

На правах рукописи



ЧЕРКАСОВА Юлия Вадимовна

**РАЗРАБОТКА ГЕНЕРАТОРА МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОММУТАЦИИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА ПРИБОРАМИ С ПОДВИЖНОЙ
СИСТЕМОЙ ЭЛЕКТРОДОВ**

Специальность 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань – 2017

Работа выполнена на кафедре «Общая и экспериментальная физика»
ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Научный руководитель: Власов Александр Николаевич,
доктор технических наук, профессор кафедры
«Общая и экспериментальная физика»,
ФГБОУ ВО «Рязанский государственный
радиотехнический университет», г. Рязань

Официальные оппоненты: Волков Степан Степанович,
доктор физико-математических наук, профессор,
Рязанское высшее воздушно-десантное
командное училище им. генерала армии В.Ф.
Маргелова, профессор кафедры автомобильной
техники г. Рязань

Бочков Виктор Дмитриевич,
кандидат технических наук,
директор ООО «Импульсные технологии»,
г. Рязань

Ведущая организация: Акционерное общество «Энергетический
институт им. Г.М. Кржижановского»
(АО «ЭНИН»), г. Москва

Защита диссертации состоится «20» февраля 2018 г. в 13.30 на
заседании диссертационного совета Д 212.211.03 в ФГБОУ ВО «Рязанский
государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань,
ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО
«Рязанский государственный радиотехнический университет» и на
официальном сайте университета www.rsreu.ru.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим
направлять по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Автореферат разослан «___» _____ 201 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
Д 212.211.03 д.ф.-м.н., профессор



М.В. Чиркин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Сильные импульсные магнитные поля широко используются в физическом эксперименте, в частности, для проведения работ, связанных с детонационным напылением пленок, моделированием разряда линейной молнии, получением импульсных магнитных полей с индукцией до 13 Тл , используемых для проведения биофизических экспериментальных исследований. Для создания таких полей существуют различные методы, рассмотренные разными авторами и объединенные общим принципом – разрядкой конденсаторной батареи через соленоид. Основным недостатком приборов, работающих по данному принципу, является относительно низкая повторяемость пикового значения индукции импульсов магнитного поля из-за отсутствия обратной связи между величиной индукции генерируемого магнитного поля и драйверами силовых элементов, формирующих импульс магнитного поля. Очевидным способом стабилизации пикового значения индукции является обрывание импульса тока на определенном уровне, контролируемом каким-либо датчиком, который можно назвать датчиком индукции или датчиком прерывателя тока. Его задача при определенном значении индукции магнитного поля формировать управляющий импульс заданной амплитуды.

Существует большой ряд устройств, которые могли бы быть использованы в качестве такого датчика. Например, это датчики Холла, датчики тока на основе пояса Роговского, тиратроны, тиристоры, разрядники, оптоволоконные датчики. Но эти датчики имеют ряд недостатков. Например, датчик Холла ненадежен, так как содержит электронную схему, имеет зависимость показаний от температуры; датчик тока на основе пояса Роговского дает невысокую точность, низкий уровень выходного сигнала, возможность измерения только переменного тока, высокую стоимость и при его использовании появляется необходимость в интегрирующем устройстве. Тиратроны с накаливаемым катодом относятся к разряду мощных тиратронов и применяются для управления большими токами. Ранее они широко применялись в промышленной электронике, но в настоящее время почти полностью вытеснены тиристорами, выполняющими те же функции. Но у тиристоров есть большой недостаток, что если ток, протекающий через тиристор в прямом направлении (в открытом состоянии), будет возрастать со скоростью более некоторой критической, то произойдет разрушение структуры и выход тиристора из строя, что объясняется ограниченным ростом площади протекания носителей, увеличением плотности тока и локальным тепловым пробоем. Основными недостатками разрядников являются высокое минимальное напряжение возникновения разряда, значительное время срабатывания, малый срок службы, низкая надежность и относительно высокая стоимость. Для измерения сверхбольших токов при высоких напряжениях в последнее время все чаще применяются оптоволоконные

датчики тока. Данные датчики обладают очень широким диапазоном измеряемых токов (до 500 кА), высоким классом точности, широким частотным диапазоном. Но для использования этих датчиков необходимы специальные терминалы, что ведет к дополнительному увеличению их стоимости.

В данной работе предлагается в качестве датчика использовать герметизированный магнитоуправляемый контакт (МК) – геркон. Это прибор с подвижной системой электродов, который управляется магнитным полем, и время его коммутации определяется временем развития электрического пробоя и может составлять несколько десятков наносекунд. Геркон – недорогое, простое, быстродействующее устройство, которое способно работать при высоких нагрузках и обладающее высокой электрической прочностью, но также имеющее ряд недостатков, такие как хрупкость стеклянного баллона, чувствительность к ударам и вибрациям, конечная скорость срабатывания контактов, возможное размыкание контактов при длительной эксплуатации при больших токах. А в качестве мощного источника энергии использовать установку ИНГИР-Мега-15, позволяющую получать субмиллисекундные импульсы магнитного поля с пиковым значением силы тока до 400 кА.

Применение герметизированного магнитоуправляемого контакта с определенными временными характеристиками в составе экспериментальной установки – генератора мощных импульсов магнитного поля, предъявляет к нему ряд требований, которые должны обеспечить надежность работы прибора в целом. Таким образом, детальное изучение временных характеристик является важной прикладной задачей. Для ее решения необходимо исследовать физические процессы, происходящие при замыкании электрических цепей подвижными электродами при высоких напряжениях.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы является создание генератора, позволяющего получать мощные импульсы магнитного поля с высокой стабильностью пикового значения индукции магнитного поля и малой длительностью заднего фронта, с учетом исследования физических процессов, происходящих при замыкании электрических цепей подвижными электродами при высоких напряжениях.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

- разработка генератора мощных импульсов магнитного поля с повышенной стабильностью амплитуды и малой длительностью заднего фронта.
- разработка методики моделирования процессов, происходящих при замыкании электрических цепей подвижными электродами при высоких напряжениях и создание численной модели формирования электрического пробоя, для обоснования использования в качестве датчика индукции – вакуумного высоковольтного магнитоуправляемого контакта.

– разработка методики оценки тепловой неустойчивости катодных микровыступов в подвижной системе электродов – с размерами, присущими для контактного покрытия из вольфрама, с целью проверки отсутствия катодного механизма развития электрического пробоя и его влияния на временные характеристики процесса коммутации магнитоуправляемого контакта.

– разработка методики расчёта параметров датчика индукции мощных импульсов магнитного поля на основе вакуумного высоковольтного магнитоуправляемого контакта.

– экспериментальная проверка эффективности применения предложенных методик расчета параметров и характеристик магнитоуправляемого контакта при создании генератора мощных импульсов магнитного поля.

