер построил первый каскадный генератор [20], работавший по схеме умножения напряжения, в которой набор конденсаторов заряжался через систему диодов от источника переменного тока. В 1931 американский физик Р. Ван де Грааф создал первый электростатический генератор, позволявший получать напряжение до 80 кВ. В современных устройствах такого типа достигается напряжение на выходе до 20 МВ. Для ускорения электронов до больших энергий используются принципы резонансного и индукционного

ускорения. Активная разработка таких ускорителей велась после 2-й мировой войны и связана с бурным развитием техники генерации СВЧ-колебаний для целей радиолокации. В середине 1960-х гг. в связи с прогрессом мощной высоковольтной импульсной техники возникло новое направление в ускорительной технике – получение пучков заряженных частиц с током до нескольких МА. В конце 20 в. началось широкое использование ускоряющих систем, включающих сверхпроводящие резонаторы. Такие системы позволяют уменьшить потери мощности, расходуемой на нагрев резонаторов.

В таких ЛУЭ высокое напряжение создаётся двумя способами. Первый способ с помощью однофазных или трёхфазных трансформаторов с выпрямителем. Второй способ с использованием схемы умножения напряжения. В электростатических ускорителях для создания высоких напряжений заряд транспортируется к высоковольтному электроду на изолирующей ленте. Электронная пушка, создающая поток электронов, располагается на высоковольтном электроде. Ускоряются электроны в специальной вакуумной камере (ускорительной трубке). Для предотвращения электрического пробоя элементы ускорителя располагаются в баке, заполненном электроизолирующим газом под давлением. Ускорители прямого действия используются при электронно-лучевой сварке, резке и плавке металлов, дефектоскопии изделий, очистке промышленных отходов, а также для улучшения термомеханических свойств полимерных материалов. Пучки ускоренных электронов и тормозное излучение применяются для стерилизации продуктов питания и медицинских инструментов [4].

1.1 Существующие схемы генерации импульсов ускоряющего напряжения

Задача генератора импульсов относительно медленно накопить энергию, сообщаемую им от источника питания [21] и максимально быстро передать её в нагрузку. Существует два электрических способа накопления энергии [22], а

именно емкостной (электрическое поле) и индукционный (магнитное поле).

Ёмкостной метод:

$$E_{эл} = CU_0^2/2, \quad (1)$$

где C – ёмкость накопителя энергии;

U_0 – напряжение, до которого заряжен накопитель.

Индукционный метод:

$$E_{эм} = LI_0^2/2, \quad (2)$$

где L – индуктивность накопителя;

I_0 – ток, протекающий по индуктивности.

В случае ёмкостного накопителя, формирование импульса происходит при подключении нагрузки к обкладкам ёмкости с помощью замыкающего коммутатора, при этом через нагрузку протекает ток:

$$I_n = CdU/dt, \quad (3)$$

где $U(t)$ – напряжение на конденсаторе в процессе его разрядки.

Для появления ЭДС самоиндукции необходимо разорвать ток, проходящий через индуктивность:

$$\mathcal{E}_n = -LdI/dt, \quad (4)$$

где $I(t)$ – ток в процессе формирования импульса.

В литературе [23] рассмотрены случаи с ограничениями, которые определяют максимальную плотность запасаемой энергии для указанных накопителей. Из расчётов в [23] следует, что максимальная плотность, запасенная в индуктивном элементе, может более чем на два порядка быть выше энергии, запасенной в емкостном элементе. Для высвобождения запасенной энергии в нагрузку изменяют состояние «контура сжатия» с помощью переключателя. Именно параметры переключателя определяют максимальную частоту следования генерируемых импульсов.

В роли коммутаторов используются замыкающие ключи, которые применяются вместе с емкостными накопителями энергии. Замыкающие ключи имеют широкий диапазон рабочего напряжения и токов. Существуют

высоковольтные (>5 кВ) и низковольтные (<5 кВ) коммутаторы. Высоковольтные замыкающие ключи – тиратроны, искровые и псевдоискровые разрядники [24]. Параметры импульса на нагрузке напрямую связаны с характеристиками замыкающих ключей [22], тем самым на коммутаторы накладываются особые требования. Для схем выше 200 кВ используют искровые разрядники [25]. Для индуктивных накопителей применяются полупроводниковые прерыватели тока (ППТ) [26,27] совместно с выходными звеньями сжатия мощности генератора. Ускорители, использующие ППТ, представлены в таблице 1.1

Таблица 1.1 – Параметры разработанных в ИЭФ УрО РАН ускорителей электронов с использованием ППТ

Ускоритель	Система сжатия импульса	U, кВ	W, Дж	T _и , нс	Частота, Гц постоянно (пачка)
Малахит	ПТСК	250	3	50	300 (3000)
Технологический	ПТСК	350	7	25	100
Контроль	ПТСК	30-120	0,2	15-20	100 (10 000)
УРТ-0,2	Тиратрон+ППТ	200	1,75	35	250
УРТ-0,5	Тиратрон+ППТ	500	6,25	50	200
УРТ-1	Тиратрон+ППТ	900	25	60	50

Также используются магнитные коммутаторы (дроссели насыщения), которые могут быть в роле накопителей энергии [28]. Например, они используются в ГВИ ускорителей ГЕЗА [29, 30].

Для формирования импульсов высокого напряжения, традиционно, используются генераторы Аркадьева-Маркса. Принцип работы генераторов следующий: заданное количество конденсаторов n , соединенных параллельно, заряжаются до напряжения U_3 , далее при помощи замыкающих коммутаторов соединяются последовательно и на нагрузке импульс имеет значение напряжения равное произведению количества коммутаторов на зарядное напряжение nU_3 .

В зависимости от компоновки и параметров разрядного контура, генератор Аркадьева-Маркса может быть использован как зарядное устройство

накопительных линий генераторов. Также альтернативный вариант, он может быть использован как формирователь импульса на нагрузке длительностью $0.1 \div 1$ наносекунды.

На рисунке 1.1 показан генератор Аркадьева-Маркса с быстродействующим твердотельным коммутатором, предназначенным для заряда формирующей линии с коммутацией магнитным ключом. Построение генератора по этой схеме позволяет улучшить частотные и ресурсные характеристики ускорителя. Данный ускоритель способен получать импульсный пучок с энергией до 500 кэВ, током до 100 кА и длительностью импульса 140 нс, с частотой повторения 5 имп./с.

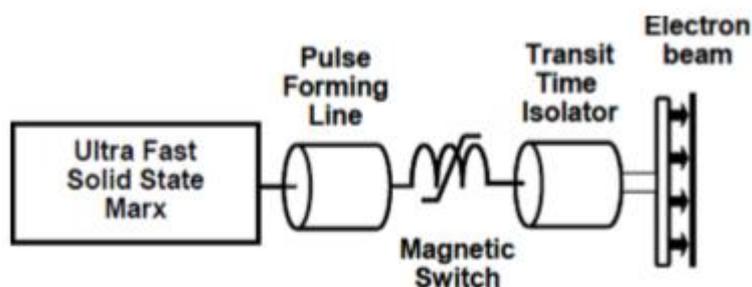


Рисунок 1.1 – Генератор Аркадьева-Маркса с быстродействующим твердотельным коммутатором

Аналогично построен генератор ускорителя RHEPP II (2,5 МВ, 25 кА) [31]. Существенным недостатком таких систем является высокая цена ускорителя, большие габариты и вес. Зарядка формирующей линии может осуществляться по трансформаторной схеме, как в ускорителе ETIGO-IV [32]. Данный ускоритель способен получать электронный пучок током до 13 кА с длительностью импульса 120 нс, с напряжением 400 кВ и с частотой повторений 1 имп./с.

Еще одно успешное исполнение генераторов высоковольтных импульсов заключается в применении трансформаторов Тесла. Трансформатор Тесла состоит из двух контуров, связанных индуктивно, работающих в режиме свободных колебаний. Схема показана на рисунке 1.2.

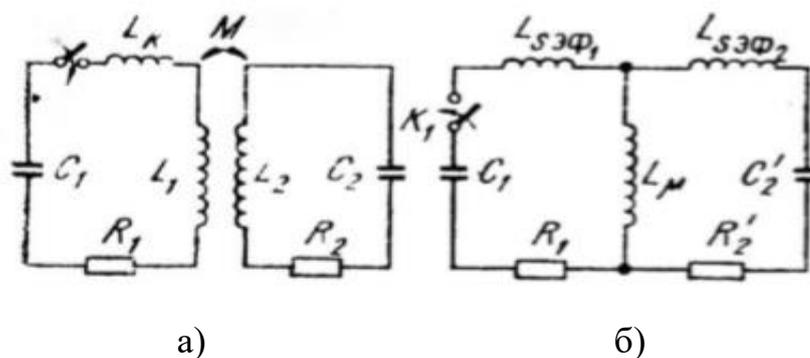


Рисунок 1.2 – а) схема трансформатора Тесла, б) схема трансформатора Тесла, приведенная к первичной цепи

Токи свободных колебаний [33]:

$$\frac{1}{L_1 C_1} I_1 + \frac{R_1}{L_1} \cdot I_1 + \ddot{I}_1 + \frac{M}{L_1} \ddot{I}_2 = 0$$

$$\frac{1}{L_2 C_2} I_2 + \frac{R_2}{L_2} \cdot I_2 + \ddot{I}_2 + \frac{M}{L_2} \ddot{I}_1 = 0$$

где M - коэффициент взаимной индукции;

L_1, L_2 - соответственно индуктивности первичного и вторичного контуров с учетом индуктивностей обмоток трансформатора и собственных конструктивных индуктивностей контуров.

В таблице 1.2 показаны примеры применения трансформаторов Тесла в России и за рубежом.

Таблица 1.2 – Характеристики ускорителей электронов с генераторами на основе трансформатора Тесла.

Ускоритель	Амплитуда ускоряющего напряжения, кВ	Амплитуда импульса тока, кА	Длительность импульса, нс	Частота следования импульсов, имп./с	Литература
Синус-6	400	8,0	25	100	[33]
Синус-5	700	6,0	5	100	[33]
РИТА-150	150	0,5	10	15	[33]
Sinus-160	300	3,0	4,5	100	[34]
Sinus-500	550	5,5	22	150	[34]
Sinus-700/90	450	7,5	90	200	[34]
Sinus-700	1000	10	30	0.1	[35]
РАДАН-220	200	–	3	10	[35]
РАДАН-303	400	6	4–5	10	[36]
РАДАН-ЭКСПЕРТ	150–160	–	2	10	[36]

Трансформатор Тесла, встроенный в формирующую линию, которая отделена от вакуумного электродного диода газовым разрядником, используют в ускорителях Синус-6 (1980г.), Синус-5 и Рита-150 (Таблица 1.2). Конструктивная схема ускорителей показана на рисунке 1.3.

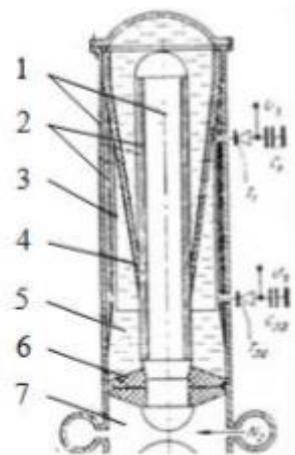


Рисунок 1.3 – Конструктивная схема ускорителей:

1 – формирующая линия; 2 – магнитопровод; 3 – первичный виток; 4 – катушка вторичной обмотки; 5 – трансформаторное масло; 6 – проходной изолятор; 7 – обостряющий разрядник;

Такие схемы использовались в ускорителях серии SINUS в 1990 – 2002 гг. [33].

Также рассмотрим генератор серии РАДАН, показанный на рисунке 1.4а. Данные генераторы использовались как наносекундные драйверы для создания субнаносекундных генераторов импульсов. Они также содержат в составе схемы трансформатор Тесла. Трансформатор Тесла здесь выполнен с разомкнутым стальным магнитопроводом для зарядки несимметричной двойной формирующей линии (рисунок 1.4б).

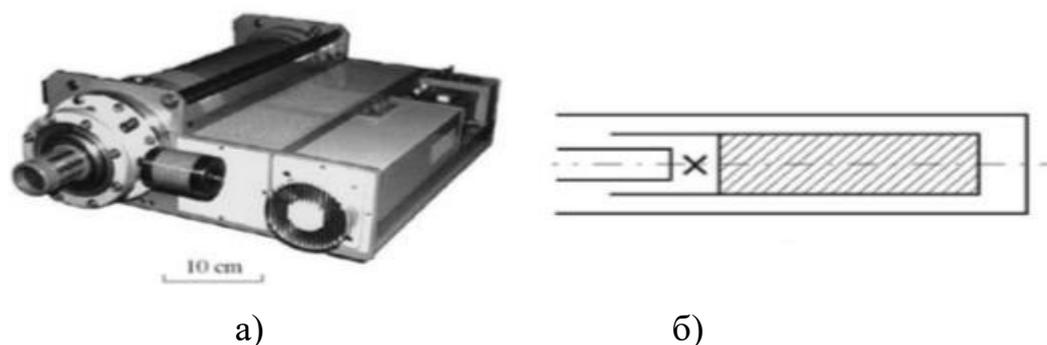


Рисунок 1.4 – а) внешний вид генератора РАДАН; б) несимметричная двойная формирующая линия. Здесь знаком X показано место установки коммутатора.

В данной главе были рассмотрены существующие схемы генераторов и их принцип действия, а именно схема Аркадьева-Маркса и схема с применением трансформаторов Тесла. Также были приведены как зарубежные ускорители, так и русские ускорители на их основе.

1.2 Импульсный ускоритель электронов «АСТРА»

В данной работе в качестве исследуемого ускорителя выбран ускоритель «АСТРА» [37]. Ускоритель «АСТРА» создан в Томском политехническом университете. Данный импульсный ускоритель электронов создан на основе генератора высоковольтных импульсов, описанного в [38]. Характеристики генератора позволяют формировать на нагрузке импульс высокого напряжения длительностью до 1 мкс с частотой следования до 100 имп./с. Генератор нагружен непосредственно на вакуумный электронный диод для производства пучка ускоренных электронов.

Изучение воздействия импульсного электронного пучка наносекундной длительности позволило найти применение импульсным ускорителям во многих сферах народного хозяйства и промышленности [39-42].

Также в современном мире повышенное внимание к экологической обстановке актуализировало применение ускорителей электронов для решения

Высоковольтная емкость $C2$ заряжается следующим образом: емкость $C1$ заряжается квазипостоянным напряжением от источника со стабилизированным током I . Амплитуда напряжения заряда равна 0,5-2 кВ, которая может регулироваться. Когда поступает сигнал управления от внешнего генератора коммутатор $VT1$ (тиристорный) отпирается и в контуре $C1, T1, C2, T2$ возникают свободные колебания с круговой частотой, близкой:

$$\omega = 1/\sqrt{L_P * C_{\Sigma}}, \quad (5)$$

где L_P – индуктивность рассеяния трансформатора $T1$;

$$C_{\Sigma} = (C1 \cdot C2')/(C1 + C2') \quad (6)$$

$$C2' = C2 \cdot k_{T1}^2 \quad (7)$$

где k_{T1} – коэффициент трансформации $T1$.

При $C1=C2'$, накопитель $C1$ полностью разряжается за время $t=T/2=\pi/\omega$, соответственно $C2$ за это же время заряжается до максимального напряжения, сердечник $T2$ перемагничивается до $-B_s$. Синусоидальный ток в контуре $C1, L_P, C2$ становится равным нулю. В этот момент, по сигналу запуска от СЗК открывается $VT2$ - энергия из $C2$ через автотрансформатор $T2$ выделяется в нагрузку. На этом рабочий цикл заканчивается.

2.2 Параметры схемы замещения выходной цепи генератора

На основании принципиальной схемы ускорителя (рисунок 2.1) к расчёту была принята упрощенная схема замещения (рисунок 2.2) основных узлов высоковольтной части ускорителя с учётом значимых конструктивных особенностей.

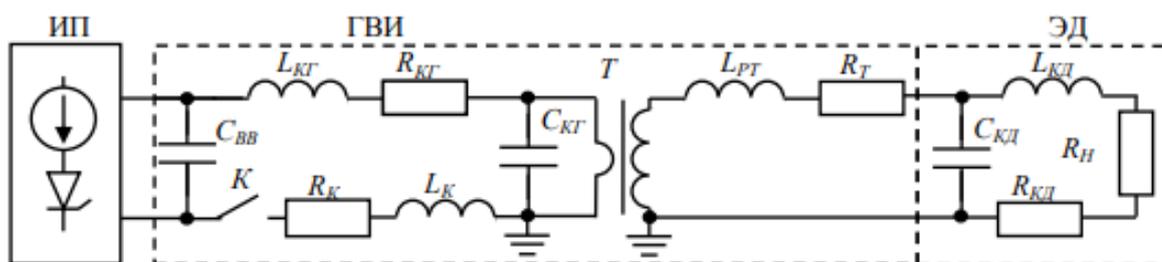


Рисунок 2.2 – Схема замещения высоковольтного генератора ускорителя «АСТРА».

