

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: «Электроника и наноэлектроника» 11.04.04
Уровень образования: магистр
Отделение материаловедения
Период выполнения: 2017/2018 учебный год

МАГИСТЕРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Стабильность запуска тиратрона с холодным катодом при высоких анодных напряжениях

УДК 621.387.332.015.032.22

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ61	Аргунов Григорий Александрович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор	Королёв Юрий Дмитриевич	доктор физико-математических наук, профессор		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Старикова Екатерина Васильевна	кандидат философских наук, доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор	Ахмеджанов Рафик Равильевич	доктор биологических наук, профессор		

По разделу на английском языке

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Парнюгин Александр Сергеевич	кандидат педагогических наук		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Электроника и наноэлектроника	Яковлев В.Ю.	доктор физико-математических наук, профессор		

Томск – 2018 г.

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 работы</i> 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: «Электроника и наноэлектроника» 11.04.04
Уровень образования: магистр
Отделение материаловедения
Период выполнения: 2017/2018 учебный год

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП
_____ Яковлев В.Ю.
(Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
4НМ61	Аргунов Григорий Александрович

Тема работы:

Стабильность запуска тиратрона с холодным катодом при высоких анодных напряжениях

Утверждена приказом директора (дата, номер)

От 02.04.2018 г. №2279/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	<i>Объект исследования – тиратрон с холодным катодом ТПИ1-10к/50 и его модификации.</i>
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ol style="list-style-type: none">1. Обзор литературы по теме диссертации;2. Выявление особенностей и недостатков в работе серийно-выпускаемых тиратронов типа ТПИ1-10к/50 с высоко эмиссионной таблеткой в узле запуска;3. Испытания прототипа отпаянного тиратрона серии ТПИ1-10к/50 с новым узлом запуска;4. Изучение особенностей режимов горения разряда в узле запуска прототипа тиратрона;5. Испытания и выбор схем запуска

	<i>тиратрона, обеспечивающие наносекундную стабильность срабатывания.</i>
Перечень графического материала	Презентация, выполненная в MS PowerPoint
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Социальная ответственность	Ахмеджанов Рафик Равильевич
Финансовый менеджмент	Старикова Екатерина Васильевна
Раздел на английском языке	Парнюгин Александр Сергеевич
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Обзор литературы	

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор	Королёв Юрий Дмитриевич	Доктор физико-математических наук, профессор		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ61	Аргунов Григорий Александрович		

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

Студенту:

Группа	ФИО
4НМ61	Аргунов Григорий Александрович

Школа	ИШНПТ	Подразделение	Отделение Материаловедения
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	«Электроника и наноэлектроника» 11.04.04

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): <i>материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Р 200 000
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Районный коэффициент – 30%
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	НДС – 18%, отчисления на заработную плату – 30%
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	SWOT-анализ, Карта сегментирования
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Определение структуры и трудоемкости работ в рамках НИИ, планирование бюджета НИИ.
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Оценка ресурсной и организационной эффективности исследования
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):	
1. Матрица SWOT	
2. График проведения и бюджет НИ	
3. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ	

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Старикова Екатерина Васильевна	Кандидат философских наук, доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ61	Аргунов Григорий Александрович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
4НМ61	Аргунов Григорий Александрович

Школа	ИШНПТ	Подразделение	Отделение Материаловедения
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	«Электроника и наноэлектроника» 11.04.04

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<i>Описание рабочего места и объекта исследования.</i>	<i>Объект исследования – характеристики газоразрядного коммутатора – тиратрона с холодным катодом. Работа заключается в проведении экспериментов с исследуемым тиратроном. Рабочее место состоит из огражденного экспериментального стенда и отдельной экранированной комнаты для персонала.</i>
<i>1. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</i>	<i>– ГН 2.1.6.695-98. Нормы содержания озона в воздухе рабочей зоны; – ГОСТ 12.1.038–82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов. - СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. "Гигиенические требования к организации работы".</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>1. Анализ выявленных вредных факторов</i>	<i>- повышенное содержание озона в воздухе.</i>
<i>2. Анализ выявленных опасных факторов</i>	<i>-высокое напряжение (до 50 кВ).</i>
<i>3. Защита в чрезвычайных ситуациях.</i>	<i>– перечень возможных ЧС при проведении экспериментов; –выбор наиболее типичной ЧС; –разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; –разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.</i>
<i>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.</i>	<i>- специальные правовые нормы трудового законодательства; - организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны оператора.</i>
<i>5. Обеспечение экологической безопасности.</i>	<i>- анализ воздействия объекта исследования на окружающую среду;</i>

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор	Ахмеджанов Рафик Равильевич	доктор биологических наук, профессор		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ61	Аргунов Григорий Александрович		

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа новых производственных технологий

Направление подготовки: «Электроника и наноэлектроника» 11.04.04

Уровень образования: магистр

Отделение материаловедения

Период выполнения: 2017/2018 учебный год

Форма представления работы:

магистерская диссертация

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

Срок сдачи студентом выполненной работы:

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
01/05/2018	Основная часть	60
05/05/2018	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
15/05/2018	Социальная ответственность	10
30/05/2018	Обязательное приложение на иностранном языке	15
		Сумма: 100 баллов

Составил руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор	Королёв Юрий Дмитриевич	доктор физико-математических наук, профессор		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Электроника и наноэлектроника	Яковлев В.Ю.	доктор физико-математических наук, профессор		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа: 120 с., 28 рис., 14 табл., 27 источников.

Ключевые слова: тиратрон с холодным катодом, псевдоискровой разрядник, тлеющий разряд.

Объектом исследования является прототип двухсекционного отпаянного тиратрона с холодным катодом типа ТПИ1-10к/50.

Цель работы – испытания тиратрона с холодным катодом и выбор условий горения вспомогательного разряда и схем запуска, обеспечивающих наносекундную стабильность срабатывания тиратрона.

В процессе работы проводились: подготовка схем запуска и системы регистрации; измерение статических пробивных напряжений основного разрядного промежутка тиратрона в целом и его секций по отдельности; получение вольтамперных характеристик вспомогательного разряда узла запуска тиратрона; регистрация осциллограмм тока разряда в основном промежутке тиратрона, напряжения импульса запуска и напряжения на аноде тиратрона с наносекундным временным разрешением.

В результате исследования выявлены особенности режимов горения вспомогательного разряда в узле запуска. Предложены и испытаны схемы запуска, обеспечивающие наносекундную стабильность срабатывания тиратрона.

Степень внедрения: частичная.

Область применения: электрофизические и промышленные электро-разрядные установки.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	11
1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	14
1.1 Общий принцип работы тиратрона с холодным катодом.....	14
1.2 Конструктивные особенности тиратрона ТПИ1-10к/50	16
1.3 Сильноточный разряд в основном разрядном промежутке тиратрона	18
1.4 Вспомогательный тлеющий разряда в узле запуска тиратрона ТПИ1-10к/50.....	22
1.5 Методы запуска тиратрона с холодным катодом	27
1.6 Особенности работы тиратрона с высоко-эмиссионной таблеткой в узле запуска	31
1.7 Постановка задачи	35
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	36
2.1 Экспериментальная установка.....	36
2.2 Конструктивные особенности прототипа отпаянного тиратрона ТПИ1- 10к/50 с новым узлом запуска	37
2.3 Методики измерений	39
2.3.1 Измерение статических пробивных напряжений основного разрядного промежутка в целом и секций тиратрона в отдельности.....	39
2.3.2 Получение вольтамперные характеристики вспомогательного разряда в узле запуска	41
2.4 Методы запуска тиратрона с новым узлом запуска	43
3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	47
3.1 Напряжения статического пробоя основного промежутка тиратрона в целом и секций по отдельности	47
3.2 Вольтамперные характеристики вспомогательного тлеющего разряда	50
3.3 Схемы запуска тиратрона при высоких анодных напряжениях	54

4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	61
4.1 Потенциальные потребители результатов исследования	62
4.2 SWOT-анализ.....	64
4.3 Инициализация научно-технического проекта.....	66
4.3.1 Техничко-экономическое обоснование проведения научно-технического исследования.....	66
4.3.2 Оценка научно-технического уровня исследования	67
4.4 Планирование работ по научно-техническому исследованию	69
4.5 Бюджет научно-технического исследования	72
4.5.1 Расчёт материальных затрат на реализацию проекта.....	72
4.5.2 Расчет капитальных вложений на реализацию проекта.....	73
4.5.3 Расчёт оплаты труда работников.....	74
4.6 Оценка ресурсной и организационной эффективности исследования.....	76
5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	79
5.1 Профессиональная социальная безопасность	79
5.1.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть при проведении исследования	79
5.1.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов	81
5.2 Экологическая безопасность.....	87
5.2.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду	87
5.2.2. Анализ «жизненного цикла» объекта исследования	87
5.2.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды	87
5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	88
5.3.1 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть при проведении исследований	88
5.3.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС	89

5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	91
5.4.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства.....	91
5.4.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.....	91
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	94
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	96
Приложение I.....	99

ВВЕДЕНИЕ

Ключевой задачей импульсной электроэнергетики является передача в нагрузку импульсной электрической энергии. В процессе коммутации большое внимание уделяется коммутаторам, поскольку именно они во многом определяют качество передаваемого импульса. В роли коммутаторов в импульсных источниках напряжений используются газоразрядные или полупроводниковые приборы.

Газоразрядные приборы представляют собой большую группу коммутаторов. Как правило, эти приборы используются для коммутации высоковольтных импульсов при токах на уровне десятков-сотен килоампер.

Среди большого разнообразия газоразрядных коммутаторов следует выделить коммутаторы низкого давления – тиратроны с холодным катодом. В зарубежной литературе эти приборы получили название «pseudospark switches», или «псевдоискровые разрядники». Такое название эти приборы получили из-за особенности развития в них газового разряда [1-3]. Импульсный разряд низкого давления по своим характеристикам напоминает искровой разряд атмосферного давления. Именно поэтому авторы работ [1-3] присвоили этому разряду название «псевдоискровой».

Конструкция тиратрона с холодным катодом в значительной степени напоминает конструкцию классического водородного тиратрона с накаливаемым катодом. Однако в данном типе тиратронов накаливаемый катод отсутствует. Благодаря холодному катоду, данные тиратроны имеют некоторые преимущества по сравнению с классическими: отсутствие нагретого до температуры свыше 800 °С катода обеспечивает в прикатодной области, ответственной за формирование разряда, в 2–3 раза большую плотность водорода, что создает условия для снижения времени коммутации. Отсутствие постоянной эмиссии электронов ускоряет процесс деионизации промежутка после окончания импульса тока. Одновременно это упрощает конструкцию

тиратрона, устраняет дополнительный нагрев – отпадает необходимость в источнике питания нагревателя и принудительном охлаждении прибора.

Диапазон рабочих давлений газа в приборе соответствует левой ветви кривой Пашена, когда длина свободного пробега электрона для реакции ионизации превышает длину основного межэлектродного промежутка. В таких условиях пробой в промежутке не может инициироваться одиночными электронами. Для инициирования пробоя необходим значительный поток электронов в промежуток со стороны катода. Этот поток обеспечивается за счет специального узла запуска тиратрона, который обычно располагается в заземленной катодной полости. Разнообразные методы запуска тиратронов описаны в работах [1, 4].

В ранних публикациях представлены результаты исследований разряда и конструкций тиратронов, полученные на разборных макетах. К настоящему времени созданы отпаянные металлокерамические приборы, которые производятся компанией *Импульсные технологии*, г. Рязань [<http://www.pulsetech.ru>]. Описание первых образцов этих приборов приведено в работе [1]. В приборах серии ТДИ используются узлы запуска на основе разряда по поверхности диэлектрика или полупроводника, а в приборах серии ТПИ применяется узел запуска с использованием вспомогательного стационарного слаботоочного тлеющего разряда.

Условия горения вспомогательного тлеющего разряда в значительной степени определяют характеристики тиратрона в целом [5, 9]. Это, в частности, относится к пробивному напряжению, к времени запаздывания пробоя в основном промежутке относительно момента приложения импульса запуска, к частоте следования импульсов. Поэтому выбору режимов горения вспомогательного разряда и конструкции электродной системы прибора уделяется большое внимание.

При определенных условиях в тиратронах с холодным катодом удается получить малое время запаздывания пробоя в основном промежутке относительно момента приложения импульса запуска и наносекундную

стабильность в разбросах времен запаздывания [1, 4, 6]. Это позволяет использовать тиратроны в сложных электрофизических системах, где требуется параллельная работа большого количества приборов. В качестве примера можно привести публикации [7, 8], где описан линейный индукционный ускоритель и схема импульсного модулятора ускорителя для получения максимального напряжения 2.5 МВ. В схеме применены тиратроны с холодным катодом типа ТПИ1-10к/50 (максимальный ток 10 кА при анодном напряжении до 50 кВ). В режиме параллельной работы включаются 96 приборов.

Обеспечение наносекундной стабильности при параллельном срабатывании большого количества приборов представляет собой серьезную проблему. Это особенно относится к условиям, когда давление газа в приборе должно быть низким, чтобы обеспечить высокое анодное напряжение [4].

В тиратронах, исследуемых в данной работе, используется узел запуска на основе стационарного вспомогательного тлеющего разряда. Для облегчения зажигания вспомогательного разряда, в узле запуска применяется так называемая высокоэмиссионная таблетка. Её использование позволяет значительно снизить напряжение зажигания и горения вспомогательного разряда. Однако недостатком таких узлов запуска является то, что свойства таблетки могут меняться в процессе работы тиратрона. Вместе с этим, меняется и режим горения вспомогательного разряда, что приводит к существенному разбросу времен запаздывания срабатывания тиратрона [9].

Для решения указанной проблемы был разработан прототип тиратрона ТПИ1-10к/50 с новым узлом запуска без использования высоко-эмиссионной таблетки. В настоящей работе представлены результаты исследования данного тиратрона. Изучены особенности горения вспомогательного разряда в новом узле запуска. Проведены испытания тиратрона в различных схемах запуска при высоких анодных напряжениях. Для исследуемых схем запуска была получена наносекундная стабильность срабатывания тиратрона ± 2 нс.

1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Общий принцип работы тиратрона с холодным катодом

Упрощенное схематическое изображение конструкции тиратрона приведено на рисунке 1. Тиратрон представляет собой прибор цилиндрической формы высотой от 10 до 20 см и диаметром от 3 до 20 см. Электроды тиратрона размещаются внутри диэлектрического цилиндра *1*, а их контакты выведены наружу цилиндрического стакана в виде фланцев. Основной межэлектродный промежуток состоит из анода *2* и катода *3*. Как правило, диаметр отверстий в электродах основного разрядного промежутка сопоставим с расстоянием между ними, и составляет несколько миллиметров.

Рабочее давление газа в приборе, как и в классических тиратронах с накаливаемым катодом, поддерживается за счет генератора водорода. К выводам нагревателя генератора водорода подается напряжение (4 – 7) В при токах на уровне около 2 А.

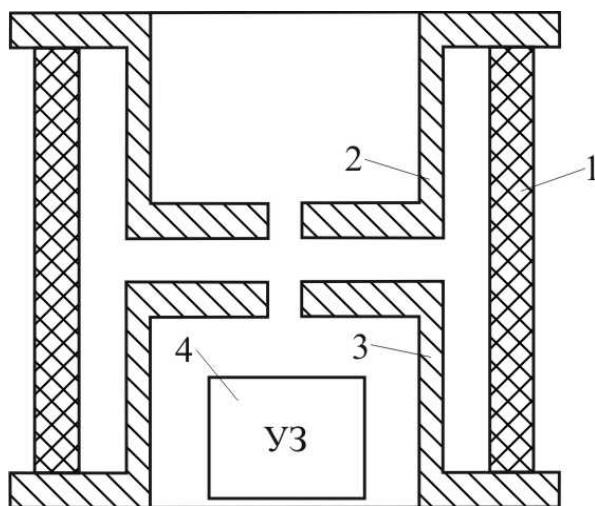


Рисунок 1. Общая схема разрядника. *1* – диэлектрический цилиндр, *2* – полый анод, *3* – полый катод, *4* – узел запуска.

Основной промежуток сообщается с катодной полостью через отверстие в верхней плоскости катода *3*. Катодная полость – это важная часть системы

электродов, в которой начинается развитие пробоя основного промежутка тиратрона. Для того чтобы обеспечить поток электронов в основной промежуток, необходимо в полости катода создать плазму. При внешнем инициировании разряда в основном промежутке в полости катода размещается специальный узел запуска. В настоящее время разработаны различные по конструкции и принципу работы узлы запуска. Для инициирования разряда в основном промежутке в заданный момент времени к одному из электродов узла запуска относительно земли прикладывается импульс напряжения амплитудой несколько кВ (импульс запуска).

Под действием импульса запуска происходит генерация плазмы в полости основного катода и инжекция электронов с поверхности этой плазмы в основной промежуток. Интенсивный поток электронов в основном промежутке инициирует развитие импульсного разряда [10, 11]. Подробное описание механизма пробоя приведено в Главе 1.3.

1.2 Конструктивные особенности тиратрона ТПИ1-10к/50

Изображение конструкции тиратрона ТПИ1-10к/50 приведено на рисунке 2. Этот тиратрон предназначен для коммутации токов до 10 кА при напряжении на аноде тиратрона до 50 кВ. Внешний диаметр керамического корпуса тиратрона составляет 95 мм. Основной межэлектродный промежуток включает в себя анод *A* и полый катод *C* сложной формы. В данном приборе применена двухсекционная конструкция основного промежутка, когда между электродами *A* и *C* имеется градиентный электрод *G*. Межэлектродное расстояние в каждой секции для приборов рассматриваемого типа обычно составляет (3–5) мм. В рабочем диапазоне давлений типичное напряжение, которое выдерживает без пробоя одиночная секция, может достигать 25 кВ [1, 12-15]. Таким образом, рабочее анодное напряжение двухсекционного прибора может достигать 50 кВ.

Основной межэлектродный промежуток сообщается с катодной полостью через отверстия в верхней плоскости электрода *C*. Диаметр отверстий соизмерим с межэлектродным расстоянием секций основного промежутка.

Из конструкции электродной системы видно, что градиентный электрод *G* защищает внутреннюю поверхность керамического корпуса прибора от воздействия продуктов горения разряда. Узел запуска тиратрона включает в себя электроды *A*₁ и *C*₁. Отличительной особенностью конструкции полого катода *C*₁ является наличие внутри него так называемой высоко-эмиссионной таблетки *ЕС*, роль которой состоит в том, чтобы облегчить зажигание вспомогательного разряда и снизить напряжение его горения. Таблетка размещена вблизи дна катодной полости и представляет собой цилиндр с диаметром 10 мм. Она изготовлена из порошковых материалов методом горячего прессования. Основным компонентом является вольфрам (около 90%), к которому добавлены окись алюминия и карбонат цезия.

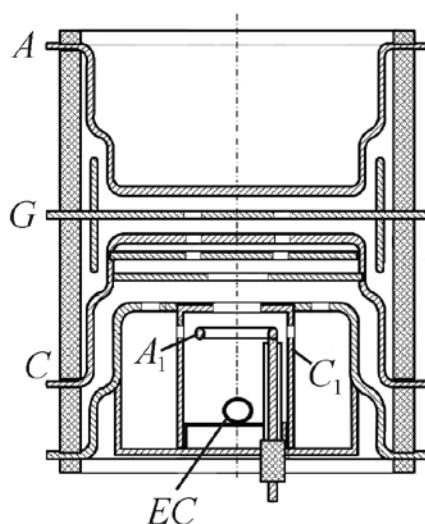


Рисунок 2. Схематическое изображение конструкции тиратрона ТПИ1-10к/50. *A* – анод тиратрона, *C* – полый катод тиратрона, *G* – промежуточный градиентный электрод, *A₁* – кольцевой анод вспомогательного тлеющего разряда, *C₁* – полый катод вспомогательного тлеющего разряда, *EC* – таблетка с высокой эмиссионной способностью

Как упоминалось ранее, для регулировки давления в приборе используется генератор водорода (в некоторых приборах используется дейтерий). Поскольку прибор является отпаянным, то невозможно измерить величину абсолютного давления в нем. В этом случае, в качестве относительной величины давления газа используется напряжение на генераторе водорода. Типичное значение напряжения на нем составляет (4–7) В, при токе до 2 А. Для повышения давления на нагреватель подаётся напряжение, происходит выделение газа и давление в приборе повышается. При выключенном напряжении, нагреватель генератора холодный и он, поглощая рабочий газ, снижает его давление в тиратроне. Регулируя напряжение на нагревателе, можно менять рабочее давление в приборе.

1.3 Сильноточный разряд в основном разрядном промежутке тиратрона

Как отмечалось выше, для инициирования разряда в основном разрядном промежутке тиратрона необходимо создать плазму в полости основного катода. Тогда электроны с поверхности этой плазмы под действием высокого анодного напряжения будут извлекаться в основной промежуток и производить ионизацию газа. В работе [11] показано, что если давление газа в тиратроне ниже некоторого критического значения, то развитие газового разряда в основном промежутке невозможно. В этом случае основной промежуток представляет собой вакуумный диод с ионной компенсацией.

Если давление газа выше критического значения, то под действием электронов из плазмы в катодной полости происходит генерация плазмы в основном промежутке и зажигание сильноточного тлеющего разряда с полым катодом. Разряд в своем развитии проходит несколько квазистационарных стадий. Рассмотрим процесс зажигания разряда и его стадии более подробно.

На рис. 3 приведены осциллограммы тока и напряжения горения разряда в основном промежутке, полученные на односекционном разборном макете тиратрона [16]. Разряд поддерживался в водороде при давлении 0.6 Тор, а напряжение, приложенное к аноду тиратрона, составляло 1550 В. Из осциллограмм отчетливо видно четыре стадии развития разряда. Рассмотрим более подробно каждую из этих стадий.

Стадия I – стадия запаздывания пробоя (рисунок 4). На этом этапе электроны, поступающие в основной зазор со стороны катодной полости в направлении анода, производят ионизацию газа. Вблизи анода начинает формироваться избыточный объемный заряд положительных ионов. Данный объемный заряд создает потенциальный барьер для электронов, благодаря чему

электроны захватываются этим объемным зарядом и процесс ионизации усиливается.

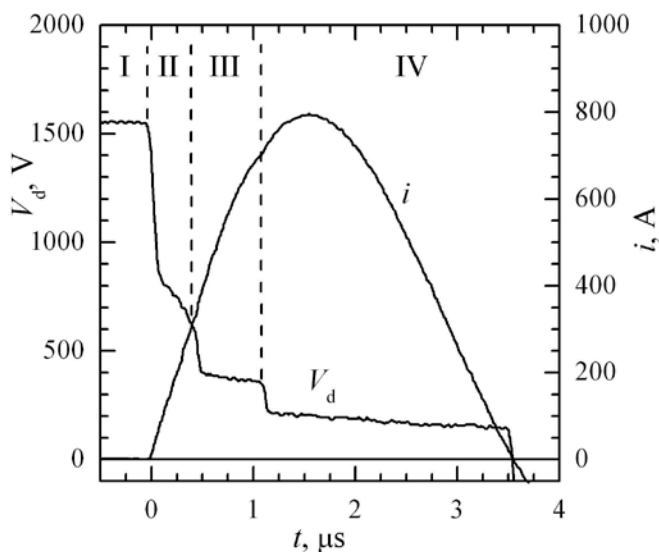


Рисунок 3. Осциллограммы тока и напряжения, показывающие различные стадии развития сильноточного разряда во времени. Давление газа в приборе $p = 0.6$ Тор, используемый газ – H_2 (водород), напряжение на разрядном промежутке $V_0 = 1550$ В.

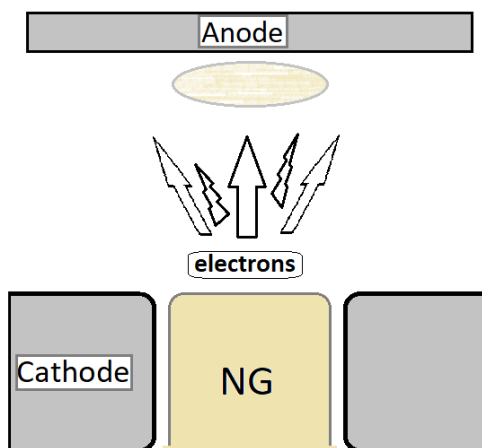


Рисунок 4. Схематическое изображение области разряда в I стадии развития разряда. NG – negative glow (отрицательное свечение в катодной полости).

Таким образом, со стороны анода в направлении катода распространяется ионизационная волна, что, в конечном счёте, приводит к формированию положительного столба в разрядном промежутке. К моменту формирования положительного столба происходит резкий спад напряжения и устанавливается квазистационарная стадия II.

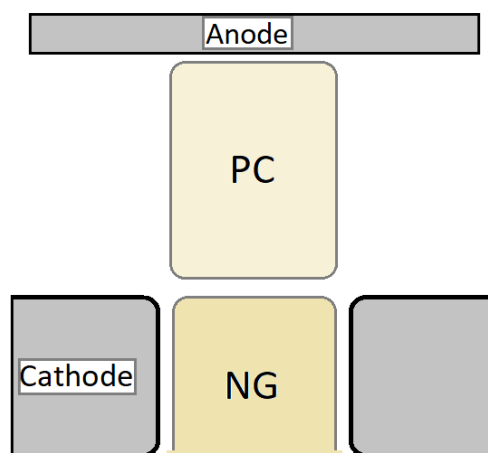


Рисунок 5. Схематическое изображение области разряда в II стадии – плотного тлеющего разряда (dense glow discharge). NG – negative glow (отрицательное свечение в катодной полости), PC – positive column (положительный столб тлеющего разряда).

