

На правах рукописи

Потапенко Надежда Викторовна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДУГОВОГО РАЗРЯДА В ПАРАХ РТУТИ
В ТРЕХЭЛЕКТРОДНЫХ ПРОМЕЖУТКАХ
С НАКАЛЕННЫМ КАТОДОМ
И РАЗРАБОТКА ДОЛГОВЕЧНЫХ РТУТНЫХ ТИРАТРОНОВ**

Специальность 05.27.02
«Вакуумная и плазменная электроника»

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2006

Работа выполнена на кафедре общей и экспериментальной физики ГОУВПО
«Рязанский государственный радиотехнический университет»

Научные руководители: доктор технических наук, профессор
Киселев Юрий Владимирович
доктор технических наук
Зильберман Марк Маркович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Коротченко Владимир Александрович
кандидат технических наук, доцент
Гнидо Валерий Федорович

Ведущая организация: **Всероссийский электротехнический
институт, г. Москва**

Защита диссертации состоится “ 4 ” июля 2006 г. в зале заседаний Ученого совета в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.211.03 в ауд. 235 ГОУВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Автореферат разослан “01” 06 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.211.03
доктор технических наук, профессор

Б.И. Колотилин

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Развитие современной науки и техники требует дальнейшего совершенствования устройств силовой электроники и, в частности, преобразователей электрической энергии. При этом приоритетом является достижение минимальной энергоемкости преобразовательных приборов, которая определяется их КПД. Главной задачей при создании преобразовательных приборов является снижение до минимума потерь электрической энергии в процессе ее преобразования. Эта задача решается применением приборов, принцип действия которых позволяет обеспечить минимально возможное падение напряжения на приборе в проводящий период в сочетании с возможностью получения необходимой мощности не за счет увеличения тока, а за счет повышения напряжения.

Существенное влияние на эффективность преобразовательного устройства оказывает возможность регулирования им с помощью управляемого электронного преобразовательного прибора, что позволяет, например в промышленном электроприводе, экономить до 40 % электроэнергии по сравнению с нерегулируемым электроприводом. Сказанное определяет актуальность создания высоковольтных управляемых электронных преобразовательных приборов.

Наряду с требованиями существенного снижения потерь электроэнергии, решающим является требование обеспечения высокой долговечности и надежности работы преобразовательных приборов, включая сохранение работоспособности при наличии временных перенапряжений и предотвращение при этом катастрофических отказов. Важное значение придается и стоимости преобразовательных приборов, которая в современных преобразовательных устройствах достигает одной трети стоимости всего устройства.

Все большее внимание обращается на экологическую безопасность преобразовательных электронных приборов в части применения материалов, оказывающих отрицательное влияние на окружающую среду.

С точки зрения потерь электроэнергии существенное значение имеет и снижение времени готовности прибора к работе, так как это время не входит в период полезной работы прибора и при эксплуатации прибора в режимах с большим количеством циклов включения и выключения может составить заметную часть полного времени эксплуатации.

Для расширения областей применения высоковольтных преобразовательных электронных приборов весьма важными являются требования обес-

печения их надежной работы в широком диапазоне температур окружающей среды – от отрицательной – минус 60°C до максимальной положительной – $+100^{\circ}\text{C}$.

В зависимости от условий применения к преобразовательным приборам, установленным в различных источниках питания радиоэлектронной аппаратуры, предъявляются и требования устойчивости к воздействию различных ионизирующих излучений и дестабилизирующих факторов космического пространства.

В настоящее время, в зависимости от рабочей среды, в которой происходит преобразование электрической энергии, в качестве преобразовательных управляемых электронных приборов применяются полупроводниковые, вакуумные, газоразрядные и ртутные вентили. Анализ свойств этих приборов свидетельствует о том, что в зависимости от режимов работы и условий применения отдается предпочтение приборам одной из этих групп.