ИП – источник питания; ГВИ – высоковольтный генератор;
 ЭД – электронный диод; $C_{ВВ}$ – высоковольтный ёмкостный накопитель;
 $L_{КГ}$ – индуктивность контура разряда высоковольтного ёмкостного накопителя; $R_{КГ}$ – сопротивление контура разряда ёмкостного накопителя;
 K – высоковольтный коммутатор; R_K – сопротивление токопроводящего канала коммутатора; T – высоковольтный импульсный трансформатор;
 $L_{РТ}$ – индуктивность рассеяния трансформатора; R_{OT} – сопротивление обмоток трансформатора; $C_{КГ}$ – конструктивная ёмкость генератора;
 $L_{КД}$ – индуктивность электронного диода; $C_{КД}$ – конструктивная ёмкость диода; R_H – сопротивление нагрузки;

Источник питания, осуществляет заряд ёмкостного накопителя $C_{ВВ}$ за время $t_{зар} = 25$ мкс до заданного амплитудного значения. Ёмкостный накопитель $C_{ВВ}$ соединён с ИП линией зарядки – токопроводом, выполненным в виде кабельной линии, влияние которой учитывалось при получении осциллограммы зарядного напряжения $C_{ВВ}$.

Для моделирования импульсного трансформатора принята Т-образная схема замещения [48,49]. Для учёта умножения напряжения в трансформаторной связи все номиналы элементов были приведены к единому напряжению высокой стороны с коэффициентом K^2 , где K коэффициент трансформации. Это было сделано для учета умножения напряжения в трансформаторной связи. Схема замещения высоковольтного генератора ВГ (Рисунок 2.2) представлена функциональными элементами $C_{ВВ}$, R_H , K и T , а так же конструктивными параметрами, влияющими на баланс энергии в генераторе $L_{КГ}$, $R_{КГ}$, R_K , $L_{РТ}$, R_{OT} , $C_{КГ}$, $L_{КД}$, $C_{КД}$. Значения параметров элементов схемы замещения, определяемых конструктивным исполнением, были

оценочно рассчитаны исходя из геометрических размеров токопроводов с учётом проводимости материала и поверхностного эффекта [50,51,52]. Значение индуктивности L_k было выбрано согласно полученному значению в [53]. Для оценки значений конструктивных ёмкостей $C_{КГ}$ и $C_{КД}$, ввиду малой их величины для корректного инструментального измерения, был использован расчёт в программе моделирования полей ELCUT 5.5 Профессиональная версия. При этом учитывалось, что основной составляющей конструктивной ёмкости генератора $C_{КГ}$ является ёмкость градиентных колец высоковольтного изолятора электронной пушки относительно заземлённого корпуса, а для конструктивной ёмкости диода $C_{КД}$ – ёмкость катододержателя относительно градиентных колец высоковольтного изолятора электронной пушки и относительно заземлённого корпуса генератора.

Результаты оценочных расчётов сведены в таблицу 2.1.

Параметры элементов схемы замещения генератора ускорителя «АСТРА» были взяты из [50-53] и приведены в таблице 2.1. Следует отметить, что индуктивность контура разряда высоковольтного ёмкостного накопителя $L_{КГ}$ (Рисунок 2.2) является эквивалентным значением и складывается из индуктивности элементов по пути следования разрядного тока: батареи конденсаторов, участка корпуса и контактной системы коммутатора. Оценочное омическое сопротивление перечисленных элементов учитывается значением $R_{КГ}$ [51].

Таблица 2.1 – Параметры элементов схемы замещения генератора ускорителя «АСТРА».

Обозначение элемента	$C_{ВВ}$	$L_{КГ}$	$R_{КГ}$	L_k	R_k	$C_{КГ}$	$L_{РТ}$	R_T	$L_{КД}$	$C_{КД}$	$R_{КД}$
Единицы измерения	нФ	нГн	Ом	нГн	мОм	пФ	мкГн	мОм	нГн	пФ	мОм
Оценочное значение параметра	88	13	1,45	18	21	120	6,9	28	160	83	10

Полученные параметры элементов схемы замещения генератора содержат данные, учитывающие параметры ключевых узлов генератора, влияющих на характеристики формируемого импульса ускоряющего напряжения.

По данной схеме замещения была смоделирована модель генератора, показанная на рисунке 2.3. Данная схема была апробирована в [54].

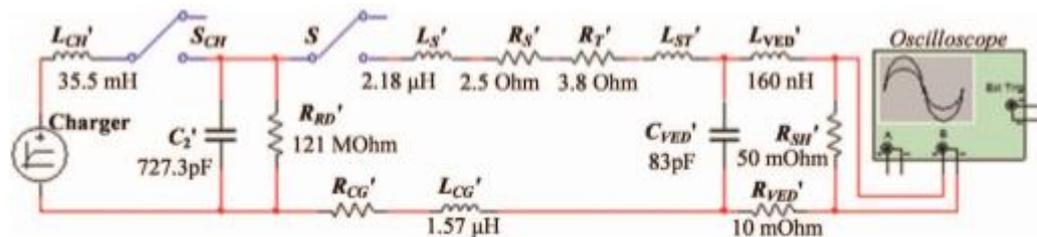


Рисунок 2.3 – Модель генератора [54]

Также в статье [54] представлены графики, показанные на рисунке 2.4 и демонстрирующие корректность воспроизводства импульса напряжения вычислительной моделью генератора.

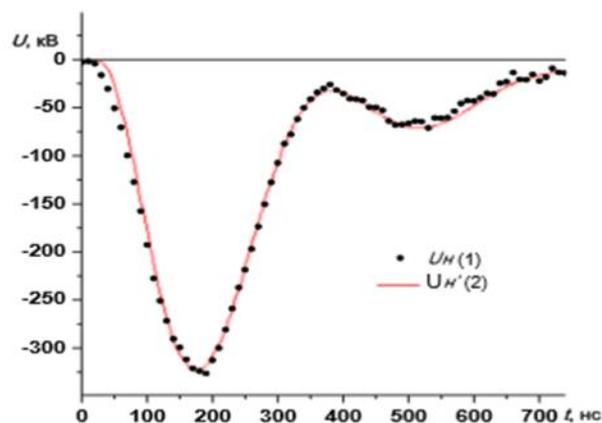


Рисунок 2.4 – Осциллограмма напряжение: 1) натуральный результат, 2) смоделированный результат [54]

Из рисунка 2.4 видно, что результат, полученный при помощи моделирования, повторяет натуральный эксперимент, что говорит о правильности заложенных идей.

Чтобы изучить возможности схемы, показанной на рисунке 2.3, необходимо прибегнуть к изменению параметров генератора. Первым параметром будет выступать высоковольтная емкость, определяющая импульсную мощность генератора. Вторым параметром оптимизации выступает сопротивление нагрузки, которое определяет режим работы генератора (периодический или аperiodический разряд) и амплитуду напряжения импульса. Для получения корректных измерений необходимо ввести ограничения, которые обеспечивают эффективную работу генератора:

- *Длительность импульса не превышает 1 мкс.* При изменении высоковольтной емкости, будет происходить накопление разного количества энергии при том же зарядном напряжении. При увеличении количества накопленной энергии и неизменной цепи разряда увеличивается длительность разряда. Ускоряющий промежуток вакуумного диода ускорителя сохраняет электрическую прочность для импульса напряжения до 500 кВ длительностью менее 1 мкс. И если на него подается импульс с большей длительностью, то вероятность пробоя промежутка существенно увеличивается. Для нашего исследования принимаем ограничение длительности импульса ускоряющего напряжения 1 мкс из условий электрической прочности промежутка и эффективности компрессии энергии генератором (насыщение сердечника трансформатора).

- *Энергия электронов должна быть выше 100 кэВ.* Ускоритель использует вакуумный электронный диод с выпуском электронов из области генерации в область использования (атмосферу). Вывод электронов происходит через титановую мембрану выпускного окна толщиной 50-60 мкм. Электроны с энергией меньше 100 кэВ остаются в фольге. Следовательно, необходимо оценивать эффективность для электронов с энергией больше 100 кэВ, которые ускоряются при напряжении больше 100 кВ.

- *Ограничение напряжения на нагрузке 500 кВ.* Ускорители с зарядным напряжением свыше 500 кВ требуют сложной защиты от рентгена, а также необходимо иметь дополнительное разрешение от Роспотребнадзора.

- *Апериодический режим.* При периодическом режиме разряда генератора увеличивается вероятность переключения ускоряющего промежутка, приводящего к выходу из строя вакуумного электронного диода.

- *Потери энергии.* Оптимизация схемы производится на основе анализа режимов генерации импульсов напряжения и не включает потери энергии при компрессии импульса и формировании пучка электронов.

3. Определение пределов моделирования

В данном разделе представлена модель генератора, смоделированная в программной среде NI Multisim. При помощи данной модели генератора производился поиск оптимальных параметров зарядной емкости $C_{вв}$ и сопротивления нагрузки R_n для выявления максимальной эффективной работы генератора. В рамках исследования первой итерации приняли:

- зарядная емкость $C_{вв}$ (от 50 пФ до 1100 пФ) с шагом 100 пФ;
- сопротивление нагрузки R_n (от 25 Ом до 100 Ом) с шагом 25 Ом и (от 100 Ом до 400 Ом) с шагом 100 Ом.

Выбор первичного диапазона параметров моделирования основан на анализе режимов работы существующего ускорителя АСТРА.

3.1 Моделирование заряда высоковольтной ёмкости

Для достижения поставленной цели в данной магистерской работе была смоделирована в программной среде NI Multisim электрическая схема генератора, представленная на рисунке 3.1 [49]. Данная модель схемы генератора была составлена из схемы замещения высоковольтного генератора ускорителя «АСТРА» (рисунок 2.2). Значения для моделирования схемы были взяты из таблицы 2.1. Создание модели электронной схемы позволяет

исследовать работу генератора в различных режимах, без проведения натурных экспериментов.

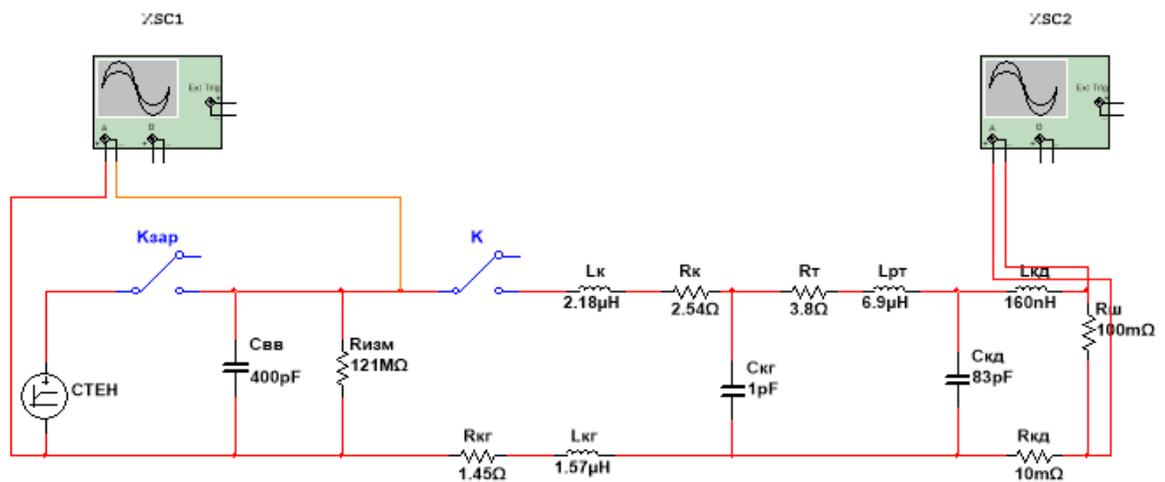


Рисунок 3.1 - Электрическая схема генератора в программной среде NI Multisim

Ключи, применяемые в электрической схеме, для упрощения имеют идеальные характеристики.

Осциллограф 1 предназначен для регистрации напряжения на эквивалентной ёмкости $C_{ВВ}'$ (Рисунок 3.1). Заряд $C_{ВВ}'$ осуществляется от эквивалентного источника питания ИП', представляющего собой источник постоянного напряжения, отделённый индуктивностью зарядного дросселя. Для упрощения модели и ограничения влияния моделируемого ИП, ключ $K_{ЗАР}$ после окончания процесса зарядки размыкается.

Далее на рисунке 3.2 представлена осциллограмма напряжения на зарядной емкости $C_{ВВ}$.

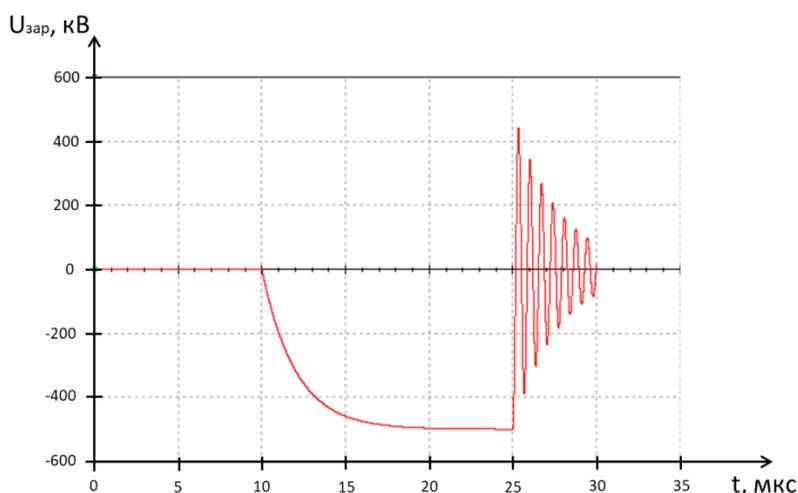


Рисунок 3.2 – Заряд батареи конденсатора $C_{вв}$ от источника питания

Из осциллограммы напряжения, показанной на рисунке 3.2, видно, что конденсатор $C_{вв}$ заряжается до 497 кВ за время 25 мкс. Для обеспечения корректных исследований необходимо было обеспечить одинаковые условия, а именно максимальная амплитуда напряжения, для всех вариантов моделирования, на зарядной емкости составляла 497 кВ.

3.2 Режим короткого замыкания

Для определения частоты и периода собственных колебаний разрядной цепи генератора был смоделирован опыт короткого замыкания.

Модель генератора, показанная на рисунке 3.3, соответствует режиму работы близкому к короткому замыканию.

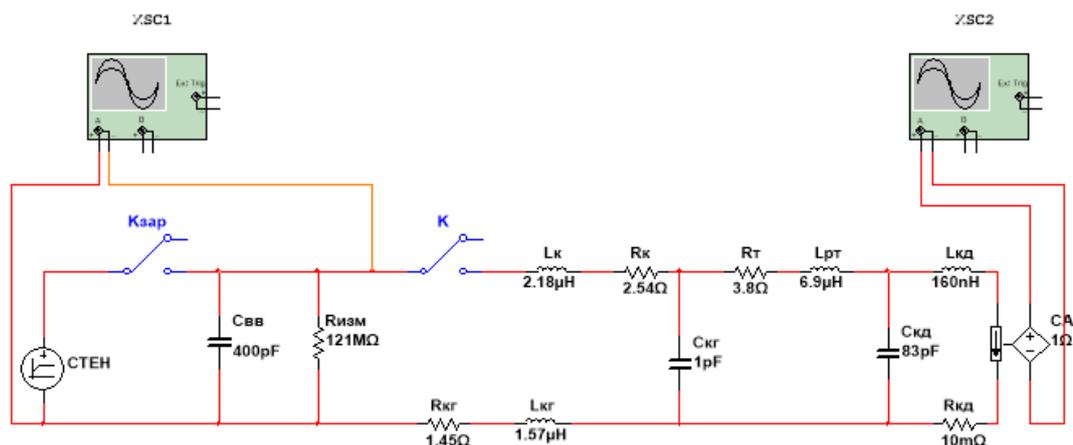


Рисунок 3.3 – Электрическая схема генератора в режиме короткого замыкания

Для получения осциллограммы тока необходимо было добавить датчик тока СА (аналог пояса Роговского в схеме диагностики ускорителя АСТРА), с которого снималась осциллограмма тока короткого замыкания, показанная на рисунке 3.4.