В течении стадии II напряжение горения разряда уменьшается с 800 до 600 В, а ток разряда увеличивается от 80 до 300 А. В соответствии с терминологией, введенной в [10], данная стадия соответствует так называемому плотному тлеющему разряду (“dense glow discharge”). Расположение областей разряда для данной стадии приведено на рис. 5. В катодной полости располагается плазма отрицательного свечения NG, а в основном промежутке плазма положительного столба. Между плазмой отрицательного свечения и положительного столба существует переходная область – двойной электрический слой [10]. Электроны из плазмы отрицательного свечения ускоряются в этом слое и производят ионизацию газа в положительном столбе.

На стадии плотного тлеющего разряда ток замыкается на всю внутреннюю поверхность катодной полости. К окончанию этой стадии основная доля тока разряда начинает замыкаться на внутреннюю поверхность отверстия в катоде. За счет развития взрывоэмиссионной неустойчивости на внутренней поверхности отверстия возникают искровые катодные пятна, напряжение горения разряда снижается и происходит переход в стадию сверхплотного тлеющего разряда (стадия III).

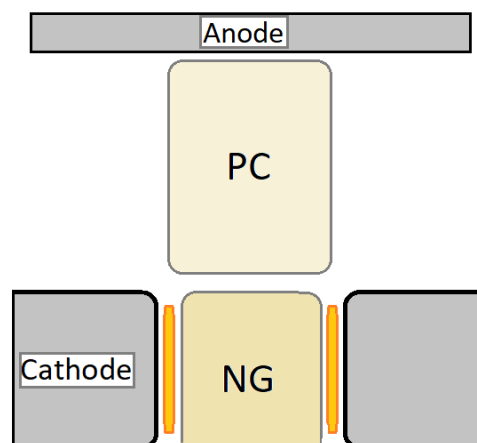


Рисунок 6. Схематическое изображение области разряда в III стадии – сверхплотного тлеющего разряда (super dense glow discharge). NG – negative glow (отрицательное свечение в катодной полости), PC – positive column (положительный столб тлеющего разряда).

На этой стадии (рисунок 6) ток разряда увеличивается с 300 до 700 А, а напряжение падает с 600 до 350 В. Несмотря на то, что на внутренней поверхности отверстия катодной полости появляются катодные пятна, разряд все еще поддерживается в режиме тлеющего. Как показано в работах [16, 17] на данной стадии ток разряда может достигать 10 кА. Несмотря на столь внушительное значение тока, способного протекать в данной стадии, положительный столб и отрицательное свечение все еще не сливаются воедино, как это происходит в дуговом разряде.

Пятна являются источником повышенной электронной эмиссии. Тем не менее, ярко выраженное дуговое катодное пятно в этой стадии отсутствует.

Наконец, при переходе в режим IV на кромке катодного отверстия со стороны основного межэлектродного промежутка возникает дуговое катодное пятно. Разряд переходит в режим вакуумной дуги. Отчетливо выраженное катодное пятно приводит к новому резкому уменьшению напряжения горения разряда. Для этого режима горения разряда характерно низкое напряжение – на уровне 200 В и возрастание тока до 800 А. Также, режим IV можно охарактеризовать как сильноточный разряд с катодным пятном. Фактически, разряд начинает гореть в плазме металлического пара.

1.4 Вспомогательный тлеющий разряд в узле запуска тиратрона ТПИ1-10к/50

На рисунке 7 приведён пример вольтамперной характеристики вспомогательного разряда в узле запуска с использованием высоко эмиссионной таблетки.

Основная доля тока вспомогательного тлеющего разряда протекает между кольцевым анодом и катодом сложной формы. Этот ток обозначен как i_1 . Однако, в плоской части катода сложной формы (электрод C_1) имеется отверстие и некоторый паразитный ток i_2 протекает также на полый катод C . Таким образом, полный ток вспомогательного тлеющего разряда $i = i_1 + i_2$.

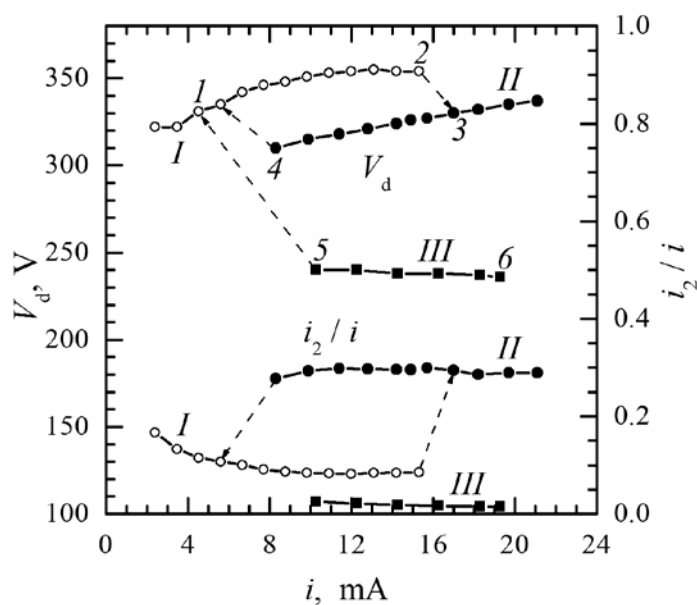


Рисунок 7. Вольтамперная характеристика вспомогательного тлеющего разряда при использовании таблетки с пониженной эмиссионной способностью и доля паразитного тока i_2/i на электрод C . Напряжение на генераторе водорода $V_H = 5.6$ В, $R_b = 20$ кОм.

После пробоя между кольцевым анодом и катодом узла запуска, зажигается тлеющий разряд с полым катодом. Условия его горения соответствуют точке I на участке I вольтамперной характеристики. Если мы повышаем напряжение источника питания, то рабочая точка движется вправо по

кривой *I*. Снижение напряжения источника питания приводит к погасанию разряда.

Режим *I* соответствует так называемому затрудненному тлеющему разряду (“hindered glow discharge”) с полым катодом. В этом режиме длина катодного слоя (области прикатодного падения потенциала) соизмерима с радиусом катодной полости, и отчетливо выраженная область плазмы отрицательного свечения отсутствует. Для поддержания разряда в диапазоне типичных токов (4 – 16) мА требуется повышенное напряжение. Оно было на уровне (320 – 350) В. Доля паразитного тока в полном токе вспомогательного тлеющего разряда i_2/i составляла около 8 %.

Некоторое критическое значение тока соответствует точке 2 вольтамперной характеристики, из которой разряд скачкообразно переходит в режим, соответствующий участку *II* (в точку 3). В полости возникает область плазмы отрицательного свечения, и разряд трансформируется из затрудненного в обычный тлеющий разряд с полым катодом. Тем не менее, свойства разряда поменялись довольно существенно. Примечательно то, что значительная часть тока протекала в виде паразитного тока, т.е. разряд частично перехватывался через отверстие в электроде C_1 на полость электрода *C*. Доля паразитного тока в полном токе разряда достигала 30 %. На вольтамперной характеристике имелся гистерезис. Фактически можно говорить, что разряд горит между кольцевым анодом A_1 и катодной полостью сложной формы, образуемой электродами C_1 и *C*. При уменьшении напряжения источника питания рабочая точка смещается по кривой *II* влево до тех пор, пока из точки 4 не происходит обратный скачкообразный переход на участок *I*.

Наиболее сильное влияние эмиссионной таблетки на напряжение горения разряда имеет место на участке *III* вольтамперной характеристики. Режим *III* соответствовал ситуации, когда значительная доля тока начинала замыкаться на

таблетку EC в виде тока эмиссии. Примечательно, что доля паразитного тока резко уменьшалась и составляла $(1.6 - 2) \%$. При использовании таблетки с малым содержанием карбоната цезия простое увеличение тока вспомогательного разряда не приводило к переходу в режим III . Перевод в данный режим можно было произвести, если на систему электродов C_1 и C подать импульс запуска с током на уровне 10 А. Изменение режима I или II горения разряда в режим III может также произойти при приложении импульса запуска к одному из электродов узла запуска. Тогда после протекания в цепи запуска импульсного тока на уровне 10 А, стационарный слаботочный тлеющий разряд начинает поддерживаться на участке III . Снижение напряжения источника питания и тока разряда, приводит к тому, что разряд скачком переходит из режима III в режим I (переход из точки 5 в точку 1).

В других приборах, где содержание карбоната цезия в таблетке было увеличено, реализовался лишь режим III с низким напряжением горения и малой долей паразитного тока [4, 18].

Вольтамперные характеристики вспомогательного разряда такого прибора представлены на рисунке 8. Благодаря оптимальному составу таблетки, вольтамперные характеристики разряда в узле запуска не имеют гистерезисов и спонтанных переходов. Но, как показали эксперименты, при приложении импульса запуске, возникают переходы из одного режима в другой.

Рассмотрим для определенности кривую для напряжения на генераторе дейтерия $V_H = 5.2$ В. После пробоя в узле запуска зажигается разряд, условия горения которого соответствуют точке I вольтамперной характеристики (рисунок 8 *a*). Напряжение горения разряда в данной точке $V_d = 210$ В, ток $i = 5$ мА.

Как описано выше, в работе [9] был замечен эффект влияния импульса запуска на вид вольтамперной характеристики. Это влияние связывалось с тем,

что при замыкании тока импульсного разряда запуска на эмиссионную таблетку свойства таблетки изменяются. В рассматриваемых экспериментах импульс запуска имел амплитуду $V_T = 6.7$ кВ при длительности импульса на полувысоте 1 мкс и длительности фронта 160 нс. Максимальный ток разряда запуска в системе электродов C и C_1 достигал 25 А.

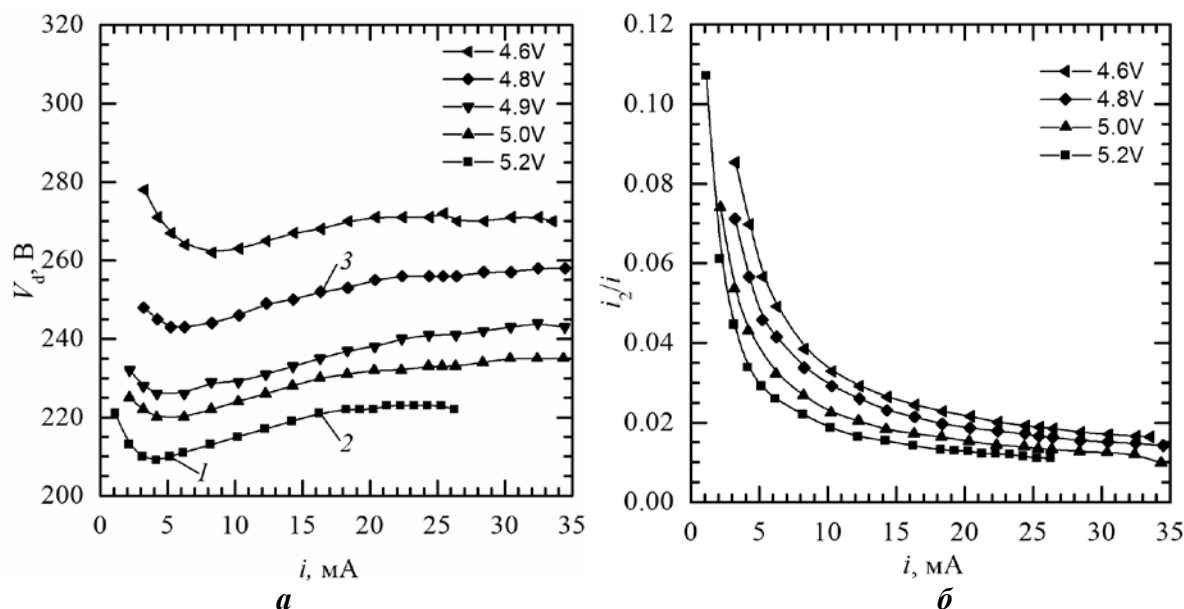


Рисунок 8. Вольтамперные характеристики разряда в узле запуска a и доля паразитного тока в полном токе разряда b для различных напряжений на генераторе дейтерия. $R_1 = 40$ кОм.

Оказалось, что и для данного прибора после протекания тока импульсного разряда запуска напряжение горения вспомогательного стационарного разряда может уменьшиться. В частности, для условий, соответствующих точке 2, разряд переходит в режим с напряжением горения $V_d = 175$ В и током $i = 17.1$ мА. Тем не менее, данный режим разряда не устойчив. Спустя некоторое время (например, через несколько секунд) разряд вновь переходит к условиям горения соответствующим точке 2. Кроме того, следует отметить, что влияние импульса запуска на последующее напряжение горения стационарного разряда в данном приборе проявляется лишь при напряжении на генераторе дейтерия $V_H = (5.1 - 5.2)$ В.

Аналогичный по своей сути эффект имеет место, когда происходит пробой в основном промежутке. Возникает сильноточный разряд, который оказывает более сильное воздействие на таблетку, чем разряд запуска. Тогда снижение напряжения горения вспомогательного тлеющего разряда происходит и при более низких давлениях газа. В частности, если условия по давлению газа соответствуют $V_H = 4.8$ В, а вольтамперная характеристика соответствует точке 3 ($V_d = 250$ В, $i = 16$ мА), то после сильноточного пробоя между электродами А и С₁ разряд в узле запуска переходит в режим с напряжением горения $V_d = 180$ В и током $i = 17.8$ мА. Однако, и в этом случае разряд с пониженным напряжением горения не поддерживается в стационарном режиме. Спустя некоторое время разряд спонтанным образом переходит к условиям, соответствующим точке 3.

1.5 Методы запуска тиратрона с холодным катодом

Среди существующих схем запуска тиратронов с узлом запуска на основе вспомогательного тлеющего разряда, можно выделить 2 типа схем – так называемая схема запуска «классического тиратрона» и схема запуска «тиратрона с заземленной сеткой». Рассмотрим их более подробно.

Схема запуска *классического тиратрона*

На рисунке 9 приведено схематическое изображение тиратрона и схемы запуска классического тиратрона.

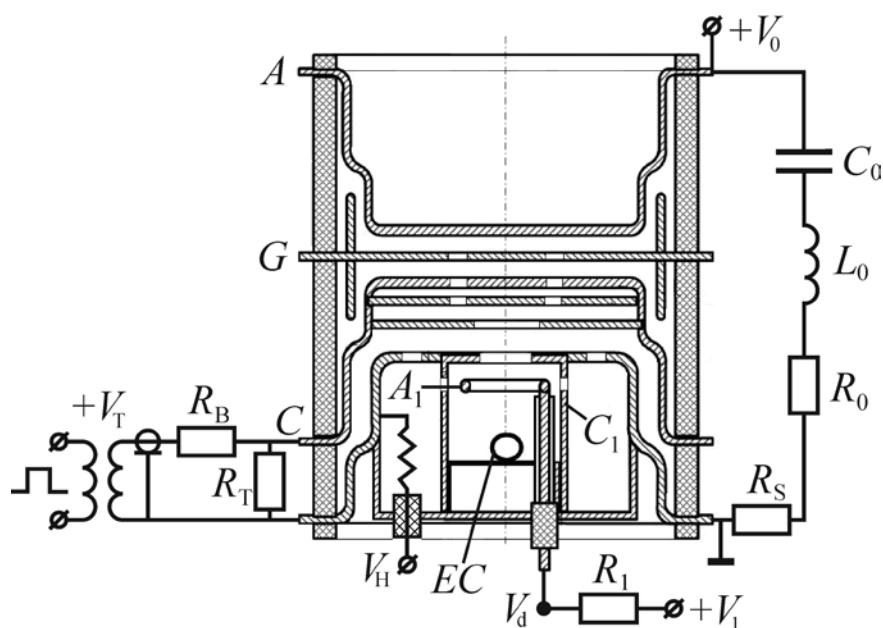


Рисунок 9. Схематическое изображение конструкции тиратрона TP11-10k/50 и электрическая схема запуска, соответствующая классическому тиратрону. A – анод, C – полый катод, G – градиентный электрод, A_1 – кольцевой анод вспомогательного разряда, C_1 – полый катод вспомогательного разряда, EC – высоко-эмиссионная таблетка, V_H – источник питания генератора водорода (дейтерия). $C_0 = 10$ нФ, $L_0 = 1.3$ мкГн, $R_0 = 11$ Ом, $R_T = 10$ кОм, $R_1 = (10 - 40)$ кОм, $R_B = 210$ Ом, $R_S = 0.03$ Ом.

Как видно из рисунка 9, тиратрон включен в электрическую цепь для коммутации емкости C_0 заряженной до напряжения V_0 на нагрузку R_0 . Включение прибора соответствует так называемой схеме классического тиратрона [4, 19]. В этой схеме электрод C_1 заземлен и играет роль полого катода. Ток разряда при коммутации протекает между анодом A и катодом C_1 . В терминологии, используемой при описании тиратронов с накаливаемым катодом,

электрод C играет роль сетки. Импульс запуска положительной полярности V_T прикладывается между этим электродом и заземленным электродом C_1 .

Вспомогательный разряд зажигается между кольцевым анодом A_1 и полым катодом C_1 от источника питания V_1 . Обычно это стационарный тлеющий разряд с полым катодом при типичных токах (10 – 20) мА [20].

Принцип работы тиратрона в представленной схеме следующий. Перед запуском прибора к аноду приложено высокое напряжение V_0 , и в узле запуска горит вспомогательный тлеющий разряд. Импульс запуска V_T подается между электродами C и C_1 , в результате чего в данной электродной системе возникает импульсный разряд с типичным током (10 – 20) А. По отношению к разряду запуска электрод C является полым анодом сложной формы. Как видно из рисунка 9, в полости анода имеются две перегородки с отверстиями, которые частично экранируют систему электродов узла запуска от основного межэлектродного промежутка $A-C$. Тем не менее, при зажигании импульсного разряда газоразрядная плазма генерируется в анодной полости, и в частности, в узком промежутке между плоскостью электрода C и верхней перегородкой. Электроны из этой плазмы извлекаются в основной промежуток, и в результате инициируется сильноточный разряд в соответствии с механизмом, описанным в [10, 11]. Принцип получения электронного пучка напоминает принцип работы электронной пушки с плазменным катодом [1, 19, 21-23].

На первом этапе развития разряда в основном промежутке газоразрядная плазма возникает между электродами G и C . Энергия на развитие разряда поставляется из емкости нижней секции [24-26]. Далее (на наносекундном масштабе времен) развивается пробой между электродами A и G верхней секции прибора. После этого ток основного разряда начинает протекать между анодом A и полым катодом C_1 .

Схема запуска тиратрона с заземленной сеткой

Другой широко применяемой схемой запуска является так называемая схема с заземленной сеткой [1, 12]. Эта схема, совместно со схематическим изображением конструкции тиратрона, приведена на рисунке 10.

Отличительная особенность данной схемы состоит в том, что электрод, играющий роль сетки (электрод C), заземлен. В этом случае ток основного разряда, при замыкании на электрод C , не вызывает изменения его потенциала, а соответственно, высокое напряжение не должно проникать в цепь запуска, как это наблюдалось в работе предыдущей схемы.

Тиратрон включен в электрическую цепь для коммутации емкости C_0 заряженной до напряжения V_0 на нагрузку R_0 . В исходном состоянии к основному межэлектродному промежутку приложено напряжение V_0 . В узле запуска между кольцевым анодом A_1 и полым катодом C_1 за счет источника питания V_1 поддерживается вспомогательный тлеющий разряд с полым катодом. Обычно это стационарный разряд при типичных токах (10 – 20) мА. Импульс запуска отрицательной полярности $-V_T$ амплитудой 2 – 3 кВ прикладывается между электродами C_1 и C .

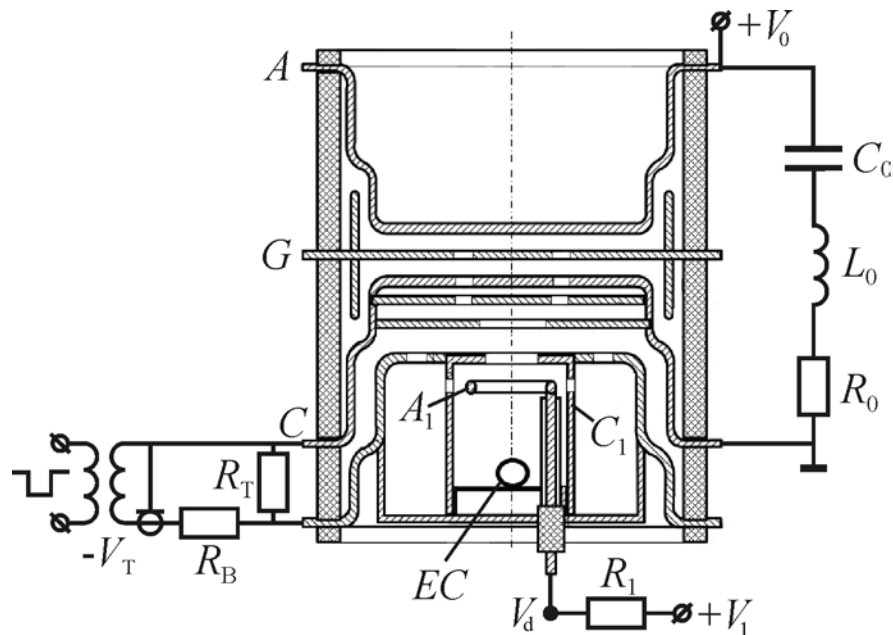


Рисунок 10. Схематическое изображение конструкции тиратрона ТПИ1-10к/50 и метод запуска для схемы с заземленной сеткой. A – анод тиратрона, C – полый катод тиратрона, G – промежуточный градиентный электрод, A_1 – кольцевой анод вспомогательного тлеющего разряда, C_1 – полый катод вспомогательного тлеющего разряда, EC – таблетка с высокой эмиссионной способностью, V_0 – зарядное напряжение для емкости C_0 , V_1 – напряжение источника для питания вспомогательного тлеющего разряда, V_T – импульс запуска тиратрона.

Ток импульса запуска ограничен балластным резистором. Как правило, величина этого сопротивления находится на уровне (30–60) Ом. Под действием импульса запуска зажигается тлеющий разряд с полым катодом и полым анодом при импульсном токе на уровне от 10 А и выше. В полости *C* возникает плазма, электроны из плазмы извлекаются в основной промежуток через отверстия в верхней плоскости электрода *C*. Это приводит к инициированию разряда в основном промежутке [1, 12]. Здесь основная доля тока сильноточного разряда замыкается на электрод *C*. Тогда на ранних стадиях возникает импульсный тлеющий разряд с относительно высоким напряжением горения, а последующее снижение напряжения горения происходит за счет формирования дугового катодного пятна [1, 15].

1.6 Особенности работы тиратрона с высоко-эмиссионной таблеткой в узле запуска

Эксперименты по исследованию вспомогательного тлеющего разряда в узле запуска показали [9], что режимы горения вспомогательного разряда могут меняться в процессе работы тиратрона. В тиратронах типа ТПИ1-10к/50 с высоко эмиссионной таблеткой в узле запуска режимы горения вспомогательного разряда могут меняться самопроизвольно, от импульса к импульсу. В свою очередь, исходные режимы горения вспомогательного разряда влияют на характеристики тиратрона в целом. Это, в свою очередь, приводит к существенному разбросу времен запаздывания срабатывания тиратрона.

В работе [9] представлены результат испытаний тиратрона ТПИ1-10к/50 в схеме запуска классического тиратрона. Принцип работы тиратрона в данной схеме описан в предыдущем разделе. В экспериментах использовался тиратрон с оптимальным составом высокоэмиссионной таблетки. Это означает, что гистерезис вольтамперных характеристик отсутствовал. Однако авторы наблюдали переходы из одного режима горения вспомогательного разряда в другой при подаче импульса запуска. Осциллограммы импульса запуска и напряжения на аноде тиратрона приведены на рисунке 11.

Осциллограммы на рисунке 11 *a* соответствуют условиям, когда вспомогательный разряд имел напряжение горения 250 В при токе 16 мА. В данных условиях полное время запаздывания пробоя в основном промежутке составляет 100 нс. Данный интервал включает в себя как процесс зажигания разряда запуска, так и процесс развития предпробойных явлений в основном промежутке.

Видно, что вначале напряжение импульса запуска V_T , прикладываемое между электродами C и C_1 , возрастает, а затем в момент времени $t_1 = 80$ нс напряжение перестает нарастать. Это говорит о том, что в промежутке под

действием импульса V_T начал развиваться разряд, и время t_1 фактически является временем запаздывания пробоя для данного разряда.