Вместе с тем для питания постоянным током современной мощной радиоэлектронной аппаратуры наиболее полно комплексу предъявляемых требований удовлетворяют ртутные тиратроны. К их преимуществам относятся высокая экономичность, сравнительно малые потери электроэнергии при ее преобразовании, большая долговечность, практическое отсутствие ограничений по высокому напряжению, устойчивость к перенапряжениям и отсутствие катастрофических отказов, устойчивость к воздействию ионизирующих излучений и дестабилизирующих факторов космического пространства, низкая стоимость, связанная с простотой изготовления и применением сравнительно дешевых материалов.

Однако к числу недостатков ртутных преобразовательных приборов относятся их экологическая опасность как в период производства, так и в условиях эксплуатации, связанная с применением сравнительно больших количеств жидкой ртути, узкий диапазон допустимых температур окружающей среды (от $+15^{\circ}\text{C}$ до $+45^{\circ}\text{C}$), большое время готовности к работе – до 30 минут.

Цель диссертационной работы заключается в исследовании влияния объемной концентрации ртути на величину и стабильность напряжений возникновения и поддержания разряда в ртутных тиратронах и в разработке долговечных тиратронов с уменьшенной объемной концентрацией ртути.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решались следующие задачи:

1. Исследование влияния объемной концентрации ртути на напряжения возникновения и поддержания разряда в ртутных тиратронах.
2. Исследование влияния объемной концентрации ртути на долговечность тиратронов с уменьшенным количеством ртути.
3. Разработка и исследование твердотельных генераторов ртути на основе прессованного порошка окиси ртути.
4. Исследование влияния конструкции тиратронов с уменьшенным количеством ртути на их время готовности к работе и на диапазон допустимых температур окружающей среды.

Научная новизна

1. Определена зависимость напряжений возникновения и поддержания дугового разряда в ртутном тиратроне от объемной концентрации ртути.
2. Установлена возможность существенного (на один - два порядка величины) уменьшения объемной концентрации ртути в тиратронах с ртутным наполнением.
3. Исследовано влияние объемной концентрации ртути на долговечность тиратронов с ртутным наполнением.
4. Установлена возможность создания ртутных тиратронов с твердотельными генераторами ртути на основе прессованного порошка окиси ртути.
5. Исследована и установлена возможность уменьшения времени готовности к работе ртутных тиратронов на порядок величины.
6. Изучено влияние температуры окружающей среды на вероятность обратных зажигания в ртутных тиратронах и доказана возможность увеличения максимальной допустимой температуры окружающей среды до $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$.
7. Исследована и установлена принципиальная возможность снижения допустимой температуры окружающей среды для ртутных тиратронов до минус $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ при установке в тиратрон дополнительного подогревателя, обеспечивающего нагрев нижней части баллона тиратрона до температуры не менее $+75\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Научно-практическое значение результатов работы заключается в следующем:

1. Разработаны принципы конструирования ртутных тиратронов с уменьшенной на один - два порядка величины объемной концентрацией ртути и повышенной долговечностью до 12000 часов.
2. Разработаны конструкция и технология изготовления твердотельных генераторов ртути на основе спрессованных порошков окиси ртути, титана и железа.

3. Разработаны способы уменьшения времени готовности к работе ртутных тиратронов до 10 – 30 секунд.

4. Разработаны способы расширения диапазона допустимых температур окружающей среды для ртутных тиратронов от +100 °С до минус 60 °С.

5. На основе проведенных исследований разработаны, внедрены в производство в ООО НПП «ФОН» и в аппаратуру и поставляются потребителям ртутные тиратроны, рассчитанные на средний ток анода 0,5 А и обратное напряжение анода 5 кВ и 10 кВ (ТР1-0,5/5 и ТР1-0,5/10).

Достоверность результатов работы подтверждается соответствием экспериментальных результатов теории, использованием современных методов исследования физических процессов в газоразрядных приборах, включая измерительную аппаратуру высокого класса точности, достигнутыми электрическими параметрами разработанных и внедренных в производство ртутных тиратронов.