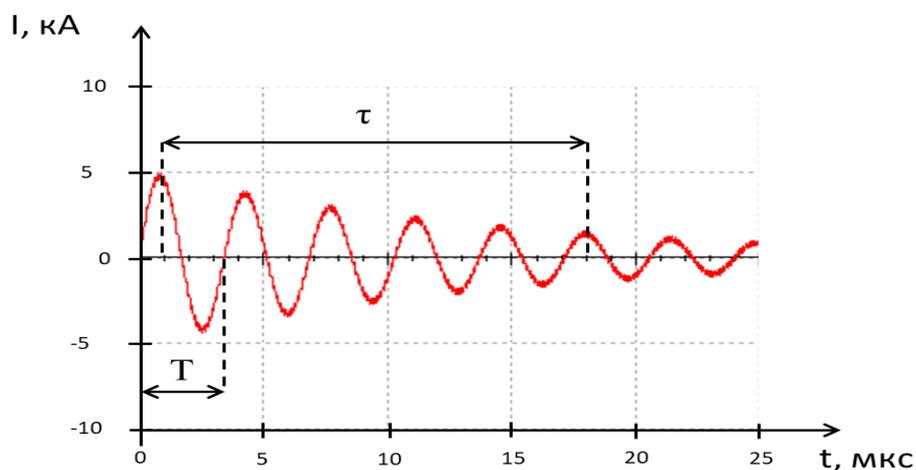


Рисунок 3.4 – Осциллограмма тока короткого замыкания, полученная при помощи моделирования в NI Multisim

Анализ кривой тока показал, что колебания в разрядном контуре носят затухающий характер с периодом колебания $T = 0,689$ мкс, а постоянная времени затухания $\tau = 6,42$ мкс.

3.3 Анализ длительности импульса

Необходимо найти значения зарядной емкости $C_{ВВ}$ и сопротивления нагрузки $R_{Н}$, при которой длительность импульса будет превышать 1 мкс. Для этого было произведено первое итерационное измерение с максимальным значением зарядной емкости $C_{ВВ}$ и сопротивления нагрузки $R_{Н}$. На рисунке 3.5 показана схема моделирования генератора.

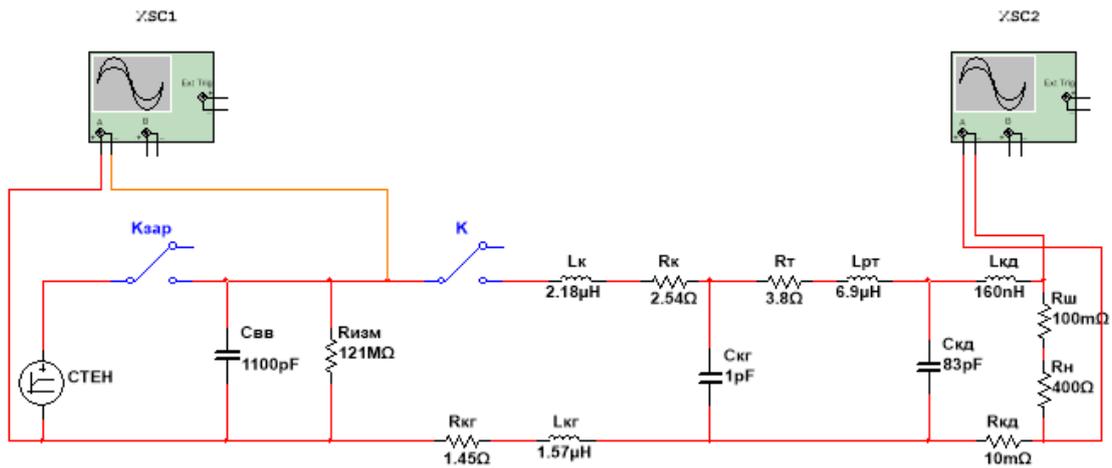


Рисунок 3.5 – Схема моделирования генератора

На рисунке 3.6 представлена осциллограмма импульса, на которой показано как находится длительность импульса. За длительность импульса t принимаем временной период равный 3τ , где τ период собственных колебаний разрядной цепи.

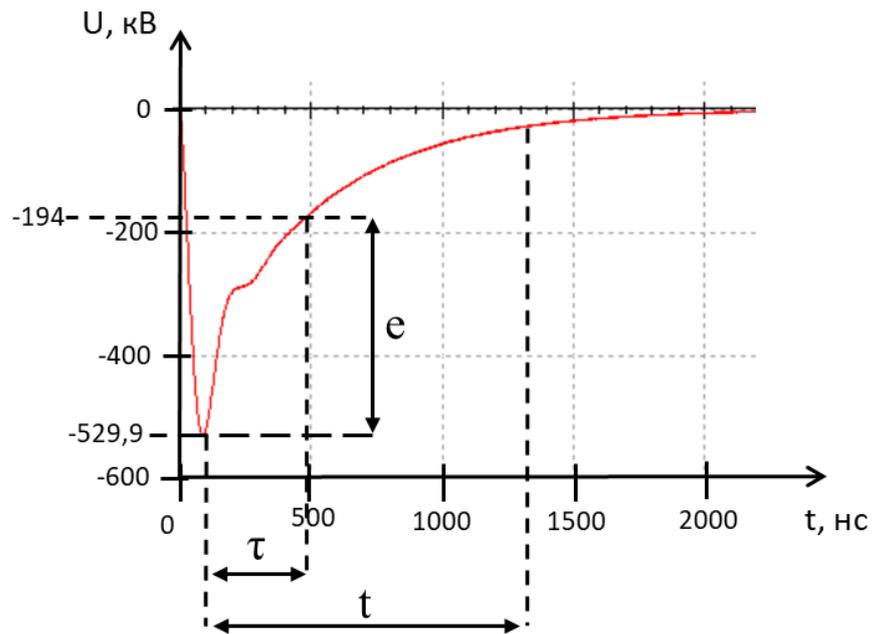


Рисунок 3.6 – Осциллограмма импульса

В Таблице 3.1 занесены значения изменения длительности импульса от зарядной емкости $C_{вв}$ для сопротивления нагрузки 400 Ом.

Таблица 3.1 – Длительности импульса от $C_{\text{ВВ}}$ для нагрузки 400 Ом

$C_{\text{ВВ}}$, пФ	U_{max} , кВ	τ , мкс	$t=3*\tau$, мкс
50	215,9	0,078	0,234
100	300,8	0,103	0,309
200	385,9	0,129	0,387
300	429,9	0,153	0,459
400	458,7	0,166	0,498
500	477,3	0,188	0,564
600	490,3	0,282	0,846
700	503	0,309	0,927
800	512	0,341	1,023
900	519,3	0,369	1,107
1000	525,1	0,401	1,203
1100	529,9	0,439	1,317

Далее представлены графики τ от $C_{\text{ВВ}}$ и U_{max} от τ .

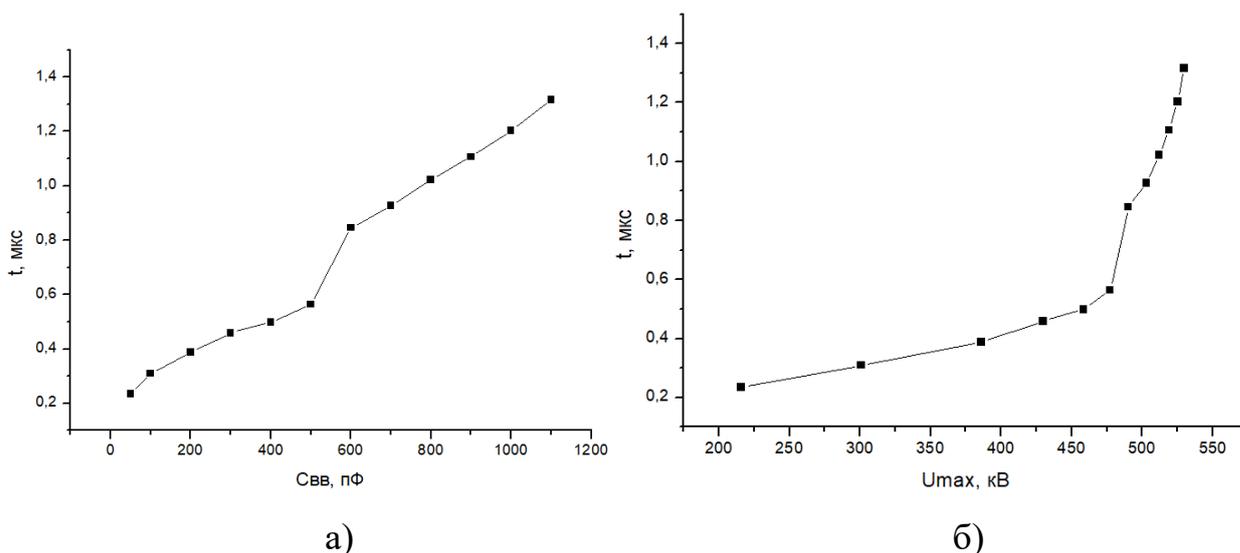


Рисунок 3.7 – Зависимости: а) τ от $C_{\text{ВВ}}$, б) τ от U_{max}

На практике сопротивление нагрузки в 400 Ом для вакуумного электронного диода труднодостижимо, следовательно, диапазон значений и шаг сопротивления нагрузки приняли (от 25 Ом до 100 Ом) с шагом 25 Ом и (от 100 Ом до 400 Ом) с шагом 100 Ом.

При сопротивлении нагрузки 300 Ом значения длительности импульса от зарядной емкости $C_{\text{ВВ}}$ представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Длительности импульса от $C_{вв}$ для нагрузки 300 Ом

$C_{вв}$, пФ	U_{max} , кВ	τ , мкс	$t=3*\tau$, мкс
50	188	0,082	0,246
100	260,5	0,104	0,312
200	334,4	0,129	0,387
300	371,5	0,149	0,447
400	399,9	0,174	0,522
500	416,9	0,197	0,591
600	428,9	0,231	0,693
700	442,3	0,263	0,789
800	450,8	0,299	0,897
900	457,5	0,323	0,969
1000	462,9	0,366	1,098
1100	467,5	0,389	1,167

Далее представлены графики τ от $C_{вв}$ и U_{max} от τ .

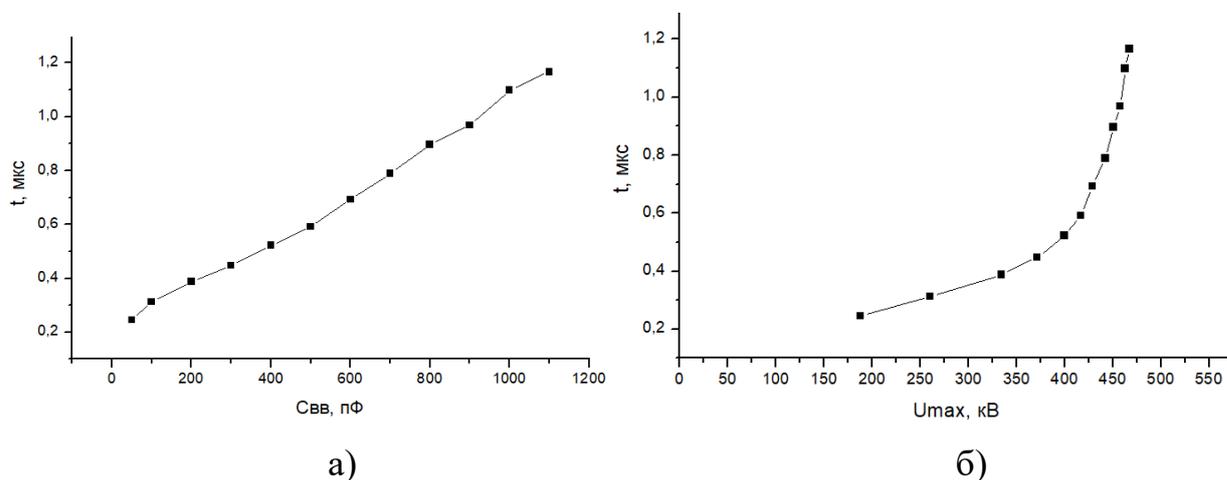


Рисунок 3.8 – Зависимости: а) τ от $C_{вв}$, б) τ от U_{max}

Далее моделировалась ситуация для сопротивления нагрузки 200 Ом. Значения длительности импульса от зарядной емкости $C_{вв}$ представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Длительности импульса от $C_{вв}$ для нагрузки 200 Ом

$C_{вв}$, пФ	U_{max} , кВ	τ , мкс	$t=3*\tau$, мкс
50	148,3	0,086	0,258
100	202,5	0,096	0,288
200	263,2	0,128	0,384
300	294,5	0,150	0,450
400	319,3	0,182	0,546
500	334	0,197	0,591

C_{BB} , пФ	U_{max} , кВ	τ , мкс	$t=3*\tau$, мкс
600	349,3	0,228	0,684
700	359	0,251	0,753
800	366,5	0,267	0,801
900	372,4	0,295	0,885
1000	381,9	0,308	0,924
1100	387	0,327	0,981

Далее представлены графики τ от C_{BB} и U_{max} от τ .

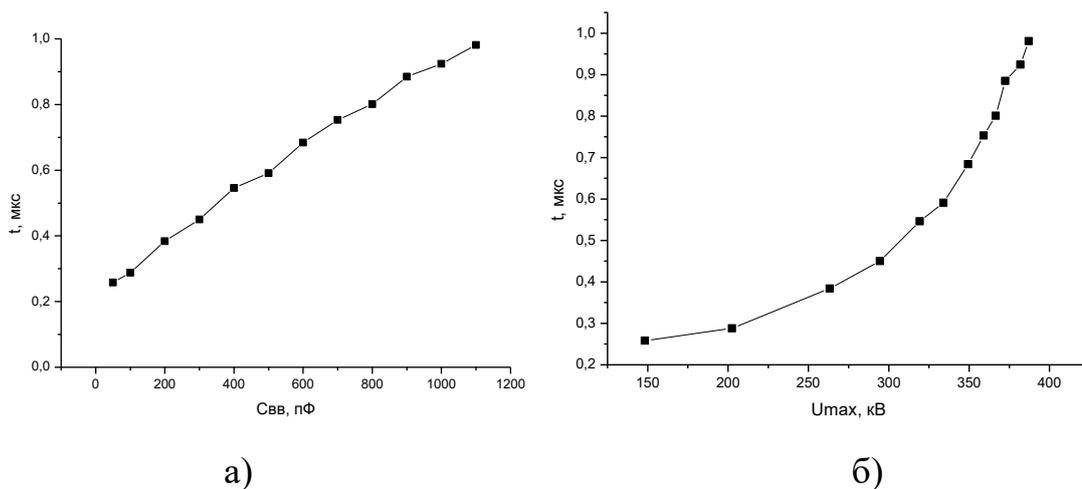


Рисунок 3.9 – Зависимости: а) τ от C_{BB} , б) τ от U_{max}

Сопротивление нагрузки 100 Ом. Значения длительности импульса от зарядной емкости C_{BB} представлены в таблице 7.

Таблица 3.4 – Длительности импульса от C_{BB} для нагрузки 100 Ом

C_{BB} , пФ	U_{max} , кВ	τ , мкс	$t=3*\tau$, мкс
50	91,5	0,072	0,216
100	123	0,093	0,279
200	158,6	0,129	0,387
300	182,8	0,156	0,468
400	201,8	0,179	0,537
500	217,4	0,206	0,618
600	226,9	0,215	0,645
700	239,1	0,239	0,717
800	246	0,257	0,771
900	256	0,271	0,813
1000	261,6	0,289	0,867
1100	266,3	0,306	0,918

Далее представлены графики τ от $C_{\text{вв}}$ и U_{max} от τ .