Научная новизна

1. Оценена тепловая неустойчивость микровыступов на катоде в подвижной системе электродов вакуумного высоковольтного магнитоуправляемого контакта (геркона). Впервые доказано преобладание анодного механизма развития электрического пробоя в приборах с подвижной системой электродов (герконах) при межэлектродных зазорах менее 1 мм.

2. На основе решения уравнения движения контакт-детали с учетом силы притяжения контактов и параметров экспериментального соленоида определена зона устойчивого срабатывания вакуумного высоковольтного магнитоуправляемого контакта в пределах субмиллисекундного диапазона.

3. Экспериментально доказано, что получение мощных импульсов магнитного поля с высокой стабильностью амплитуды и малой длительностью заднего фронта возможно за счет включения в состав генератора мощных импульсов магнитного поля вакуумного высоковольтного магнитоуправляемого контакта (геркона) в качестве датчика прерывателя тока.

Научные положения, выносимые на защиту

1. В приборах с подвижной системой электродов – вакуумных высоковольтных магнитоуправляемых контактах при межэлектродных зазорах менее 1 мм вакуумный пробой развивается в парах материала анода, испаряемого под воздействием токов автоэлектронной эмиссии с микровыступов на катоде (анодный механизм), в отличие от катодного механизма в неподвижной системе электродов.

2. Устойчивое срабатывание магнитоуправляемого контакта в пределах субмиллисекундного (40 – 400 мкс) диапазона обеспечивается при его расположении равноудаленно от торцевых поверхностей полеобразующего соленоида и на расстоянии от оси не более $1,4 \cdot R_{\text{внеш}}$, где $R_{\text{внеш}}$ – внешний радиус соленоида.

3. Применение в составе генератора мощных импульсов магнитного поля магнитоуправляемого контакта в качестве датчика прерывателя тока позволяет формировать импульсы заданной амплитуды с пиковым значением индукции магнитного поля порядка 7 Тл.

Практическая ценность работы

1. Разработана методика моделирования процессов, происходящих при замыкании электрических цепей подвижными электродами при высоких напряжениях и создана численная модель формирования электрического пробоя, которая может служить основой проведения комплекса теоретических исследований физических процессов в системах с подвижными электродами и анализа факторов, определяющих их протекание.

2. Создана численная модель оценки тепловой неустойчивости катодных микровыступов при коммутации электрического тока в условиях резкого изменения напряженности электрического поля, вызываемых уменьшением межконтактного зазора в приборах с подвижной системой электродов.

3. Разработан способ оценки параметров датчика индукции мощных импульсов магнитного поля на основе магнитоуправляемого контакта с трехззорной конструкцией, позволяющий получить зону его устойчивого срабатывания на основе решения уравнения движения контакт-детали с учетом силы притяжения контактов и параметров экспериментального соленоида.

4. Предложен способ формирования управляющих импульсов магнитного поля заданной амплитуды с высоким значением индукции за счет включения в состав генератора мощных импульсов магнитного поля вакуумного высоковольтного магнитоуправляемого контакта (геркона).

5. Разработано устройство генератора мощных импульсов магнитного поля с повышенной стабильностью амплитуды и крутым задним фронтом (патент на полезную модель РФ № 167668).

Достоверность основных результатов достигнута за счет анализа и обобщения известных и авторских экспериментальных данных по исследованию процессов сопровождающих коммутацию электрического тока в приборах с подвижной системой электродов; экспериментального подтверждения работы численных моделей и их соответствие известным теоретическим и экспериментальным расчетам; создания генератора мощных импульсов магнитного поля, используемого для проведения физических экспериментальных исследований при воздействии мощным магнитным полем; применения современных методов исследований и статистической обработки результатов экспериментов.

Реализация и внедрение результатов работы

Разработанный генератор мощных импульсов магнитного поля используется для проведения физических экспериментов в Рязанском государственном радиотехническом университете (РГРТУ). Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы использовались на кафедре «Общая и экспериментальная физика» РГРТУ при выполнении НИР №28-12 по проведению исследований индукционного разряда при быстром спаде сильного магнитного поля в горячей плазме с использованием установки

«ИНГИР-Мега-15», а также внедрены в учебный процесс по дисциплине «Физические основы электронных и ионных процессов».

Методы проведения исследования

В диссертационной работе при проведении исследования используются аналитические методы, методы корреляционного и регрессионного анализа, математической статистики и математического моделирования, компьютерного моделирования.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на научно-технических конференциях: III Международной научно-практической конференции «Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе» г. Рязань, 27-30 сентября 2011 г.; Международной научно-практической конференции «Инновации в науке, производстве и образовании» г. Рязань: Рязанский государственный университет имени С. А. Есенина (РГУ), 14-16 октября 2013 г.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 13 печатных работ, из них 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК для защиты кандидатских диссертаций, 5 статей в научных журналах, 2 тезиса докладов и оформлен 1 патент на полезную модель.

Структура и объем работы

Диссертационная работа изложена на 150 страницах машинописного текста, содержит 52 рисунка и 3 таблицы. Состоит из введения, 3-х глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 95 наименований, и приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, сформулированы цели работы, охарактеризована научная и практическая значимость проводимых исследований, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен краткий обзор литературы. На основе литературных источников описаны устройства для получения импульсных магнитных полей высоких энергий. Приведен сравнительный анализ возможности применения различных устройств, которые могли бы быть использованы в качестве датчика индукции при разработке устройства получения сильных импульсных магнитных полей. Сделан вывод о применимости в данной работе в качестве датчика индукции коммутационного устройства – геркона. Рассмотрены виды и характеристики таких коммутационных устройств. Приведены процессы и механизмы возникновения электрического пробоя в них. Внимание уделено и вопросам, касающимся влияния контактных материалов и конфигурации электродов на возникновение электрического пробоя. По результатам проведенного обзора литературы сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена исследованию процессов при коммутации электрического тока приборами с подвижной системой электродов – вакуумными высоковольтными магнитоуправляемыми контактами или герконами (ВВМК), так как при создании генератора мощных импульсов магнитного поля, принцип работы которого следует из схемы, представленной на рис. 14, особое место в ней занимает геркон, являющийся датчиком индукции, благодаря которому можно стабилизировать пиковое значение индукции обрыванием импульса тока на определенном уровне.

В качестве такого геркона был выбран магнитоуправляемый контакт МКА-52142 (на современном этапе выпускается его аналог МКА-40142) с вольфрамовым покрытием на контакт деталях, обеспечивающий высокую скорость перемещения электродов. Такие малогабаритные магнитоуправляемые контакты используются для коммутации напряжений до 10 кВ при токе в 1 мА . Основными особенностями работы приборов является наличие большого ограничительного резистора (10^7 Ом). Для обоснования использования такого прибора с помощью схемы представленной на рис. 1 были проведены дополнительные исследования электрической прочности и условий развития электрического пробоя, основным инициатором которого явилась автоэлектронная эмиссия (АЭЭ) с микровыступов на отрицательном электроде – катоде. И в дальнейшем разработана численная модель данного процесса.