Научные положения, выносимые на защиту:

- в трехэлектродных промежутках с накалимым катодом и несамостоятельным дуговым разрядом в парах ртути уменьшение объемной концентрации ртути на два порядка величины (с 4,3 мг/см³ до 0,012 мг/см³) не приводит к увеличению напряжения поддержания разряда;

- напряжение возникновения дугового несамостоятельного разряда в парах ртути при уменьшении объемной концентрации ртути на порядок величины (с 4,3 мг/см³ до 0,17 мг/см³) увеличивается не более чем на 12 %, а при уменьшении объемной концентрации ртути на два порядка величины (с 4,3 мг/см³ до 0,012 мг/см³) возрастает вдвое;

- в течение 12000 часов работы ртутного тиратрона с уменьшенной на порядок величины (с 4,3 мг/см³ до 0,07 мг/см³) объемной концентрацией ртути напряжение поддержания разряда не изменяется, а при уменьшении объемной концентрации ртути на два порядка величины (с 4,3 мг/см³ до 0,012 мг/см³) возрастает на 32 %;

- при длительной работе ртутного тиратрона, когда критерием долговечности является напряжение возникновения разряда, уменьшение объемной концентрации ртути на порядок величины (с 4,3 мг/см³ до 0,07 мг/см³) не снижает долговечности тиратрона, сохраняя ее на уровне 12000 часов, а при уменьшении объемной концентрации ртути на два порядка величины (с 4,3 мг/см³ до 0,012 мг/см³) долговечность тиратрона снижается до 2100 часов.

Апробация работы. Основные результаты работы опубликованы в 18 научно-технических статьях и доложены на 7 научно-технических конференциях:

- X конференции по физике газового разряда, Рязань, 2000;
- X международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития вакуумной техники», Казань, 2001;
- III международной научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы физики», Саранск, 2001;
- XI конференции по физике газового разряда, Рязань, 2002;
- IV международной научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы физики», Саранск, 2003;
- IX всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, НИТ-2004, Рязань, 2004;
- XII научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника», Судак, Украина, 2005.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 122 наименований. Объем работы составляет 171 страницу машинописного текста, включая 53 рисунка и 17 таблиц.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и определено общее направление исследований. Дано краткое содержание работы и приведены научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор современных электронных высоковольтных управляемых приборов для преобразования электрической энергии. Показано, что по физическим процессам, протекающим в электронных управляемых преобразовательных приборах (вентильях), и по материалам рабочей среды их можно разделить на пять групп: полупроводниковые, вакуумные, газоразрядные, ртутные с жидким катодом и ртутные с накалимым катодом. Представлены данные по их основным параметрам и особенностям конструкции. Проанализированы преимущества и недостатки приборов каждой из групп.

Раздел 1.1 посвящен рассмотрению мощных полупроводниковых управляемых вентилей – тиристоров. Проанализированы преимущества и не-

достатки этих приборов. К числу недостатков тиристоров относятся сравнительно низкое рабочее напряжение (не более 6 кВ), чувствительность к перенапряжениям, катастрофические отказы, низкая радиационная стойкость и высокая стоимость, на порядок величины превышающая стоимость эквивалентных газоразрядных приборов.

В разделе 1.2 представлены данные по высоковольтным управляемым вакуумным вентилям. Их особенностью является ограниченность сферы применения только очень высокими рабочими напряжениями (сотни киловольт).

Раздел 1.3 посвящен тиратронам с газовым наполнением. Их основной недостаток - сравнительно малая долговечность, связанная с поглощением наполняющего газа арматурой и стенками оболочек приборов.

В разделе 1.4 представлены данные по ртутным вентилям с жидким катодом. Их недостатки – экологическая опасность, связанная с большим количеством ртути, – до нескольких килограммов, большие габариты и масса, возможность применения только в стационарной аппаратуре.