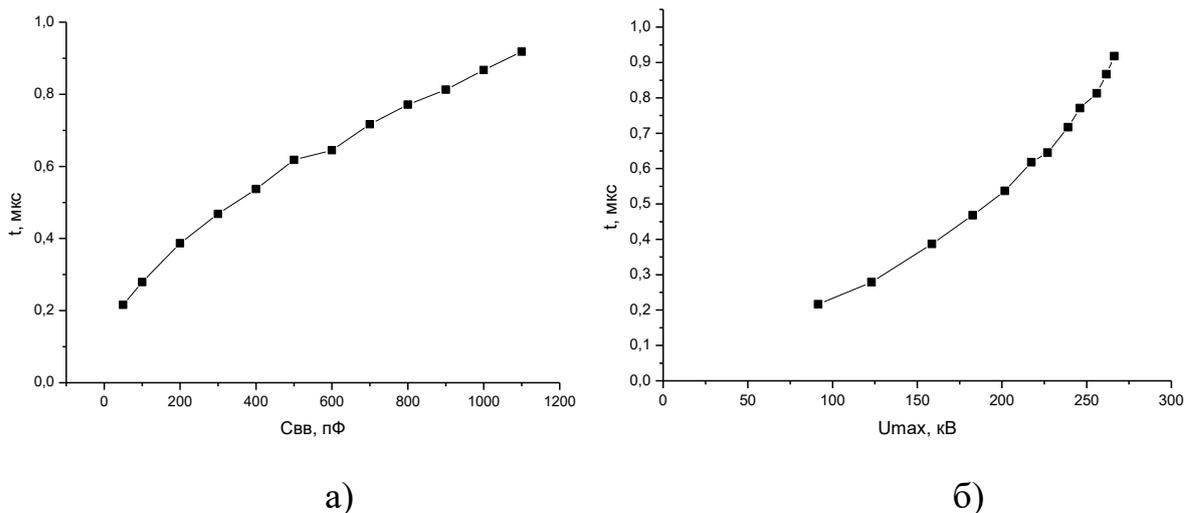


Рисунок 3.10 – Зависимости: а) τ от $C_{\text{вв}}$, б) τ от U_{max}

Сопротивление нагрузки 75 Ом. Значения длительности импульса от зарядной емкости $C_{\text{вв}}$ представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Длительности импульса от $C_{\text{вв}}$ для нагрузки 75 Ом

$C_{\text{вв}}$, пФ	U_{max} , кВ	τ , мкс	$t=3*\tau$, мкс
50	72	0,070	0,210
100	97	0,097	0,291
200	126,2	0,129	0,387
300	146,5	0,152	0,456
400	162,9	0,183	0,549
500	176,7	0,204	0,612
600	184,8	0,223	0,669
700	196	0,243	0,729
800	205,9	0,256	0,768
900	211,7	0,268	0,804
1000	216,5	0,288	0,864
1100	224,9	0,299	0,897

Далее представлены графики τ от $C_{\text{ВВ}}$ и U_{max} от τ .

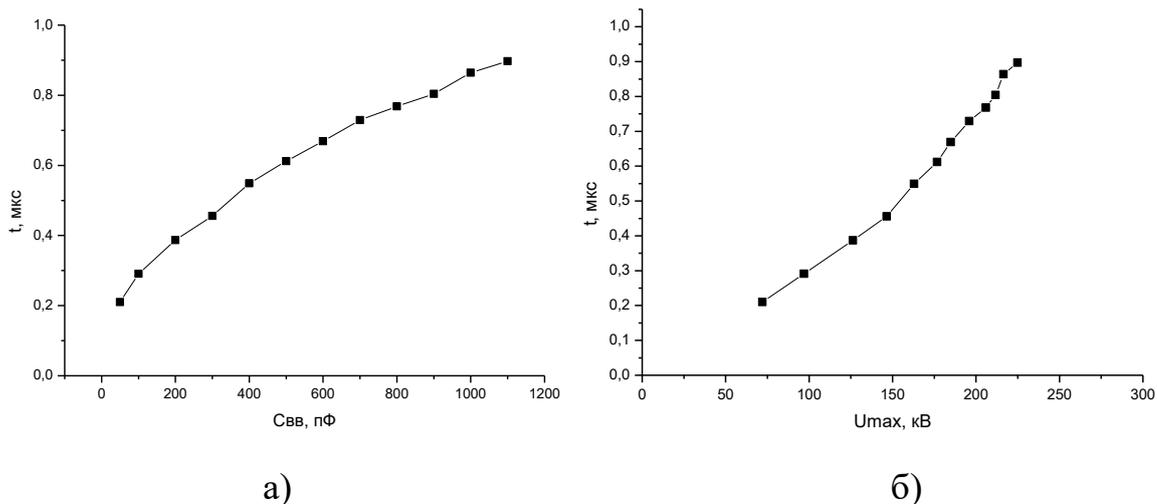


Рисунок 3.11 – Зависимости: а) τ от $C_{\text{ВВ}}$, б) τ от U_{max}

При сопротивлении нагрузки 50 Ом. Значения длительности импульса от зарядной емкости $C_{\text{ВВ}}$ представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Длительности импульса от $C_{\text{ВВ}}$ для нагрузки 50 Ом

$C_{\text{ВВ}}$, пФ	U_{max} , кВ	τ , мкс	$t=3*\tau$, мкс
50	50	0,069	0,207
100	68,2	0,096	0,288
200	89,8	0,138	0,414
300	105,2	0,159	0,477
400	117,9	0,187	0,561
500	128,8	0,204	0,612
600	138,5	0,222	0,666
700	144,4	0,240	0,720
800	152,7	0,254	0,762
900	157,2	0,271	0,813
1000	164,7	0,283	0,849
1100	168,4	0,304	0,912

Далее представлены графики τ от $C_{вв}$ и U_{max} от τ .

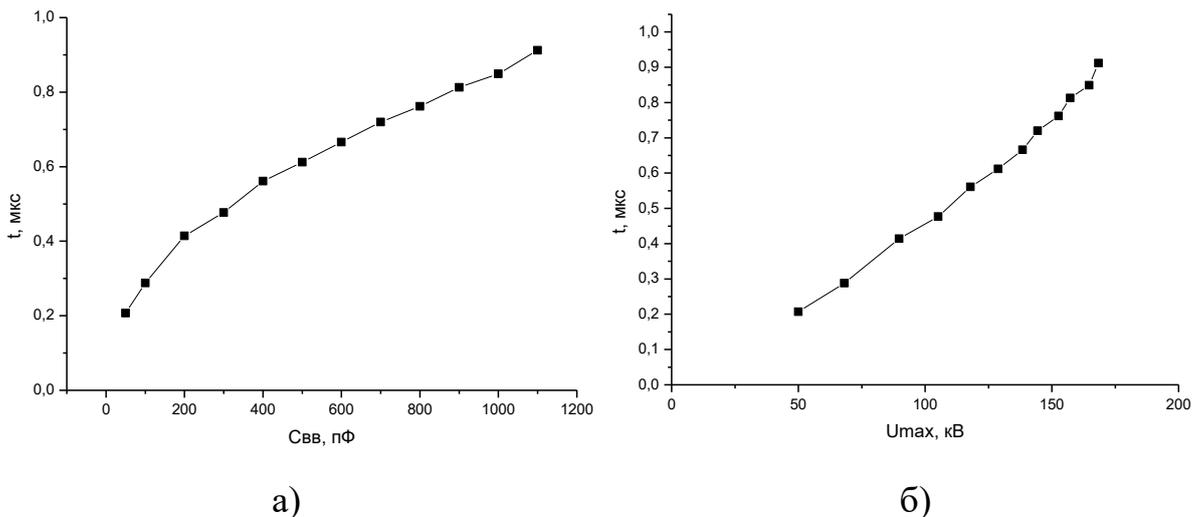


Рисунок 3.12 – Зависимости: а) τ от $C_{вв}$, б) τ от U_{max}

Также для сопротивления нагрузки 25 Ом, были проведены аналогичный эксперимент. Значения длительности импульса от зарядной емкости $C_{вв}$ представлены в таблице 10.

Таблица 3.7 – Длительности импульса от $C_{вв}$ для нагрузки 25 Ом

$C_{вв}$, пФ	U_{max} , кВ	τ , мкс	$t=3*\tau$, мкс
50	25,2	0,071	0,213
100	35,1	0,098	0,294
200	48,4	0,128	0,384
300	57,2	0,158	0,474
400	64,6	0,182	0,546
500	71,3	0,208	0,624
600	77,3	0,227	0,681
700	82,7	0,238	0,714
800	86,1	0,262	0,786
900	91	0,274	0,822
1000	95,6	0,291	0,873
1100	98,3	0,301	0,903

Далее представлены графики τ от $C_{\text{ВВ}}$ и U_{max} от τ .

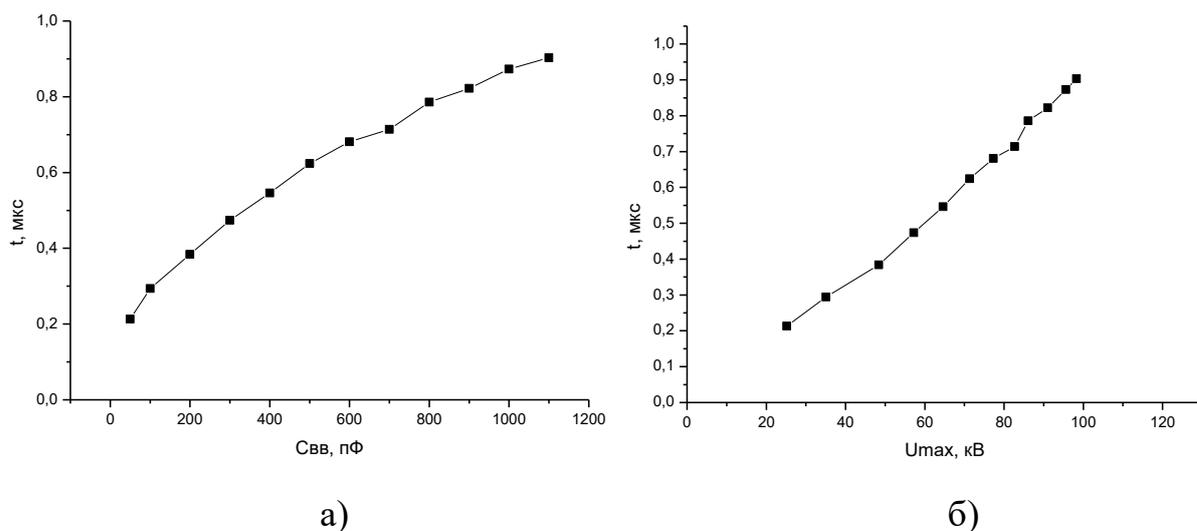


Рисунок 3.13 – Зависимости: а) τ от $C_{\text{ВВ}}$, б) τ от U_{max}

Далее значения длительности импульса были записаны в обобщенную таблицу 3.8 для всех значений зарядной емкости $C_{\text{ВВ}}$ и сопротивления нагрузки R_{H} .

Таблица 3.8 – Длительность импульса (мкс) при изменении $C_{\text{ВВ}}$ и R_{H}

R_{H} , Ом \ $C_{\text{ВВ}}$, пФ	25	50	75	100	200	300	400
50	0,213	0,207	0,210	0,216	0,258	0,246	0,234
100	0,294	0,288	0,291	0,279	0,288	0,312	0,309
200	0,384	0,414	0,387	0,387	0,384	0,387	0,387
300	0,474	0,477	0,456	0,468	0,450	0,447	0,594
400	0,546	0,561	0,549	0,537	0,546	0,522	0,498
500	0,624	0,612	0,612	0,618	0,591	0,591	0,564
600	0,681	0,666	0,669	0,645	0,684	0,693	0,846
700	0,714	0,720	0,729	0,717	0,753	0,789	0,927
800	0,786	0,762	0,768	0,771	0,801	0,897	<u>1,023</u>
900	0,822	0,837	0,804	0,813	0,885	0,969	<u>1,107</u>
1000	0,873	0,849	0,864	0,867	0,924	<u>1,098</u>	<u>1,203</u>
1100	0,903	0,912	0,897	0,918	0,981	<u>1,167</u>	<u>1,317</u>

Из данной таблицы можно сделать вывод, что для некоторых значений зарядной емкости $C_{\text{ВВ}}$ и сопротивлений нагрузки R_{H} присутствуют значения длительности импульса t больше 1 мкс. Данные значения не удовлетворяют принятому условию $\tau < 1$ мкс и исключены из моделирования.

3.4 Анализ амплитуды импульса напряжения

Аналогично длительности, в табличной форме был проведен анализ амплитуды импульса напряжения.

Таблица 3.9 – Амплитуда импульса (кВ) при изменении $C_{\text{ВВ}}$ и R_{H}

R_{H} , Ом \ $C_{\text{ВВ}}$, пФ	25	50	75	100	200	300	400
50	<u>25,2</u>	<u>50</u>	<u>72</u>	<u>91,5</u>	148,3	188	215,9
100	<u>35,1</u>	<u>68,2</u>	<u>97</u>	123	202,5	260,5	300,8
200	<u>48,4</u>	<u>89,8</u>	126,2	158,6	263,2	334,4	385,9
300	<u>57,2</u>	105,2	146,5	182,8	294,5	371,5	429,9
400	<u>64,6</u>	117,9	162,9	201,8	319,3	399,9	458,7
500	<u>71,3</u>	128,8	176,7	217,4	334	416,9	477,3
600	<u>77,3</u>	138,5	184,8	226,9	349,3	428,9	490,3
700	<u>82,7</u>	144,4	196	239,1	359	442,3	503
800	<u>86,1</u>	152,7	205,9	246	366,5	450,8	512
900	<u>91</u>	157,2	211,7	256	372,4	457,5	519,3
1000	<u>95,6</u>	164,7	216,5	261,6	381,9	462,9	525,1
1100	<u>98,3</u>	168,4	224,9	266,3	387	467,5	529,9

В данной таблице присутствуют значения, когда амплитуда импульса напряжения ниже 100 кВ. Согласно принятым условиям, электроны с энергией менее 100 кэВ не могут быть выведены через мембрану выпускного окна и относятся к потерям.

После рассмотрения всех ограничений, была составлена таблица 3.10, содержащая исходные данные для моделирования.

Таблица 3.10 – Длительность импульса (мкс) при изменении $C_{\text{ВВ}}$ и R_{H}

R_{H} , Ом \ $C_{\text{ВВ}}$, пФ	25	50	75	100	200	300	400
50	-	-	-	-	0,258	0,246	0,234
100	-	-	-	0,279	0,288	0,312	0,309
200	-	-	0,387	0,387	0,384	0,387	0,387
300	-	0,477	0,456	0,468	0,450	0,447	0,594
400	-	0,561	0,549	0,537	0,546	0,522	0,498
500	-	0,612	0,612	0,618	0,591	0,591	0,564
600	-	0,666	0,669	0,645	0,684	0,693	0,846
700	-	0,720	0,729	0,717	0,753	0,789	0,927
800	-	0,762	0,768	0,771	0,801	0,897	-
900	-	0,837	0,804	0,813	0,885	0,969	-

$R_H, \text{ Ом}$	25	50	75	100	200	300	400
$C_{BB}, \text{ пФ}$							
1000	-	0,849	0,864	0,867	0,924	-	-
1100	-	0,912	0,897	0,918	0,981	-	-

4. Исследование эффективности передачи энергии в электронный пучок

Эффективность передачи η можно оценить из выражения

$$\eta = \frac{E}{E_G} \quad (8)$$

где E – энергия, перенесённая пучком в атмосферу ($>100\text{кэВ}$), Дж;

E_G – накопленная энергия в генераторе, Дж.

Накопленная энергия в генераторе рассчитывается по формуле:

$$E_G = \frac{C_{BB} \cdot U^2}{2} \quad (9)$$

где C_{BB} - зарядная емкость, пФ;

U – зарядное напряжение, кВ.

Все значения накопленной энергии приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Значения накопленной энергии в генераторе

$C_{BB}, \text{ пФ}$	$E_G, \text{ Дж}$
50	6,25
100	12,5
200	25
300	37,5
400	50
500	62,5
600	75
700	87,5
800	100
900	112,5
1000	125
1100	137,5

Для расчета выделившейся энергии воспользуемся формулой:

$$E = \int_{t_1}^{t_2} P dt \quad (10)$$

где E – выделившаяся энергия, Дж;

P – мощность, МВт;

t – время за которое амплитуда импульса напряжения превышает 100 кВ, мкс.

$$P = \frac{U^2}{R_n} \quad (11)$$

где U – амплитуда напряжения, кВ;

R_n – сопротивление нагрузки, Ом.

На рисунке 22 представлена осциллограмма мощности для $C_{\text{вв}}=700$ пФ и $R_n=400$ Ом.