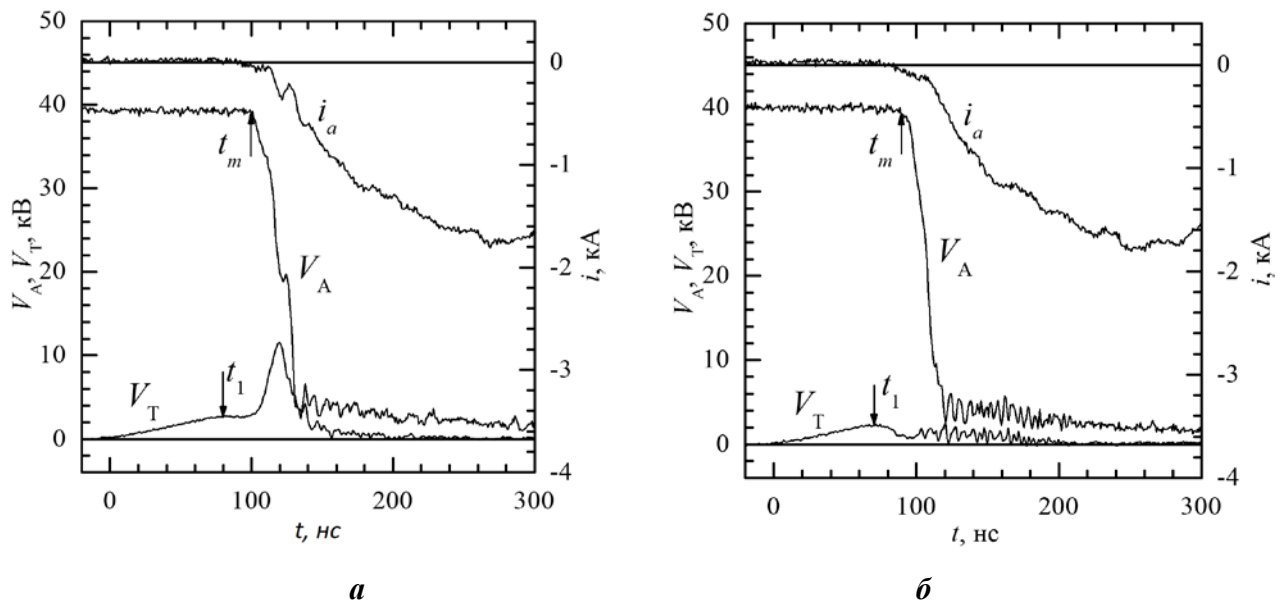


Рисунок 11. Осциллограммы тока i_a , напряжения на аноде V_A и импульса запуска V_T при $V_H = 4.8$ В для разных исходных условий горения вспомогательного тлеющего разряда в узле запуска. *а)* $i = 16$ мА, $V_d = 250$ В, *б)* $i = 17.8$ мА, $V_d = 180$ В.

Плазма разряда запуска генерируется в полости C , электроны извлекаются из этой плазмы в зазор нижней секции тиратрона $G-C$, и в этом зазоре возникает разряд. Далее точно по такой же схеме возникает разрядная плазма в верхней секции прибора, т.е. в зазоре $A-G$. В итоге ток начинает замыкаться с анода A на полый катод C_1 . Ток нарастает во времени, что приводит к спаду напряжения на основном промежутке.

В процессе коммутации анодное напряжение перераспределяется между тремя последовательно включенными промежутками: верхней секцией прибора, нижней секцией и зазором $C-C_1$. Поскольку сопротивление зазора $C-C_1$ большое, то к нему при коммутации прикладывается напряжение около 10 кВ. Этот импульс напряжения зарегистрирован как выброс на осциллограмме V_T . В момент максимума выброса напряжения имеет место частичный обрыв коммутируемого тока, и задержка в спаде напряжения. При дальнейшем

протекании разрядных процессов сопротивление всех трех секций уменьшается и разряд переходит в стадию с низким напряжением горения.

В условиях, когда имеет место режим вспомогательного тлеющего разряда с пониженным напряжением горения (рисунок 11 б, $V_d = 180$ В), полное время запаздывания пробоя составляет 90 нс. Легко видеть, что полное уменьшение произошло за счет того, что уменьшилось время запаздывания пробоя t_1 в системе электродов запуска. Пробой начал развиваться при напряжении $V_T(t_1) = 2.3$ кВ, и время t_1 оказалось равным 70 нс. Тем не менее, время запаздывания, отсчитываемое от момента зажигания разряда в системе электродов запуска, осталось неизменным и составляет 20 нс.

Из осциллограмм также видно, что если исходный режим горения вспомогательного разряда соответствует пониженному напряжению, то пробой в узле запуска сопровождается спадом напряжения на электродах CC_1 практически до нуля. Это значит, что при пробое возникает разряд с низким сопротивлением. Тогда выброс высокого напряжения на электроде С, характерный для коммутации в условиях на рисунке 11 а, отсутствует. Осциллограммы спада напряжения V_A и роста тока i_a являются гладкими.

При пробое основного промежутка разряд в узле запуска может перейти в режим с пониженным напряжением горения. Тем не менее, данный режим не устойчив. Спустя некоторое время разряд вновь может спонтанно перейти в другой режим. Именно с этим эффектом и связаны разбросы во временах запаздывания срабатывания тиратрона.

Переходы между режимами горения вспомогательного разряда происходили спонтанно. На рисунке 12 приведены осциллограммы в режиме накопления для 20 импульсов. Видно, что разброс во временах запаздывания пробоя в приборе связан именно с изменением режимов горения вспомогательного разряда. Эффект перехода связан с изменением свойств

эмиссионной таблетки при замыкании на нее тока сильноточного импульсного разряда [9].

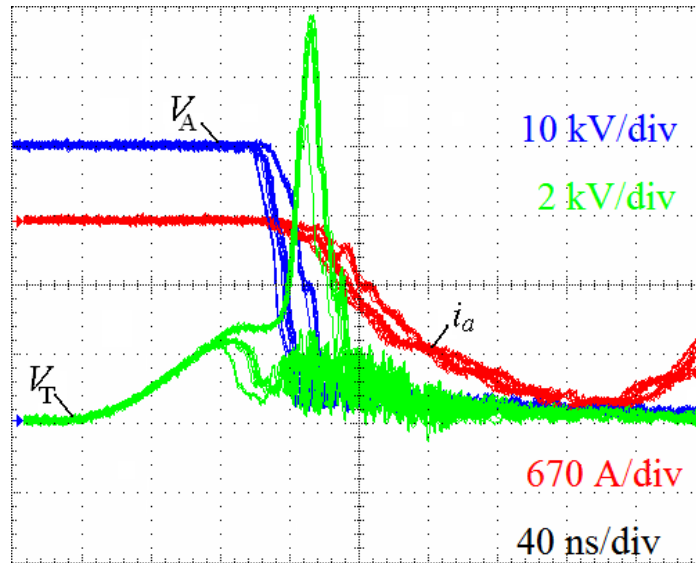


Рисунок 12. Осциллограммы тока i_a , напряжения на аноде V_A и импульса запуска V_T , иллюстрирующие разброс срабатывания тиратрона. $V_H = 4.8$ В, $V_0 = 40$ кВ. Для первого импульса $i = 16$ мА, $V_d = 250$ В.

И осциллограмм на рисунках 11 и 12 видно, что в процессе развития пробоя в основном промежутке высокой анодное напряжение может проникать в цепь запуска. В частности, на осциллограммах на рисунке 11 *a* напряжение на электроде *C* достигает 12 кВ, тогда как импульс запуска имел амплитуду на уровне 2 кВ. Это связано с тем, что на начальном этапе развития разряда, ток данного разряда замыкается на электрод *C*, и является одним из недостатков схемы запуска «классического тиратрона» [19].

1.7 Постановка задачи

Из проведенного обзора литературы несложно сделать вывод, что узел запуска является важным элементом тиратрона, а режимы горения вспомогательного разряда в узле запуска определяют характеристики тиратрона в целом. При этом, для обеспечения наносекундной стабильности срабатывания, режим горения разряда не должен меняться от импульса к импульсу.

Было установлено, что изменения режимов горения вспомогательного разряда связаны, в том числе, с неоптимальным составом высоко эмиссионной таблетки. В том случае, когда использовалась высоко эмиссионная таблетка с неоптимальным составом, наблюдался гистерезис вольтамперных характеристик вспомогательного разряда ещё до приложения импульса запуска. Однако, даже применение высокоэмиссионной таблетки с оптимальным составом, не решало этой проблемы. Приложение импульса запуска вызывало изменение режима горения вспомогательного разряда.

Для решения данной проблемы был разработан новый узел запуска без использования высоко-эмиссионной таблетки. В предложенной конструкции тиратрона используется узел запуска на основе вспомогательного тлеющего разряда. Приемлемые напряжения зажигания вспомогательного разряда достигаются благодаря электродам узла запуска в форме полых цилиндров. Конструкция узла запуска проектировалась так, чтобы минимизировать изменения стандартных электродов тиратрона. Детальное описание конструкции прототипа приведено в *разделе 2*.

Таким образом, основной задачей настоящей работы является испытание прототипа тиратрона с новым узлом запуска и выбор условий горения вспомогательного разряда и схем запуска, обеспечивающих наносекундную стабильность срабатывания тиратрона.

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1 Экспериментальная установка

Функциональная схема экспериментальной установки представлена на рисунке 13. Основным элементом установки является прототип отпаянного тиратрона ТПИ1-10к/50.

Цепь основного разряда включает в себя конденсатор C_0 , балластное сопротивление R_0 и низкоомный шунт R_s . При разряде накопительной емкости C_0 ток основного разряда протекает между электродами A и C . Зарядка этой емкости до ~ 40 кВ производится посредством трансформаторного источника постоянного высокого напряжения «PS1» через зарядное сопротивление R_3 . Ток основного разряда ограничен балластным сопротивлением $R_0 = 10$ Ом. Сопротивление низкоомного шунта $R_s = 0.08$ Ом, амплитуда тока основного разряда (через сопротивления R_0 и R_s) составляет примерно 1.5 кА.

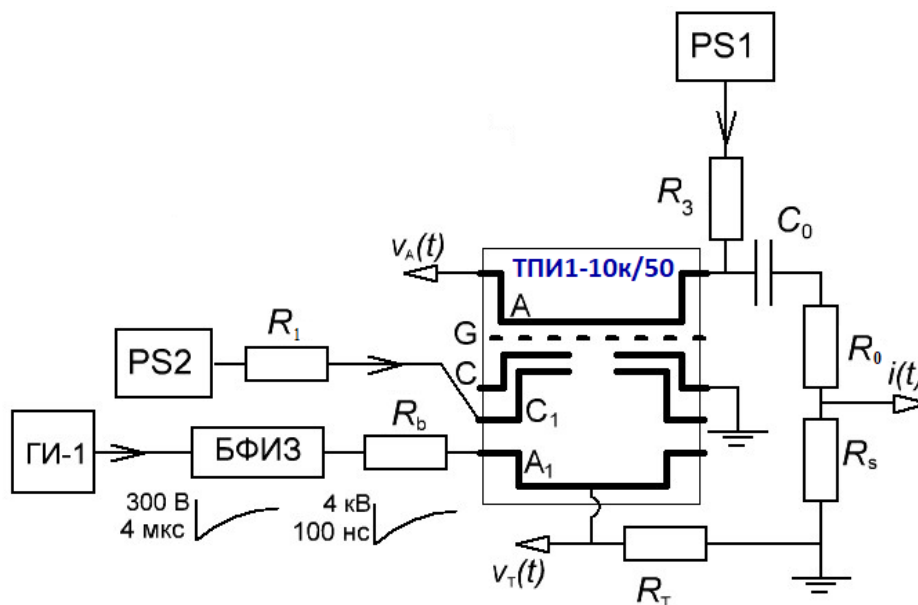


Рисунок 13. Общая схема экспериментальной установки. GI-1 – генератор задающих импульсов; БФИЗ – блок формирования импульсов запуска; PS1 – источник напряжения для зарядки емкости C_0 основного разрядного контура; PS2 – источник питания вспомогательного разряда; R_b – балластный резистор, ограничивающий тока импульса запуска; R_1 – балластный резистор в цепи питания вспомогательного разряда; R_3 – зарядное сопротивление для емкости

C_0 ; R_0 – балластный резистор для основного разрядного контура;

R_s – низкоомный шунт; R_T – резистор цепи запуска.

2.2 Конструктивные особенности прототипа отпаянного тиратрона ТПИ1-10к/50 с новым узлом запуска

В данной работе проводились эксперименты с прототипом отпаянного тиратрона типа ТПИ1-10к/50. В конструкции прототипа используется узел запуска на основе вспомогательного тлеющего разряда, но без высокоэмиссионной таблетки. Конструкция узла запуска проектировалась так, чтобы минимизировать изменения стандартных электродов тиратрона. Поэтому изменения в конструкции тиратрона коснулись только узла запуска (рисунок 14). В новом узле запуска электрод вспомогательного разряда A_1 имеет форму полого цилиндра вместо кольца.

Диаметр керамического изолятора нового прибора составляет 97 мм, диаметр фланцев 125 мм. Высота прибора 190 мм, расстояние между фланцами катода C и анода A составляет 105 мм.

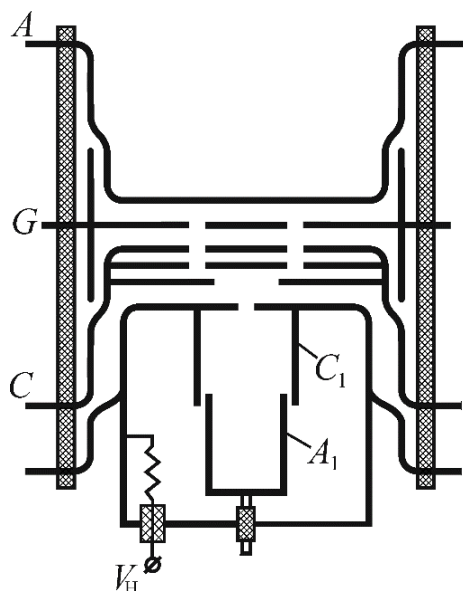


Рисунок 14. Схематическое изображение конструкции экспериментального тиратрона ТПИ1-10к/50 с модернизированным узлом запуска. A – анод тиратрона, C – полный катод тиратрона, G – промежуточный градиентный электрод, A_1 – полый анод вспомогательного разряда, C_1 – полный катод вспомогательного тлеющего разряда.

Конструкция узла запуска следующая. Электроды C_1 и A_1 выполнены в виде полостей внутренними диаметрами 30 мм и 26 мм соответственно.

Расстояние между доньшками полостей составляет 80 мм. Узел запуска сообщается с полостью основного катода через отверстие в электроде C_1 диаметром 5 мм.

Электроды основного промежутка не подвергались изменению. Расстояния между секциями электродов, толщины электродов и диаметры отверстий в электродах G и C составляли 2.5 мм, 2 мм и 3.5 мм соответственно. Диаметр отверстий в средней перегородке 3.5 мм, отверстие в нижней перегородке – 16 мм, расстояние между перегородками составляет 2.5 мм. Расстояние от нижней перегородки до верхней плоскости в электроде C составляет 4 мм.

На рисунке 15 представлена фотография прототипа отпаянного тиратрона типа ТПИ1-10к/50 с новым узлом запуска.



Рисунок 15. Фотография прототипа отпаянного тиратрона типа ТПИ1-10к/50 с новым узлом запуска.

2.3 Методики измерений

2.3.1 Измерение статических пробивных напряжений основного разрядного промежутка в целом и секций тиратрона в отдельности

Результаты измерений статических пробивных напряжений тиратрона необходимы для определения рабочего диапазона напряжений питания нагревателя генератора водорода V_H , при которых прибор выдерживает без пробоя анодное напряжение $V_A > 40$ кВ.

Как отмечалось выше, зарядка основной накопительной емкости C_0 производилась от источника постоянного напряжения через балластное сопротивление. В процессе зарядки измерение напряжения V_A на аноде тиратрона осуществлялось высоковольтным пробником. Электрод C заземлён. Пример осциллограмм, иллюстрирующих методику измерения напряжения пробоя основного промежутка тиратрона приведен на рисунке 16.

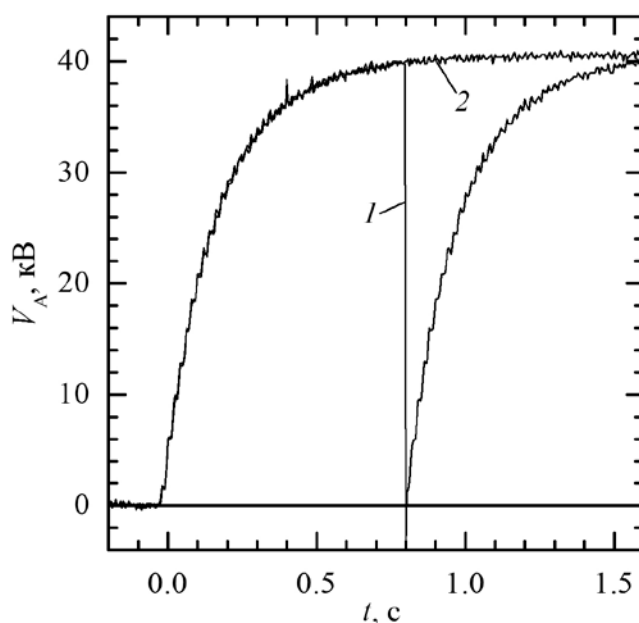


Рисунок 16. Осциллограммы напряжения на аноде при зарядке накопительной емкости C_0 , иллюстрирующие методику измерения статического пробивного напряжения основного промежутка. $V_0 = 40$ кВ, $V_H = 5.1$ В.

1 – пробой происходит в момент времени $t = 0.8$ с; 2 – пробой отсутствует.

После включения источника напряжения зарядка емкости C_0 происходит за время около 1 с. Для испытания, соответствующего осциллограмме 1, пробой тиратрона происходит в момент времени $t = 0.8$ с. На осциллограмме виден резкий спад напряжения и процесс повторной зарядки емкости. Поскольку величина статического пробивного напряжения имеет некоторое отклонение от среднего значения, то при другом испытании при том же самом анодном напряжении пробоя может не произойти. Этот случай демонстрируется осциллограммой 2.

Такая же методика применялась для определения напряжения пробоя секций тиратрона по отдельности. Для измерения напряжения пробоя для верхней секции электроды G и C соединялись проводником. Для измерений для нижней секции закорачивались электроды A и G .

2.3.2 Получение вольтамперные характеристики вспомогательного разряда в узле запуска

В общем случае, схема питания вспомогательного разряда связана со схемой запуска тиратрона. В случае тиратрона ТПИ1-10к/50 со стандартным узлом запуска, использовалась только одна схема питания вспомогательного разряда, где напряжение положительной полярности прикладывалось к кольцевому аноду. Это связано с тем, что высоко эмиссионная таблетка узле запуска может выполнять свои функции только в составе катода C_1 с отрицательной полярностью по отношению к кольцевому аноду. В противном случае, напряжение зажигания вспомогательного разряда будет составлять несколько киловольт.

В случае с новым узлом запуска, электроды узла запуска могут иметь различные полярности. В данной работе будут рассмотрены несколько схем запуска с различными полярностями электродов узла запуска при питании вспомогательного разряда. Получение вольтамперных характеристик необходимо для определения режимов работы узла запуска.

Рассмотрим методику получения вольтамперных характеристик вспомогательного разряда для одной из схем запуска на рисунке 17. Резистор R_2 в измерительной схеме необходим, поскольку к нему прикладывается импульс запуска.

Источник напряжения положительной полярности V_1 через балластный резистор подключался к электроду A_1 . Вспомогательный разряд зажигался между электродами A_1 и C_1 . Из измерительной схемы можно видеть, что основная часть тока вспомогательного разряда протекает через балластный резистор R_1 и резистор R_2 . Как отмечалось во введении, в процессе получения вольтамперных характеристик регистрировались напряжение на самом разряде V_d – между электродами A_1 и C_1 , ток разряда – i_1 и паразитный ток i_2 .

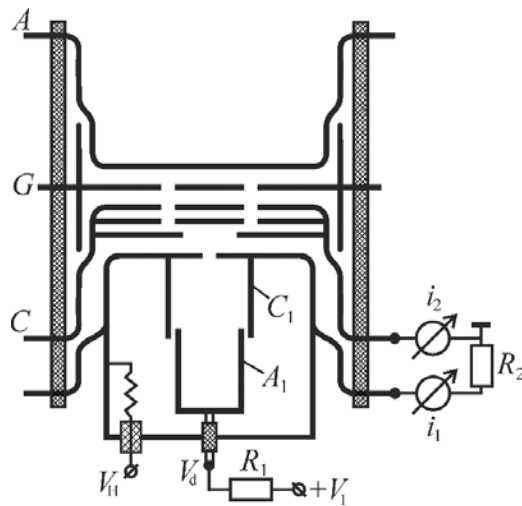


Рисунок 17. Электрическая схема для получения вольтамперных характеристик вспомогательного тлеющего разряда узла запуска. $R_1=26$ кОм, $R_2= 4,4$ кОм.

Для другой схемы запуска источник питания вспомогательного разряда $+V_1$ подключается через балластный резистор R_1 к катоду вспомогательного разряда C_1 . Схема для получения вольтамперных характеристик приведена на рисунке 18. Вспомогательный разряд, как и в предыдущей схеме, зажигался между электродами A_1 и C_1 , однако теперь катодом вспомогательного разряда является электрод A_1 , а C_1 – анодом. Основная часть тока вспомогательного разряда протекает через балластный резистор R_1 и резистор R_2 . В процессе получения вольтамперных характеристик регистрировались напряжение V_d на самом разряде – между электродами A_1 и C_1 , ток разряда i_1 и паразитный ток i_2 .

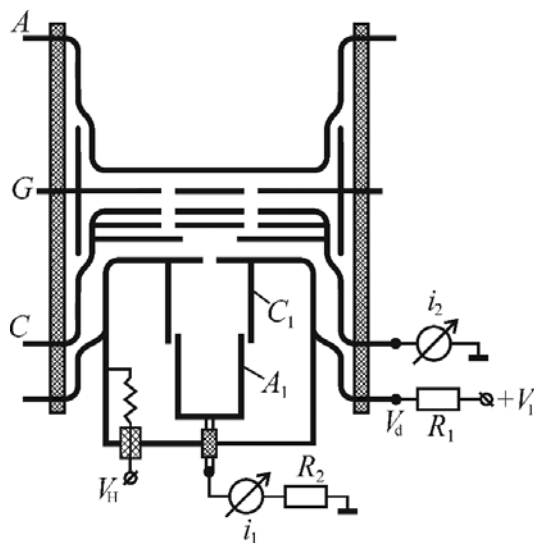


Рисунок 18. Электрическая схема для получения вольтамперных характеристик вспомогательного тлеющего разряда узла запуска. $R_1=26$ кОм, $R_2= 1$ кОм.

2.4 Методы запуска тиратрона с новым узлом запуска

В данной работе проведены испытания трёх схем запуска. Исходя из терминологии раздела 1.5, данные схемы запуска относятся к схемам запуска тиратрона с заземленной сеткой. Для определенности обозначим данные схемы запуска номерами, которые будут использоваться в дальнейшем.

Схема № 1

В данной схеме запуска питание вспомогательного разряда осуществляется от источника напряжения положительной полярности $+V_1$ через балластный резистор $R_1=26$ кОм. Это напряжение прикладывается к электроду A_1 .

Схема запуска приведена на рисунке 19. Принцип работы данной схемы запуска состоит в следующем. В начальный момент времени к аноду тиратрона A приложено высокое напряжение $V_0 \approx 40$ кВ, а в узле запуска поддерживается разряд с током 10-30 мА. Цепь основного разряда включает в себя сам конденсатор C_0 , балластное сопротивление R_0 и низкоомный шунт R_s .

Для запуска тиратрона импульс напряжения отрицательной полярности амплитудой 4 кВ прикладывается к электроду C_1 через токоограничивающий резистор R_B . Под действием этого импульса между электродами C и C_1 зажигается сильноточный импульсный разряд с током около 20 А. Плазма этого разряда заполняет полости электрода C . Электроны с поверхности этой плазмы, под действием высокого напряжения, движутся в направлении анода A и инициируют пробой основного межэлектродного промежутка тиратрона в соответствии с механизмом, описанным в разделе 1.3.

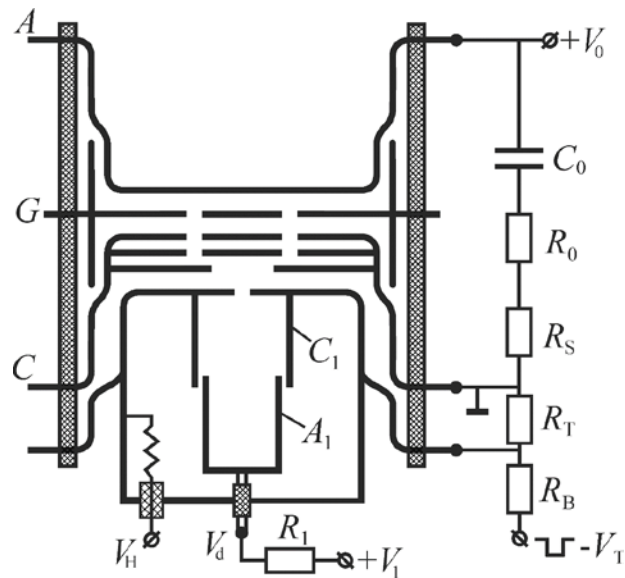


Рисунок 19. Схема запуска тиратрона № 1.