Раздел 1.5 посвящен рассмотрению и анализу ртутных тиратронов. К числу преимуществ этих приборов по сравнению с газоразрядными вентилями, относится более высокий КПД, определяемый меньшими потерями в проводящий период вследствие меньшего потенциала ионизации ртути по сравнению с потенциалами ионизации инертных газов. Другим неоспоримым преимуществом ртутных тиратронов является их высокая долговечность, т.к. давление паров ртути в течение срока службы не уменьшается, а оксидный катод работает в таком режиме, при котором его долговечность может достигать десятков тысяч часов. К преимуществам ртутных тиратронов относятся и отсутствие ограничений по рабочему анодному напряжению – до сотен киловольт в секционированных приборах, и высокая надежность работы вследствие отсутствия катастрофических отказов при перенапряжениях. Радиационная стойкость ртутных тиратронов наряду с радиационной стойкостью вакуумных вентилях является самой высокой среди электронных вентилях.

Следует также отметить низкую стоимость ртутных тиратронов, которая на порядок величины меньше стоимости полупроводниковых и других аналогов.

При всех положительных качествах ртутных тиратронов им присущ ряд серьезных недостатков. Основным из них является экологическая опасность, связанная с применением сравнительно больших (1- 10 г) количеств жидкой ртути. Наличие ртути является причиной и другого недостатка ртутных тиратронов – существенно ограниченного диапазона допустимых температур ок-

ружающей среды (от +15 °С до +45 °С). Частично этот недостаток устранен при создании тиратронов со смешанным ртутно-аргоновым наполнением. Но эти приборы, так же как и газонаполненные тиратроны, характеризуются сравнительно низкой долговечностью, связанной с уменьшением давления аргона в течение срока службы. К недостаткам ртутных тиратронов традиционной конструкции относится и достаточно большое время готовности к работе (не менее 5 минут).

Сравнительный анализ свойств высоковольтных электронных управляемых приборов для преобразования электрической энергии, приведенный в главе 1, позволяет сделать вывод о том, что для преобразования электрической энергии, начиная с напряжений 5 - 10 кВ, с учетом комплекса энергетических и экономических требований, предъявляемых к этим приборам, предпочтительно применение ртутных тиратронов.

Вместе с тем для того чтобы существенно расширить применение ртутных тиратронов в современных устройствах преобразования электрической энергии, необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать возможность и уменьшить количество ртути в этих приборах на один - два порядка величины до уровня, определяемого экологической безопасностью таких массовых приборов, как люминесцентные лампы дневного света.
2. Определить пути повышения долговечности ртутных тиратронов до 10000-12000 часов.
3. Расширить диапазон допустимых температур окружающей среды до уровня, обеспечиваемого вакуумными приборами и газонаполненными тиратронами – от минус 60 °С до + 100 °С.
4. Уменьшить время готовности к работе на порядок величины – до 10-30 секунд.

Вторая глава посвящена рассмотрению и анализу физических процессов, протекающих в ртутных тиратронах.

В разделе 2.1 рассматриваются физико-химические свойства ртути и ее соединений. Эти сведения важны для выбора материалов, применяемых в конструкции ртутных тиратронов с точки зрения исключения потерь ртути в течение срока службы тиратрона в результате образования амальгам. Изучение свойств различных соединений ртути также имеет большое значение для выбора альтернативных твердотельных источников ртути вместо жидкой ртути.

Раздел 2.2 посвящен анализу механизма работы ртутных тиратронов. Рассмотрены основные факторы, кроме количества ртути и давления ртутного пара, оказывающие определяющее влияние на электрические параметры этих приборов. Показано, что на такие параметры, как напряжение зажигания (напряжение возникновения разряда) и напряжение запирающего, существенное влияние оказывают контактная разность потенциалов между катодом и сеткой, нагрев сетки плазмой дуги и тепловым излучением катода и анода, а также действие окружающих сетку ионов, приходящих от деионизирующейся плазмы.