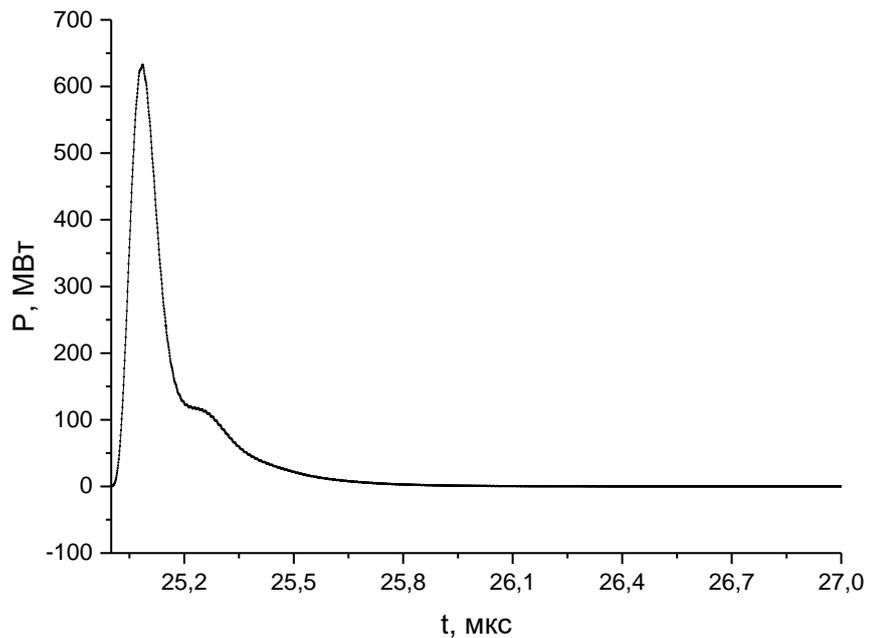


Рисунок 4.1 - Осциллограмма мощности для $C_{\text{вв}}=700$ пФ и $R_n=400$ Ом

Интеграл мощности даст энергию, перенесенную электронным пучком. Были проведены расчеты для всех значений $C_{\text{вв}}$ и R_n удовлетворяющих условиям. Результаты всех расчётов записаны в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Значение выделившейся энергии (Дж) при изменении $C_{\text{вв}}$ и R_n

$R_H, \text{ Ом}$	25	50	75	100	200	300	400
$C_{\text{ВВ}}, \text{ пФ}$							
50	-	-	-	-	2,89	3,91	4,15
100	-	-	-	4,98	9,63	10,7	11,62
200	-	-	11,25	16,13	22,47	23,41	23,17
300	-	8,28	21,42	27,53	34,89	34,99	33,64
400	-	19,31	32,86	38,98	46,62	45,97	46,76
500	-	28,63	43,99	50,85	58,44	57,85	58,12
600	-	40,37	54,62	62,95	70,05	69,62	71,06
700	-	49,75	66,59	74,43	81,17	81,43	81,47
800	-	61,07	77,79	86,74	92,6	92,97	-
900	-	71,3	90,15	98,33	103,99	104,75	-
1000	-	81,83	101,65	110,66	115,77	-	-
1100	-	92,61	113,25	121,48	127,15	-	-

На рисунке 4.2 представлен график зависимости энергии от сопротивления нагрузки для всех $C_{\text{ВВ}}$.

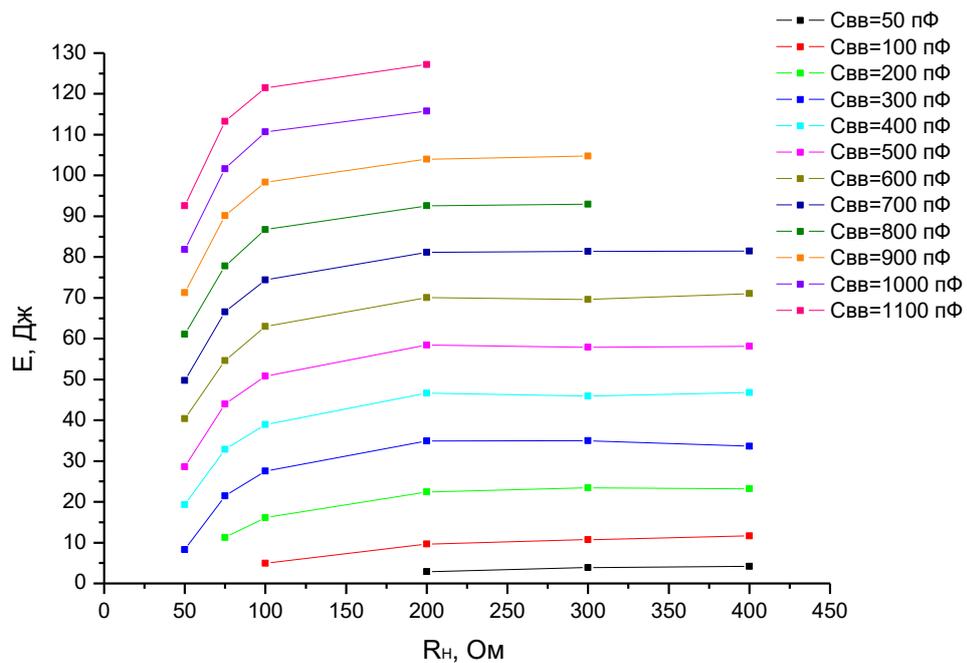


Рисунок 4.2 – Зависимости энергии от сопротивления нагрузки для всех $C_{\text{ВВ}}$

Таблица 4.3 – Значения эффективности при изменении $C_{вв}$ и R_n

R_n , Ом	25	50	75	100	200	300	400
$C_{вв}$, пФ							
50	-	-	-	-	0,46	0,63	0,66
100	-	-	-	0,4	0,77	0,86	0,93
200	-	-	0,45	0,65	0,9	0,94	0,93
300	-	0,22	0,57	0,73	0,93	0,93	0,9
400	-	0,39	0,66	0,78	0,93	0,92	0,94
500	-	0,46	0,7	0,81	0,94	0,93	0,93
600	-	0,54	0,73	0,84	0,93	0,93	0,95
700	-	0,57	0,76	0,85	0,93	0,93	0,93
800	-	0,61	0,78	0,87	0,93	0,93	-
900	-	0,63	0,8	0,87	0,92	0,93	-
1000	-	0,66	0,81	0,89	0,93	-	-
1100	-	0,67	0,82	0,88	0,93	-	-

На рисунке 4.3 представлена зависимость эффективности η от сопротивления нагрузки R_n .

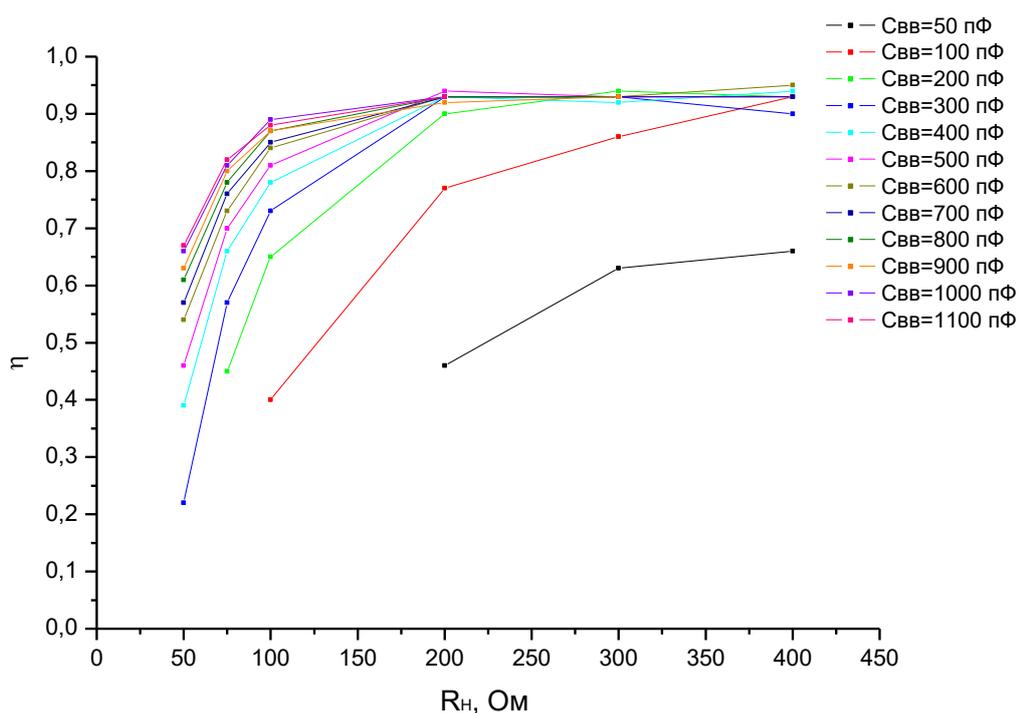


Рисунок 4.3 – Зависимость эффективности η от сопротивления нагрузки R_n

Из этого графика видно, что генератор работает в наиболее эффективном режиме при сопротивлении нагрузки в диапазоне от 100 Ом до 400 Ом и зарядной емкости от 400 пФ до 1100 пФ. По опыту сложно получить в

вакуумном диоде нагрузку близкой к 100 Ом с удовлетворительной геометрией генерации пучка. Следовательно, самая высокая эффективность при сопротивлении нагрузки 100 Ом осуществляется при зарядной емкости равной 1000 пФ.

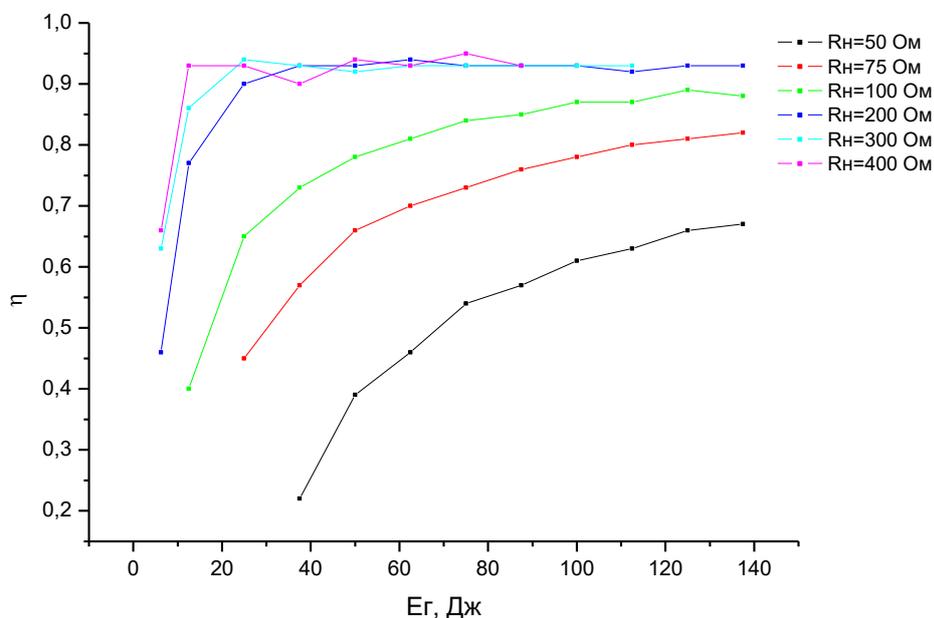


Рисунок 4.4 – Зависимость эффективности η от накопленной энергии E_g

Из данного графика видно, что генератор работает в эффективном режиме при любой накопленной энергии и в диапазоне сопротивления нагрузки от 200 Ом до 400 Ом, что определяется аperiodическим характером разряда ёмкости накопителя. Опыт эксплуатации показал, что импеданс вакуумного электронного диода ускорителя АСТРА близок к 100 Ом. Следовательно, при сопротивлении нагрузки 100 Ом целесообразно изготавливать ускоритель с накопителем 125 Дж.

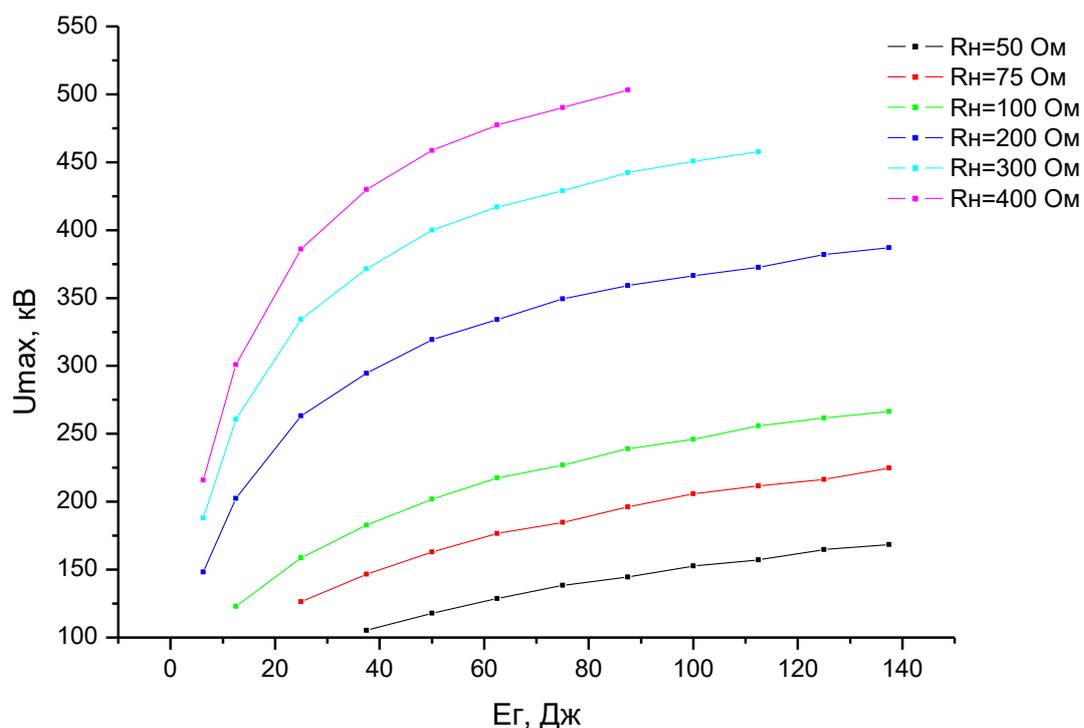


Рисунок 4.5 – Зависимость максимальной амплитуды напряжения U_{\max} от накопленной энергии E_{Γ}

Приведённый график может быть использован при расчёте генератора ускорителя или как настроечный при настройке вакуумного электронного диода уже существующего ускорителя.

Заключение

Была проведена оптимизация параметров схемы генератора ускорителя с целью увеличения эффективности работы в режиме с выводом пучка электронов в атмосферу. Для этого была ранее составлена эквивалентная схема ускорителя и на её основе построена вычислительная модель генератора, которая подтвердила свою адекватность при сравнении результатов моделирования импульса напряжения на нагрузке с натурным экспериментом. Анализ работы схемы и опыта эксплуатации ускорителя позволил установить упрощения и граничные условия моделирования, а именно: длительность импульса напряжения на нагрузке менее 1 мкс, амплитуда импульса напряжения на нагрузке больше 100 кВ и менее 500 кВ, апериодический режим

разряда. При определении влияния каждого элемента схемы на формирование импульса ускоряющего напряжения выделены ёмкость накопителя энергии и сопротивление нагрузки. Для установленных элементов определили диапазоны значений, удовлетворяющих установленным условиям моделирования. Результат моделирования позволил установить, что максимальная эффективность работы схемы генератора без учёта потерь достигается при эквивалентной высоковольтной ёмкости генератора 200 пФ (25 Дж) и сопротивлении нагрузки 200 Ом и выше. Максимальная накопленная энергия в генераторе при сохранении длительности импульса менее 1 мкс составит 140 Дж при амплитуде 387 кВ. Ускоритель с импульсом ~500 кВ на нагрузке 400 Ом будет обладать энергозапасом порядка 80 Дж. По результатам работы были построены семейства кривых, позволяющие производить настройку вакуумного диода существующего ускорителя по напряжению на нагрузке.

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

Студенту:

Группа	ФИО
4ТМ71	Цепляева Ирина Васильевна

Школа	ИШНПТ	Отделение	материаловедения
Уровень образования	магистр	Направление/специальность	13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов и оборудования определена в соответствии с рыночными ценами города Томска. Размер месячного оклада исполнителей определен в соответствии со штатным расписанием НИ ТПУ
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Норма амортизационных отчислений оборудования
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисление во внебюджетные фонды в размере 30%

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

4. Оценка коммерческого потенциала инженерных решений (ИР)	- Анализ потребителей - Матрица SWOT-анализа
5. Формирование плана и графика разработки и внедрения ИР	- Календарное планирование работ - Диаграмма Ганта
6. Составление бюджета	Расчет бюджетной стоимости работ по оптимизации параметров генератора субмикросекундных импульсов
7. Оценка эффективности	Расчет ресурсосберегающей и социальной эффективности исследования

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценочная карта
2. Матрица SWOT
3. Календарный план-график проведения НИОКР по теме

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кацук Ирина Вадимовна	к. т. н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ71	Цепляева Ирина Васильевна		

5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

5.1 Введение

На сегодняшний день под практической значимостью проекта можно отнести коммерческую ценность разработки. Оценка коммерческой ценности (потенциала) разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов.