$R_1 = 26 \text{ кОм}$, $R_B = 60 \text{ Ом}$, $R_T = 4.4 \text{ кОм}$, $R_S = 0.08 \text{ Ом}$, $R_0 = 10 \text{ Ом}$, $C_0 = 10 \text{ нФ}$, $V_T = 4 \text{ кВ}$.

Схема № 2

Следующая схема запуска приведена на рисунке 20. Здесь катодом вспомогательного разряда является электрод A_1 , а C_1 – анодом. Через балластный резистор $R_1 = 26 \text{ кОм}$ положительное напряжение питания вспомогательного тлеющего разряда подается на электрод C_1 .

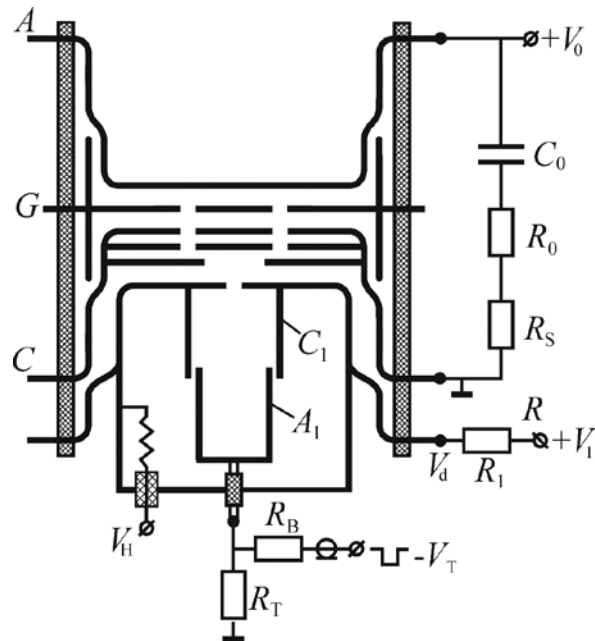


Рисунок 20. Схема запуска тиратрона № 2.

$R_1 = 26 \text{ кОм}$, $R_B = 60 \text{ Ом}$, $R_T = 4.4 \text{ кОм}$, $R_S = 0.08 \text{ Ом}$, $R_0 = 10 \text{ Ом}$, $C_0 = 10 \text{ нФ}$.

Импульс запуска подается на электрод A_1 , а не на C_1 , как в предыдущей схеме. Ток импульса запуска ограничивается резистором $R_B = 60$ Ом.

В начальный момент времени к аноду тиратрона A приложено высокое напряжение $V_0 \approx 40$ кВ, а в узле запуска поддерживается разряд с током 10-30 мА. Для запуска тиратрона импульс напряжения отрицательной полярности амплитудой 4 кВ прикладывается к электроду A_1 через токоограничивающий резистор R_B . Под действием этого импульса ток разряда между электродами A_1 и C_1 существенно возрастает, что приводит к увеличению паразитного электронного тока на электрод C . Под действием высокого напряжения в основном межэлектродном промежутке, электроны из полости C движутся в направлении анода A и инициируют пробой основного межэлектродного промежутка тиратрона.

Схема № 3

Схема №3 приведена на рисунке 21. Данная схема аналогична схеме № 1 в плане питания вспомогательного разряда.

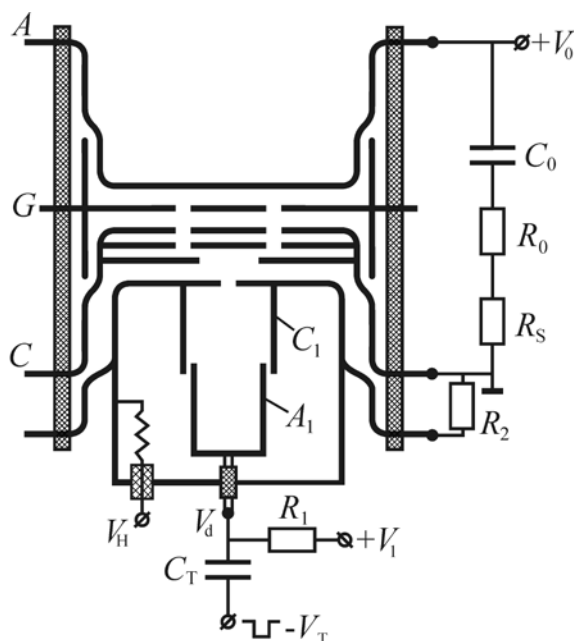


Рисунок 21. Схема запуска тиратрона № 3.

$R_1 = 26$ кОм, $R_2 = 4.7$ кОм, $C_T = 3.3$ нФ, $R_S = 0.08$ Ом, $R_0 = 10$ Ом, $C_0 = 10$ нФ.

Главным отличием этой схемы от схемы № 1 является то, что здесь импульс запуска подается не на электрод C_1 , а на электрод A_1 через конденсатор C_T . Этот конденсатор служит здесь для того, чтобы не допустить отклонения тока вспомогательного разряда в схему запуска.

Принцип работы данной схемы запуска состоит в следующем. В начальный момент времени к аноду тиратрона A приложено высокое напряжение $V_0 \approx 40$ кВ, а в узле запуска поддерживается разряд с током 10-30 мА. Цепь основного разряда включает в себя сам конденсатор C_0 , балластное сопротивление R_0 и низкоомный шунт R_s .

Для запуска тиратрона импульс напряжения отрицательной полярности амплитудой 4 кВ прикладывается к электроду A_1 через конденсатор C_T . Под действием этого импульса происходит изменение полярности электродов узла запуска так, что на момент приложения импульса, электрод A_1 становится катодом, а электроды C и C_1 – анодами. Таким образом, плотность электронов плазмы вспомогательного разряда смещается в область электрода C . Под действием высокого напряжения со стороны анода A , электроны инициируют пробой основного межэлектродного промежутка тиратрона.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 Напряжения статического пробоя основного промежутка тиратрона в целом и секций по отдельности

В настоящей работе исследуется тиратрон с двухсекционной конструкцией основного промежутка. Это означает, что высокое напряжение, прикладываемое к аноду, распределяется между секциями в соответствии с их собственными емкостями. Значения собственных электрических емкостей между электродами тиратрона приведены в таблице 1.

Таблица 1. Межэлектродные емкости тиратрона.

<i>ёмкость между электродами</i>	<i>значение</i>
C_{C1A1} , пФ	28
C_{CC1} , пФ	62
C_{GC} , пФ	35
C_{AG} , пФ	34

Из результатов измерения межэлектродных емкостей тиратрона можно видеть, что для рассматриваемого прибора электрические емкости секций основного разрядного промежутка - C_{GC} и C_{AG} практически равны и составляют 35 и 34 пФ соответственно. Это означает, что напряжение между секциями должно распределяться поровну.

Результаты измерения статических пробивных напряжений секций тиратрона в отдельности и основного промежутка в целом для разных давлений газа в приборе приведены на рисунке 22.

Видно, что напряжение пробоя нижней секции тиратрона GC значительно ниже, чем для верхней секции AG . При напряжении на генераторе водорода $V_H = 5.25$ В напряжение пробоя основного промежутка превышает 45 кВ. При этом пробивное напряжение секции GC составляет 8 кВ, а для секции AG – 21 кВ. С уменьшением давления газа в приборе, пробивные напряжения секций увеличиваются. Но, пробивное напряжение секции GC увеличивается быстрее и

для давления, соответствующего напряжению на генераторе водорода 5.05 В, пробивные напряжения секций оказываются практически равны друг другу и составляют 32 кВ для секции G–C и 33 кВ для секции A–G.

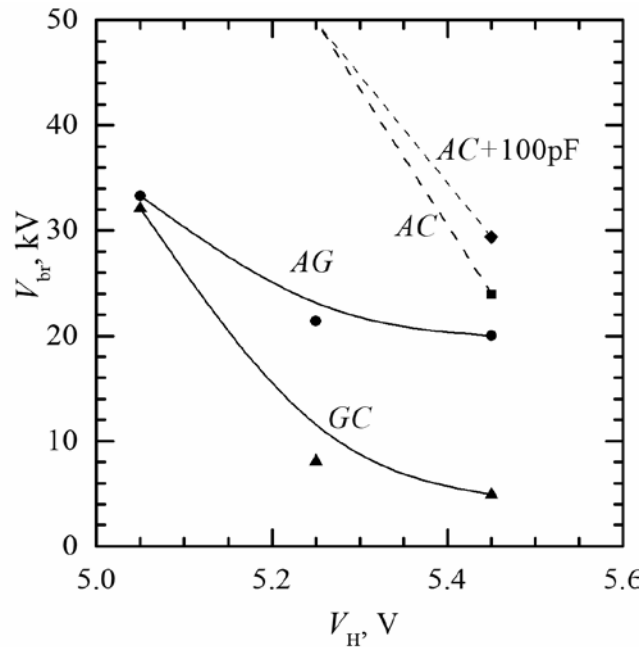


Рисунок 22. Пробивные напряжения основного зазора и секций тиратрона.

Анализируя соотношения между пробивными напряжениями секций тиратрона в отдельности и его основного разрядного промежутка в целом, можно заметить следующую особенность. При высоком давлении газа в приборе (давление в приборе соответствует напряжению на нагревателе генератора водорода 5.45 В) отчетливо видно, что пробивное напряжение основного разрядного промежутка определяется пробивным напряжением той секции, пробивное напряжение которой меньше. В данном случае, меньше напряжение секции GC. Т.е. как только емкость секции GC заряжается до пробивного напряжения, происходит пробой этой секции, а затем пробой в основном промежутке. Это означает, что напряжение пробоя основного промежутка в целом определяется напряжением пробоя той секции тиратрона, чье пробивное напряжение меньше (для данного случая, эта секция - CG).

Существуют некоторые способы повышения пробивных напряжений основного разрядного промежутка тиратрона. Эти способы заключаются в том, чтобы искусственно, при помощи делителей напряжения, перераспределить напряжения между секциями. Возможно использование различных делителей – емкостных, или омических. В экспериментах по исследованию методов повышения пробивного напряжения основного разрядного промежутка тиратрона при помощи делителей было показано, что наилучший результат достигается при использовании емкостного делителя с емкостью 100 пФ [27].

В экспериментах, проводимых в рамках данной ВКР, для повышения статического пробивного напряжения основного зазора, использовался именно емкостной делитель напряжения емкостью 100 пФ, включенный параллельно секции *CG*. При этом верхним плечом делителя была собственная емкость верхней секции. Как можно видеть из результатов измерений пробивных напряжений на рисунке 22, включение конденсатора параллельно секции *CG* тиратрона при давлении, соответствующего напряжению на генераторе водорода 5.45 В, повышало пробивное напряжение полного межэлектродного зазора с 24 до 30 кВ.

Для рассматриваемого тиратрона рабочий диапазон напряжений на нагревателе генераторе водорода составил (5.05 – 5.25) В (при этом давлении пробивное напряжение основного разрядного промежутка в целом более 40 кВ). При напряжениях на нагревателе несколько ниже чем 5.05 В, запуск тиратрона возможен, однако время запаздывания срабатывания и разброс времен запаздывания оказывается высоко. Если же напряжение на нагревателе будет слишком мало, то запуск тиратрона может вовсе не произойти.

3.2 Вольтамперные характеристики вспомогательного тлеющего разряда

Как отмечалось выше, в процессе получения вольтамперных характеристик регистрировались напряжение V_d между электродами C_1 и A_1 , основной ток вспомогательного разряда i_1 и паразитный ток i_2 .

В экспериментах по получению вольтамперных характеристик, напряжения на нагревателе генератора водорода выбирались из рабочего диапазона, приведенного в предыдущем разделе при определении статических пробивных напряжений.

Схема № 1

Получение вольтамперных характеристик производилось по схеме №1, подробно описанной в п. 2.3.2.

Вольтамперные характеристики вспомогательного тлеющего разряда, соответствующие напряжениям на генераторе водорода 5.05, 5.25 и 5.45 В, приведены на рисунке 23.

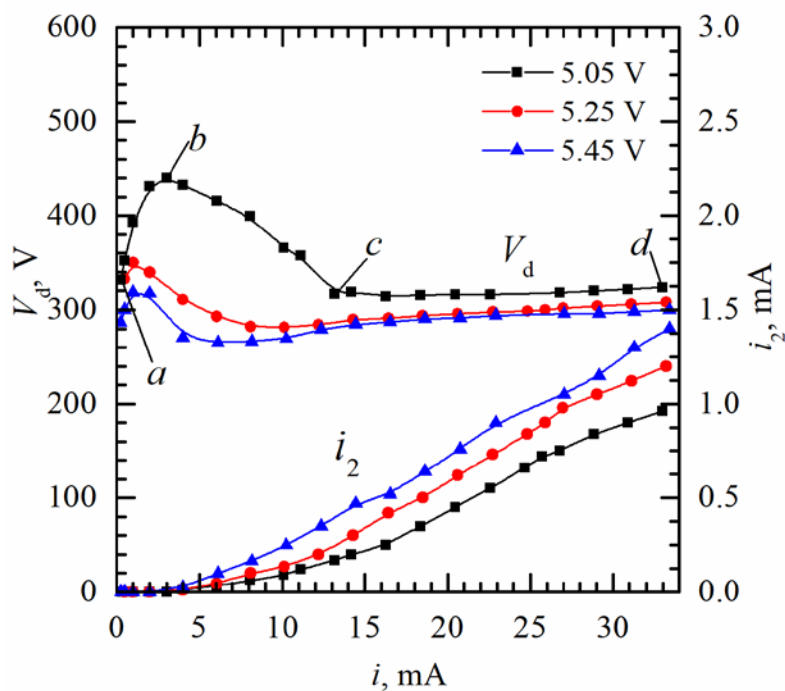


Рисунок 23. ВАХ вспомогательного тлеющего разряда.

Для определенности рассмотрим вольтамперную характеристику разряда для напряжения на генераторе водорода $V_H = 5.05$ В. Зажигание разряда происходит при напряжении 330 В. При этом не наблюдается скачка напряжения на потенциальном электроде. Между электродами узла запуска A_1 и C_1 начинает протекать ток на уровне 250 мкА (точка a). Сопротивление разряда для этой точки характеристики $R_d \approx 1.3$ МОм, что заведомо больше балластного сопротивления $R_1 = 26$ кОм. Это говорит о том, что режим горения разряда соответствует так называемому затрудненному режиму [16, 17]. Другими словами, это режим высоковольтного тлеющего разряда.

При повышении напряжения источника питания напряжение горения разряда также увеличивается. На нарастающем участке характеристики имеет место высоковольтный тлеющий разряд вплоть до максимума (точка b). При дальнейшем увеличении напряжения источника питания наблюдается снижение напряжения горения разряда, которое можно характеризовать как переход от затрудненного разряда к обычному тлеющему разряду. Схожее поведение вольтамперной характеристики наблюдалось ранее и для тиратронов с таблеткой в узле запуска [9, 10]. Однако в настоящих экспериментах переход происходит не скачкообразно, а плавно.

При дальнейшем повышении напряжения V_1 напряжение горения разряда изменяется слабо, а ток разряда увеличивается. Это значит, что сопротивление разряда уменьшается, а в катодной полости нарабатывается плазма отрицательного свечения. Например, для точки вольтамперной характеристики с током $i = 20$ мА и напряжением $V_d = 316$ В, сопротивление разряда составляет 15.8 кОм. Таким образом на участке кривой $c-d$ имеет место обычный тлеющий разряд с полым катодом.

На рисунке 23 помимо вольтамперных характеристик приведены зависимости паразитного тока i_2 от полного тока разряда I в области до

максимума напряжения горения паразитный ток близок к нулю. В процессе перехода к обычному тлеющему разряду с полым катодом паразитный ток монотонно возрастает.

С увеличением давления газа в тиратроне (с увеличением напряжения V_H) зажигание разряда происходит при меньшем напряжении источника питания V_1 . Переход от затрудненного разряда к обычному тлеющему разряду и появление паразитного тока происходит при меньших токах разряда. Также, с ростом давления газа в тиратроне величина паразитного тока, при одном и том же полном токе разряда, оказывается выше.

Схема № 2

Получение вольтамперных характеристик производилось по схеме №2, подробно описанной в п. 2.3.2. В отличие от предыдущей схемы, здесь электрод C_1 является анодом вспомогательного тлеющего разряда. Вольтамперные характеристики вспомогательного тлеющего разряда, соответствующие рабочим напряжениям на генераторе водорода приведены на рисунке 24.

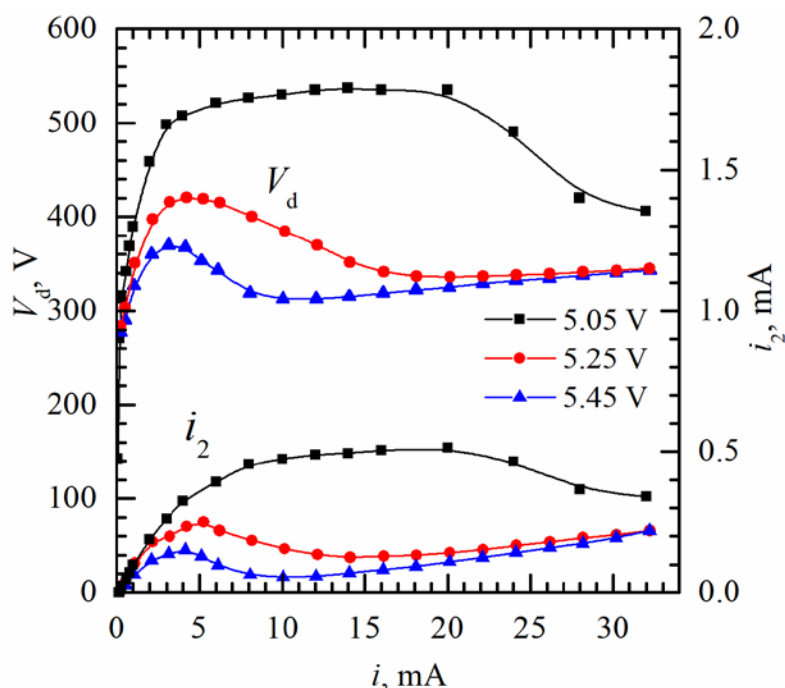


Рисунок 24. ВАХ вспомогательного тлеющего разряда.

Вид вольтамперных характеристик схож с характеристиками для предыдущей схемы. Здесь зажигание разряда происходит приблизительно при тех же напряжениях на источнике питания вспомогательного разряда, что и в случае рисунка 23. Также наблюдается режим затрудненного тлеющего разряда и режим обычного тлеющего разряда с полым катодом. Однако разряд в узле запуска поддерживается при более высоких напряжениях горения. Это может быть связано с тем, что при данной схеме питания разряда диаметр катодной полости оказывается на 4 мм меньше, чем для предыдущей схемы.

Также видно, что зажигание обычного тлеющего разряда с полым катодом происходит при большем токе разряда. Например, для напряжения на генераторе водорода $V_H = 5.05$ В, режим затрудненного разряда поддерживается вплоть до тока $i = 20$ мА, а зажигание обычного тлеющего разряда происходит при токе 32 мА. По-видимому, давление газа в приборе для данной схемы питания разряда оказывается настолько низким, что генерация плазмы отрицательного свечения оказывается возможна только в области высоких токов разряда.

Также следует отметить, что поведение паразитного тока для схемы на рисунке 24 существенно отличается от случая на рисунке 23. Здесь паразитный ток практически повторяет по форме вольтамперную характеристику, а величина тока i_2 не превышает 0.5 мА.

Сравнивая вольтамперные характеристики вспомогательного разряда нового узла запуска с разрядом в узле запуска с высоко-эмиссионной таблеткой, можно выделить следующие различия. Прежде всего, напряжение горения вспомогательного разряда нового узла запуска в рабочем диапазоне давлений несколько выше, чем в узле запуска с таблеткой и может составлять 300-400 В, в то время как в узле запуска с таблеткой напряжения горения обычно не превышают 280 В. Паразитный ток в новом узле запуска не превышает 4 % в рабочем режиме, что соизмеримо с паразитным током в узле запуска с таблеткой ЕС. Как показали эксперименты, величина паразитного тока в новом узле запуска оказывается достаточной для стабильного запуска тиратрона.

3.3 Схемы запуска тиратрона при высоких анодных напряжениях

Схема № 1

Подробно данная схема была рассмотрена в п. 2.4 настоящей работы. Принцип работы этой схемы состоит в следующем. В исходном состоянии к аноду тиратрона A приложено высокое напряжение $V_0 \approx 40$ кВ, а в узле запуска поддерживается разряд с током 10-30 мА. Цепь основного разряда включает в себя сам конденсатор C_0 , балластное сопротивление R_0 и низкоомный шунт R_s .

Для запуска тиратрона импульс напряжения отрицательной полярности прикладывается к электроду C_1 через токоограничивающий резистор R_B . В общем случае под действием импульса напряжения V_T происходит зажигание импульсного разряда между электродами C_1 и C с током около 20 А, что приводит к инициированию разряда в основном промежутке.

Как это можно видеть из схемы, при приложении импульса запуска, полярность электродов узла запуска не меняется. Импульс запуска в этой схеме приводит к интенсификации вспомогательного разряда, что вызывает существенное усиление паразитного тока. В результате этого, под действием высокого напряжения со стороны анода, начинает развиваться сильноточный импульсный разряд в основном разрядном промежутке.

На рисунке 25 приведена схема запуска и осциллограммы напряжения на аноде тиратрона V_0 , тока в основном промежутке тиратрона i_a и импульса запуска V_T . В начальных условиях к аноду тиратрона приложено напряжение $V_0 = 40$ кВ. В момент времени t_0 происходит замыкание ключа S и напряжение на электроде C_1 начинает увеличиваться. В момент времени t_1 на осциллограмме V_T можно различить небольшой пик, который соответствует началу развития разряда запуска в промежутке CC_1 . В результате, спустя 26 нс в момент времени t_m , начинается развитие разряда в основном промежутке тиратрона.

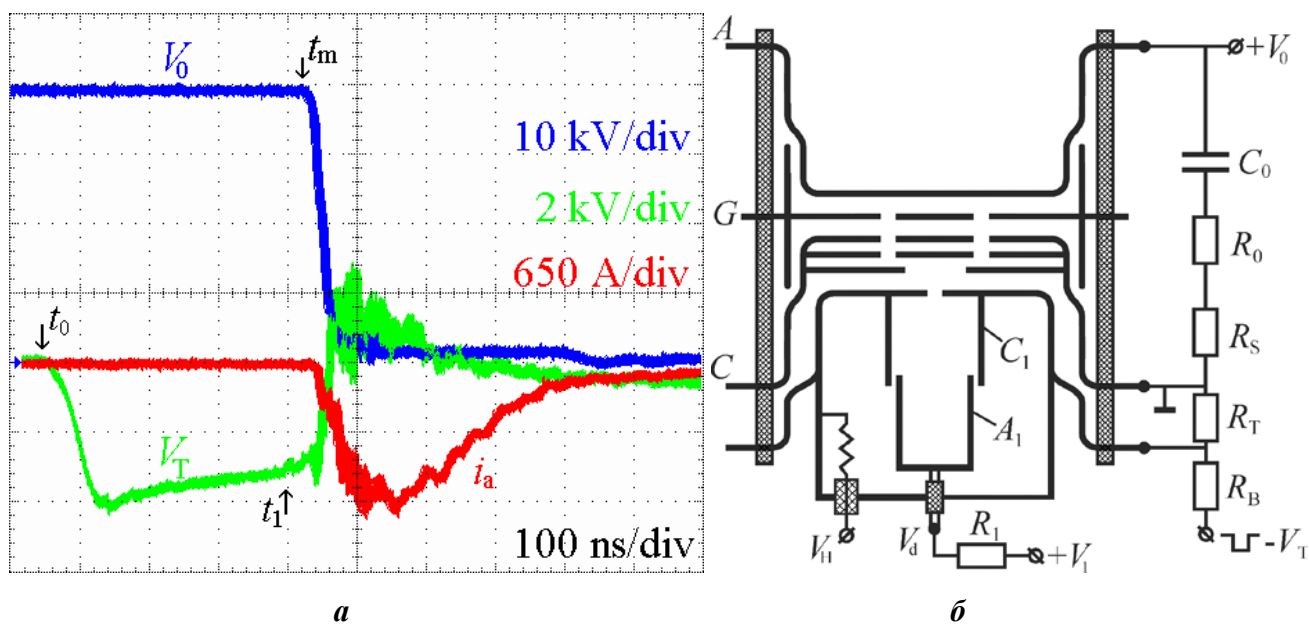


Рисунок 25. Схема запуска тиратрона № 1 и осциллограммы напряжения и тока при запуске, 50 импульсов в режиме накопления и схема запуска. $i_{mp} = 10$ мА, $V_d = 446$ В, $V_H = 5.25$ В.
a – осциллограммы, масштаб 100 нс/дел., **б** – схема запуска.

Обращает на себя внимание довольно большое время запаздывания пробоя $t_d = 396$ нс. При этом разброс времён запаздывания срабатывания, величину которого можно оценить из рисунка 25 **б**, составляет $\Delta t_d \approx \pm 4$ нс. При увеличении тока вспомогательного разряда величина паразитного тока также увеличивается, что приводит к уменьшению как времени запаздывания пробоя в основном промежутке, так и разброса времен срабатывания. В частности, при токе $i = 20$ мА время запаздывания $t_d = 226 \pm 2$ нс.