В ходе экспериментов были сняты осциллограммы тока через контакт в момент замыкания. Пример одной из них приведен на рис. 2. Из которой следует, что еще до возникновения электрических пробоев в межконтактном зазоре протекает нестабильный по времени и амплитуде ток, который обусловлен двумя составляющими: емкостным током вследствие изменяющейся во времени динамической емкости электродов при их перемещении и автоэлектронной

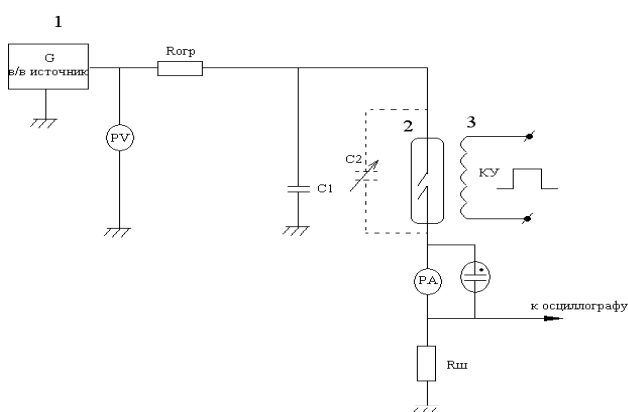


Рис. 1 – Схема проведения испытаний на электрическую прочность: 1 – источник питания; 2 – экспериментальный прибор; 3 – катушка управления; C_1 – паразитная емкость контакта и измерительной цепи относительно земли; C_2 – емкость контактов электродов

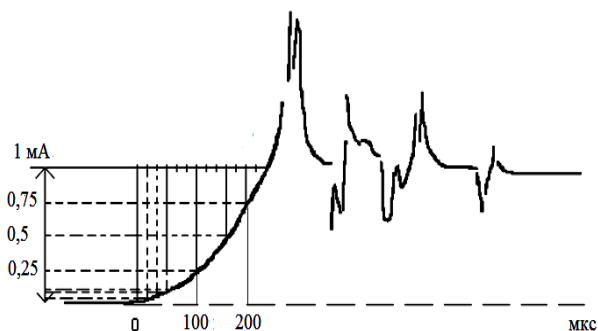


Рис. 2 – Осциллограмма тока через контакт в момент замыкания $U_0 = 10\text{ кВ}$ и $R_{огр} = 10^7\text{ Ом}$ и $I_k = 1\text{ мА}$

эмиссионным током. В дальнейшем разработана численная модель данного процесса.

эмиссией с микровыступов на катоде, являющейся инициатором электрического пробоя. Из осциллограммы видно, что время нарастания тока, т.е. длительность фронта, составляет $\approx (250 \div 300) \text{ мкс}$, а так как, первоначальный ток имеет емкостную природу и связан с увеличением динамической емкости контактов-деталей, то время длительности фронта – это есть время перемещения электродов.

По результатам испытаний были построены зависимости, которые показали, что предпробойный ток представляет собой автоэлектронную эмиссию с микровыступов на контактном покрытии. На рис. 3 приведены графики изменения предпробойного тока для двух значений постоянного напряжения при выдержке в течение одного часа. Ток нестабилен, и при увеличении до значений $4 \div 5 \text{ мкА}$ происходит лавинообразное его нарастание, и счетное устройство, включенное в цепь МК, регистрирует импульс тока – электрический пробой. После прохождения пробоя ток уменьшается, иногда до нулевого значения.

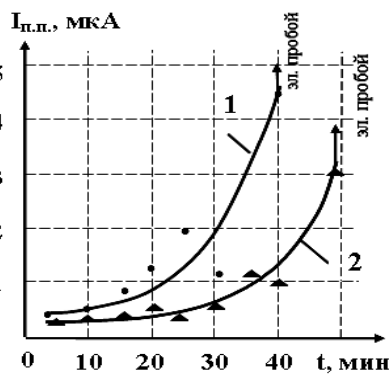


Рис. 3 – Графики изменения предпробойного тока при выдержке под напряжением:
1 – $U = 15 \text{ кВ}$; 2 – $U = 10 \text{ кВ}$

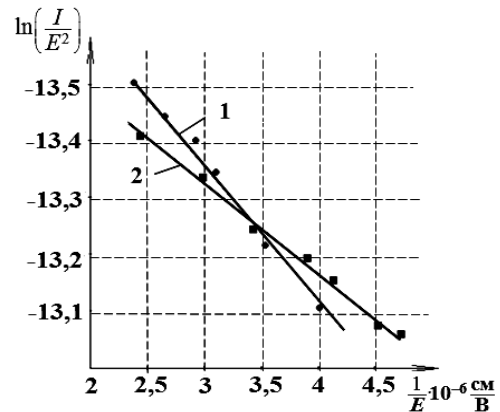


Рис. 4 – Вольт-амперная характеристика предпробойного тока:
1 – первичная; 2 – повторное испытание

Снятые по результатам испытаний вольт-амперные характеристики (ВАХ) и построенные в координатах Фаулера – Нортгейма показали, что предпробойный ток представляет собой АЭЭ с микровыступов на контактном покрытии. Причем снятая ВАХ после электрического пробоя имеет больший угол наклона, и эмиссия начинается при больших значениях напряжения на электродах (рис. 4), что, очевидно, связано с исчезновением эмитирующего микровыступа или с изменением его геометрических размеров.

Возникновение АЭЭ в статическом состоянии контакт-деталей, ее изменение в процессе выдержки под напряжением, изменение наклона ВАХ полностью укладывается в рамки теории катодного механизма развития электрических пробоев, в которых инициатором пробоев является АЭЭ с микровыступов на катоде с последующим их разогревом, плавлением, испарением и развитием микроарзряда в парах материала катода при межэлектродных зазорах меньше 1 мм . В этом случае разрушается и

подвергается электрической эрозии поверхность катода (работы Сливкова И.Н., Раховского В.И., Месяца Г. А.). А при коммутации цепи высокого напряжения **при быстром перемещении** электродов под действием магнитного поля очень сложно найти, оценить факторы, определяющие появление и развитие разрядных явлений в момент замыкания. Поэтому было сделано предположение, что эрозии будет подвергаться поверхность анода, и именно степень этой эрозии будет определять ресурс работы МК.