Под коммерческой привлекательностью понимается: востребованность продукта на рынке, техническое превосходство продукта его аналогам, цена, бюджет разработчиков и время, которое необходимо для выхода продукта на рынок.

Предметом изучения выполненной квалификационной работы был генератор высоковольтных импульсов, применяемый в высоковольтных установках (ускорители электронов).

Цель данного раздела заключается в том, чтобы выявить перспективности и успешности научно-исследовательского проекта в плане повышения финансовой эффективности.

5.2 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

5.2.1 Потенциальные потребители результатов исследования

В результате анализа потенциальных потребителей результатов разработок рассмотрен целевой рынок и проведено его сегментирование. Определены основные критерии сегментирования. Проведена оптимизация параметров генератора высоковольтных импульсов для увеличения

эффективности работы в режиме одиночных импульсов и с высокой частотой повторения. Данный генератор используется в импульсном ускорителе.

Исходя из данных, представленных на карте сегментирования рынка производства и использования генератора, можно сделать вывод, что основные потребители заняты в научной отрасли и промышленности. Использование оптимизированных параметров генератора позволят увеличить эффективность работы и определить предельные выходные характеристики генератора высоковольтных импульсов ускорителя.

Потенциальными потребителями данного исследования являются предприятия научной, промышленной и медицинской сферы, а так же ускорители используются для решения экологических задач. Этому способствуют высокие показатели эффективности и безопасности технологических процессов с применением таких устройств.

5.2.2 Анализ конкурентных технических решений

Поскольку рынок пребывает в постоянном движении, необходимо систематически производить детальный анализ конкурирующих разработок. Проведение такого анализа помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешно противостоять конкурентным разработкам и определить направления ее будущего повышения. Для проведения данного анализа необходимо обладать всей имеющейся информацией о разработках конкурентов, такой как: технические характеристики разработки, конкурентоспособность разработки, уровень завершенности научного исследования, уровень проникновения на рынок и т.д.

Для оценки и сравнения ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведены следующие критерии (таблица 5.1), которые позволяют учитывать технические, эксплуатационные и экономические характеристики разработки.

Одними из ближайших аналогов для ускорителя «АСТРА-М» от НПЛ №1 Ом НИ ТПУ в сфере ускорительной техники являются ускорители разработанные в ИЭФ УрО РАН – УРТ-0,5 и «Малахит».

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i \quad (12)$$

где К – конкурентоспособность научной разработки;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Таблица 5.1 – Оценочная карта для конкурентных разработок

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _А	Б _У	Б _М	К _А	К _У	К _М
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1 Энергоэкономичность	0,09	5	4	5	0,45	0,36	0,45
2 Уровень шума	0,02	3	5	3	0,06	0,08	0,06
3 Производительность	0,08	3	4	3	0,24	0,32	0,24
4 Удобство эксплуатации	0,07	5	5	4	0,35	0,35	0,28
5 Массогабаритные параметры	0,03	3	3	3	0,09	0,09	0,09
6 Надежность	0,09	4	4	3	0,36	0,36	0,27
7 Безопасность	0,09	5	5	4	0,45	0,45	0,36
8 Помехоустойчивость	0,08	5	4	4	0,4	0,32	0,32
Эксплуатационные критерии оценки эффективности							
1 Замена расходных материалов	0,06	5	3	2	0,3	0,18	0,12
2 Обслуживание оборудования в порядке текущей эксплуатации	0,05	5	3	2	0,25	0,15	0,1
3 Возможность внесения конструктивных изменений	0,02	5	2	2	0,1	0,04	0,04
4 Ремонт оборудования	0,03	5	2	2	0,15	0,06	0,06
5 Предполагаемый срок эксплуатации	0,05	4	5	5	0,2	0,25	0,25
6 Наличие сертификации разработки	0,05	5	5	4	0,25	0,25	0,2
Экономические критерии оценки эффективности							
1 Стоимость обслуживания	0,04	5	4	4	0,2	0,16	0,16
2 Уровень проникновения на рынок	0,04	5	5	2	0,2	0,2	0,08
3 Цена	0,06	4	3	3	0,24	0,18	0,18
4 Послепродажное обслуживание	0,05	5	5	4	0,25	0,25	0,2
Итого	1	81	71	59	4,34	4,05	3,46

5.2.3 SWOT-анализ

SWOT-анализ SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Таблица 5.2 – Матрица SWOT

	<p>Сильные стороны научного исследования: С1. Высокая технологичность исследования С2. Высокая точность результатов С3. Ясная методика получения данных С4. Наличие необходимых инструментов в лаборатории</p>	<p>Слабые стороны научного исследования: Сл1. Требуется высокая квалификация специалистов Сл2. Требуется использование оборудования не находящегося в широкой продаже Сл3. Зависимость от сроков поставки расходных и др. материалов</p>
<p>Возможности: В1. Использование имеющихся у ТПУ и НПЛ №1 ОМ ИШНПТ международных научных связей В2. Востребованность данного исследования в научном сообществе В3. Применение оптимизированного генератора в существующих производствах, использующих импульсные ускорители электронов В4. Увеличение спроса на использование в производстве, медицине и для решения экологических задач</p>	<p>Отсутствие подобных исследований</p>	<p>Нехватка высококвалифицированных специалистов</p>
<p>Угрозы: У1. Появление новых, более оптимизированных параметров генератора У2. Невостребованность исследования У3. Снижение интереса к импульсно-пучковым технологиям У4. Отсутствие финансирования</p>	<p>Может послужить отправной точкой для проведения исследований на импульсном ускорителе другими научными группами</p>	<p>Небольшие темпы развития рынка импульсно-пучковых технологий (экономическая ситуация в мире и стране, проблема радиофобии и др.)</p>

Согласно матрице SWOT-анализа были определены сильные стороны проекта, которые обусловлены высокой технологичностью и новизной

исследования. Так как данное устройство ещё не внедрено в массовое производство появляется и слабая сторона – долгий срок изготовления. Также основной слабостью научного проекта является нехватка квалифицированных специалистов, т.к. ускорители электронов очень сложные установки и требования к специалистам высоки. Так как в настоящее время интерес к ускорителям электронов и импульсной технике только возрастает, данный проект обладает большими возможностями и конкурентоспособен, как на отечественном рынке, так и за рубежом.

5.3 Планирование научно-исследовательских работ

5.3.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

В данном разделе была составлена перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования. Данный перечень представлен в таблице 5.3

Таблица 5.3 – Перечень этапов и работ в рамках научного исследования

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель темы
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Выбор направления исследований	3	Оптимизация параметров генератора с целью увеличения эффективности работы в режиме одиночных импульсов и с высокой частотой повторения	Руководитель, инженер
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель, инженер
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Моделирование разрядной цепи генератора с использованием программного пакета NI Multisim	Руководитель, инженер
	6	Получение аperiodического режима в разрядной цепи генератора	Руководитель, инженер
	7	Определение оптимального значения зарядной емкости и нагрузки при которых длительность импульса была меньше 1 мкс	Руководитель, инженер
	8	Расчёт мощности и энергии при оптимальных значениях зарядной емкости и нагрузки, и определение КПД генератора	Руководитель, инженер
	9	Обработка и анализ полученных результатов	Инженер
Оформление отчета по НИР	10	Составление пояснительной записки	Инженер

5.3.2 Разработка графика проведения научного исследования

Перед построением календарного плана-графика, необходимо определить временные показатели научного исследования. Для этого нужно определить трудоемкость работ.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожi}$ используется следующая формула:

$$t_{ожi} = \frac{3t_{min i} + 2t_{max i}}{5} \quad (13)$$

где $t_{ожi}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

$t_{min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i} \quad (14)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожi}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал} \quad (15)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;
 T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;
 $k_{кал}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} \quad (16)$$

где $T_{кал}$ – количество календарных дней в году;

$T_{вых}$ – количество выходных дней в году;

$T_{пр}$ – количество праздничных дней в году.

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki} необходимо округлить до целого числа.

Все рассчитанные значения необходимо свести в таблицу (табл. 5.4).

Таблица 5.4 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	Длительность работ в календарных днях T_{ki}
	t_{min} , чел-дни	t_{max} , чел-дни	$t_{ож}$, чел-дни			
Составление и утверждение технического задания	3	7	4,6	Руководитель темы	4,6	6
Подбор и изучение материалов по теме	10	15	12	Инженер	12	15
Оптимизация параметров генератора с целью увеличения эффективности работы в режиме одиночных импульсов и с высокой частотой повторения	2	5	3,2	Руководитель, инженер	1,6	2
Календарное планирование работ по теме	3	5	3,8	Руководитель, инженер	1,4	2

Название работы	Трудоёмкость работ			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	Длительность работ в календарных днях T_{ki}
	t_{min} , чел-дни	t_{max} , чел-дни	$t_{ож}$, чел-дни			
Моделирование разрядной цепи генератора с использованием программного пакета NI Multisim	7	14	9,8	Руководитель, инженер	4,9	6
Получение апериодического режима в разрядной цепи генератора	3	5	3,8	Руководитель, инженер	1,9	3
Определение оптимального значения зарядной емкости и нагрузки при которых длительность импульса была меньше 1 мкс	5	8	6,2	Руководитель, инженер	3,1	4
Расчёт мощности и энергии при оптимальных значениях зарядной емкости и нагрузки, и определение КПД генератора	7	10	8,2	Руководитель, инженер	4,1	5
Обработка и анализ полученных результатов	12	17	14	Инженер	14	18
Составление пояснительной записки	7	13	10	Инженер	10	12
Итого				Руководитель	22	28
				Инженер	53	68

Таблица 5.5 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

	Вид работ	Исполнители	T_{ki} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ													
				ян		фев			март			апр			май		
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель темы	6		█												
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	15			█											
3	Оптимизация параметров генератора с целью увеличения эффективности работы в режиме одиночных импульсов и с высокой частотой повторения	Руководитель, инженер	2				▨										
4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель, инженер	2					▨									
5	Моделирование разрядной цепи генератора с использованием программного пакета NI Multisim	Руководитель, инженер	6						▨								
6	Получение апериодического режима в разрядной цепи генератора	Руководитель, инженер	2,5							▨							
7	Определение оптимального значения зарядной емкости и нагрузки при которых длительность импульса была меньше 1 мкс	Руководитель, инженер	4								▨						
8	Расчёт мощности и энергии при оптимальных значениях зарядной емкости и нагрузки, и определение КПД генератора	Руководитель, инженер	5									▨					
9	Обработка и анализ получившихся результатов	Инженер	18											█			
10	Составление пояснительной записки	Инженер	12,5														█



- руководитель



- инженер



- руководитель, инженер

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

5.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное программное обеспечение для научных работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

5.4.1 Расчет материальных затрат НТИ

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения исследований по данной теме.

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3 – 5 % от цены). В эту же статью включаются затраты на оформление документации (канцелярские принадлежности, тиражирование материалов). Результаты по данной статье заносятся

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расх\ i} \quad (17)$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расх\ i}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.);

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Величину транспортных расходов приняты на уровне 20% от стоимости материалов. Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносятся в таблицу 5.6

Таблица 5.6 – Материальные затраты

Наименование	Примечание	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (Z_m), руб.
Картридж для принтера	Cactus CS-ТК1110BK	1	380	380
Канцелярские товары	-	-	1 500	2 000
Итого				2380

5.4.2 Основная заработная плата

В настоящую статью включается основная заработная плата младшего научного сотрудника (инженера) и руководителя исследования. Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением исследования, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату и рассчитывается по формуле:

$$Z_{зн} = Z_{осн} + Z_{доп} \quad (18)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата;

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p \quad (19)$$

где T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} \quad (20)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника в соответствии со штатным расписанием НИ ТПУ, 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 36 раб. дней $M = 10,8$ месяца, 6-дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Таблица 5.7 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	52	104
- праздничные дни	16	16
Потери рабочего времени		
- отпуск	36	24
- невыходы по болезни	7	7
Действительный годовой фонд рабочего времени	254	214

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p \quad (21)$$

где $Z_{тс}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{пр} = 0,3$ – премиальный коэффициент;

$k_d = 0,2$ – коэффициент доплат и надбавок;

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

Тарифная заработная плата зависит от оклада, установленных премий и надбавок: для инженера – 17000, для преподавателя 26300.

Пример расчета заработной платы для руководителя:

$$Z_m = Z_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p = 26300 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 51285 \text{ руб,}$$

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{51285 \cdot 10,8}{254} = 2180,6 \text{ руб,}$$

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p = 2180,6 \cdot 22 = 47973,2 \text{ руб.}$$

Пример расчета заработной платы для инженера:

$$Z_m = Z_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p = 17000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 32045 \text{ руб,}$$

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{32045 \cdot 11,2}{214} = 1677,1 \text{ руб,}$$

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p = 1677,1 \cdot 53 = 88886,3$$

Расчет основной заработной платы приведен в таблице 5.8

Таблица 5.8 – Заработная плата

Исполнители	$Z_{тс}$, руб	Z_m , руб	$Z_{дн}$, руб	T_p , раб.дн	$Z_{осн}$, руб
Руководитель	26300	51285	2180,6	22	47973,2
Инженер	17000	32045	1677,1	53	88886,3
Итого					136859,5

5.4.3 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} \quad (22)$$

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

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,15 \cdot 136859,5 = 20528,9$$

5.4.4 Амортизация оборудования, используемого для проектирования

В данном разделе включены затраты, связанные с покупкой оборудования, которое необходимо для работы. Стоимость данного оборудования определяется по прайс-листу или обговаривается в процессе заключения договора. Расчет затрат по данной статье заносится в таблицу 5.9

Таблица 5.9 – Стоимость оборудования

Наименование	Примечание	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (Z_M), руб.
Ноутбук	ASUS VivoBook 15 X540UB-DM264	1	29 299	29 299
Лицензионное программное обеспечение	NI Multisim	1	44 137,8	44 137,8
Принтер	Xerox Phaser 3116	1	8700	8700
Итого				82136,8

В связи с длительностью использования, учитывается стоимость программного обеспечения с помощью амортизации:

$$A = \frac{\text{Стоимость} \cdot N_{\text{дней испытания}}}{\text{Срок службы} \cdot 365} = \frac{82136,8 \cdot 68}{4 \cdot 365} = 3825,5 \text{ руб.}$$

5.4.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам

государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) \quad (23)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Общая ставка взносов составляет в 2018 году –30% (ст. 425, 426 НК РФ):

- 22 % – на пенсионное страхование;
- 5,1 % – на медицинское страхование;
- 2,9 % – на социальное страхование.

Таблица 5.10 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
Руководитель проекта	47973,2	7196
Инженер	88886,3	13 333
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,3	
Итого		
Руководитель проекта	16550,76	
Инженер	30665,79	

5.4.6 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{накл} = (\text{сумма статей } 1 \div 7) \cdot k_{нр} \quad (24)$$

где k_{nr} – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

5.4.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на проведение научно-исследовательской работы.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательскую работу приведен в таблице 5.11

Таблица 5.11 – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	Примечание
1. Материальные затраты НИИ	2380	Пункт 5.4.1
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	136859	Пункт 5.4.2
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	20528,9	Пункт 5.4.3
4. Амортизация	3825,5	Пункт 5.4.4
5. Отчисления во внебюджетные фонды	30665,79	Пункт 5.4.5
6. Накладные расходы	31 081,4	16 % от суммы ст. 1-5
7. Бюджет затрат НИИ	225 340,59	Сумма ст. 1- 6

5.5 Определение ресурсной (ресурсосберегающей) и социальной эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

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

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i \quad (25)$$

где a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения;

b_i – бальная оценка i -го варианта.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы (табл. 5.12).

Таблица 5.12 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Бальная оценка разработки		
			Исп.1	Исп.2	Исп.3
1. Производительность		0,2	3	4	3
2. Энергосбережение		0,2	5	4	5
3. Надежность		0,3	4	4	3
4. Материалоемкость		0,3	5	3	2
ИТОГО		1	13	15	13
$I_{p-исп i}$			4,3	3,7	3,1

Интегральный показатель ресурсоэффективности для разрабатываемого проекта:

$$I_{pi} = 0,2 \cdot 3 + 0,2 \cdot 5 + 0,3 \cdot 4 + 0,3 \cdot 5 = 4,3$$

Проведенная оценка ресурсоэффективности проекта дала результат 4,3 из 5, что подтверждает эффективность реализации технического проекта.