Схема № 2

Подробно данная схема была рассмотрена в п. 2.4 настоящей работы. Принцип работы этой схемы состоит в следующем. Положительное напряжение $+V_1$ для зажигания вспомогательного тлеющего разряда прикладывается к электроду C_1 , а импульс запуска отрицательно полярности прикладывается между электродом A_1 и заземленным катодом C . В данном случае зажигание разряда запуска происходит не в системе электродов CC_1 за счет усиления

паразитного тока, а в системе электродов A_1-C за счет протекания тока разряда запуска через отверстие в электроде C_1 .

В рассматриваемом случае электрод A_1 является полым катодом, электрод C_1 полым анодом, а электрод C – катодом. При токе разряда 10 мА напряжение горения разряда $V_d \approx 385$ В. При этом потенциал электрода C_1 оказывается равен 429 В. Это означает, что электроны из плазмы разряда не могут выйти в промежуток C_1-C . Тогда, паразитный ток обеспечивается в основном ионами из плазмы в полости C_1 , которые выходят через отверстие и ускоряются в промежутке C_1-C .

После подачи импульса запуска происходит усиление тока вспомогательного разряда. Ток начинает течь с электрода A_1 на электрод C_1 . Поскольку этот ток ограничен сопротивлением R_1 , потенциал электрода C_1 становится отрицательным по отношению к заземленному электроду C . В результате на электрод C начинает протекать ток электронов из плазмы в анодной полости и из катодного слоя. Под действием этих электронов происходит инициирование разряда запуска между электродами C_1-C , и ток разряда запуска начинает протекать в системе электродов A_1-C .

Осциллограммы тока разряда в основном промежутке, напряжения на аноде и напряжения запуска V_T для рассматриваемой схемы приведены на рисунке 26. Видно, что длительность переходных процессов на емкости кабеля, сопротивлении R_T и сопротивлении разряда запуска составляет приблизительно 150 нс, что существенно меньше, чем для предыдущей схемы.

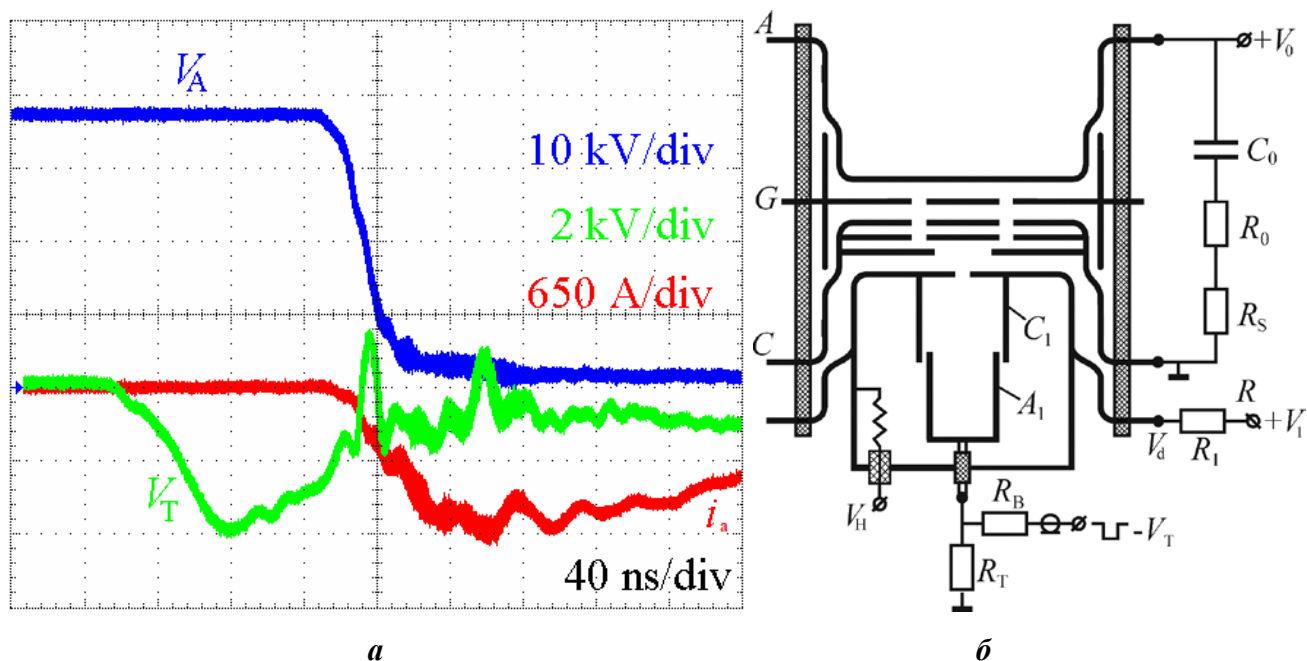


Рисунок 26. Схема запуска тиратрона № 2 и осциллограммы напряжения и тока при запуске, 50 импульсов в режиме накопления и схема запуска. *a* – экспериментальные осциллограммы, *б* – схема запуска. $i_{mp} = 30 \text{ mA}$, $V_d = 365 \text{ B}$, $V_H = 5.2 \text{ B}$.

С увеличением тока вспомогательного разряда, время запаздывания пробоя в основном промежутке и разброс времен запаздывания уменьшаются. При токе вспомогательного разряда $i = 30 \text{ mA}$, время запаздывания срабатывания $t_d = 110 \pm 2 \text{ нс}$ (рисунок 26 *б*).

Схема № 3

Данная схема аналогична схеме № 1 в плане питания вспомогательного разряда. Однако, в отличие от схемы №1, импульс запуска отрицательной полярности здесь подается через конденсатор на электрод A_1 . Конденсатор C_T здесь используется для того, чтобы не допустить протекания тока вспомогательного разряда в цепь запуска.

Пример осциллограмм при использовании данной схемы запуска приведен на рисунке 27. Для этой схемы запуска время запаздывания срабатывания тиратрона составляет $t_d = 87 \pm 2.5 \text{ нс}$.

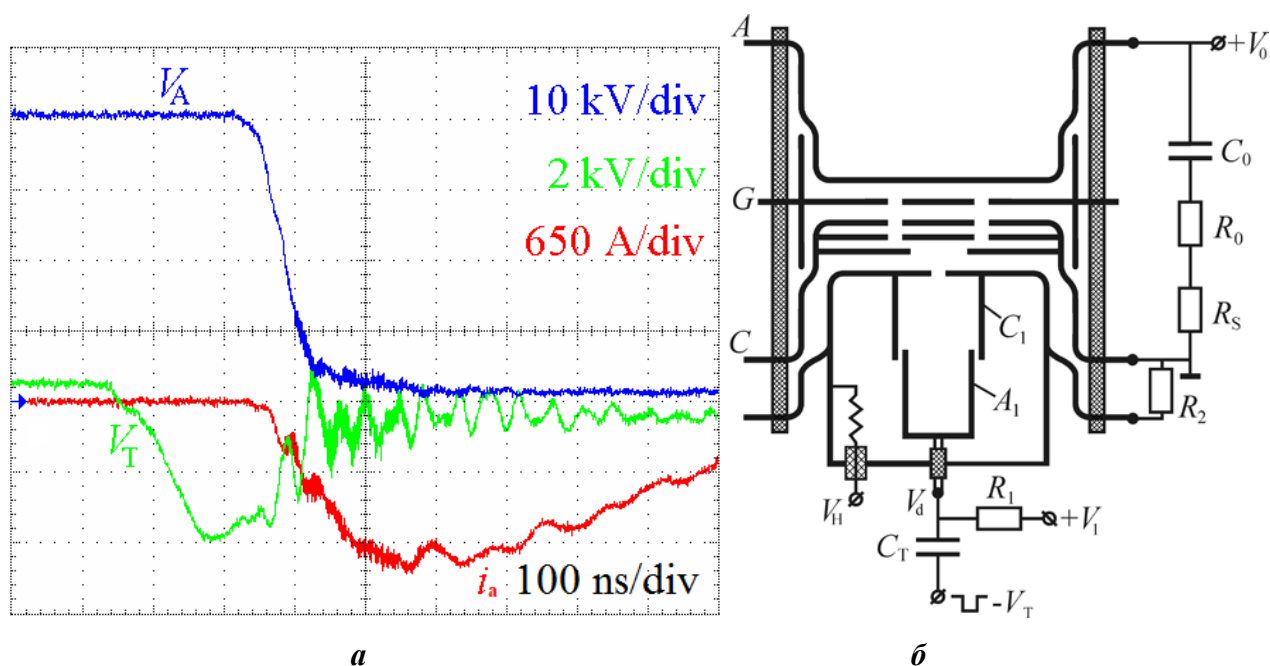


Рисунок 27. Схема запуска тиратрона № 3 и осциллограммы напряжения и тока при запуске, 50 импульсов в режиме накопления и схема запуска. *a* – экспериментальные осциллограммы, *б* – схема запуска. $i_{mp} = 10$ мА, $V_d = 350$ В, $V_H = 5.2$ В.

До момента приложения импульса запуска электрод A_1 является анодом, а через отверстия в полости C_1 на электрод C протекает паразитный ток ионов. После приложения импульса V_T происходит изменение полярности электродов узла запуска так, что на момент приложения импульса, электрод A_1 становится катодом, а электроды C и C_1 – анодами. Таким образом, плотность электронов плазмы вспомогательного разряда смещается в область электрода C . Ток разряда начинает протекать между полым катодом A_1 , анодом C_1 . Причем ток этого разряда оказывается довольно высоким. Кроме того, за счет протекания этого тока потенциал электрода C_1 оказывается отрицательным. В результате из плазмы вспомогательного разряда в промежутке C_1 - C начинает течь большой электронный ток. Под действием высокого напряжения со стороны анода A , электроны инициируют пробой основного межэлектродного промежутка тиратрона.

Выводы

В настоящей работе были проведены испытания тиратрона ТПИ1-10к/50 с новым узлом запуска без использования высокоэмиссионной таблетки.

В процессе измерения статических пробивных напряжений секций тиратрона по отдельности и основного разрядного промежутка в целом, был определен рабочий диапазон напряжений на нагревателе генератора водорода, он составил (5.05 – 5.25) В. При этом напряжении пробивное напряжение основного разрядного промежутка составляет ~40 кВ (соответственно, при понижении напряжения на генераторе водорода, статическое пробивное напряжение основного промежутка увеличивается). Было показано, что включение конденсатора емкостью 100 пФ параллельно секции CG позволяет существенно повысить пробивное напряжение основного межэлектродного промежутка в целом.

Вольтамперные характеристики вспомогательного разряда узла запуска исследуемого тиратрона были получены для двух схем питания. В случае с первой схемой, источник питания положительной полярности подключался к аноду узла запуска A_1 . В этой схеме питания паразитный ток монотонно увеличивался с ростом тока вспомогательного разряда. Сам тлеющий разряд в узле запуска имел несколько стадий, которые имеют плавные переходы между собой. Во второй схеме питания вспомогательного тлеющего разряда источник питания положительной полярности подключался к электроду C_1 . Вид вольтамперных характеристик для этой схемы схож вольтамперными характеристиками для предыдущей схемой. Однако паразитный ток в этой схеме по своей форме повторял вид вольтамперной характеристики, а не просто монотонно увеличивался с ростом основного тока разряда как у предыдущей схемы. Для данных схем вольтамперные характеристики были получены для трех давлений газа в приборе, соответствующим напряжениям на генераторе водорода 5.05, 5.25 и 5.45 В. Основное различие между вольтамперными характеристиками вспомогательного разряда при разных давлениях состоит в том, что на начальном участке ВАХ (режим затрудненного или высоковольтного

тлеющего разряда) напряжения горения вспомогательного разряда выше при более низких давлениях (разница достигает 100 В), чем в стадии обычного тлеющего разряда (разница не более 10 В для давлений из диапазона измерений).

На основе экспериментальных данных, можно сделать вывод, что наиболее оптимальным режимом горения вспомогательного разряда в узле запуска является нормальный тлеющий разряд, т.к. в этом режиме вольтамперная характеристика является линейной и напряжение горения разряда слабо меняется с ростом тока. Более того, при изменении давления газа в приборе в рабочем диапазоне, напряжение горения разряда в данном режиме будет меняться незначительно, что является большим преимуществом в плане стабильности работы тиратрона.

В экспериментах были испытаны три схемы запуска тиратрона при высоких анодных напряжениях. В первой из этих схем удалось получить стабильность срабатывания 400 ± 4 нс. Во второй схеме была получена стабильность 110 ± 3 нс. В третьей схеме запуска была получена стабильность запуска 87 ± 2.5 нс. Наиболее оптимальной можно считать именно третью схему, не только благодаря наилучшим характеристикам стабильности по сравнению с остальными, но и потому что в этой схеме не происходит ответвление тока вспомогательного разряда в цепь запуска благодаря использованию конденсатора C_T , через который подается импульс запуска.

4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Целью раздела выпускной квалификационной работы «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности научно-исследовательского проекта, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации. Задачи раздела:

- Произвести оценку потенциальных потребителей результатов исследования;
- Произвести SWOT-анализ;
- Произвести технико-экономическое обоснование НТИ;
- Осуществить оценку научно-технического уровня исследования;
- Составить план реализации НТИ;
- Сформировать бюджет исследования;
- Произвести оценку эффективности НТИ.

4.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Коммутаторы различных типов широко применяются во всех областях электроники. Наибольшее распространение получили твердотельные коммутаторы. Столь высокая популярность твердотельных коммутаторов объясняется их универсальностью, доступностью и высоким качеством. Они используются практически в любых электронных приборах, производимым промышленностью. В составе электронного прибора или электрофизической установки можно встретить различные типы коммутаторов, однако, практически всегда один из них – коммутаторы твердотельного типа.

		Область применения			
		Промышленная микроэлектроника (бытовая техника, компьютеры и т.д.) и медицинские технологии	Электрофизические промышленные и экспериментальные установки	Промышленная силовая электроника (установки электроразрядного бурения, стерилизации, лазеры и т.д.)	Военная промышленность
Тип коммутатора	Твердотельные коммутаторы (solid state switches)				
	Искровые промежутки (spark gaps)				
	Тиратроны (thyratrons)				
	Прочие коммутаторы (игнитроны и др.)				

Таблица 4.1. Карта сегментирования коммутаторов в различных областях электроники. Наиболее темным цветом выделены те ячейки, где данный тип коммутатора применяется чаще остальных. Наиболее светлый оттенок имеют те области, в которых использование данного типа коммутатора минимально, отсутствует, либо нет достоверных сведений.

Первая группа сегментирования – промышленная микроэлектроника и медицинские технологии. Применение здесь газоразрядных коммутаторов, в том числе и тиратронов, ограничивается крайне малой долей в составе некоторых медицинских установок, например – в рентгенографических установках.

Электрофизические промышленные и экспериментальные установки почти всегда состоят из различных функциональных блоков, в которых преобладает тот, или иной тип коммутаторов. Часто, такие установки предназначены для коммутации больших токов и напряжений, что делает целесообразно использование в них газоразрядных коммутаторов, в частности тиратронов.

Промышленная силовая электроника по применению коммутаторов похожа на предыдущую область. Как правило, в таких установках необходимо коммутировать большие токи и напряжения в частотном режиме. Для этого, среди газоразрядных коммутаторов, отлично подходят именно тиратроны.

В военной промышленности большую часть применяемых коммутаторов составляют твердотельных, что обуславливается их высокой надежностью. Однако, в составе некоторых комплексов находят применение и газоразрядные коммутаторы. Как правило, это тиратроны.

Из проведенного анализа потенциальных потребителей результатов исследования можно сделать вывод о том, что тиратроны, хотя и не являются лидерами среди коммутаторов различного типа, лидируют среди газоразрядных коммутаторов, уступая лишь твердотельным.

4.2 SWOT-анализ

Ниже приведена SWOT-матрица, составленная на основе разностороннего анализа проекта.

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Экологическая безопасность С2. Наличие прототипа научной разработки С3. Успешная конкуренция и высокий спрос продукта на международном уровне С4. Модернизация прибора в рамках проекта не вызовет существенного изменения в производстве С5. Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии.</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Недостаточный уровень точности текущего производства не обеспечивает должного уровня повторяемости продукции Сл2. Большой срок от момента согласования модернизированной конструкции до получения отпаянного прототипа Сл3. Параметры тиратронов имеют тенденцию меняться со временем Сл4. Большой срок поставок материалов и комплектующих, используемых при проведении научного исследования Сл5. Высокая стоимость измерительного оборудования, необходимого для проведения исследований</p>
<p>Возможности: В1. Появление дополнительного спроса на новый продукт В2. Повышение производительности в импульсных технологиях В3. Возможность одновременной коммутации нескольких приборов В4. Получение новых фундаментальных знаний в исследуемой области В5. Применение исследуемых приборов в перспективных экспериментальных установках</p>	<p>Соотношение выявленных сильных сторон и возможностей научно-исследовательского проекта однозначно свидетельствуют о высоком рыночном потенциале рассматриваемой продукции. Улучшенные характеристики тиратрона создадут не только дополнительный спрос в уже существующих областях импульсной электротехники, но и позволят использовать их в новых областях отрасли.</p>	<p>Выявленные слабые стороны научно-исследовательского проекта по большей части относятся к уровню производства рассматриваемых приборов и к обеспечению условия для проведения исследований в этой области. В случае, если выявленные слабые стороны не будут устранены, будет невозможно одновременное использование нескольких приборов, а также могут происходить прерывания в проведении исследований.</p>
<p>Угрозы: У1. Снижение доли рынка газоразрядных коммутаторов в пользу твердотельных У2. Монополия на внутреннем рынке У3. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства У4. Введения дополнительных государственных требований к сертификации продукции У5. Ограничения на экспорт продукции</p>	<p>Несмотря на сильные стороны проекта, потенциально-существующие угрозы могут не только снизить спрос на тиратроны, но и прервать проводимые в этой области исследования, а также нанести вред отрасли в целом. Однако, не стоит ожидать полного вытеснения их с рынка, благодаря уникальным характеристикам.</p>	<p>Хотя выявленные угрозы и слабые стороны проекта прямо не соотносятся друг с другом, следует ожидать снижения спроса на тиратроны в том случае, если не будет обеспечиваться достаточная точность их производства.</p>

Таблица 4.2. Матрица SWOT.

Исходя из результатов анализа, можно сделать вывод о том, что тиратроны с холодным катодом являются и, вероятнее всего, будут оставаться вполне конкурентоспособным продуктом в импульсной электротехнике. Таким образом, проведение исследований в данной области является перспективным, поскольку благодаря именно таким исследованиям удастся улучшить характеристики рассматриваемых приборов, благодаря чему сохраняется возможность конкурировать на международном уровне.

4.3 Инициализация научно-технического проекта

4.3.1 Технико-экономическое обоснование проведения научно-технического исследования

В рамках данной выпускной квалификационной работы проведено исследование стабильности запуска тиратрона с холодным катодом при высоких анодных напряжениях.

В работе приведены результаты испытаний экспериментального прибора с модернизированным узлом запуска. Цель модернизации состояла в том, чтобы обеспечить наносекундную стабильность запуска тиратрона при высоких анодных напряжениях.

В ходе работы проведены испытания экспериментального тиратрона в различных схемах запуска. Изучены особенности работы модернизированного узла запуска. Показано, что с модернизированным узлом запуска достигается стабильность срабатывания тиратрона ± 3 нс (в не модернизированных приборах стабильность запуска составляет не менее ± 15 нс).

Результатами исследования являются:

–данные по стабильности срабатывания тиратрона в различных схемах запуска;

–вольтамперные характеристики вспомогательного разряда модернизированного узла запуска;

–данные по пробивным напряжениям основного зазора и секций тиратрона;

–конструкция модернизированного узла запуска.

4.3.2 Оценка научно-технического уровня исследования

Для оценки научной ценности, технической значимости и эффективности проекта необходимо: рассчитать коэффициент научно-технического уровня. Коэффициент НТУ рассчитывается при помощи метода балльных оценок, в котором каждому из признаков НТУ присваивается определенное число баллов по принятой шкале. Общую оценку приводят по сумме баллов по всем показателям с учетом весовых характеристик. Общая оценка рассчитывается по формуле (3)

$$НТУ = \sum_{i=1}^n k_i \cdot П_i , \quad (3)$$

где k_i – весовой коэффициент i – го признака;

$П_i$ – количественная оценка i – го признака.

Признаки НТУ	Весовой коэффициент
Уровень новизны	0.5
Теоретический уровень	0.4
Возможность реализации	0.2

Таблица 4.3. Весовые коэффициенты НТУ

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

Таблица 4.4. Шкала оценки новизны.

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

Таблица 4.5. Значимость теоретических уровней

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

Таблица 4.6. Возможность реализации по времени и масштабам.

$$k_1 = 0.4, P_1 = 8, k_2 = 0.4, P_2 = 8,$$

$$k_3 = 0.4, P_3 = 10, k_4 = 0.5, P_4 = 2.$$

$$НТУ = 0.4 \cdot 8 + 0.4 \cdot 8 + 0.4 \cdot 10 + 0.5 \cdot 2 = 11.4$$

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

4.4 Планирование работ по научно-техническому исследованию

Планирование исследования – это составление календарных планов выполнения комплексов работ, определение денежных средств, необходимых для их реализации, а также трудовых и материальных ресурсов.

Основные задачи:

- 1 Взаимная увязка исследовательских работ;
- 2 Согласование выполнения отдельных этапов исследований во времени, определение их длительности и обеспечение их выполнения в установленные сроки;
- 3 Определение общего объема работ и потребных для его выполнения денежных, материальных и трудовых ресурсов;
- 4 Распределение общего объема работ между исполнителями.

Графический метод планирования.

Определение трудоемкости и продолжительности работ осуществляется на основе отраслевых нормативов, типовых норм на разработку конструкторской документации, а для работ, обладающих большой неопределенностью на основе вероятностных (экспертных) методов, широко используемых в СПУ.

График выполнения работ по дням составлен на год с учетом всех выходных, предпраздничных и праздничных дней в рисунке 23.

Содержание работ	Продолжительность работ, ожид/день			Исполнители
	t_{\min}	t_{\max}	$t_{\text{ож}}$	
1 Разработка и утверждение плана работ	2	3	3	И, РП
2 Определение последовательности этапов исследования	1	2	2	И
3 Описание объекта исследования и ожидаемых результатов	2	4	3	И
4 Подготовка приборов и оборудования к проведению экспериментов	2	3	2	И

5 Проверка и отладка оборудования	1	3	2	И
6 Проведение серии экспериментальных исследований	2	4	3	И
7 Обработка экспериментальных данных	4	5	5	И
8 Интерпретация результатов, обсуждение	2	3	3	И, РП
9 Обработка результатов	3	4	4	И
10 Сравнение экспериментальных данных и результатов оценок	1	2	2	И
11 Обсуждение полученных результатов	3	4	4	И
12 Составление программы расчета	4	5	5	И
13 Утверждение результатов: расчеты, графики	3	5	5	И, РП
14 Расчет экономической части	5	6	6	И
15 Определение раздела техники безопасности	5	6	6	И
16 Отчет о проделанной работе	10	11	11	И, РП

Таблица 4.7. Этапы реализации проекта.

Ожидаемое время работы $T_{ож} = 66$ дней.

Результаты планирования показали, что время, затраченное на проектирование для: инженера (И) – 66 дней; руководителя проекта РП - 22 дня.

При графическом методе планирования на основе расчета трудоемкости и календарной продолжительности выполнения всех включенных в план исследований с учетом их взаимосвязи и последовательности выполнения во временном масштабе (соответствующим производственному календарю планируемого года) строится графическая модель комплекса работ в виде линейной диаграммы, в которой положение и длина каждой линии характеризует дату начала (окончания) и продолжительность выполнения каждой работы. На основе линейного графика определяется общая продолжительность всего комплекса работ.