Для оценки скорости нарастания напряженности электрического поля при различных скоростях перемещения электродов был проведен расчет напряженности электрического поля в процессе замыкания в каждый момент времени (без учета влияния рельефа поверхности) по данной формуле:

$$E_0 = U_0/d = U_0/(d_0 - 0,5at^2), \quad (1)$$

где U_0 – рабочее напряжение (10 кВ); d_0 – начальный межконтактный зазор (0,5 мм); a – ускорение концов контакт-деталей; t – время с момента подачи напряжения на управляющую катушку.

Результаты расчета приведены на рис. 5. Расчет показал, что ток автоэлектронной эмиссии при напряженности электрического поля $E = (3 \div 8) \cdot 10^7$ В/м возникает примерно через 250 мкс до замыкания, что совпадает с результатами осциллограммы. Ускорение a определялось на основе результатов теоретических расчетов и данных эксперимента по оценке времени замыкания МК с помощью управляющей катушки (соленоида). Величина тока управления превышала ток срабатывания на 50%, что регламентировалось, как и параметры катушки (геометрические размеры, число витков, сопротивление), требованиями ОТУ к таким коммутаторам. Время движения контакт-деталей определялось экспериментально по времени нарастания предпробойного тока. Ток АЭЭ (предпробойный ток) определялся с учетом влияния рельефа поверхности, т.е. с учетом коэффициента усиления поля по формуле

$$I_{АЭЭ} = j_{АЭЭ} \cdot S \quad (2)$$

где S – площадь эмитирующего участка контактирующей поверхности.

Теоретическое определение величины и характера изменения плотности автоэлектронного тока $j_{АЭЭ}$ проводились на основе решения уравнения Фаулера-Нордгейма. А величина напряженности электрического поля в

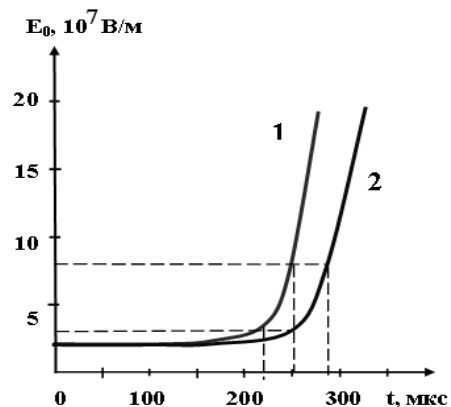


Рис. 5 – Зависимости напряженности поля от времени при различных значениях ускорения контактов и межэлектродного расстояния:

$$1 - a = 1,5 \cdot 10^4 \text{ м/с}^2$$

$$2 - a = 1,1 \cdot 10^4 \text{ м/с}^2$$

процессе замыкания определялась в каждый момент времени по формуле (1). Для оценки коэффициента усиления поля β с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) были исследованы поверхности контактных покрытий из вольфрама, нанесенных различными методами. Для покрытия, полученного плазменным напылением (рис. 6, а), высота микровыступов составила $4,5 \div 7$ мкм при радиусе $0,5 \div 4$ мкм, а для покрытия, нанесенного из газовой фазы (рис. 6, б) и из дугового разряда (рис. 6, в), значения высоты лежат в диапазоне $0,1 \div 2$ мкм при радиусе $\approx 0,5 \div 2$ мкм.

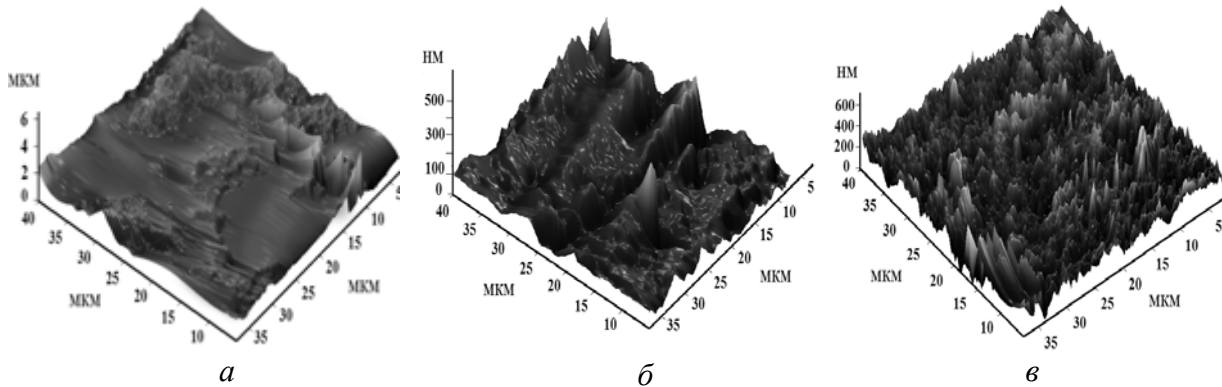


Рис. 6 – АСМ изображение поверхности вольфрамового покрытия, полученного плазменным напылением – а, газовой фазой осаждением – б и осаждением из дугового разряда – в

В результате было сделано предположение, что наиболее вероятные формы микровыступов – это эллипсоиды или конусы с закругленной вершиной. В этих случаях можно принять $\beta = \alpha h/r + 1$, $\alpha \approx 1$, h – высота микровыступа, r – радиус закругления вершины. При этом для покрытия, полученного плазменным напылением, коэффициент усиления поля изменяется от 2 до 10, а для покрытия, нанесенного из газовой фазы и из дугового разряда, коэффициент изменяется от 1 до 2.

С учетом коэффициентов усиления поля был проведен расчет автоэлектронного тока (рис. 7) в диапазоне времени $200 \div 300$ мкс (от момента появления тока до момента контактирования электродов). Из расчетов следует, что даже при самых неблагоприятных условиях (плазменная приштамповка), в момент времени равном моменту замыкания контактов (кривая 1), наибольшая плотность тока будет равна $j_{АЭЭ} = 1,3 \cdot 10^7$ А/см² и это значительно (в 5 раз) меньше теоретического значения, полученного другими авторами ($j = 5 \cdot 10^7$ А/см²),

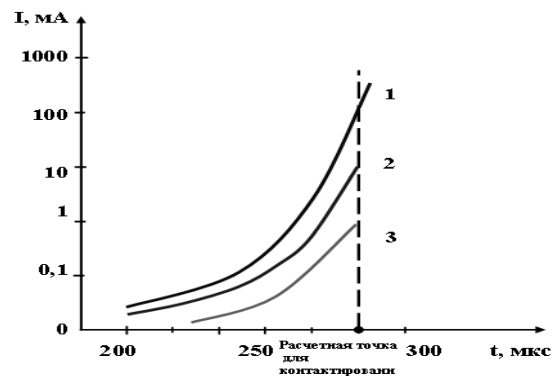
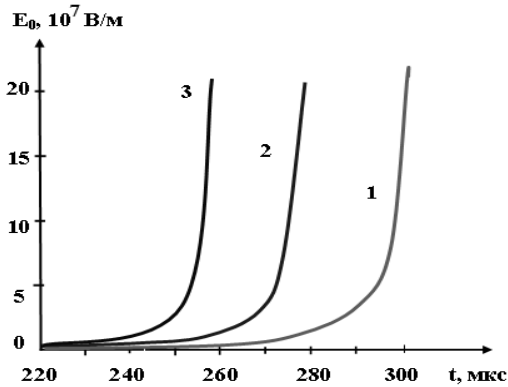


Рис. 7 – Расчетные зависимости тока автоэлектронной эмиссии в диапазоне времени $200 \div 300$ мкс для различных значений β и r
 1 – $\beta = 10$, $r = 0,5$ мкм;
 2 – $\beta = 2$, $r = 0,5$ мкм;
 3 – $\beta = 2$, $r = 2$ мкм

ведущего к плавлению эмитирующего микровыступа на катоде.