Напряжение поддержания разряда главным образом зависит от режима работы и эмиссионной способности оксидного катода. Электрическая прочность, в особенности вероятность обратных зажигания, определяется материалом, конструкцией, температурой анода и взаимным расположением анода и сетки.

В разделе 2.3 рассмотрена типовая конструкция разработанных ранее и выпускаемых промышленностью ртутных тиратронов. Показано, что применение сравнительно большого количества жидкой ртути в виде капли, помещенной на дно катодной горловины ножки тиратрона, удаленной от основных источников нагрева - термоэлектронного катода и дуги, является основной причиной недостатков, присущих этим приборам (экологической опасности, большого времени готовности к работе, ограниченного диапазона допустимых температур окружающей среды).

Раздел 2.4 посвящен теоретическому исследованию влияния массы ртути и давления ртутного пара на основные параметры тиратрона для определения возможности существенного уменьшения количества ртути в приборе. При этом основное ограничение связано с увеличением напряжений возникновения и поддержания разряда при уменьшении давления ртутного пара. Расчет необходимой массы ртути проводился по формуле

$$m = \frac{pV\mu}{RT}, \quad (1)$$

где m – масса ртути; T – температура ртутного пара; R – универсальная газовая постоянная; μ – молярная масса ртути; V – объем тиратрона.

Расчет проведен при наибольшей допустимой температуре окружающей среды + 100 °С, которой соответствует температура баллона тиратрона и ртутного пара: + 230 °С. При таком условии требуется наибольшее количество ртути по сравнению с комнатной температурой.

Сравнение полученных расчетным путем данных по массе ртути и ее объемной концентрации с фактическими данными в серийно выпускаемых ртутных тиратронах, рассчитанных на обратное напряжение анода до 15 кВ, показало, что фактическая масса ртути и ее объемная концентрация в этих приборах на несколько порядков величины больше определенных расчетным путем. На основании проведенного теоретического анализа сделан вывод о возможности существенного уменьшения массы ртути и ее объемной концентрации в ртутных тиратронах.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию возможности существенного уменьшения массы ртути и ее объемной концентрации в ртутных тиратронах.

В разделе 3.1 обоснован выбор конструкции экспериментального макета тиратрона, рассчитанного на средний ток анода 0,5 А и обратное напряжение анода до 10 кВ. Сформулированы основные требования, предъявляемые к экспериментальному макету. С помощью численного моделирования и натурных испытаний определены основные геометрические размеры электродов макета и межэлектродные расстояния.

Раздел 3.2 посвящен выбору, расчету и исследованию катода экспериментального макета. С целью обеспечения максимальной экономичности и минимального времени готовности к работе выбран прямонакальный сетчатый оксидный катод, рассчитанный на работу при средней плотности тока до 125 мА/см², при рабочей температуре 1070 К.

Расчет времени разогрева такого катода проводился по формуле

$$t_{раз} = \frac{c_k g_k + c_z g_z + c_o g_o}{\varepsilon_k \sigma T_k^3 S_k}, \quad (2)$$

где g_k , g_z , g_o – соответственно масса зерна катода, никелевой губки и оксидного покрытия; c_k , c_z , c_o – удельные теплоемкости материалов зерна катода, никелевой губки и оксидного покрытия; ε_k – интегральный коэффициент излучения катода; T_k – температура катода; S_k – площадь активной поверхности катода; σ – постоянная Больцмана.

Время разогрева катода, определяемое по этой формуле, – 7 секунд, что находится в хорошем соответствии с экспериментально определенным временем разогрева – до 10 секунд.

Раздел 3.3 посвящен экспериментальному исследованию теплового режима тиратрона. Исследован тепловой режим баллона в зависимости от электрического режима работы тиратрона и мощности накала термокатода, а также от температуры окружающей среды до + 100 °С.