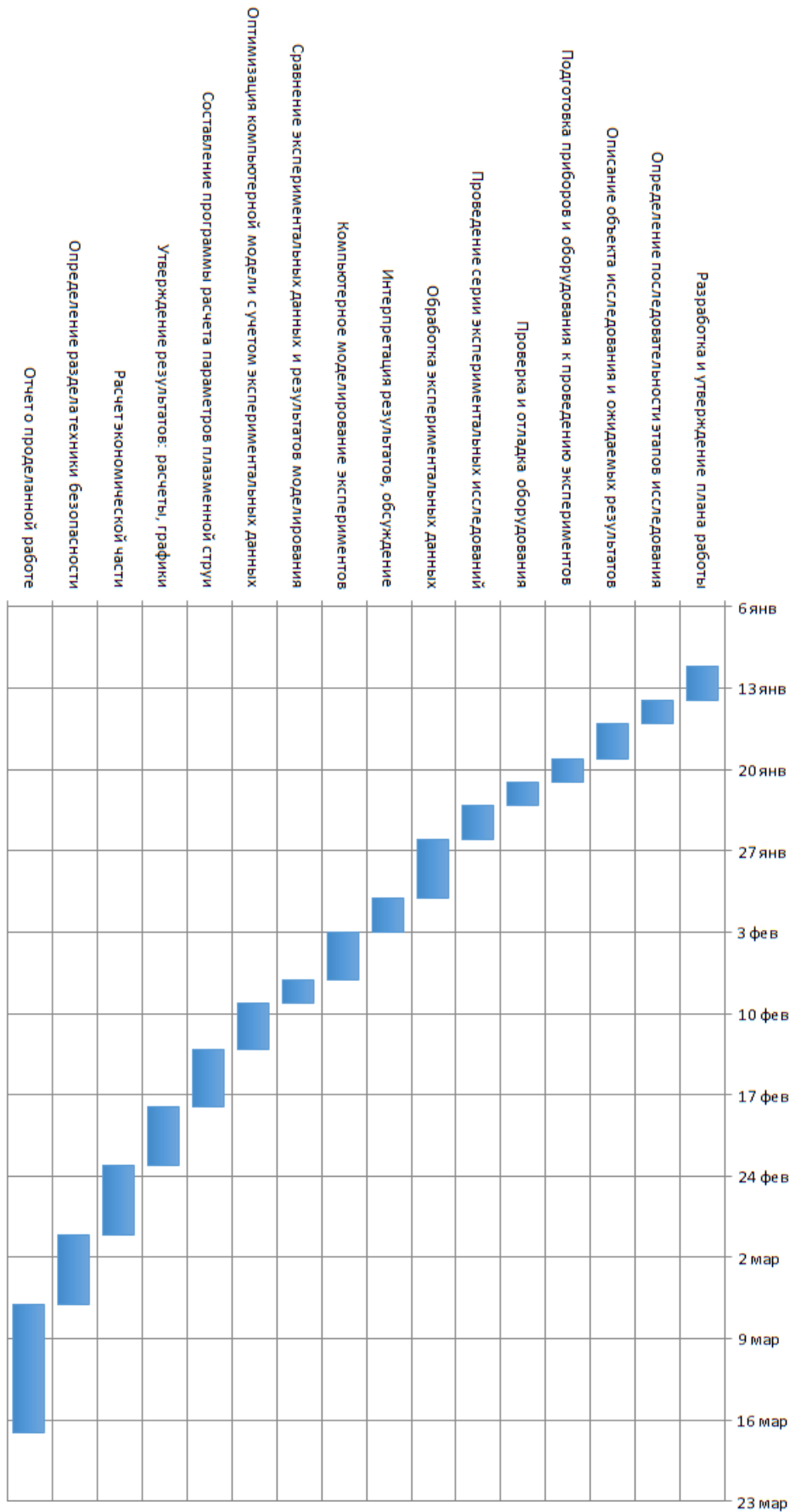


Рисунок 4.1. График Ганта.

4.5 Бюджет научно-технического исследования

4.5.1 Расчёт материальных затрат на реализацию проекта

Стоимость всех материалов, комплектующих изделий и компонентов, необходимых для выполнения работ формируется исходя из приобретения и платы за транспортировку. Транспортно–заготовительные расходы принимаются в пределах от 3 до 5 % от цены материалов (в данной работе 3%). Стоимость сырья, материалов, специального оборудования, комплектующих изделий приведена в таблице 10.

Наименование	Кол-во	Цена за единицу, руб	Сумма, руб
Принтер	1	2000	2000
Электронные компоненты	1	15000	15000
Расходные материалы	1	1000	1000
Печатная бумага	1	250	250
Канцелярские товары	1	100	100
Осциллограф	1	40000	40000
Источник питания	1	700	700
Мультиметр	2	1500	3000
Персональный компьютер	1	15000	15000
Паяльная станция	1	5000	5000
Всего за материалы			82050
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)			4102,5
Итого по статье С _м			86152,5

Таблица 4.8. Материальные затраты на проведение исследования.

4.5.2 Расчет капитальных вложений на реализацию проекта

Для реализации проекта, необходимы, помимо зарплат, вложения для производства вспомогательного источника питания для исследуемого тиратрона.

Капитальные вложения включают: затраты на приобретение электронных компонентов и расходных материалов, доставку, сборку прибора и его настройку.

Расчет капитальных вложений оформлен в виде таблицы 11:

Наименование	Кол-во	Цена, Руб	Общая стоимость, руб
Электронные компоненты			
- Выпрямительный диод КД206В;	4	130	520
- Резистор силовой АН-100, 100 Вт, 1 Ом;	1	620	620
- Конденсатор электролитический алюминиевый ЕСАР (К50-35), 2200 мкФ, 400В , В43458-А9228-М;	1	2 460	2 460
- Резистор металлооксидный МО-200 (С2-23) 2 Вт, 100 кОм, 5%;	3	3	9
- Конденсатор электролитический алюминиевый ЕСАР (К50-35), 2.2 мкФ, 400 В, 105°С, ТК 8Х11, ТКР2R2М2GF11;	2	12	24
- Конденсатор электролитический алюминиевый ЕСАР (К50-35), 10 мкФ, 400 В, 105°С, 10х20, В43851А9106М000;	2	30	60
-Транзистор IRGB14C40LPBF, IGBT 430В 20А зажигТО220;	2	130	260
- Сердечник ферритовый кольцевой М6000НМ, 45х28х12;	1	180	180
- Полумостовой драйвер IR2103PBF;	1	120	120
-Резистор SQP 10 Вт 10 Ом;	2	14	28
-Диод импульсный FR207;	48	4	192
- Катушка индуктивности SMD В82464G4104М, 100 мкГн, 1А;	1	85	85
- Конденсатор керамический дисковый DHRB34С102М2FB ;	10	58	580
- Резистор силовой АН-50, 50 Вт, 2.2 кОм;	10	180	1800
-Блок питания RS-25-12.	1	1430	1430
Материалы и прочее			
Расходные и вспомогательные материалы	1	3000	3000
Всего затрат			13368

Таблица 4.9. Затраты на сборочные единицы источника питания.

4.5.3 Расчёт оплаты труда работников

Так как работа является научной, решено установить простую повременную форму оплаты труда. Руководителю проекта устанавливается 4 квалификационная группа профессорско-преподавательского персонала, инженеру-электронике 1 квалификационная категория позволяющая выполнять задания уровня сложности средний и высокий.

В таблице 9 приведены данные тарифной сетки для работников за единицу времени (час). Основная заработная плата сотрудников рассчитывается по формуле 4.

№ п/п	Наименование категории работника	Группа	Количество работников	Форма оплаты труда	Ставка в месяц без РК	Стоимость проработанного часа (руб.)
1.	РП	4	1	повременная	40000	250
2.	Инженер-электроник	1	1		30000	187,5
3.	Итого		2			

Таблица 4.10. Данные для расчета заработной платы участников проекта.

Время работы каждого участника проекта представлено в таблице 12.

Находим районный коэффициент:

$$PK = 250 \cdot 176 \cdot 30\% = 13200 \text{ руб.}$$

$$ЗП_{осн} = 250 \cdot 176 + PK = 250 \cdot 176 + 13200 = 57200 \text{ руб.} \quad (4)$$

Проект включает в себя отчисления на страховые выплаты, которые рассчитываются по формуле 4.1.

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) = 0,3 \cdot (250 \cdot 176 + 0) = 13200 \text{ руб.} \quad (4.1)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.), $Z_{\text{доп}}$ – в нашем случае не предусмотрена, поэтому равняется нулю.

№ п/п	Работник	Почасовая ставка (руб.)	Количество отработанных часов	Районный коэффициент (руб.)	Отчисления на страховые выплаты	Заработная плата (руб.)
1	РП	250	176	13200	13200	57200
2	Инженер-электроник к 1 кат.	187,5	528	29700	28700	127200
3	Итого				41900	184400

Таблица 4.11. Основная заработная плата проектировщиков.

4.6 Оценка ресурсной и организационной эффективности исследования

Тиратроны с холодным катодом широко применяются в различных областях, где используются импульсные технологии. В частности:

- геология и нефтедобыча - в установках для сейсморазведки и электробурения;
- мощные лазерные системы, в т.ч. лазеры на свободных электронах и рентгеновские лазеры;
- импульсные радиационные технологии - радиационная стерилизация, радиационная обработка жидкостей в тонких слоях;
- в источниках питания мощных установок по производству озона, в технологиях дезактивации высокотоксичных веществ;
- радиолокация, в том числе сверхширокополосные радиолокационные средств нового поколения без использования традиционных СВЧ приборов.

Имеющиеся аналоги: Тиратроны марок E2V CX1536A и EG&G HY-5751 являются аналогами обсуждаемого прибора. По основным техническим характеристикам, а именно – коммутационный импульсный ток 5 – 10 кА при напряжениях 40 – 50 кВ, данные приборы схожи с тиратроном типа ТПИ1-10к/50. Однако существенным недостатком данных аналогов является их высокая стоимость, что в частности, делает отечественные приборы конкурентно способными.

Показатели организационной эффективности	Вес показателя K_i	Значение показателя до внедрения результатов разработки, балл a_i	Значение показателя до внедрения результатов разработки с учетом веса, $K_i \times a_i$	Значение показателя после внедрения результатов разработки, балл b_i	Значение показателя после внедрения результатов разработки с учетом веса, $K_i \times b_i$

Надежность	0,3	3	0,9	4	1,2
Наглядность	0,1	3	0,3	5	0,5
Быстродействие	0,2	3	0,6	5	1
Энергосбережение	0,2	4	0,8	4	1
Удобство экспл-ции	0,2	3	0,6	3	0,8
ИТОГО	1,00		3,2		4,5

Таблица 4.12. Оценка организационной эффективности внедрения результатов разработки.

Результаты анализа показали, что внедрение и эксплуатация модернизированного тиратрона ТПИ1-10к/50 обеспечит большую надежность и быстродействие в рамках определенного объекта (например, электрофизической установки). Эффективность производственного цикла будет увеличена от 3,2 до 4,5 баллов, хотя некоторые показатели эффективности останутся без изменений.

Выводы по главе

В данном разделе ВКР «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» были решены все поставленные задачи:

- Определены основные потребители результатов проекта
- Проведен SWOT- анализ проекта
- Проведена оценка научно-технического уровня проекта и определено, что данный проект имеет высокую значимость теоретического и практического уровня.
- Осуществлено планирование работ в рамках НТИ. Ожидаемое время реализации исследования составляет 66 рабочих дней.
- Составлена смета НТИ. Общие расходы составили 197 768 рублей. Стоимость материальных затрат, необходимых для проведения НТИ, при этом составила 13 368 рублей. Расходы на заработную плату персонала с учетом страховых отчислений составляют 184 400 рублей.

5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Объектом исследования являются характеристики газоразрядного коммутатора – тиратрона с холодным катодом типа ТПИ1-10к/50. Исследования проводятся на экспериментальном стенде. В ходе экспериментальной работы со стендом проводятся измерения электрических сигналов при помощи осциллографа и импульсных высоковольтных делителей.

Целью данного раздела является анализ и оценка вредных и опасных факторов, которые могут оказать воздействие на персонал, занимающийся проведением исследований на экспериментальном стенде. Так же рассмотрены вопросы, касающиеся непосредственно техники безопасности, пожарной профилактики и охраны окружающей среды, даны рекомендации по созданию оптимальных условий труда.

5.1 Профессиональная социальная безопасность

5.1.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть при проведении исследования

Согласно номенклатуре, опасные и вредные факторы по ГОСТ 12.0.003-74 делятся на следующие группы:

- физические;
- химические;
- психофизиологические;
- биологические.

В ходе анализа экспериментального стенда и режимов его работы, были выявлены опасные и вредные факторы, которые представлены в таблице 13.

Источник фактора	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-74)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
<p>Источник высокого напряжения;</p> <p>Работа в помещении;</p>	<p>1. Отклонение показателей микроклимата в помещении.</p> <p>2. Повышенное содержание озона в воздухе.</p> <p>3. Недостаточная освещенность.</p> <p>4. Умственное перенапряжение.</p>	<p>1. Электрический ток.</p>	<p>– СанПиН 2.2.4-548-96, ГОСТ 12.1.005-88. Параметры микроклимата;</p> <p>– ГН 2.1.6.695-98. Нормы содержания озона в воздухе рабочей зоны;</p> <p>– СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение;</p> <p>– ГОСТ 12.1.038–82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.</p>

Таблица 5.1. Опасные и вредные факторы при проведении работ с экспериментальным стендом.

5.1.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов

Вредные факторы

Отклонение параметров микроклимата в помещении

Работа с рассматриваемым стендом относится к легкой I-б. Оптимальные условия микроклимата в производственных помещениях - это такие условия, при которых человек чувствует себя комфортно в течение рабочей смены. Ниже показаны оптимальные величины показателей для микроклимата в холодный и теплый период года для группы 1б, согласно СанПиН 2.2.4.548-96:

- Оптимальная температура в теплое время года составляет 22-24 °С, а в холодное 21-23 °С;
- Относительная влажность воздуха 40-60 % вне зависимости от времени года, допускается 70% в холодное время года;
- Скорость движения воздушных потоков в холодное время года составляет 0,1 м/с; в теплое время года – 0,2 м/с.

Для создания благоприятного микроклимата, необходимо использовать водяное отопление с применением радиаторов, а также систему кондиционирования рабочего помещения.

Повышенное содержание озона в воздухе

В процессе работы стенда, некоторые металлические части находятся под высоким напряжением. В результате разрядных явлений на поверхности металлов, происходит генерация молекул озона.

Высокая окисляющая способность озона и образование во многих реакциях с его участием свободных радикалов кислорода определяют его высокую токсичность. Воздействие озона на организм может приводить к преждевременной смерти.

Наиболее опасное воздействие высоких концентраций озона в воздухе:

–на органы дыхания прямым раздражением;

–на холестерин в крови человека с образованием нерастворимых форм, приводящим к атеросклерозу;

–на органы размножения у самцов всех видов животных, в том числе и человека (вдыхание этого газа убивает мужские половые клетки и препятствует их образованию). При долгом нахождении в среде с повышенной концентрацией этот газ может стать причиной мужского бесплодия.

Озон в Российской Федерации отнесён к первому, самому высокому классу опасности вредных веществ в соответствии с ГН 2.1.6.695-98. Нормативы по озону:

–предельно допустимая концентрация (ПДК) в воздухе рабочей зоны 0,1 мг/м³.

При этом, порог человеческого обоняния приближённо равен 0,01 мг/м³.

Необходимым мероприятием для устранения воздействия данного фактора на персонал является вытяжная вентиляция рабочего помещения

Недостаточная освещенность

Естественное и искусственное освещение рабочих помещений должно обеспечивать освещенность, достаточную для безопасного выполнения работ, пребывания и передвижения людей.

В рабочих помещениях рациональное освещение играет чрезвычайно важную роль, так как при правильной организации оно способствует уменьшению зрительного утомления и улучшению функционального состояния организма, обеспечивает благоприятную санитарную обстановку труда и благоустройство рабочих помещений. Независимо от типа освещения, оно должно обеспечить достаточный уровень освещенности и равномерное распределение света на рабочих местах и в рабочих помещениях, защиту глаз от слепящего действия источников света и от чрезмерно высоких яркостей, наконец, наиболее благоприятный для глаза и организма спектр источников света.

Расчет искусственного освещения

Верно спроектированное и выполненное производственное освещение улучшает условия зрительной работы, понижает астеничность, содействует увеличению производительности труда, благотворно воздействует на производственную среду, оказывая позитивное психологическое действие на труженика, увеличивает сохранность труда и понижает травматизм.

Требования к освещенности в помещениях, где установлены компьютеры, следующие: при выполнении зрительных работ высокой точности общая освещенность должна составлять 300 лк, а комбинированная – 750 лк; аналогичные требования при выполнении работ средней точности – 200 и 300 лк соответственно.

Кроме того, все поле зрения должно быть освещено достаточно равномерно – это основное гигиеническое требование.

Расчет освещения производится для комнаты площадью 24 м^2 , ширина которой 4 м, длина – 6 м, высота – 3,5 м. Воспользуемся методом светового потока.

Для определения количества светильников определим световой поток, падающий на поверхность по формуле:

$$F=(E \cdot K \cdot S \cdot Z)/n \quad (5.2)$$

где F – рассчитываемый световой поток, Лм;

E – нормированная минимальная освещенность, Лк (определяется по таблице).

$E = 300$ Лк; S – площадь освещаемого помещения (в нашем случае $S = 24$ м²);

Z – отношение средней освещенности к минимальной (обычно принимается равным 1, 1.1, 2, пусть $Z = 1,1$);

K – коэффициент запаса, учитывающий уменьшение светового потока лампы в результате загрязнения светильников в процессе эксплуатации (его значение зависит от типа помещения и характера проводимых в нем работ и в нашем случае $K = 1,5$);

n – коэффициент использования, выражается отношением светового потока, падающего на расчетную поверхность, к суммарному потоку всех ламп и исчисляется в долях единицы.

Значение коэффициентов РС и РП были указаны выше: РС = 40 %, РП = 60 %.

Значение n определим по таблице коэффициентов использования различных светильников. Для этого вычислим индекс помещения по формуле:

$$I=S/(h \cdot (A+B)) \quad (5.3)$$

где S – площадь помещения, $S = 24$ м²;

h – расчетная высота подвеса, $h = 3,42$ м;

A – ширина помещения, $A = 4$ м;

B – длина помещения, $B = 6$ м.

Подставив значения получим: $I=24/(3,42 \cdot (6+4))=0,70$

Зная индекс помещения I находим $n = 0,22$ Подставим все значения в формулу для определения светового потока F : $F=(300 \cdot 1,5 \cdot 24 \cdot 1,1)/0,22=54000$ Лм

Для освещения выбираем люминесцентные лампы типа ЛБ40-1, световой поток которых $F = 4320$ Лк.

Рассчитаем необходимое количество ламп по формуле:

$$N=F/F_{\text{л}} \quad (5.4)$$

где N – определяемое число ламп;

F – световой поток, $F = 54000$ Лм;

$F_{\text{л}}$ – световой поток лампы, $F_{\text{л}} = 4320$ Лм. $N=54000/4320=12$ шт.

При выборе осветительных приборов используем светильники типа ОД. Каждый светильник комплектуется двумя лампами.

Умственное перенапряжение

Наиболее эффективные средства предупреждения утомления при работе – это средства, нормализующие активную трудовую деятельность человека. На фоне нормального протекания производственных процессов одним из важных физиологических мероприятий против утомления является правильный режим труда и отдыха (СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03).

Существуют следующие меры по снижению влияния монотонности:

- необходимо применять оптимальные режимы труда и отдыха в течение рабочего дня;
- соблюдать эстетичность производства.

Для уменьшения физических нагрузок организма во время работы рекомендуется использовать специальную мебель с возможностью регулировки под конкретные антропометрические данные, например, эргономичное кресло.

Анализ опасных факторов

Электрический ток

Степень опасного воздействия на человека электрического тока зависит от:

- рода и величины напряжения и тока;
- частоты электрического тока;
- пути прохождения тока через тело человека;
- продолжительности воздействия на организм человека;
- условий внешней среды.

В основе работы экспериментального стенда лежит процесс разрядки накопительной емкости через исследуемый тиратрон. Напряжение, до которого заряжается емкость может достигать 50 кВ. Кроме того, в работе стенда есть источник напряжения до 2 кВ для питания вспомогательного разряда узла запуска.

Электрический ток высокого напряжения оказывает на человека термическое воздействие, вызывает сбой в работе сердца, вплоть до его остановки. Удар током может вызвать сбой в работе нервной системы, например, беспорядочные сокращения мышц. Острая электро-травма может стать причиной нарастающей асистолии.

Основными мероприятиями по защите от электропоражения являются:

- обеспечение недоступности токоведущих частей путем использования изоляции в корпусах оборудования;
- применение средств коллективной защиты от поражения электрическим током;
- защитного заземления;
- защитного зануления;
- защитного отключения;
- использование устройств бесперебойного питания.

Технические способы и средства применяют отдельно или в сочетании друг с другом так, чтобы обеспечивалась оптимальная защита.

5.2 Экологическая безопасность

5.2.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду

При разработке, исследовании, хранении, эксплуатации и утилизации прибора не происходит загрязняющих выбросов в окружающую среду.

Проведение экспериментов над исследуемым тиратроном не представляет угрозы окружающей среде, поскольку не происходит выбросов вредных веществ в воздух.

5.2.2. Анализ «жизненного цикла» объекта исследования.

Заявленный ресурс тиратрона типа ТПИ1-10к/50 составляет не менее 10^6 импульсов.

5.2.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды.

При выходе прибора из строя, его следует утилизировать заводом-изготовителем (ООО «Импульсные технологии», г. Рязань).

Перед утилизацией составляется акт списания. Если прибор не подлежит ремонту и эксплуатации, это подтвердит технический осмотр и выведенное на основании его результатов экспертное заключение, прибор разбирается на составные компоненты: керамические изоляторы и металлические электроды.

Полученные в ходе утилизации материалы можно будет использовать как новое сырье в дальнейшем производстве. Согласно ГОСТ 17.1.3.13-86 исследуемый тиратрон не наносит вред гидросфере. Основные материалы, входящие в состав исследуемого тиратрона – керамика (Al_2O_3), медь, серебро, сталь.

5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

5.3.1 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть при проведении исследований

Наиболее вероятным ЧС, которое может возникнуть в процессе проведения экспериментов – пожар. Кроме того, ЧС может возникнуть при стихийных явлениях и техногенных авариях.

Общие требования к пожарной безопасности даны в ГОСТ 12.1.004. В соответствии с общесоюзными нормами технологического проектирования все производственные здания и помещения по взрывопожарной опасности подразделяются на категории А, Б, В, Г и Д.

Лаборатория, в которой проводятся эксперименты, по взрывопожароопасности подходит под категорию В. Горючими компонентами в кабинете являются: изоляция кабелей, расходные материалы для печатной техники, мебель.

5.3.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС

Мероприятия по пожарной профилактике:

- организационные: правильная эксплуатация оборудования, правильное содержание зданий, территории, противопожарный инструктаж рабочих и служащих;
- технические: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- режимные: запрещение курения в неустановленных местах, производства электросварочных работ в пожароопасных помещениях;
- эксплуатационные: своевременные профилактические осмотры, ремонты, и испытания.

В связи с наличием в помещении электроустановок под напряжением рекомендуется применять углекислотные огнетушители.

Здание оснащено автоматическим средством обнаружения пожара – пожарной сигнализацией. В кабинете размещено первичное средство пожаротушения: ручной огнетушитель типа ОУ-3 – предназначенный для тушения пожаров различных типов, которые получили широкое распространение.

Степень огнестойкости здания, а также конструктивная и функциональная пожарная опасность регламентирует СНиП 21-01-97. Здание, в котором расположено исследуемое помещение, выполнено из огнестойких материалов – кирпича и бетона. При проектировании этого здания предусмотрены пути эвакуации работников в случае пожара.

В случае внезапного возгорания ни в коем случае нельзя паниковать, необходимо сразу принимать оперативные действия:

-необходимо обесточить сеть, питающей прибор;

-изолировать источник возгорания;

-закрыть форточки (чтобы не возникал сквозняк, который может усилить процесс горения);

-устранить источник возгорания при помощи огнетушителя, вызвать пожарную часть.

В случае, если нет возможности устранить источник возгорания самостоятельно, необходимо, по возможности изолировать источник возгорания, вызвать пожарную часть, эвакуироваться.

5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.4.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства

В соответствии Трудовым Кодексом РФ и правовыми нормами обеспечения безопасности предусмотрена рациональная организация труда в течение смены, которая предусматривает:

- длительность рабочей смены не более 8 часов;
- установление двух регламентируемых перерывов (не менее 20 минут после 1-2 часов работы, не менее 30 минут после 2 часов работы);
- обеденный перерыв не менее 40 минут.

При приеме на работу обязательный медицинский осмотр и периодический во время работы.

Каждый сотрудник должен пройти инструктаж по технике безопасности перед приемом на работу и в дальнейшем, должен быть пройден инструктаж по электробезопасности и охране труда.

5.4.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

Помимо работ непосредственно с экспериментальным стендом, где персонал проводит лишь малую часть своего рабочего времени, в его обязанности входит работа за компьютером, связанная с обработкой экспериментальных данных и написанием статей.

При размещении рабочих мест с компьютерами расстояние между рабочими столами с мониторами (в направлении тыла поверхности одного видеомонитора и экрана другого видеомонитора), должно быть не менее 2,0 м, а расстояние между боковыми поверхностями мониторов - не менее 1,2 м.

Рабочие места с ПК при выполнении работы, требующей значительного умственного напряжения или высокой концентрации внимания, рекомендуется изолировать друг от друга перегородками высотой (1,5 - 2,0) м.

Экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии (600 – 700) мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов.

Конструкция рабочего стола должна обеспечивать оптимальное размещение на рабочей поверхности используемого оборудования с учетом его количества и конструктивных особенностей, характера выполняемой работы.

При этом допускается использование рабочих столов различных конструкций, отвечающих современным требованиям эргономики.

Поверхность рабочего стола должна иметь коэффициент отражения 0,5 - 0,7. Конструкция рабочего стула (кресла) должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы при работе на ПЭВМ, позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины для предупреждения развития утомления.

Тип рабочего стула (кресла) следует выбирать с учетом роста пользователя, характера и продолжительности работы с ПЭВМ. Рабочий стул (кресло) должен быть подъемно-поворотным, регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки.