Для исследования предпробойных явлений впервые была создана численная модель развития этого процесса («Gerkon»). Результаты, приведенные на рис. 8, по порядку значений величин имеют хорошее соответствие с экспериментальными расчетами. В ней в качестве расчетной основы была взята модель для приборов с неподвижной системой электродов, в которую в качестве исходных данных были введены условия присущие только системе с подвижными электродами, в частности присущие ВВМК.

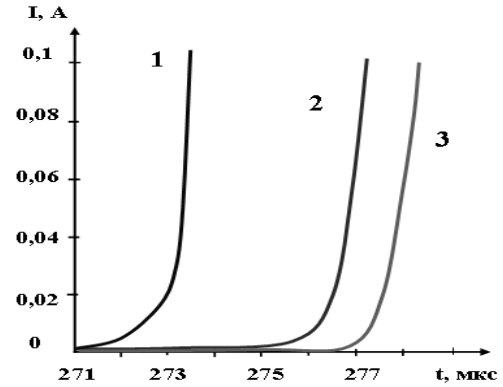


Радиус закругления вершины $r = 0,5$ мкм,
высота микровыступа $h = 1$ мкм:

1 – $a = 1,1 \cdot 10^4$ м/с²;

2 – $a = 1,3 \cdot 10^4$ м/с²;

3 – $a = 1,5 \cdot 10^4$ м/с²



Ускорение движения контактов

$a = 1,3 \cdot 10^4$ м/с² :

1 – $\beta = 10$ ($r = 0,5$ мкм, $h = 4,5$ мкм);

2 – $\beta = 2$ ($r = 0,5$ мкм, $h = 0,5$ мкм);

3 – $\beta = 2$ ($r = 2$ мкм, $h = 0,5$ мкм)

Рис. 8 – Численное моделирование формирования электрического пробоя

В использованной данной модели расчета были оценены временные характеристики нарастания электрического тока в условиях резкого изменения напряженности поля, влияния структуры и состояния поверхности контактного покрытия на процесс возникновения и изменения АЭЭ.

С целью проверки отсутствия катодного механизма развития пробоя и его влияния на временные характеристики процесса коммутации, была разработана методика оценки тепловой неустойчивости катодных микровыступов нагреваемых автоэмиссионным током. И создана численная модель «Gerkon 2» на основе решения уравнение теплового баланса в одномерном приближении с данным граничным условием и переходом к безразмерным параметрам – с размерами, присущими для контактного покрытия из вольфрама В магнитоуправляемых контактах (рис. 9):

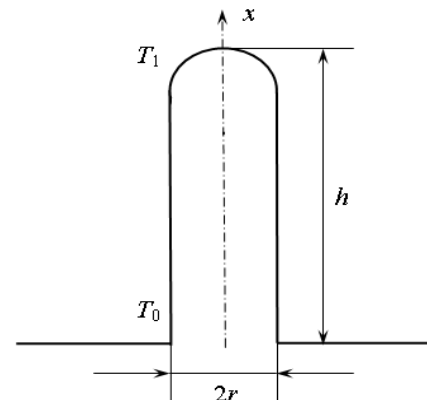


Рис. 9 – Схема цилиндрического вольфрамового выступа на катоде

$$\rho_1 c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + j^2 \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)], \quad -\lambda \frac{dT}{dx} \Big|_{x=h} = q_H, \quad Q = \frac{(T - T_0)}{T_0}, \quad \tau = \frac{\lambda t}{\rho_1 c h^2}, \quad (3)$$

где q_H – поток тепла, выделяющийся на вершине выступа; $T_0 = 300 \text{ K}$ – начальная температура выступа; c – его теплоемкость; ρ_1 – плотность материала катода; λ – коэффициент теплопроводности катодного материала; ρ_0 – удельное электрическое сопротивление; α – температурный коэффициент удельного электрического сопротивления;

На рис. 10 показаны зависимости безразмерной температуры вершины выступа Q от времени τ при различных значениях высоты микровыступа h и плотности автоэлектронного тока j_0 .

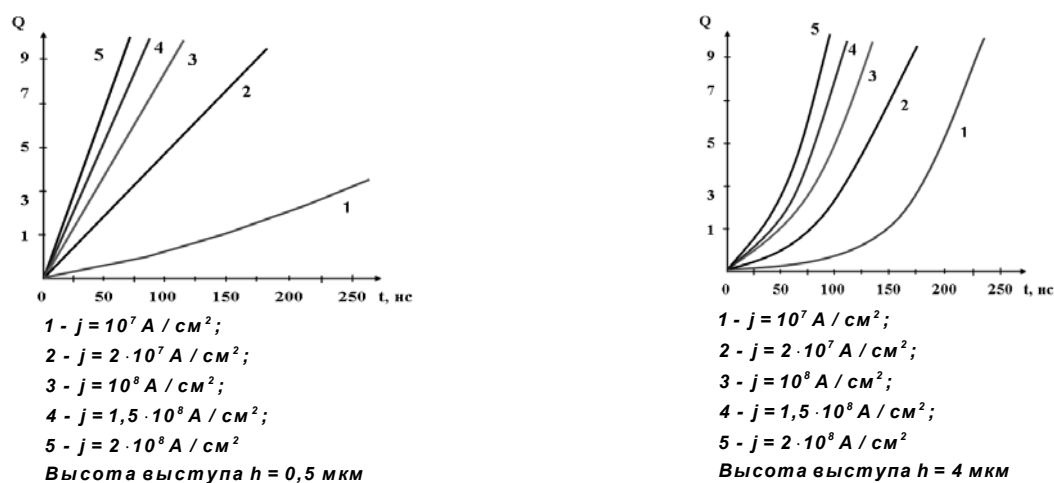
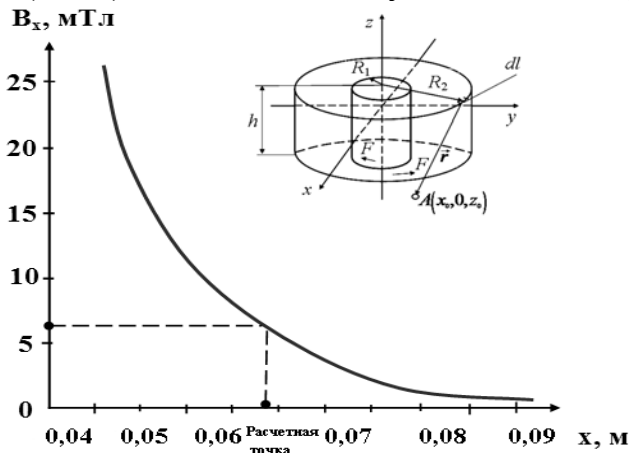