Установлено, что время готовности тиратрона к работе в основном определяется временем разогрева баллона тиратрона до температуры, при которой в тиратроне возникает разряд.

Время готовности тиратрона к работе определялось по формуле

$$t_{\text{гот}} = t_{\text{раз}} + \frac{(T_{62} - T_{61})SC\delta\rho}{0,239P}, \quad (3)$$

где T_{62} и T_{61} – температура баллона после и до введения тиратрона в рабочий режим; S – площадь поверхности баллона; C – удельная теплоемкость материала баллона; ρ – плотность материала баллона; δ – толщина стенки баллона; P – суммарная мощность, выделяющаяся в тиратроне.

Определенное расчетным путем время готовности тиратрона к работе составляет не более 30 секунд, что соответствует данным, полученным при экспериментальных исследованиях.

В разделе 3.4 представлены данные по экспериментальному исследованию зависимости напряжений возникновения и поддержания разряда от массы ртути и ее объемной концентрации. Исследования проводились при уменьшении массы ртути с 500 мг до 20 мг и ее объемной концентрации - с 4,3 мг/см³ до 0,17 мг/см³. Жидкая ртуть вводилась в тиратрон в стеклянных или металлических ампулах, выполненных в виде герметизированных с обоих концов трубок. Ампулы проектировались с учетом условий: не терять герметичность до температуры 500 °С, т.к. тиратрон в процессе откачки нагревается до температуры 480 °С, и разрушаться при температуре с 500 °С до 900 °С.

Механическое напряжение, приложенное изнутри к стенке ампулы, определялось по формуле

$$\sigma_c = P \frac{2r_2^2}{r_2^2 - r_1^2}, \quad (4)$$

где P – внутреннее давление паров ртути на стенку цилиндра; r_1 и r_2 – соответственно внутренний и внешний радиусы цилиндра.

Установлено, что при уменьшении массы ртути и ее объемной концентрации в указанных пределах напряжения возникновения и поддержания разряда практически не изменяются. На основании проведенных экспериментальных исследований подтвержден сделанный в результате теоретических исследований вывод о возможности существенного уменьшения массы ртути и ее объемной концентрации в ртутных тиратронах.

В разделе 3.5 приводятся данные о стабильности напряжений возникновения и поддержания разряда в тиратронах с уменьшенными массой ртути и ее объемной концентрацией в течение срока службы.

Показано, что при массе ртути до 20 мг и ее объемной концентрации до $0,17 \text{ мг/см}^3$ напряжение поддержания разряда остается стабильным в течение времени испытания 12000 часов. Напряжение возникновения разряда стабильно в течение 12000 часов при объемной концентрации ртути до $0,6 \text{ мг/см}^3$, а при объемной концентрации ртути до $0,17 \text{ мг/см}^3$ возрастает в допустимых пределах, определяемых установленными критериями.

Глава 4 посвящена разработке генераторов ртути на основе спрессованных порошков окиси ртути, исследованию параметров и долговечности тиратронов с этими генераторами.

В разделе 4.1 представлен обзор данных в научно-технической литературе по составу генераторов ртути, изготовленных из порошков различных соединений ртути.

Раздел 4.2 посвящен разработке генераторов ртути на основе спрессованной смеси порошков красной окиси ртути, титана или циркония и карбонильного железа. Обоснована необходимость создания таких генераторов с целью получения малого – до нескольких миллиграммов строго дозированного количества ртути. Прессованные таблетки генераторов ртути помещались в металлические контейнеры, предварительно откачанные до давления не ниже 10^{-3} Па. Минимальное количество ртути в созданных генераторах ртути – 1,4 мг. В работе предложен откачиваемый генератор ртути с индивидуальным подогревателем, на конструкцию которого подана заявка на патент и получено положительное решение Федерального института промышленной собственности от 16.02.2005 г.*

В разделе 4.3 представлены результаты исследования влияния уменьшения массы ртути с 20 мг до 1,4 мг и ее объемной концентрации с $0,17 \text{ мг/см}^3$ до $0,012 \text{ мг/см}^3$ на напряжения возникновения и поддержания разряда. Показано, что такое уменьшение массы ртути и ее объемной концентрации практически не оказывает влияния на напряжение поддержания разряда и приводит к увеличению вдвое напряжения возникновения разряда.