В данной работе был проведен поиск импульсных ускорителей разработанных другими институтами, а также был произведен анализ технических конкурентных решений. Для ускорителя «Астра-М» он составил 4.3, для «УРТ-0,5» равен 3.7, а для «Малахит» 3.1. Вследствие чего можно сделать вывод, что ускоритель «Астра-М» превосходит аналоги по техническим, эксплуатационным и экономическим показателям. В дальнейшем необходимо было произвести планирование научно-исследовательской работы. Было произведено формирование бюджета на проектирование, которое

составило 225 340,59 руб. из которого 157987,9 руб. было выделено на заработные платы. На сегодняшний день ускорители электронов применяются в качестве источников ионизирующего излучения в промышленности, медицине и для решения экологических задач.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
4ТМ71	Цепляева Ирина Васильевна

Школа	ИШНПТ	Отделение (НОЦ)	Материаловедения
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Тема ВКР:

Оптимизация параметров высоковольтного субмикросекундного генератора на основе импульсного трансформатора	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования является генератор импульсного ускорителя электронов. Данный генератор используется в ускорителе «АСТРА-М». Ускорители электронов в настоящее время широко используются в промышленности, медицине и для решения экологических задач. Рабочая зона – лаборатория ТПУ (операторская) для экспериментов и офисное помещение с компьютером для моделирования.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
2. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	Правовые и организационные вопросы изложены в документе СанПиН 2.6.1.2573-10 "Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ". Согласно 91 статье Трудового кодекса Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ, нормирована продолжительность рабочего времени неделю. Рабочее место должно соответствовать нормам ГОСТа 12.2.032-78 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ).

<p>3. Производственная безопасность: 3.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения 3.2. Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов</p>	<p>Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. отклонение показателей микроклимата; 2. превышение уровня шума; 3. недостаточная освещенность рабочей зоны; 4. повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека; 5. повышенный уровень ионизирующих излучений; 6. повышенный уровень электромагнитных излучений.
<p>4. Экологическая безопасность</p>	<p>Экологическая безопасность: Концентрация озона и окислов азота рассчитывается согласно СанПиН 2.6.1.2573-10 "Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ". При работе ускорителей или генераторов не происходит сбросов в гидросферу или воздействия отходов на литосферу, т.к. никаких опасных веществ при проведении экспериментов не используются.</p>
<p>5. Безопасность в чрезвычайных ситуациях</p>	<p>Перечень возможных ЧС: - возгорание оборудования; - короткое замыкание электрической цепи связанное с неисправностью оборудования (в том числе генератора).</p>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ71	Цепляева Ирина Васильевна		

6. Социальная ответственность

6.1 Введение

Предметом изучения выполненной квалификационной работы был генератор импульсного ускорителя электронов, позволяющий формировать на нагрузке импульсы высокого напряжения длительностью до 1 мкс с частотой следования до 100 имп./с. Данный генератор используется в ускорителе «АСТРА-М». Ускорители электронов в настоящее время широко используются в промышленности, медицине и для решения экологических задач. В работе была смоделирована схема генератора импульсного ускорителя в программной среде NI Multisim. Также были использованы различные пакеты программ (Microsoft Office, Mathcad и др.). После окончания проектных работ были проведены эксперименты с импульсным ускорителем АСТРА – М, находящегося в лаборатории ТПУ.

Требования, определяемые к генератору высоковольтных импульсов, определяют немаловажную роль в его проектировании. От генераторов высоковольтных импульсов в настоящее время требуется высокая надежность, стабильность работы и обеспечение требуемого уровня электрической прочности в установке в которой он применяется.

В данном разделе будут рассмотрены опасные и вредные производственные факторы при работе установок в составе с генератором высоковольтных импульсов. Также будут решены вопросы обеспечения защиты от них на основе требований действующих нормативных документов.

6.2 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

В соответствии с пунктом 13.1 статьи 13 Постановления Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 03.06.2003 № 118". О введении в действие санитарно-эпидемиологических правил и нормативов СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03" лица, работающие с ПЭВМ более 50%

рабочего времени (профессионально связанные с эксплуатацией ПЭВМ), должны проходить обязательные предварительные при поступлении на работу и периодические медицинские осмотры в установленном порядке.

Согласно 91 статье Трудового кодекса Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ [56] нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю. Работодатель обязан вести учет времени, фактически отработанного каждым работником.

В соответствии с СанПиН 2.6.1.2573-10 «Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ» [57] к работе на ускорителе допускаются лица:

- не моложе 18 лет;
- не имеющие медицинских противопоказаний;
- отнесенные приказом руководителя организации к категории персонала группы А;
- прошедшие обучение по правилам работы на ускорителе и по радиационной безопасности;
- прошедшие инструктаж по радиационной безопасности.

Рабочее место при выполнении работ в положении сидя должно соответствовать требованиям, указанным в ГОСТе 12.2.032-78 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования» [58].

По ГОСТ 23000-78 «Система «человек-машина». Пульты управления. Общие эргономические требования» [59] пульты управления для работы в положении сидя должны иметь пространство для ног оператора с размерами не менее:

- 600 мм – по высоте;
- 400 мм – по глубине (на уровне колен);
- 600 мм – по глубине (на уровне пола);
- 500 мм – по ширине.

Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы» [60] высота рабочей поверхности стола для взрослых пользователей должна регулироваться в пределах 680-800 мм; при отсутствии такой возможности высота рабочей поверхности стола должна составлять 725 мм.

Рабочий стол должен иметь пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Конструкция рабочего стула должна обеспечивать:

- ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм;
- поверхность сиденья с закругленным передним краем;
- регулировку высоты поверхности сиденья в пределах 400-550 мм и углам наклона вперед до 15° и назад до 5°;
- высоту опорной поверхности спинки 300 ± 20 мм, ширину – не менее 380 мм и радиус кривизны горизонтальной плоскости – 400 мм;
- угол наклона спинки в вертикальной плоскости в пределах $\pm 30^\circ$;
- регулировку расстояния спинки от переднего края сиденья в пределах 260-400 мм;
- стационарные или съемные подлокотники длиной не менее 250 мм и шириной – 50-70 мм;
- регулировку подлокотников по высоте над сиденьем в пределах 230 ± 30 мм и внутреннего расстояния между подлокотниками в пределах 350-500 мм.

Рабочее место пользователя ПЭВМ следует оборудовать подставкой для ног, имеющей ширину не менее 300 мм, глубину не менее 400 мм, регулировку по высоте в пределах до 150 мм и по углу наклона опорной поверхности подставки до 20°. Поверхность подставки должна быть рифленой и иметь по переднему краю бортик высотой 10 мм.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100 – 300 мм от края, обращенного к пользователю, или на специальной,

регулируемой по высоте рабочей поверхности, отделенной от основной столешницы.

6.3 Производственная безопасность

Для выбора факторов необходимо использовать ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация». [61] Перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой работы представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 - Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разрабо тка	Изготов ление	Эксплуа тация	
1.Отклонение показателей микроклимата	+		+	СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений»
2. Превышение уровня шума	+	+		СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки»
3.Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	+	+	СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение»
4.Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	+	+	+	ГОСТ 12.1.038-82 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов (с Изменением N 1)»
5.Повышенный уровень ионизирующих излучений			+	СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009»
6.Повышенный уровень электромагнитных излучений			+	СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах»

6.3.1 Анализ выявленных вредных производственных факторов

При оптимизации параметров генератора высоковольтных импульсов, важно учитывать влияние вредных производственных факторов, представленных в таблице 1. Рассмотрим каждый из них.

Отклонение показателей микроклимата

Санитарные правила и нормы СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» [62] предназначены для предотвращения неблагоприятного воздействия микроклимата рабочих мест, производственных помещений на самочувствие, функциональное состояние, работоспособность и здоровье человека.

Показателями, характеризующими микроклимат в производственных помещениях, являются:

- температура воздуха;
- температура поверхностей;
- относительная влажность воздуха;
- скорость движения воздуха;
- интенсивность теплового облучения.

Оптимальные параметры микроклимата на рабочих местах приведены в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Оптимальные величины показателей микроклимата [62]

Период года	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	21-23	20-24	60-40	0,1
Теплый	22-24	21-25	60-40	0,1

В холодный период года – отопление и вытяжная вентиляция, а в теплый период – естественная и приточная вентиляции поддерживают температуру воздуха на рабочих местах.

Превышение уровня шума

Основными источниками шума в лаборатории, в которой находится ускорители электронов, являются привода, пробой разрядника, криогенный и вакуумный насосы и другие движущиеся детали. Повышенный шум на рабочем месте оказывает вредное влияние на организм работника в целом, вызывая неблагоприятные изменения в его органах и системах. Длительное воздействие такого шума способно привести к развитию у работника потери слуха, увеличению риска артериальной гипертензии, болезней сердечно-сосудистой, нервной системы и др. При этом специфическим клиническим проявлением вредного действия шума является стойкое нарушение слуха (тугоухость), рассматриваемое как профессиональное заболевание. Шум на рабочем месте оказывает раздражающее влияние на работника, повышает его утомляемость, а при выполнении задач, требующих внимания и сосредоточенности, способен привести к росту ошибок и увеличению продолжительности выполнения задания.

Согласно санитарным нормам СН 2.2.4/2.1.8.562-96 [63] предельно допустимый уровень звука на рабочем месте для трудовой деятельности – 65 дБ.

Недостаточная освещенность рабочей зоны

Недостаточное освещение влияет на функционирование зрительного аппарата, то есть определяет зрительную работоспособность, на психику человека, его эмоциональное состояние, вызывает усталость центральной нервной системы, возникающей в результате прилагаемых усилий для опознания четких или сомнительных сигналов.

Для оптимизации условий труда имеет большое значение освещение рабочих мест. Задачи организации освещенности рабочих мест следующие: обеспечение различаемости рассматриваемых предметов, уменьшение напряжения и утомляемости органов зрения. Производственное освещение

должно быть равномерным и устойчивым, иметь правильное направление светового потока, исключать слепящее действие света и образование резких теней.

Требования к освещению помещений указаны в СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение» [64], согласно которому для зрительных работ средней точности, освещенность, при системе общего освещения, должна составлять 400 лк.

Лаборатория оснащена источниками искусственного (общего) освещения, помещение, в котором осуществляется разработка проекта – источниками естественного (бокового) и искусственного (общего) освещения.

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

В качестве накопителя энергии ускорителя служит генератор импульсных напряжений, напряжение на выходе которого может достигать 400 кВ. Ускоритель формирует положительный импульс величиной 300 кВ.

При нахождении около электрооборудования сквозь тело человека может возникнуть цепь электротока по любому из семи перечисленных ниже сценариев:

- 1) непосредственное прикосновение различными частями тела к двум разным полюсам источника;
- 2) прикосновение к одному полюсу, обладающему потенциалом относительно земли;
- 3) попадание под остаточный заряд, сохранившийся на схеме после ее отключения;
- 4) действие наведенного заряда в металлических проводниках, оборудовании, не имеющем непосредственной связи с действующими источниками напряжения;
- 5) возникновение разряда статически скопившегося электричества;
- 6) образование эффекта напряжения шага;

7) создание благоприятных условий для аварийного пробоя электрической изоляции, образованной воздушным расстоянием до потенциала.

Проходя через тело человека, электрический ток производит термическое, электролитическое, механическое и биологическое воздействие.

- термическое действие тока проявляется в ожогах отдельных участков тела, нагреве и повреждении кровеносных сосудов;

- электролитическое – в разложении органической жидкости, в том числе крови, что вызывает нарушение ее состава, а также ткани в целом;

-механическое – в расслоении, разрыве тканей организма;

-биологическое – в раздражении и возбуждении живых тканей организма, а также в нарушении внутренних биологических процессов.

Взаимодействуя с биотоками организма, внешний ток может нарушить нормальный характер их воздействия на ткани и вызвать непроизвольные сокращения мышц.

Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов регламентируются ГОСТ 12.1.038-82 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов (с Изменением N 1)» [65].

Предельно допустимые значения напряжений прикосновения при аварийном режиме производственных электроустановок с частотой тока 50 Гц, напряжением выше 1000 В, с глухим заземлением нейтрали не должны превышать значений, указанных в таблице 6.3.

Таблица 6.3 – Предельно допустимые значения напряжений прикосновения

Продолжительность воздействия t, с	До 0,1	0,2	0,5	0,7	1,0	Св.1,0 до 0,5
Предельно допустимое значение напряжения прикосновения U, В	500	400	200	130	100	65

Повышенный уровень ионизирующих излучений

В результате воздействия ионизирующих излучений на организм человека в тканях могут происходить сложные физические, химические и биохимические процессы. Ионизирующие излучения вызывают ионизацию атомов и молекул вещества, в результате чего молекулы и клетки ткани разрушаются.

Источником ионизирующих излучений в лаборатории является ионный ускоритель. Ионизирующим излучением являются потоки электронов, позитронов, протонов, дейтронов, альфа-частиц и других заряженных частиц, а также нейтронов, рентгеновского и гамма-излучения.

Выше определенных пороговых значений облучение может вызвать острые реакции, такие как покраснение кожи, выпадение волос, радиационные ожоги или острый лучевой синдром. Эти реакции являются более сильными при более высоких дозах и более высокой мощности дозы. Например, пороговая доза острого лучевого синдрома составляет приблизительно 1 Зв.

Если доза является низкой и/или воздействует длительный период времени, обусловленный этим риск существенно снижается, поскольку в этом случае увеличивается вероятность восстановления поврежденных тканей. Тем не менее, риск долгосрочных последствий, таких как рак, который может проявиться через годы и даже десятилетия, существует. Воздействия этого типа проявляются не всегда, однако их вероятность пропорциональна дозе облучения. Этот риск выше в случае детей и подростков, так как они намного более чувствительны к воздействию радиации, чем взрослые.

СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009» [66] применяются для обеспечения безопасности человека во всех условиях воздействия на него ионизирующего излучения искусственного или природного происхождения.

Основные пределы доз представлены в таблице 6.4.

Таблица 6.4 – Основные пределы доз [66]

Нормируемые величины	Пределы доз	
	персонал (группа А)	население
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год	1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год
Эквивалентная доза в год в хрусталике глаза	150 мЗв	15 мЗв
Коже	500 мЗв	50 мЗв
кистях и стопах	500 мЗв	50 мЗв

Повышенный уровень электромагнитных излучений

Основным источником электромагнитных излучений в лаборатории является ускорительная установка.

Длительное воздействие на человека электромагнитных полей промышленной частоты приводит к расстройствам, которые субъективно выражаются жалобами на головную боль в височной и затылочной области, вялость, расстройство сна, снижение памяти, повышенную раздражительность, апатию, боли в сердце, нарушение ритма сердечных сокращений. Могут наблюдаться функциональные нарушения в центральной нервной системе, а также изменения в составе крови.

Воздействие электромагнитного излучения радиочастотного диапазона определяется плотностью потока энергии, частотой излучения, продолжительностью воздействия, режимом облучения, размером облучаемой поверхности тела, индивидуальными особенностями организма. Воздействие электромагнитного излучения может проявляться в различной форме – от незначительных изменений в некоторых системах организма до серьезных нарушений в организме. Поглощение организмом человека энергии электромагнитного излучения вызывает тепловой эффект. Начиная с

определенного предела организм человека, не справляется с отводом теплоты от отдельных органов, и их температура может повышаться. В связи с этим воздействие электромагнитного излучения особенно вредно для тканей и органов с недостаточно интенсивным кровообращением (глаза, мозг, почки, желудок, желчный и мочевой пузыри). Облучение глаз может привести к ожогам роговицы, а облучение ЭМИ СВЧ-диапазона – к помутнению хрусталика – катаракте.

При длительном воздействии электромагнитного излучения радиочастотного диапазона даже умеренной интенсивности могут произойти расстройства нервной системы, обменных процессов, изменения состава крови. Могут также наблюдаться выпадение волос, ломкость ногтей. На ранней стадии нарушения носят обратимый характер, но в дальнейшем происходят необратимые изменения в состоянии здоровья, стойкое снижение работоспособности и жизненных сил.

Требования к безопасным условиям воздействия электромагнитных полей в диапазоне 30 кГц-300 ГГц установлены в СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» [67].

Безопасной нормой для человека, в зависимости от частоты волны, считаются следующие показатели:

- до 300 кГц – 25 В/м²;
- 3 МГц – 15 В/м²;
- 30 МГц – 10 В/м²;
- 300 МГц – 3 В/м²;
- свыше 0,3 ГГц – 10 мкВ/см².

6.3.2 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов

Рабочая камера, соответствует требованиям технической документации на ускоритель и обеспечивает возможность безопасного проведения работ.

Пультовая, площадью 15 м², соответствует требованиям технической документации на ускоритель.

Для снижения воздействия повышенного шума, источник шума (ускоритель) располагают в отдельном помещении. Персонал при проведении экспериментов находится в пультовой, отделенной от источника шума металлической дверью и бетонной стеной. Резиновые подложки, установленные под вакуумными насосами, приводят к затуханию колебаний. Для снижения шума в лаборатории необходимо применение звукопоглощающих материалов – перфорированных, минераловатных плит. В качестве глушителей шума можно использовать индивидуальные наушники.