Рис. 10 – Численное моделирование тепловой неустойчивости катодных микровыступов при разных плотностях тока

Анализ результатов, приведенных на рис. 10 показал, что время разогрева превышает время развития пробоя и поэтому в дальнейшем в расчет принимается только процесс развития электрического пробоя в парах материала анода и этот процесс протекает очень быстро, что и определило целесообразность использования вакуумного магнитоуправляемого контакта в качестве датчика индукции, т.е. прерывателя магнитного поля. При этом время протекания тока в момент времени замыкания составляет несколько десятков $нс$ с величиной тока, определяемого только сопротивлением разрядного промежутка. Данное утверждение и результаты теоретического расчета хорошо согласуются с результатами, приведенными в работах Чадаева Н.Н. и Иваникова А.С. при создании генератора наносекундных высоковольтных импульсов длительностью до 5 нс с использованием подвижных электродов в магнитоуправляемых контактах. Проведенный расчет временных характеристик в дальнейшем был учтен при расчете параметров датчика индукции мощных импульсов магнитного поля.

Третья глава посвящена разработке методики расчёта параметров датчика индукции мощных импульсов магнитного поля на основе ВВМК, экспериментальному исследованию и проверке теоретической модели. В генераторе мощных импульсов магнитного поля геркон должен срабатывать

при заданном значении индукции магнитного поля, и поэтому необходимо было найти связь между временем замыкания контакт-деталей и величиной индукции магнитного поля создаваемой соленоидом на определенном расстоянии от его оси. Для этого вначале на основе метода эквивалентного соленоида была получена данная зависимость при заданных параметрах экспериментального соленоида (рис. 11). Из нее следует, что при увеличении расстояния от внешней стенки соленоида до точки, где определяется индукция на (1 – 2) см, ведет к спаду значения индукции приблизительно на порядок.



Внутренний радиус $R_1 = 0,031$ м;
Внешний радиус $R_2 = 0,045$ м;
Высота соленоида $h = 0,09$ м;
Число витков соленоида $N = 10$;
Ток, проходящий через элемент dl соленоида $I = 50$ кА;
Расстояние от оси соленоида $x_0 = 0,063$ м;
Расстояние вдоль оси $z_0 = 0,045$ м.

Рис. 11 – Распределения индукции B_x вдоль оси x для экспериментального соленоида

Затем на основе решения уравнения движения контактов в случае их симметрии, было определено время замыкания экспериментального геркона МКА-52142 с использованием его параметров и характеристик:

$$t_{\text{зам.}} = \sqrt{2m \cdot y_{\text{max}} / F_{\Sigma \text{ср.}}}, \quad F_{\Sigma \text{ср.}} = 2F_T(y) - c \cdot y_{\text{max}}, \quad (4)$$

где m – приведенная масса контакт-детали; c – жесткость на изгиб; y_{max} – смещение контакт-детали до замыкания; F_T – сила тяги.

Затем построена зависимость изменения времени замыкания геркона от расстояния от оси соленоида (рис. 12). Из нее можно увидеть зону устойчивого срабатывания геркона в пределах субмиллисекундного диапазона (40 – 400 мкс), а также, время замыкания геркона, при его расположении равноудаленно от торцевых поверхностей соленоида на расстоянии 1,8 см от внешней стенки соленоида, которое будет приблизительно равно $t_{\text{зам.}} \approx 370$ мкс. Такое расположение геркона в дальнейшем будет доступно для экспериментальной проверки.

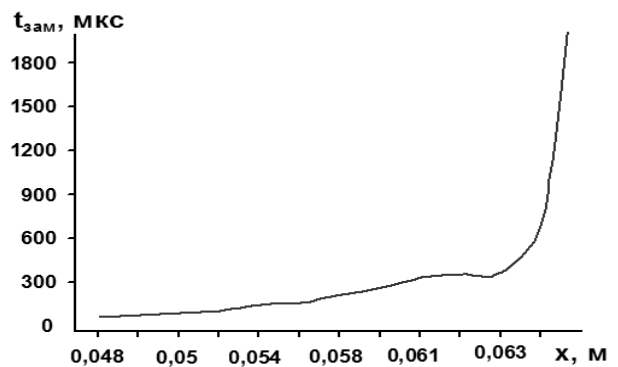


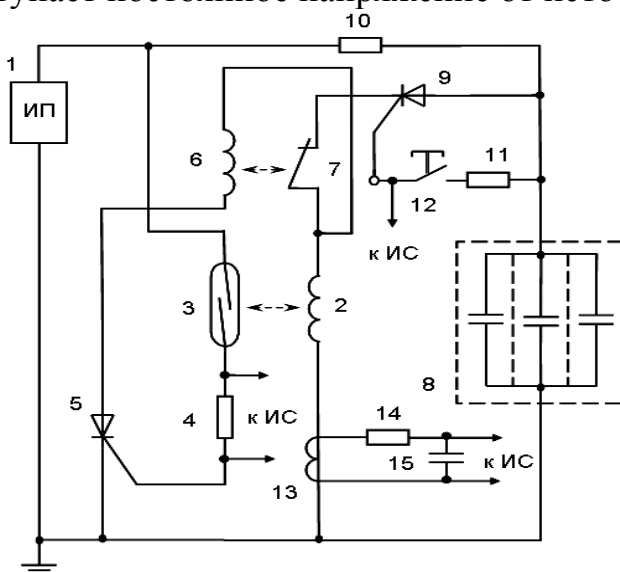
Рис. 12 – Зависимость изменения времени замыкания экспериментального геркона от расстояния от оси соленоида

Для экспериментальной проверки эффективности предложенных методик расчета параметров и характеристик высоковольтного магнитоуправляемого контакта был создан генератор мощных импульсов магнитного поля, источником энергии которого является ранее созданная установка «ИНГИР-Мега-15». В состав ее входят: силовая система, испытательная камера, полеобразующая система, управляющая регистрационно-измерительная система. Внутри испытательной камеры устанавливается полеобразующая система, состоящая из экспериментального соленоида и геркона, закрепленного параллельно на определенном расстоянии (1,8 см) от внешней стенки соленоида (рис. 13).