Компьютер широко применяется в офисе, в производстве. Применение компьютерных технологий принципиально изменило характер труда офисных работников и требования к организации и охране труда. Несоблюдение требований безопасности при работе за компьютером приводит к дискомфорту работников: возникают головные боли и резь в глазах, появляются усталость и раздражительность. Может нарушаться сон, ухудшается зрение, начинают болеть

руки, шея, поясница, что приводит в конечном итоге к понижению качества и эффективности работы работника, и, как следствие, всего предприятия.

К требованиям работы за компьютером можно отнести:

– использование комбинированного рабочего времени, т.е. совмещение работы письменного характера и работы за компьютером (если основная часть работы проходит за компьютером);

– использование ПЭВМ исключительно в рабочих целях;

– содержание рабочего стола с компьютером в порядке для наиболее комфортной работы за ним;

– выполнение ряда специальных упражнений для глаз во время регламентированного перерыва.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью данной ВКР являлось испытание прототипа тиратрона с холодным катодом и выбор условий горения вспомогательного разряда и схем запуска, обеспечивающих наносекундную стабильность срабатывания тиратрона. В результате работы были определены особенности работы модернизированного узла запуска, а также проведены испытания данного тиратрона в различных схемах запуска.

В рамках литературного обзора был проведён анализ конструкции тиратрона с узлом запуска на основе вспомогательного тлеющего разряда и принцип его работы в различных схемах запуска. Рассмотрены механизмы развития сильноточного разряда в основном разрядном промежутке и вспомогательного разряда в узле запуска. Рассмотрены различные схемы запуска тиратронов с холодным катодом и определены их отличительные особенности. Установлены проблемы, связанные с узлом запуска серийно-выпускаемых тиратронов типа ТПИ1-10к/50. Приведено описание конструкции модернизированного тиратрона ТПИ1-10к/50.

Проведенный литературный обзор и анализ текущих исследований в области импульсных разрядов низкого давления применительно к тиратронам с холодным катодом свидетельствуют о том, что существует необходимость дальнейших исследований в этой области, направленных на модернизацию конструкции тиратронов.

В третьем разделе настоящей работы рассмотрены особенности вольтамперных характеристик и даны рекомендации по поводу выбора режима горения вспомогательного разряда в узле запуска. Представлены данные по стабильности срабатывания исследуемого тиратрона в различных схемах запуска. Отличительной особенностью первой схемы запуска является относительно

большое время запаздывания срабатывания тиратрона 400 нс, при этом разброс этих времен для 50 импульсов составляет ± 4 нс. Во второй схеме была получена стабильность 110 ± 3 нс. В третьей схеме запуска была получена стабильность запуска 87 ± 2.5 нс. Наиболее оптимальной можно считать именно третью схему, не только благодаря наилучшим характеристикам стабильности по сравнению с остальными, но и потому что в этой схеме не происходит ответвление тока вспомогательного разряда в цепь запуска благодаря использованию конденсатора C_T , через который подается импульс запуска.

Проведенный анализ научно-технического уровня исследования, в рамках раздела «финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение», показал, что исследование имеет высокую значимость для прикладных и научно-исследовательских областей импульсной техники, однако не используется в широком спектре отраслей.

В рамках раздела «социальная ответственность» определены опасные и вредные факторы, имеющие место в работе с экспериментальным стендом. Разработаны профилактические меры по предотвращению чрезвычайных ситуаций при работе с экспериментальным стендом, а также необходимые меры безопасности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Bochkov V.D., Dyagilev V.M., Ushich V.G., Frants O.B., Korolev Y.D., Shemyakin I.A., Frank K. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2001. V. 29. P. 802.
2. Bickel P., Christiansen J., Frank K., Gortler A., Hartmann W., Kowalewicz R., Linsenmeyer A., Kozlik C., Stark R., Wiesneth P. // IEEE Trans. Electron Devices. 1991. V. 38. P. 712.
3. Frank K., Dewald E., Bickes C., Ernst U., Iberler M., Meier J., Pruker U., Rainer A., Schlaug M., Schwab J. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1999. V. 27. P. 1008.
4. Korolev Y.D., Landl N.V., Geyman V.G., Bolotov A.V., Kasyanov V.S., Nekhoroshev V.O., Kovalsky S.S. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2015. V. 43. P. 2349.
5. Landl N.V., Korolev Y.D., Frants O.B., Geyman V.G., Bolotov A.V. // J. Phys.: Conf. Series. 2015. V. 652. 012050.
6. Meena B.L., Rai S.K., Tyagi M.S., Pal U.N., Kumar M., Sharma A.K. // J. Phys.: Conf. Series. 2010. V. 208. 012110.
7. Логачев П.В., Кузнецов Г.И., Корепанов А.А., Акимов А.В., Шиянков С.В., Павлов О.А., Старостенко Д.А., Фатькин Г.А. // ПТЭ. 2013. Вып. 6. С. 42.
8. Акимов А.В., Акимов В.Е., Бак П.А., Бочков В.Д., Вехорева Л.Т., Корепанов А.А., Логачев П.В., Панов А.Н., Старостенко Д.А., Шилин О.В. // ПТЭ. 2012. Вып. 2. С. 78.
9. Korolev, Yu. D.; Landl, N. V.; Geyman, V. G.; Frants, O. B.; Shemyakin, I. A.; Kasyanov, V. S.; Bolotov, A. V. // Plasma Physics Reports. 2018. V. 44. P. 110–117.
10. Korolev Y.D., Frank K. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1999. V. 27. P. 1525.
11. Kozyrev A.V., Korolev Y.D., Rabotkin V.G., Shemyakin I.A. // J. Appl. Phys. 1993. V. 74. P. 5366.

12. Bochkov V. D., Kolesnikov A. V., Korolev Y. D., Rabotkin V. G., Frants O. B., Shemyakin I. A. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1995. V. 23. P. 341–346.
13. Kumar N., Pareek N., Pal U. N., Verma D. K., Prajapati J., Kumar M., Kumar B. L., Prakash R. // Pramana-Journ. Phys. 2014.V. 82. P. 1075–1084.
14. Zhang J., Zhao J. P., Zhang Q. G. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2014. V. 42. P. 2037–2041.
15. Bergmann K., Danylyuk S. V., Juschkin L. // J. Appl. Phys. 2009. V. 106. Article Number 073309.
16. Y. D. Korolev, O. B. Frants, N. V. Landl, I. A. Shemyakin, and V. G. Geyman, “High-current stages in a low-pressure glow discharge with hollow cathode,” IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 41, no. 8, pp. 2087–2096, Aug. 2013.
17. E. Dewald, K. Frank, D. H. H. Hoffman, R. Stark, M. Ganciu, B. N. Mandache, M. G. Nistor, A. M. Pointu, and I. I. Popescu, “Pulsed intense electron beams generated in transient hollow cathode discharges: fundamentals and applications,” IEEE Trans. Plasma Sci. vol. 25, no. 2, pp. 272–278, Apr. 1997.
18. Yu.D. Korolev, N.V. Landl, V.G. Geyman, O.B. Frants, I.A. Shemyakin, V.O. Nekhoroshev // Fizika Plazmy, 2016, Vol. 42, No. 8, pp. 775–784
19. Landl N.V., Korolev Y.D., Frants O.B., Shemyakin I.A., Geyman V.G. // Book Series: Proceedings - International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. 2014. P. 361.
20. Королев Ю.Д., Ландль Н.В., Гейман В.Г., Франц О.Б., Шемякин И.А., Нехорошев В.О. // Физика плазмы. 2016. Т. 42. С. 775.
21. Ryabchikov A.I., Ryabchikov I.A., Stepanov I.B. Usov U.P. // Surface Coatings Technology. 2007. V. 201. P. 6523.

22. Ryabchikov A.I. // Rev. Sci. Instruments. 1992. V. 63. P. 2425.
23. Devyatkov V.N., Koval N.N., Schanin P.M., Grigoryev V.P., Koval T.V. // Laser Part. Beams. 2003. V. 21. P. 243.
24. Korolev Y.D., Frants O.B., Landl N.V., Suslov A.I. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2012. V. 40. P. 2837.
25. Korolev Y.D. // Russ. J. Gen. Chem. 2015. V. 85. P. 1311.
26. Акишев Ю.С., Апонин Г.И., Грушин М.Е., Каральник В.Б., Мониц А.Е., Панькин М.В., Трушкин Н.И. // Физика плазмы. 2007. Т. 33. С. 642.
27. Н.В. Ландль, Ю.Д. Королев, В.Г. Гейман, О.Б. Франц, Г.А. Аргунов // Известия высших учебных заведений. Физика . – 2017 . – Т.60, №8 . – с.5-12 .

Приложение I

TPI1-10k/50 cold cathode tyratron triggering stability

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4НМ61	Аргунов Григорий Александрович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор	Королёв Юрий Дмитриевич	доктор физико-математических наук, профессор		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Парнюгин Александр Сергеевич	кандидат педагогических наук		

Introduction

Since the end of 1980s, considerable interest has been generated in a new type of low-pressure high-current switching device with a cold cathode, often named the pseudospark switch [1 - 8]. The principle of function of the switch resembles that of a classical thyatron with a grounded grid. Then the term grounded-grid thyatron is also used in [9 - 11]. In early publications, there were described a variety of switch prototypes based on the demountable experimental chambers with external gas filling. As a result of the investigations, the sealed-off switches had been developed [9] in which the operating pressure is maintained due to a heated hydrogen reservoir. Currently, the Pulsed Technology Ltd., Ryazan, Russia [<http://www.pulsetech.ru/index.htm>], produces the switches commercially.

This chapter refers to common principles of the sealed-off TPI1-10k/50 cold cathode thyatron operation. Proceeding from the switch design and the methods of triggering, the TPI1-10k/50 switches, referred to as the cold cathode thyatrons. The schematic design of the devices and the principle of their operation and triggering are described.

1 Common principle of the cold cathode thyatron operation

Schematic design of the thyatron is shown in Figure 1. The thyatron is a cylindrical device with a height of 10 to 20 cm and a diameter of 3 to 12 cm. The electrodes of the thyatron are located inside the dielectric cylinder, and its contacts are led outside through a cylindrical flange. The diameter of the holes in the electrodes of the main discharge gap is comparable with the distance between them, and amounts to several millimeters.

In the initial state the voltage is applied between the electrodes of the main discharge gap - the anode 2 and the cathode 3. The figure shows a simplified schematic design of a single-section device, i.e. the main electrode gap consists of only two electrodes forming one discharge section. In mass production devices, a two-section

design of the main discharge gap is used, where a gradient electrode is placed between the main electrodes. The operating pressure in the cold-cathode thyatron is maintained by the hydrogen generator, similarly to the classic thyatrons with a heated cathode. The heater of the hydrogen generator is supplied with a voltage (5 - 6) V at currents of about 2 A.

The main gap communicates with the cathode cavity through the holes in the upper plane of the cathode 3.

The cathode cavity is an important part of the electrode system, in which the breakdown of the main gap begins. In order to provide a prebreakdown current, it is necessary to create plasma in the cavity of the cathode, which would ensure the electrons flow through the cathode holes. To this end, the triggering unit is located in the cavity of the cathode 3. The most frequently used triggering units are based on an auxiliary glow discharge (AGD) and a flashover breakdown along the surface of a dielectric or semiconductor.

The paper will consider a thyatron with a triggering unit based on an auxiliary glow discharge. In the triggering unit electrode system, due to the power source V_1 , a glow discharge with a hollow cathode burns. This is usually a stationary discharge at typical currents (10 - 20) mA. The voltage of the trigger pulse has (2-3) kV amplitude. It is applied, as a rule, between one of the electrodes of the triggering unit and the cathode 3. A glow discharge with hollow cathode and hollow anode is ignited at a pulse current of 10 A and higher under the action of the triggering pulse. Plasma arises in the cavity of the cathode 3, and the plasma's electrons are extracted into the main gap through the holes in the upper plane of the electrode C. This leads to the generation of a high-current discharge in the main gap, which at its initial stage is a pulsed glow discharge with a hollow cathode [2, 3].

When an auxiliary discharge burns, in addition to the current between the electrodes of the triggering unit, a parasitic current inevitably arises which flows to the

cathode 3. The presence of a parasitic current leads to a decrease of the breakdown voltage of the main gap.

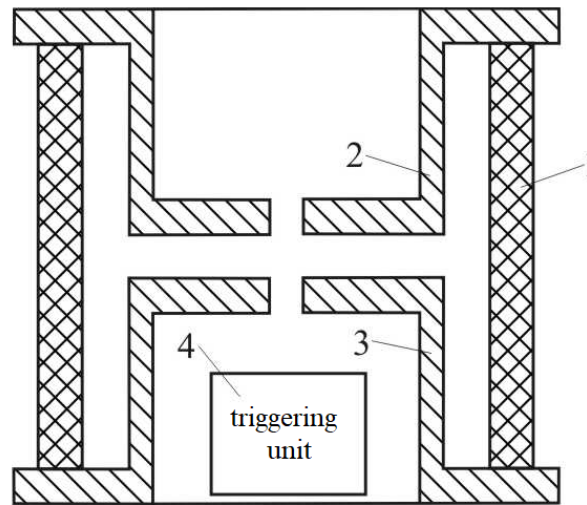


Figure 1. Common design of the switch. 1 - dielectric cylinder, 2 - hollow anode, 3 - hollow cathode, 4 – triggering unit.

Operating pressure in the spark gap is about $(7 \cdot 10^{-2} - 7 \cdot 10^{-1})$ Tor. In such conditions the mean free path of electrons exceeds the length of the main gap. In this case, the breakdown voltage of the main gap of the pseudo-spark switch corresponds to the left branch of the Paschen's curve. The mechanism of initiation of breakdown differs from the classical mechanism of development of a single electron produced avalanche. In the case of a pseudo-spark discharge, a significant pre-breakdown current is required to initiate the discharge [4].

2 Design features of TPI1-10k/50 thyatron

The design of the thyatron TPI1-10k/50 is shown in Figure 2. The outer diameter of the ceramic body of the thyatron is 95 mm. The main electrode gap includes the anode A and the hollow cathode C which has a complex shape. In the initial stat the voltage is applied between these electrodes. This device has a two-section design of the main gap with a gradient electrode between electrodes A and C. The electrode distance in

each section for diverse devices of this type is usually (4-5) mm. In the operating pressure range, the typical breakdown voltage of a single section reaches 25 kV [4, 5, 10]. Accordingly, the operating anode voltage of a two-section device can reach 50 kV.

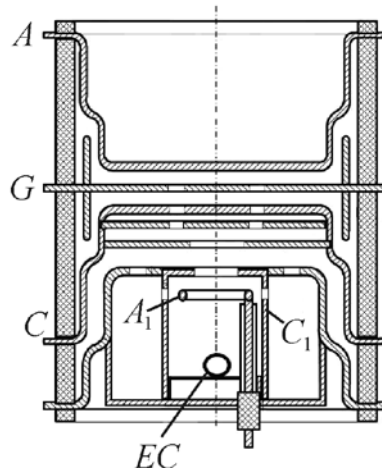


Figure 2. A schematic construction of the thyatron TPI1-10k/50. A - thyatron anode, C - hollow cathode of thyatron, G - gradient electrode, A₁ - ring anode of auxiliary glow discharge, C₁ - hollow cathode of auxiliary glow discharge, EC is a high-emissive tablet

The main interelectrode gap communicates with the cathode cavity through the holes in the upper plane of the electrode C. The diameter of the holes is commensurable with the interelectrode distance of the main gap sections. The relationship between the gap length in the main gap and the gas pressure is such that the discharge corresponds to the conditions of the left branch of the Paschen's curve.

It can be seen from the design of the electrode system that the gradient electrode G protects the inner surface of the device body from dusting of electrode material evaporation. The triggering unit of the switch includes electrodes A₁ and C₁. An auxiliary glow discharge burns between the electrodes A₁ and C₁ in the initial state. A distinctive feature of the design of the hollow cathode C₁ is the presence of the so-called high-emission EC tablet inside it. Its role is to facilitate the ignition of the auxiliary discharge and reduce the voltage of its burning. The tablet is placed near the bottom of the cathode

cavity and represents a cylinder with a diameter of 10 mm. It is produced of powder materials by hot pressing. The main component is tungsten (about 90%), to which aluminum oxide and cesium carbonate are added.

A hydrogen generator is used to adjust the pressure (some switches contain deuterium). Since the device is sealed off, it is impossible to measure the absolute pressure in it. In this case, the voltage on the hydrogen generator is used as the relative value of the gas pressure. Typical voltage value on it is 5 - 7 V, at current up to 2 A. With the voltage off, the heater is cold and the hydrogen generator works as an absorbent. In this case, the gas pressure in the device is low. It is necessary to apply voltage to the heater to increase the gas pressure in the device. By adjusting the heater voltage, it is possible to change the operating pressure in the device.

3 The mechanism of current transport in the main electrode gap

In the initial state, a voltage $+ V_0$ is applied to the main electrode gap. An auxiliary glow discharge with a hollow cathode is sustained in the electrode system of the triggering unit. Commonly this is a stationary discharge at typical currents (10 - 20) mA. A voltage trigger pulse (2 - 3) kV is applied between one of the electrodes of the triggering unit and the cathode C. A glow discharge with a hollow cathode and a hollow anode is ignited at a pulsed current of 10 A and higher under the action of this pulse. A plasma arises in the cavity C. Electrons from the plasma are extracted into the main gap through the holes in the upper plane of the electrode C. This leads to the initiation of a discharge in the main gap [4, 5].

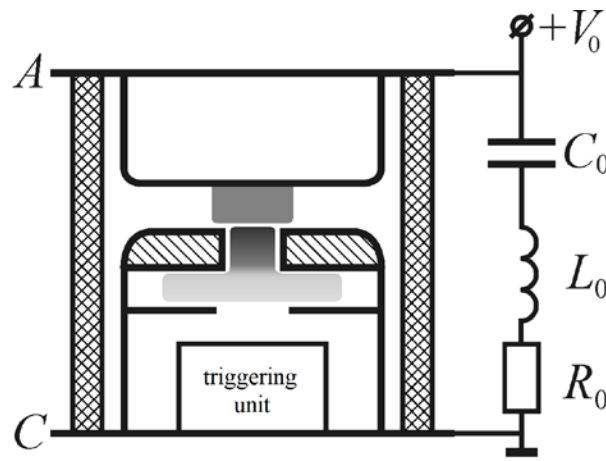


Figure 3. Schematic illustration of experiments on the investigation of dense and superdense pulse glow discharge.

Notably, the role of the hollow cathode in the high-current mode of discharge belongs to the hole on the electrode C axis [2, 4] (Fig. 3). In this case, the thickness of the flat part of the cathode, i.e. the height of the cathode cavity is comparable with its diameter.

A number of contradictions arise that need to be overcome, when choosing the design of the device, the modes of discharge sustaining in the triggering unit and the triggering methods. The most fundamental contradiction is as follows. In order to reduce the breakdown delay time in the main gap relative to the trigger pulse, it is necessary to ensure a good connection between the auxiliary discharge cavity and the hollow cathode C of the main gap. For example, this can be done by increasing the diameter of the cavity hole of the auxiliary discharge electrode. However, in this case, in addition to the main current of the auxiliary discharge between the electrodes of the triggering unit, a parasitic current from the anode to the hollow cathode C inevitably arises. The existence of a parasitic current leads to the appearance of a plasma in the cavity C and to the extraction of electrons from the plasma into the main gap and to a decrease in the breakdown voltage of the basic interval [4].

Figure 4 shows the oscillograms of the current and discharge voltage. Stage I corresponds to the delay time of the breakdown in the main gap. A sharp drop in voltage occurs and a quasi-stationary stage II is established at the end of this stage. At this stage,

the voltage decreases from 1550 to 600 V, and the current increases from 80 to 300 A. This stage corresponds to a dense glow discharge in accordance with the presented terminology [2].

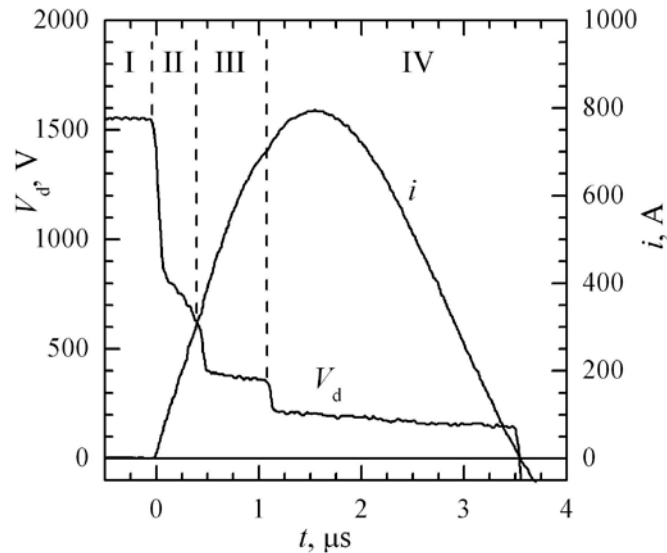


Figure 4. Current and voltage oscillograms, showing the different stages of development of a high-current discharge. $p = 0.6$ Torr, H_2 , $D = 3$ mm, $h = 4$ mm, $V_0 = 1550$ V.

Stage III is so-called superdense glow discharge. Here, spark cathode spots appear on the inner surface of the cathode cavity due to the development of explosive-emission instability. Spots are a source of increased electron emission. Nevertheless, a pronounced arc cathode spot is still missing. In this sense, the discharge properties at this stage resemble mode III of the volt-ampere characteristic of the auxiliary discharge (Figure 5).

Finally, upon transition to stage IV, an arc cathode spot arises at the edge of the cathode aperture from the main electrode gap. The discharge goes into vacuum arc mode. A low voltage at a level of 200 V and a current increase up to 800 A are true to type for this mode of discharge sustaining.

4 The mechanism of current transport in the triggering unit electrode system

Figure 5 shows an example of a current-voltage discharge characteristic for a device when using a EC tablet with increased emissivity. Also the proportion of the parasitic current to the electrode C – i_2/i is given here.

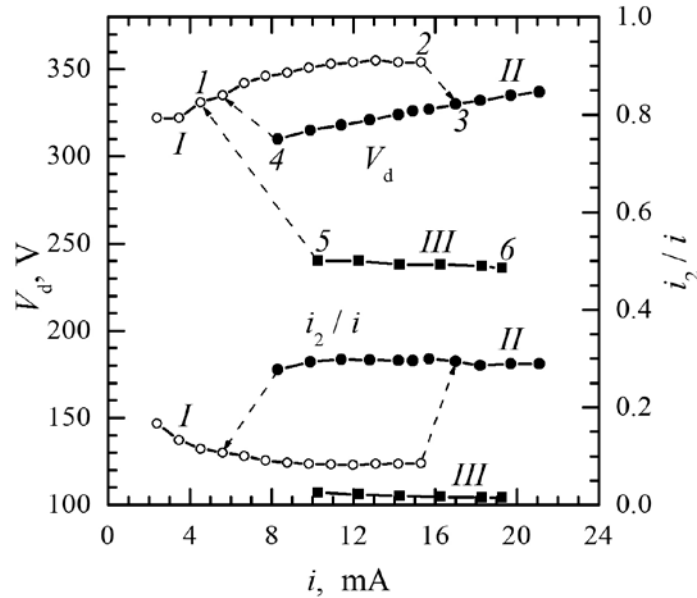


Figure 5. CVC of the auxiliary glow discharge when using a EC tablet with increased emissivity and the proportion of the parasitic current i_2/i on the electrode C. The hydrogen generator voltage is $V_H = 5.6$ V, $R_b = 20$ k Ω .

For these conditions, the breakdown voltage of the triggering unit electrode gap is $V_{br} = 420$ V. A glow discharge with a hollow cathode is ignited after the breakdown. The conditions for its combustion correspond to point 1 in section I of the current-voltage characteristic. If we increase the voltage of the power supply, then the operating point moves to the right along curve I. Decrease of the power source voltage leads to the discharge quenching.

Mode I corresponds to the so-called hindered glow discharge with a hollow cathode. In this mode, the length of the cathode layer (the region of the near-cathode drop in the potential) is comparable with the radius of the cathode cavity. There is no clearly expressed region of the negative-glow plasma. To maintain a discharge in the range of typical currents (4 - 16) mA, an increased voltage is required. It is sustained at the level

(320-350) V. The proportion of the parasitic current in the total current of the auxiliary glow discharge i_2/i is about 8%.

A certain critical value of the current corresponds to the point 2 of the current-voltage characteristic, from which the discharge rapidly changes to the mode corresponding to section II (to point 3). A region of negative-glow plasma arises in the cavity. The discharge transforms from a hindered one into a normal glow discharge with a hollow cathode. The combustion voltage of the discharge, i.e. the voltage drop across the cathode layer decreases by approximately 25 V. Nevertheless, the discharge properties change quite significantly. First, a significant part of the current flows in the form of a parasitic current, i.e. the discharge is partially intercepted through the hole in the electrode C_1 to the cavity of the electrode C. The proportion of the parasitic current in the total discharge current reached 30%. There is a hysteresis in the current-voltage characteristic. In fact, it can be said that the discharge burns between the ring anode A_1 and the cathode cavity of the complex shape, formed by the electrodes C_1 and C. When the voltage of the power supply decreases, the operating CVC point shifts along curve II to the left until point 4 reaches I point.

The same character of current-voltage characteristics with hysteresis occurs for the device in the absence of an emissive tablet. However, in this case the breakdown voltage is much higher.