Рабочая камера ускорителя должна быть оборудована приточно-вытяжной вентиляцией с механическим побуждением, предназначенной для удаления продуктов радиолиза воздуха и других токсических веществ, образующихся при осуществлении радиационных процессов. Система вентиляции должна исключать возможность поступления удаляемого из рабочей камеры ускорителя воздуха в смежные помещения. Для предотвращения неблагоприятного воздействия микроклимата, как в лаборатории, так и в помещении, где осуществляется разработка научно-исследовательского проекта, установлена приточно-вытяжная вентиляция. В холодный период года следует применять средства защиты рабочего места от радиационного охлаждения от остекленных поверхностей оконных проемов, а в теплый период – от попадания прямых солнечных лучей. Относительная влажность воздуха должна быть в пределах 40-60%. В помещении, где осуществляется разработка проекта, необходимо обеспечить величину освещенности в 400 лк с использованием для освещения люминесцентные лампы.

Металлический корпус ускорителя служит в качестве защитного экрана, понижающий уровень электромагнитных излучений. Все системы управления ускорительной установки должны быть в пультовой кабине.

Радиационная защита помещений, в которых расположен ускоритель, должна изготавливаться из материалов, наиболее эффективно ослабляющих первичное электронное или тормозное излучение, обеспечивающих наименьший выход вторичного излучения (тормозного, нейтронного и др.) и эффективное их ослабление. Радиационная защита от всех видов ионизирующего излучения, возникающего при работе ускорителя, должна проектироваться таким образом, чтобы суммарные годовые эффективные дозы облучения персонала и населения не превышали величин, регламентируемых НРБ-99/2009 [66] (20 мЗв/год для персонала группы А, 5 мЗв/год для персонала группы Б и 1 мЗв/год для лиц из населения). При этом следует учитывать максимальное время работы ускорителя в течение года и вводить коэффициент запаса, равный 2.

6.4 Экологическая безопасность

Во время работы ускорителя в результате радиолиза воздуха начинают образовываться окислы азота и озон. Окислы азота и озон являются постоянно сопутствующими факторами опасности при работе ускорителей электронов. Однако надо учитывать, что при работе ускорителя в основном выделяется озон, концентрация которого в 50 раз меньше концентрации окислов азота. Соответственно расчет вентиляционной системы производится по выбросам озона.

Продукты радиолиза воздуха образуются в основном лишь в зоне пучка ускоренных электронов. Потом эти продукты распространяются в объеме камеры. Концентрация озона и окислов азота рассчитывается согласно СанПиН 2.6.1.2573-2010 [57] "Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ". Согласно данному документу ПДК основных газообразных токсичных веществ, образующихся при работе ускорителя, занесены в таблицу 6.5.

Таблица 6.5 – предельно-допустимые концентрации выбросов вредных веществ.

Вещество	ПДК, мг/куб.м.
Озон	0,1
Окислы азота	5
Малеиновый ангедрид	1
Фталевый ангедрид	1
Толуол	50
Стирол	5
Окись углерода	30
Ацетон	200

При проведении экспериментов в лаборатории была включена рассчитанная вентиляционная система, обеспечивающая практически пяти кратный обмен воздуха. Соответственно ПДК выбросов веществ в лаборатории не превышала приведенных в таблице 3. Также следует учитывать, что студент находился в закрытой комнате при проведении экспериментов, соответственно, ПДК веществ значительно снижается.

6.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Типичной чрезвычайной ситуацией является пожар. Данная чрезвычайная ситуация может возникнуть в следующих случаях:

- короткое замыкание в цепи;
- перегрев оборудования, причиной которого является неправильная эксплуатация.

Соответственно для ликвидации чрезвычайных ситуаций должен разрабатываться план мероприятий для защиты персонала и населения. Согласно СанПиН 2.6.1.2573-10 [57] в данном плане следует отображать следующие положения:

- а) Прогноз данных чрезвычайных ситуаций;
- б) Порядок информации вышестоящей организации и других организаций о возникновении аварий;

- в) Мероприятия по ликвидации аварии;
- г) Действия персонала при аварии;
- д) Систему лечебно-профилактических мероприятий в случаях поражения электрическим током или повреждения кожи (ожог);
- е) Мероприятия по защите персонала и населения при ликвидации последствий аварии.

В случае возникновения пожара:

- сообщите о ЧС ответственному работнику или позвонить в службу пожаротушения;
- отключите питание установки;
- при возникновении угрозы жизни необходимо покинуть опасную зону. При возникновении небольшого пожара необходимо воспользоваться ручным огнетушителем и потушить возгорание;

Для недопущения пожара:

- перед работой необходимо проверять все технологические узлы установки;
- перед работой необходимо проверять все токоведущие части на предмет повреждения изоляции.

6.6 Заключение по разделу «Социальная ответственность»

По разделу «Социальная ответственность» были рассмотрены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности работников. Далее были проанализированы опасные и вредные факторы, которые могут оказывать воздействие на исполнителя проекта ВКР, а также средства защиты от этих факторов. Все это требуется для обеспечения комфортных и безопасных условий труда работников проекта.

Также в данном разделе рассмотрена экологическая безопасность (анализ воздействия объекта на атмосферу). Т.к. при работе ускорителя электронов в воздухе за счет радиолиза воздуха образуются опасные вещества

(озон и окислы азота). Для защиты работников в помещении обеспечивает многократный обмен воздуха путём установки вентиляционных систем.

Следующим пунктом в разделе были рассмотрены наиболее возможные чрезвычайные ситуации. Типичной такой ситуацией является пожар, чаще всего это возгорание оборудования. Соответственно, в данном пункте были разработаны превентивные меры предосторожности по предупреждению ЧС и необходимые действия при возникновении ЧС.

Список литературы

1. Возможности и применение импульсных ускорителей электронов. URL: https://zen.yandex.ru/media/prosto_o_slozhnom/zachem-nam-nujen-uskoritel-chastic-5aa134989d5cb381312d801b. Дата обращения: 15.03.2019.
2. В.Н Забаев. Применение ускорителей в науке и промышленности. Томск: Изд-во ТПУ, 2008.
3. M.R Cleland. High Power Electron Accelerators for Industrial Radiation Processing. Radiation Processing of Polymers, Hanser Publishers, Munich, and Oxford University Press, New York (1992) p. 23.
4. Мусабаева Л.И., Старцева Ж.А Интраоперационная электронная и дистанционная гамма-терапия рака молочной железы I–II стадий заболевания (обзор литературы). Сибирский онкологический журнал, 2011, №2 (44), с. 79.
5. Концепция развития таможенных органов Российской Федерации. Распоряжение Правительства РФ от 14 декабря 2005 г. N 2225-р.
6. Федеральная целевая программа "Государственная граница Российской Федерации (2003 – 2011 годы)".
7. Б.Г. Маслов, А.Л. Ремизов. Радиационная дефектоскопия. Контроль проникающими веществами. М.: Издательство МГТУ, 1992.
8. Немытов П.И. Системы питания и управления серии высоковольтных промышленных ускорителей электронов с мощностью выведенного пучка сотни киловатт: дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 2010.
9. Бочков В.Д., Королев Ю.Д., Франк К.Ф. и др. Псевдоискровые разрядники для схем питания импульсных лазеров // Изв. вузов. Физика. 2000. № 5. С. 97–105.
10. Ковальчук Б.М., Кремнев В.В., Поталицын Ю.Ф. Сильноточные наносекундные коммутаторы. Новосибирск: Наука, 1991. 176 с.
11. Котов Ю.А., Месяц Г.А., Рукин С.Н. и др. Твердотельный прерыватель тока для генерирования мощных наносекундных импульсов // ДАН. 1993. Т. 330, № 3. С. 315–317.

12. Дарзбек С.А., Любутин С.К., Рукин С.Н. и др. SOS-диоды: наносекундные прерыватели сверхплотных токов // Электротехника. 1999. № 4. С. 20–28.
13. Мешков А.Н. Магнитные генераторы мощных наносекундных импульсов // ПТЭ. 1990. № 1. С. 23–37.
14. Энгелько В.И. Разработка методов формирования интенсивных электронных и ионных пучков микросекундной длительности, создание на их основе ускорителей и их применение: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2002.
15. Engelko V., Yatsenko B., Mueller G. et al. Pulsed electron beam facility (GESA) for surface treatment of materials // Vacuum. 2001. Vol. 62, № 2–3. P. 211–216.
16. Абдуллин Э.Н. Взрывэмиссионные источники широкоапертурных электронных пучков микросекундной длительности: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Томск, 2007.
17. Гончаров Д.В., Ремнев Г.Е., Пушкарев А.И., Фурман Э.Г. Импульсный электронный ускоритель // Патент России № 41951. 2004. Бюл. № 31.
18. Remnev G.E., Furman E.G., Pushkarev A.I. et al. High-current pulsed accelerator with matched transformer: construction and exploitation characteristics // IEEE Transactions on fundamentals and materials. 2004. Vol. 124, № 6. P. 491–495.
19. Ускоритель заряженных частиц. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Ускоритель_заряженных_частиц. Дата обращения: 15.03.2019.
20. История создания ускорителей электронов. URL: <https://bigenc.ru/physics/text/2145960>. Дата обращения: 15.03.2019.
21. Немытов П.И. Системы питания и управления серии высоковольтных промышленных ускорителей электронов с мощностью выведенного пучка сотни киловатт: дис. ... д-ра техн. наук Новосибирск, 2010.

22. Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Советское радио, 1974. 256 с.
23. Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. Импульсный электронный разряд в вакууме, Новосибирск: Наука, 1984. 256
24. Бочков В.Д., Королев Ю.Д., Франк К.Ф. и др. Псевдоискровые разрядники для схем питания импульсных лазеров // Изв. вузов. Физика. 2000. № 5. С.97-105.
25. Ковальчук Б.М., Кремнев В.В., Поталицын Ю.Ф. Сильноточные наносекундные коммутаторы. Новосибирск: Наука, 1991. 176 с.
26. Котов Ю.А., Месяц Г.А., Рукин С.Н. и др. Твердотельный прерыватель тока для генерирования мощных наносекундных импульсов // ДАН. 1993. Т. 330, № 3. С. 315–317.
27. Дарзбек С.А., Любутин С.К., Рукин С.Н. и др. SOS-диоды: наносекундные прерыватели сверхплотных токов // Электротехника. 1999. № 4. С. 20–28.
28. Мешков А.Н. Магнитные генераторы мощных наносекундных импульсов // ПТЭ. 1990. № 1. С. 23–37.
29. Энгелько В.И. Разработка методов формирования интенсивных электронных и ионных пучков микросекундной длительности, создание на их основе ускорителей и их применение: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2002.
30. Engelko V., Yatsenko B., Mueller G. et al. Pulsed electron beam facility (GESA) for surface treatment of materials // Vacuum. 2001. Vol. 62, № 2–3. P. 211–216.
31. Neau E.L. High average power, high current pulsed accelerator technology // Proceedings of the Particle Accelerator Conference, 1-5 May 1995. Vol. 2, P. 1188–1192. doi:10.1109/PAC.1995.505170.
32. Tokuchi A., Ninomiya N., Weihua Jiang et al. Repetitive pulsed-power generator "ETIGO-IV" // IEEE Transactions on Plasma Science. 2002. Vol. 30, № 5. P. 1637–1641. doi:10.1109/TPS.2002.806644.

33. Ускорители сильноточных электронных пучков с высокой частотой следования импульсов / А. С. Ельчанинов [и др.] // Сильноточные импульсные электронные пучки в технологии. Новосибирск: Наука Сибирское отделение, 1983. С. 5–21.
34. Mesyats G. A., Korovin S. D., Gunin A. V. et al. Repetitively pulsed high-current accelerators with transformer charging of forming lines // Laser and Part. Beams. 2003. Vol. 21, № 2. P. 197–209.
35. Коровин С.Д., Ростов В.В. Сильноточные наносекундные импульсно-периодические ускорители электронов на основе трансформаторов Тесла // Известия вузов. Физика. 1996. № 12. С. 21–30.
36. Быков Н.Б., Губанов В.П., Гунин А.В. и др. Сильноточный импульсно-периодический ускоритель электронов с высокой стабильностью параметров электронного пучка // ПТЭ. 1989. № 1. С. 37–39.
37. Егоров И.С., Кайканов М.И., Луконин Е.И. и др. Частотно-импульсный электронный ускоритель «АСТРА» // ПТЭ. 2013. № 5. С. 81–84.
38. Канаев Г.Г., Кухта В.Р., Лопатин В.В. и др. Высоковольтный импульсный генератор для электроразрядных технологий / Канаев Г.Г., Кухта В.Р., Лопатин В.В., Нашилевский А.В., Ремнев Г.Е., Уемута К., Фурман Э.Г. // ПТЭ. 2010. №1. С. 105–109.
39. Сильноточные импульсные электронные пучки в технологии: сборник научных статей / Академия наук СССР (АН СССР), Сибирское отделение (СО), Институт сильноточной электроники (ИСЭ) ; под ред. Г. А. Месяца. Новосибирск: Наука: Сибирское отделение, 1983. 168 с.
40. Диденко А.Н, Григорьев В.Н., Усов Ю.П. Мощные электронные пучки и их применение. М.: Атомиздат, 1977. 280 с.
41. Соковнин С.Ю. Наносекундные ускорители электронов и радиационные технологии на их основе. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 225 с.
42. Пикаев А.К. Современное состояние радиационной технологии // Успехи химии. 1995. Т. 64, № 6. С. 609–639.

43. Пикаев А.К. Экологические применения радиационной технологии (Обзор) // Химия высоких энергий. 1994. Т. 28, № 1. С. 5–16.
44. Подзорова Е.А. Комбинированные радиационные методы очистки воды и сточных вод: дис. ... д-ра. хим. наук. М., 2001.
45. Ремнёв Г. Е., Степанов А. В., Войно Д. А. и др. Очистка и стерилизация промышленнобытовых стоков импульсным электронным пучком наносекундной длительности / И. С. Егоров, М.И. Кайканов, А. С. Маслов, Л. Р. Меринова, А. В. Попов, Б. А. Сярг, Л. Н. Шиян // Ядерная и радиационная физика: Доклады 8-й Международной конференции, Алматы, 20-23 Сентября 2011. Алматы: ИЯФ НЯЦ РК, 2011. С. 506–509.
46. Маркелов В.А., Михаленко В.А., Маслов А.С., Сярг Б.А., Попов А.В., Ремнев Г.Е., Степанов А.В., Кайканов М.И., Меринова Л.Р., Егоров И.С. Способ очистки сточных вод // Патент РФ № 2473436. 05.08.2011. Бюл. № 22.
47. Kolokolov D. Y., Egorov I. S., Kaykanov M. I. et al. Treatment of industrial and household waste water with the pulse electron accelerator-based setup // 3rd International Congress on Radiation Physics and Chemistry of Condensed Matter, High Current Electronics and Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows: Abstracts, Tomsk, September 17-21, 2012. Tomsk: TPU Press, 2012. P. 263.
48. Матханов П.Н., Гоголицын Л.З. Расчет импульсных трансформаторов. М.: Энергия, 1980. 112с.
49. Вдовин С.С., Проектирование импульсных трансформаторов. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. 208с.
50. Каштанов В.В. Анализ фронта выходных импульсов трансформатора. Радиотехника, 1995. Т.12. С. 38-40.
51. Ремнев Г.Е., Фурман Э.Г., Пушкарев А.И. и др. // ПТЭ. 2004. №3. С. 130-134.
52. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1996. 488с

53. А.Н. Матвеев. Электричество и магнетизм. Первое изд. М.: Высшая школа, 1983. 463 с.
54. Bochkov V.D., Bochkov D.V., Dyagilev V.M., et.al. High power pseudospark switches for pulsed power // proceeding of: Power Modulator Symposium, 2002 and 2002 High-Voltage workshop. 2002. Doi;10.1109/MODSUM.2002.1189518
55. I. Egorov. Numerical simulation and experimental validation of accelerating voltage formation for a pulsed electron accelerator / Review of Scientific Instruments. 2014. - №85.
56. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ;
57. СанПиН 2.6.1.2573-10 «Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ»;
58. ГОСТ 12.2.032-78 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования»;
59. ГОСТ 12.2.032-78 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования»;
60. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы»;
61. ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация»;
62. СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений»;
63. СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки»;
64. СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение»;
65. ГОСТ 12.1.038-82 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов (с Изменением N 1)»

66. СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009»;
67. СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах»;