Рис. 13 – Внешний вид испытательной камеры с установленным в ней экспериментальным соленоидом и герконом

Это расстояние было выбрано потому, что оно является оптимальным для получения заданной длительности импульса в 400 мкс при проведении эксперимента. Генератор работает следующим образом. После включения источника питания 1 и автоматического выключателя 7 (рис. 14) на магнитоуправляемый контакт 3, электромагнит 6 и через второй ограничительный резистор 10 с блоком накопительных конденсаторов 8 поступает постоянное напряжение от источника питания 1.



- 1 – источник питания,
- 2 – полеобразующая система (экспериментальный соленоид),
- 3 – датчик индукции (магнитоуправляемый контакт),
- 4 – первый ограничительный резистор,
- 5 – тиристор,
- 6 – электромагнит,
- 7 – автоматический выключатель,
- 8 – конденсаторная батарея,
- 9 – тиристорный блок,
- 10 – второй ограничительный резистор,
- 11 – третий ограничительный резистор,
- 12 – кнопка запуска,
- 13 – датчик тока (пояс Роговского),
- 14, 15 – высокоомный резистор, конденсатор
- ИС – измерительная система.

Рис. 14 – Схема генератора мощных импульсов магнитного поля

При достижении заданного напряжения на конденсаторной батарее 8 производится запуск тиристорного блока 9 с помощью кнопки 12 и ограничительного резистора 11, и через автоматический выключатель 7 и полеобразующую систему 2 проходит возрастающий во времени ток. Создаваемое полеобразующей системой 2 магнитное поле действует на магнитоуправляемый контакт 3, который при достижении заданной индукции магнитного поля внутри полеобразующей системы 2 замыкает свои контакты, и через первый ограничительный резистор 4 поступает напряжение на управляющий электрод тиристора 5. Тиристор 5 переходит в открытое состояние, электромагнит 6 срабатывает и воздействует на контакты автоматического выключателя 7, производя разрыв контура тока с полеобразующей системой. В результате ток, проходящий через полеобразующую систему 2 и датчик тока 13, быстро спадает, и задний фронт импульса магнитного поля имеет высокую крутизну.

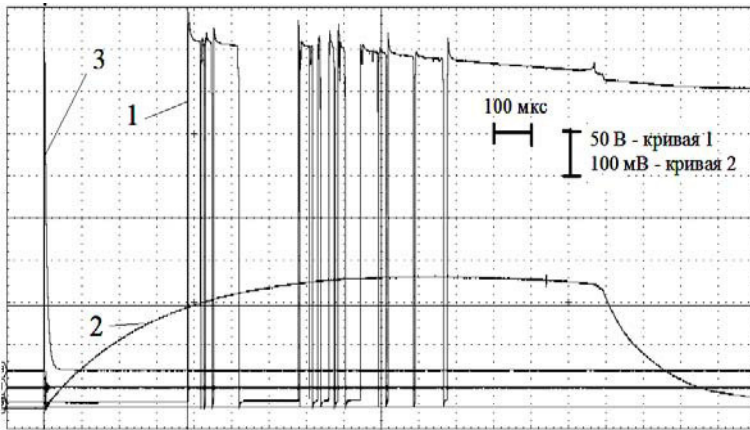


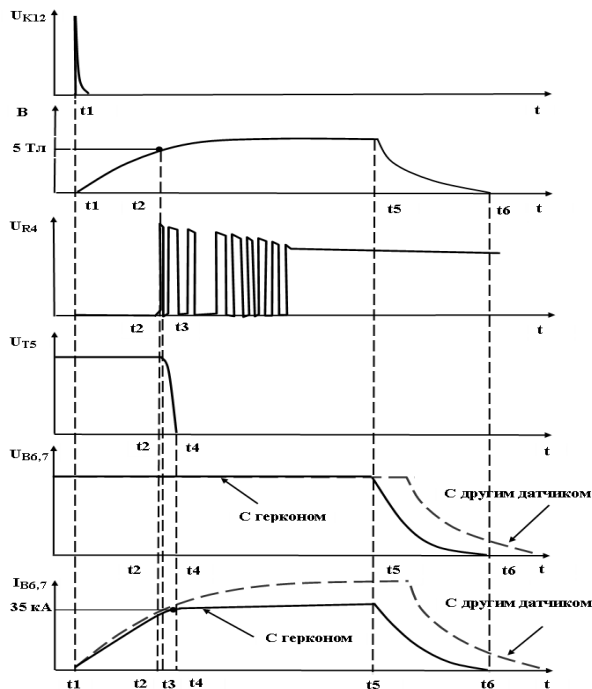
Рис. 15 – Графики изменения напряжения от времени: 1 – на ограничительном резисторе; 2 – на выходе датчика, регистрирующего ток, проходящий через полеобразующую систему, 3 – импульс синхронизации

С помощью вычислительного стенда были сняты осциллограммы сигналов тока соленоида, напряжения на нём и сигнал срабатывания геркона. Пример одной из них приведен на рис. 15. Напряжению, согласно осциллограмме, (кривая 2) составило 200 мВ.

Учтя коэффициент чувствительности

$K=175 \text{ кА/В}$, получаем ток равный 35 кА. В процессе эксперимента наблюдались многократные повторные замыкания геркона (кривая 1). Для рассматриваемой системы основная информация содержится именно в первом включении, так как после него формируется управляющий импульс, открывающий тиристор, и повторные замыкания не оказывают никакого влияния на работу всей системы. Время первого срабатывания геркона, согласно осциллограмме, составило $\approx 380 \text{ мкс}$. В результате можно определить индукцию и напряженность магнитного поля на оси экспериментального соленоида 2 (рис. 14) в момент первого срабатывания контактов геркона, которые соответственно будут равны $B \approx 5 \text{ Тл}$, $H \approx 4000 \text{ кА/м}$. По данным осциллограммы были построены временные диаграммы переходных процессов в генераторе мощных импульсов магнитного поля, представленные на рис. 16. Пунктирной линией на диаграммах представлены графики напряжения и тока проходящего через автоматический выключатель 6,7, но только если в цепь генератора установлен другой датчик индукции, который

будет иметь большее время коммутации $t_2 - t_3$, чем у вакуумного высоковольтного магнитоуправляемого контакта. Этот момент времени, определяемый временем развития электрического пробоя в герконе, обостряет



t_1 – момент запуска тиристорного блока с помощью кнопки 12;

$t_1 - t_2$ – время нарастания тока, проходящего через соленоид 2 ($\approx 400 \text{ мкс}$);

t_2 – момент первого срабатывания контактов геркона, который ограничивает управляющий импульс тока (индукции);

$t_2 - t_3$ – время коммутации определяемое временем развития электрического пробоя (несколько десятков нс);

$t_3 - t_4$ – время включения тиристора 5 ($\approx 5 \text{ мкс}$);

$t_4 - t_5$ – времена срабатывания автоматического выключателя 6,7 ($\approx 1 \text{ мс}$);

$t_5 - t_6$ – времена спада тока, проходящего через соленоид 2 ($\approx 400 \text{ мкс}$);

t_6 – момент окончания тока, проходящего через соленоид 2

Рис. 16 – Временные диаграммы переходных процессов в генераторе мощных импульсов магнитного поля

импульс тока управления на уровне 35 кА , и с учетом времени срабатывания тиристора 5 и автоматического выключателя 6, 7 мы получаем близкий к прямоугольной форме импульс тока с коротким задним фронтом.