The strongest effect of the high-emissive tablet to the discharge burning voltage takes place in the region of the III current-voltage characteristic. Mode III corresponds to the situation when a significant fraction of the current begins to be closed on the EC tablet as an emission current. It is noteworthy that the proportion of parasitic current sharply decreases to (1.6 - 2)%. Increase in the auxiliary discharge current doesn't result a transition to mode III when using a tablet with a low content of cesium carbonate. The transfer to this mode could be made if a trigger pulse is applied to the electrode system C_1 and C with current at the level of 10 A. The discharge from modes I and II can be switched to mode III, by a triggering pulse. Then, after the impulse current flows in the

triggering circuit at the level of 10 A, a stationary low-current glow discharge begins to be sustained in section III. Reducing the voltage of the power source and discharge current, leads to the fact that the discharge jumps from mode III to mode I (transition from point 5 to point 1).

In other devices, where the content of cesium carbonate in the tablet increases, only mode III with a low combustion voltage and a small proportion of the parasitic current is realized [8, 10]. It was in this mode that research was conducted to trigger a thyatron with nanosecond stability described in [7]. The current-voltage characteristics of the auxiliary discharge of such a device are shown in Fig. 6.

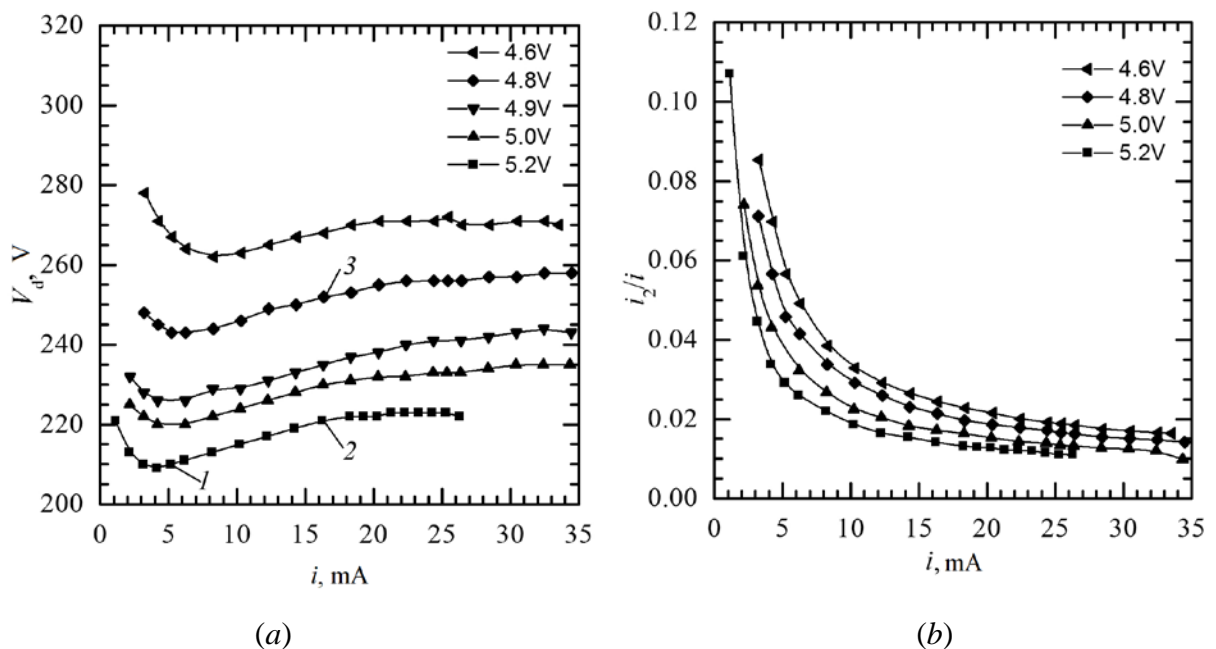


Figure 6. Current-voltage characteristics of the triggering unit discharge (a) and the proportion of parasitic current of the total discharge current (b) for different voltages of the deuterium heater.

$$R_b = 40 \text{ kOhm.}$$

Let us consider the curve for the deuterium generator voltage $V_H = 5.2 \text{ V}$. The breakdown of the triggering unit, i.e. the discharge ignition in the triggering unit occurs at a voltage $V_1 = 410 \text{ V}$. The combustion conditions of the discharge occurring after the breakdown correspond to point 1 of the current-voltage characteristic. The discharge

voltage at this point is $V_d = 210$ V, current is $i = 5$ mA, and gap resistance is $R_d = 42$ kOhm.

As described above, the effect of the trigger pulse on the form of the current-voltage characteristic was observed in [5]. This effect was associated with the fact, that when the current of a trigger pulsed discharge is closed begins circuit contacts on an with the emissive tablet, it changes the properties of the tablet. In the experiments, the trigger pulse had a $V_T = 6.7$ kV amplitude with a pulse duration $1 \mu\text{s}$ at half-height and 160 ns front duration. The maximum discharge current between the electrodes C and C_1 reached 25 A.

It turned out that for the given device the burning voltage of the auxiliary stationary discharge may decrease after the current flow of the pulsed triggering discharge. In particular, for conditions corresponding to point 2, the discharge switches to a mode with a burning voltage $V_d = 175$ V and current $i = 17.1$ mA. However, this discharge mode is not stable. After a while (for example, after a few seconds) the discharge switches back to the burning conditions corresponding to point 2. In addition, it should be noted that this effect exists only when the voltage on the deuterium generator $V_H = (5.1 - 5.2)$. For lower V_H voltages the transition to a lowered combustion voltage mode does not occur.

A similar effect occurs when a breakdown occurs in the main gap. Here there is a high-current discharge, which has a stronger effect on the EC tablet than the trigger discharge. Then the decrease in the burning voltage of the auxiliary glow discharge occurs also at lower gas pressures. In particular, if the gas pressure conditions correspond to $V_H = 4.8$ V, and the current-voltage characteristic corresponds to point 3 ($V_d = 250$ V, $i = 16$ mA), the triggering unit discharge switches to the voltage mode combustion $V_d = 180$ V and current $i = 17.8$ mA after a high-current breakdown between the electrodes A and C_1 . However, in this case too, a reduced combustion voltage discharge is not maintained in a stationary mode. Some time later, the discharge can spontaneously shift to the conditions corresponding to point 3.

5 Electrical triggering circuitry

There are many thyatron triggering circuits. We can spot two types of these - so-called "a classical thyatron triggering circuit" and "a thyatron with a grounded grid triggering circuit".

“A classical thyatron triggering circuit”

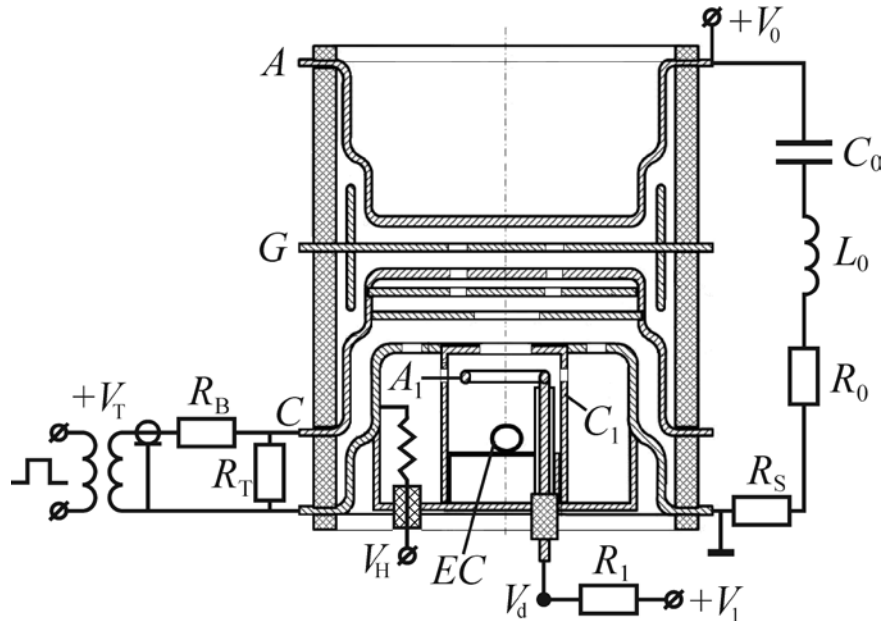


Figure 6. Schematic construction of the TPI1-10k / 50 thyatron and the electrical triggering circuit corresponding to the classic thyatron. A - anode, C - hollow cathode,

G - gradient electrode, A₁ - ring anode of auxiliary discharge, C₁ - hollow cathode of auxiliary discharge, EC - high-emissive tablet, V_H - hydrogen generator power source.

$$C_0 = 10 \text{ nF}, L_0 = 1.3 \text{ } \mu\text{H}, R_0 = 11 \text{ } \Omega, R_T = 10 \text{ k}\Omega,$$

$$R_1 = (10 - 40) \text{ k}\Omega, R_B = 210 \text{ } \Omega, R_S = 0.03 \text{ } \Omega.$$

As can be seen from Fig. 6, the thyatron is in the electrical circuit for switching capacitance C_0 charged to voltage V_0 by the load R_0 . The triggering circuit of the thyatron corresponds to the so-called classical thyatron triggering circuit [8, 16]. Here the electrode C_1 is grounded and plays the role of a hollow cathode. During commutation the discharge current flows between the anode A and the cathode C_1 . In the terminology used in the description of thyatrons with a heated cathode, electrode C plays the role of a

grid. A positive-polarity trigger pulse V_T is applied between this electrode and the ground electrode C_1 .

The auxiliary discharge is ignited between the ring anode A_1 and the hollow cathode C_1 by the power supply V_1 . This is usually a steady glow discharge with a hollow cathode at typical currents (10-20 mA) [10]. The majority of the current flows to the electrode C_1 . This current is denoted as i_1 . However, there is an aperture in the flat part of the electrode C_1 and some parasitic current i_2 also flows to the hollow cathode C . Thus, the total current of the auxiliary glow discharge is $i = i_1 + i_2$.

The principle of operation of the thyratron in the presented scheme is as follows. Before the device triggering, a high voltage V_0 is applied to the anode, and an auxiliary glow discharge maintains in the triggering unit. The V_T triggering pulse is applied between the C and C_1 electrodes, resulting in a pulse discharge with a typical current of (10 - 20) A in this electrode system. The C electrode works as a complex shape hollow anode for the pulsed triggering discharge. As it can be seen from Fig. 6, in the anode cavity there are two baffles with apertures that partially screen the electrode system of the trigger unit from the main electrode gap $A-C$. Nevertheless, when the pulse discharge ignites, the gas discharge plasma is generated in the anode cavity, and in particular in a narrow gap between the plane of the electrode C and the upper partition. Electrons from this plasma are extracted into the main gap and, as a result, in accordance with the mechanism described in [4, 5] a high-current discharge is initiated. The principle of an electron beam obtaining is similar to the principle of a plasma cathode electron accelerator operation [6, 8].

At the first stage of the discharge development in the main gap, the gas-discharge plasma arises between the electrodes G and C . Energy for the discharge development is supplied from the capacity of the lower section. Further (on a nanosecond time scale), a breakdown between the electrodes A and G of the upper section of the device develops. After that, the current of the main discharge begins to flow between the anode A and the hollow cathode C_1 . It is noteworthy, that the emissive tablet closes a significant fraction

of the main discharge current. The EC tablet helps to reduce the burning voltage of not only auxiliary glow discharge, but also high-current pulse discharge in the main gap.

“A thyatron with a grounded grid triggering circuit”

Another widely used trigger circuit is the so-called circuit with a grounded grid [6, 8, 16] (Fig. 7). In the initial state, a voltage V_0 is applied between the main gap electrodes. An auxiliary glow discharge with a hollow cathode is supported by the power supply V_1 between the ring anode A_1 and the hollow cathode C_1 in the triggering unit. Commonly this is a stationary discharge at typical currents (10 - 20) mA. A V_T trigger pulse with a 2 - 3 kV voltage is applied between the electrodes C_1 and C. A glow discharge with a hollow cathode and a hollow anode is ignited at a pulsed current of 10 A and higher under the action of the pulse. Plasma arises in the cavity C. Electrons from the plasma are extracted into the main gap through the holes in the upper plane of the electrode C. This leads to the initiation of a discharge in the main gap [4, 5]. Here, the main part of the current of the high-current discharge closes to the electrode C. Then in the early stages a pulsed glow discharge with a relatively high combustion voltage occurs, and a subsequent decrease in the combustion voltage occurs due to the formation of an arc cathode spot [4].

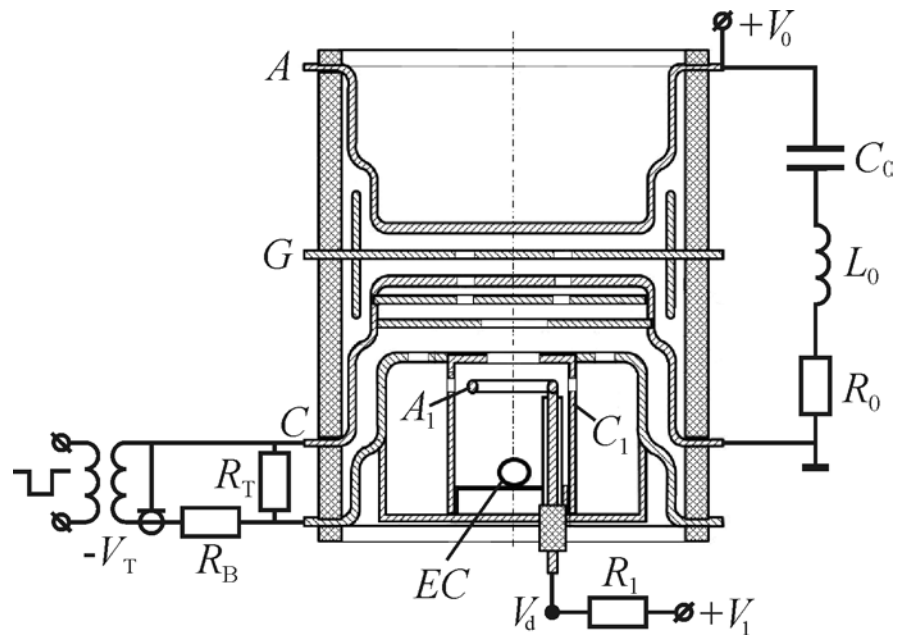


Figure 7. Schematic construction of the TPI1-10k / 50 thyatron and the electrical triggering circuit corresponding to the classic thyatron. A - anode, C - hollow cathode, G - gradient electrode, A₁ - ring anode of auxiliary discharge, C₁ - hollow cathode of auxiliary discharge, EC - high-emissive tablet, V_H - hydrogen generator power source.

6 Drawbacks of the thyatron with a high-emission tablet operation

It was defined that the current of the trigger pulse causes a change of the auxiliary discharge combustion mode in the triggering unit. In turn, the initial combustion modes of the auxiliary discharge affect the delay times of the thyatron switch.

In experiments, the trigger circuit corresponded to the so-called classical thyatron triggering scheme (Fig. 6).

The experimental thyatron had a high-emission tablet with an optimal composition. The CVC of the auxiliary discharge for different pressures is shown in Fig. 8. In this case there is no hysteresis and transitions from one form of maintaining the discharge to the other if compared to the previous described thyatron, where the composition of the tablet is not optimal (Fig. 5).

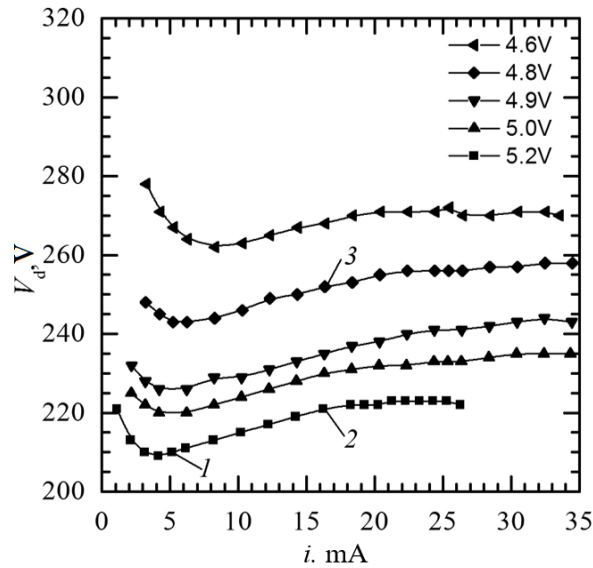


Figure 8. Current-voltage characteristics of the discharge in the triggering unit for various voltages of the deuterium heater. $R_1 = 40 \text{ k}\Omega$.

At the initial state (before the triggering pulse was applied), the auxiliary discharge is sustained at voltage of 250 V and current of 16 mA. Oscillograms of the triggering voltage and current pulses are shown in (Fig. 9 a). After the triggering pulse applying an auxiliary discharge changes its mode; voltage becomes 180 V and the current 17.8 mA.

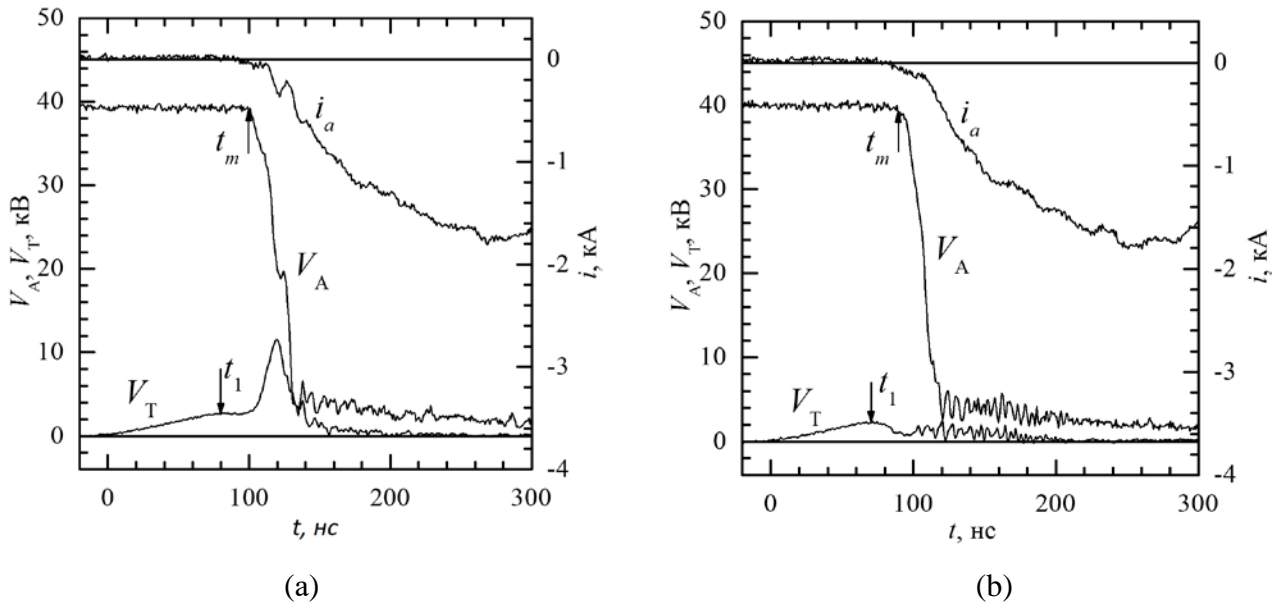


Figure 9. Discharge current i_a , anode voltage V_A and triggering pulse voltage V_T oscillograms at diverse auxiliary discharge modes at $V_H = 4.8$. a) $i = 16 \text{ mA}$, $V_d = 250 \text{ V}$, b) $i = 17.8 \text{ mA}$, $V_d = 180 \text{ V}$.

Transitions between the auxiliary discharge modes occurred spontaneously. The 20 accumulated pulses oscillogram is shown in (Fig. 10). It can be seen that auxiliary discharge mode change is the cause of the thyatron delay time jitter. The auxiliary discharge mode change is explained by the high-emissive tablet properties change caused by pulsed discharge current shortage to it.

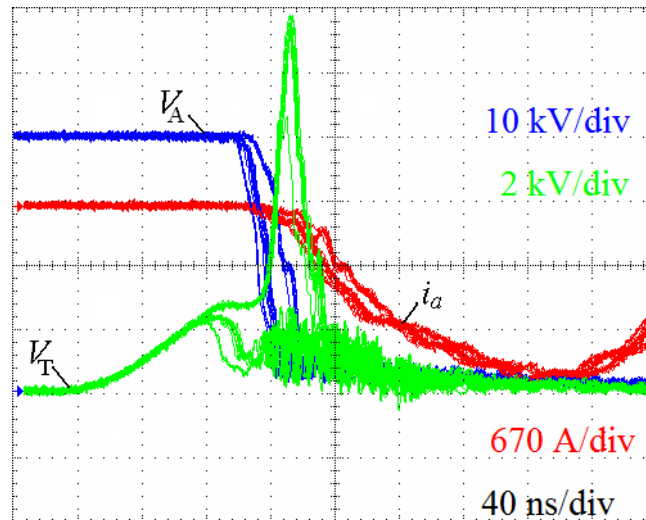


Figure 10. Discharge current i_a , anode voltage V_A and triggering pulse voltage V_T oscillograms, shows the thyatron delay time jitter. $V_H = 4.8$ V, $V_0 = 40$ kV. $i = 16$ mA, $V_d = 250$ B at the first triggering pulse.

7 Statement of the problem

As it can be seen from the literature analysis, the triggering unit of the cold cathode thyatron TPI1-10k|50 is a crucial element. The modes of the auxiliary glow discharge of the triggering unit shape the properties of the whole thyatrone. Noteworthy that the modes of the auxiliary discharge sustaining must not be changed from pulse to pulse to provide a nanosecond triggering stability.

It was found out that auxiliary discharge mode changes are related with unbalanced high-emissive tablet composition too. There is a hysteresis in a current-voltage characteristic until the triggering pulse is applied. But, even a balanced high-emissive tablet composition usage doesn't solve this issue. The auxiliary discharge mode changes by triggering pulse applying.

A new triggering unit without the high-emissive tablet was designed to solve this problem. The triggering unit based on auxiliary glow discharge is used in new construction. Low discharge initiating and sustaining voltages are estimated due to the electrodes' shape used in new device. The new electrodes are cylindrically shaped. The new triggering unit construction is designed to minimize changes of the main electrodes of the thyatron.

So, the main research task of this graduation work is to test sealed-off prototype of thyatron with new triggering unit, and to choose an appropriate auxiliary discharge sustaining modes and triggering circuitry which can provide a nanosecond thyatron triggering stability.

Conclusion

The switch design and the methods of triggering, the TPI1-10k/50 switches, referred to as the cold cathode thyratrons were described. The traits of the operation of the TPI1-10k/50 thyatron were determined. Various electrical triggering circuitry were carried out.

Within the framework of the literature review, a number of questions were considered, with concerning to the cold cathode thyatron. The current transition mechanisms in the main discharge gap and in the triggering unit were considered. The issues associated with the triggering unit of serially-manufactured TPI1-10k/50 thyratrons were identified. The description of the design of the modified TPI1-10k/50 thyatron is given. The most of the constructional changes associated with the triggering unit design.

The analysis of current research in the field of pulsed low-pressure discharges showed that there is a need for further fundamental research in this area.

References

- [1] K. Frank and J. Christiansen, "The fundamentals of the pseudospark and its applications," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 17, no. 5, pp. 748–753, Oct. 1989.
- [2] M. A. Gundersen, "Plasma-based device concepts based on the pseudospark and BLT," in *Physics and Applications of Pseudosparks*, M. A. Gundersen and G. Schaefer, Eds. New York, NY, USA: Plenum, 1990, pp. 331–341.
- [3] P. Bickel *et al.*, "High-repetition rate sealed-off pseudospark switches for pulsed modulators," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 38, no. 4, pp. 712–716, Apr. 1991.
- [4] W. Hartmann and G. Lins, "The spatial and temporal development of pseudospark switch plasmas," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 21, no. 5, pp. 506–510, Oct. 1993.
- [5] A. V. Kozyrev, Y. D. Korolev, V. G. Rabotkin, and I. A. Shemyakin, "Processes in the prebreakdown stage of a low-pressure discharge and the mechanism of discharge initiation in pseudospark switches," *J. Appl. Phys.*, vol. 74, no. 9, pp. 5366–5371, Nov. 1993.
- [6] T. Mehr *et al.*, "Trigger devices for pseudospark switches," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 23, no. 3, pp. 324–329, Jun. 1995.
- [7] Y. D. Korolev and K. Frank, "Discharge formation processes and glow to-arc transition in pseudospark switch," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 27, no. 5, pp. 1525–1537, Oct. 1999.
- [8] A. Larsson, "Gas-discharge closing switches and their time jitter," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 40, no. 10, pp. 2431–2442, Oct. 2012.
- [9] V. D. Bochkov *et al.*, "Sealed-off pseudospark switches for pulsed power applications (current status and prospects)," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 29, no. 5, pp. 802–808, Oct. 2001.
- [10] Y. D. Korolev *et al.*, "Low-voltage triggering for a pseudospark switch with an auxiliary glow discharge," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 29, no. 5, pp. 796–801, Oct. 2001.