Результаты диссертационной работы

1. Разработана конструкция генератора мощных импульсов магнитного поля с повышенной стабильностью амплитуды и крутым задним фронтом и получен патент на полезную модель РФ № 167668.

2. Проведены теоретические исследования временной зависимости тока автоэлектронной эмиссии, инициирующей электрические пробои в герконах, с учетом движения концов контакт-деталей в процессе коммутации высокого напряжения и микрорельефа контактирующих поверхностей, данные о котором впервые получены с помощью атомно-силового туннельного микроскопа.

3. Разработана численная модель механизма развития электрического пробоя «Gerkon», которая может служить основой проведения комплекса теоретических исследований физических процессов в системах с подвижными электродами и анализа факторов, определяющих их протекание.

4. Оценена тепловая неустойчивость катода и разработана численная модель процесса разогрева и испарения микровыступов на катоде при замыкании контактов «Gerkon 2», на базе неподвижной системы электродов, которая показала, что при зазорах $< 1 \text{ мм}$, катодный механизм развития электрического пробоя не играет существенной роли при анализе влияния

различных факторов на временные характеристики процесса коммутации в магнитоуправляемых контактах.

5. Разработан новый способ оценки параметров датчика индукции мощных импульсов магнитного поля на основе вакуумного высоковольтного магнитоуправляемого контакта (геркона), позволяющий получить зону его устойчивого срабатывания на основе решения уравнения движения контактной детали с учетом силы притяжения контактов и параметров экспериментального соленоида.

6. Предложен новый способ повышения стабильности работы сильноточной (до 400 кА) промышленной установки ИНГИР-Мега-15 для получения субмиллисекундных импульсов магнитного поля с высоким значением индукции за счет включения в состав установки вакуумного высоковольтного магнитоуправляемого контакта (геркона), формирующего управляющий импульс заданной амплитуды.

Публикации по теме диссертации

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Черкасова Ю. В., Иваников А. С. Исследование механизма развития пробоя в вакуумных магнитоуправляемых контактах // Вестник РГРТУ. – 2008. – №3 (25), Рязань. С. 80 – 83.

2. Черкасова Ю. В., Иваников А. С. Проведение испытаний на электрическую прочность и исследование предпробойных явлений в процессе коммутации в вакуумных магнитоуправляемых контактах // Вестник РГРТУ. – 2013. – №4 (46 ч.1), Рязань. С. 147 – 149.

3. Черкасова Ю. В., Иваников А. С. Исследование тепловой неустойчивости микровыступов на поверхности высоковольтных вакуумных магнитоуправляемых контактов // Вестник РГРТУ. – 2013. – №4 (46 ч. 3), Рязань. С. 76 – 79.

4. Черкасова Ю. В., Иваников А. С. Исследование процесса развития предпробойных явлений в приборах с подвижной системой электродов // Успехи современной радиоэлектроники. – 2014 – №10, Москва. С. 69 – 73.

5. Черкасова Ю. В., Власов А. Н., Буробин М. А. Генерация мощных импульсов магнитного поля на установке ИНГИР-Мега-15// Вестник РГРТУ. – 2017. – №60, Рязань. С. 154 – 162.

6. Черкасова Ю. В., Власов А. Н., Дубков М. В., Буробин М. А. Генератор мощных импульсов магнитного поля // Патент №167668 РФ, Н03К 3/53, Бюл. №1, 10.01.2017.

Статьи, опубликованные в других изданиях, и материалы конференций:

7. Черкасова Ю. В., Иваников А. С., Геннадьев В. М., Орешкин В.В. Электрическая прочность приборов с подвижной системой электродов // Электроника: межвуз. сб. науч. тр., г. Рязань, 2005. С. 27 – 31.

8. Черкасова Ю. В., Иваников А. С., Геннадьев В.М., Орешкин В.В. Стабилизация электрической прочности вакуумных высоковольтных конденсаторов переменной ёмкости // Электроника: межвуз. сб. науч. тр., г. Рязань, 2005. С. 25 – 27.

9. Черкасова Ю. В., Иваников А. С., Орешкин В. В. Влияние величины и способа включения нагрузки на эрозию контактной поверхности магнитоуправляемых контактов // Электроника: межвуз. сб. науч. тр., г. Рязань, 2006. С. 49 – 52.

10. Черкасова Ю. В., Иваников А. С., Орешкин В. В. Оценка возможности контроля давления остаточных газов с помощью «свидетелей» // Электроника: межвуз. сб. науч. тр., г. Рязань, 2008. С. 27 – 32.

11. Черкасова Ю. В., Иваников А. С. Моделирование процесса развития электрического пробоя в вакуумных магнитоуправляемых контактах // Тезисы докладов: третья Международная научно-практическая конференция «Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе», Рязань, 2011.

12. Черкасова Ю. В., Иваников А. С. Моделирование процесса развития электрического пробоя в вакуумных магнитоуправляемых контактах // Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе (Reed Switches and Products on Basis Thereof) / Сборник трудов третьей Международной научно-практической конференции, 27-30 сентября 2011 г. / Proceedings of the 3rd International Science and Practical Conference. 27.09-30.09.2011 / Под ред. д.т.н. С.М. Карabanова. Рязань: ОАО «РЗМКП», 2011.

13. Черкасова Ю. В., Иваников А. С. Исследование предпробойных явлений в вакуумных магнитоуправляемых контактах // Тезисы докладов: Инновации в науке, производстве и образовании: сб. тр. науч.-практ. конф., 14–16 октября 2013 г., г. Рязань/ отв. ред. К.Н. Гаврилов, В.А. Степанов; Ряз. гос. ун-т им. С. А. Есенина. – Рязань, 2013.

Черкасова Юлия Вадимовна

Разработка генератора мощных импульсов магнитного поля с использованием коммутации электрического тока приборами с подвижной системой электродов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 15.12.17 г. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.