Раздел 4.4 посвящен исследованию стабильности напряжений возникновения и поддержания разряда в тиратронах с генераторами ртути и с уменьшенной с 20 мг до 1,4 мг массой ртути и с $0,17 \text{ мг/см}^3$ до $0,012 \text{ мг/см}^3$ ее объемной концентрацией.

* Зильберман М.М., Киселев Ю.В., Потапенко Н.В. Устройство для введения ртути в электронный прибор со стабилизацией его работы. Заявка на патент № 2003121699/28 (022980) с приоритетом от 14.07.2003 г.

Установлено, что на напряжение поддержания разряда такое уменьшение объемной концентрации ртути не оказывает существенного влияния в течение 12000 часов. При уменьшении массы ртути с 20 мг до 4 мг и ее объемной концентрации с $0,17 \text{ мг/см}^3$ до $0,035 \text{ мг/см}^3$ напряжение возникновения разряда изменяется в допустимых пределах. При дальнейшем уменьшении массы ртути с 4 до 1,4 мг и ее объемной концентрации с $0,035 \text{ мг/см}^3$ до $0,012 \text{ мг/см}^3$ долговечность тиратронов, определяемая увеличением напряжения возникновения разряда более 2500 В при $U_g = -10 \text{ В}$, уменьшается с 12000 до 2100 часов.

Пятая глава посвящена разработке ртутных тиратронов с уменьшенной массой ртути и ее объемной концентрацией. Разработаны тиратроны двух типов – на средний ток анода 0,5 А и на обратное напряжение анода 5 кВ и 10 кВ.

Раздел 5.1 посвящен разработке конструкции тиратронов на основе экспериментальных макетов и образцов.

В разделе 5.2 разработана технология изготовления тиратронов как с жидкой ртутью, помещенной в стеклянные капсулы, так и с прессованными из порошков окиси ртути генераторами ртути, помещенными в металлические герметизированные контейнеры. Особенностью технологии изготовления этих тиратронов является отсутствие открытой ртути в процессе производства тиратронов, т.к. ампулы и контейнеры с ртутью вскрываются только в откачанных и герметизированных тиратронах с помощью нагрева токами высокой частоты или лазером.

В разделе 5.3 исследована и показана возможность расширения диапазона допустимых температур окружающей среды от $+100^\circ\text{C}$ до минус 60°C для разработанных ртутных тиратронов.

В разделе 5.4 представлены результаты испытания тиратронов при повышенных до 15 кВ обратном напряжении анода и до 1 А – среднем токе анода с целью определения направления дальнейшего повышения мощности тиратронов с уменьшенной объемной концентрацией ртути.

В заключении сделаны основные выводы по результатам проведенной работы.

В приложении представлен акт о практическом использовании и внедрении результатов работы в производство.

Основные результаты работы

В диссертационной работе исследованы физические процессы, протекающие при дуговом разряде в парах ртути в трехэлектродных промежутках с

накаленным катодом, и разработаны долговечные ртутные тиратроны нового поколения. Основные результаты работы могут быть сформулированы следующим образом:

1. Проведено теоретическое исследование влияния массы ртути и ее объемной концентрации на напряжения возникновения и поддержания дугового разряда в парах ртути в трехэлектродных промежутках с накаленным катодом. Установлена принципиальная возможность уменьшения массы ртути и ее объемной концентрации на несколько порядков величины по сравнению с фактическими значениями массы ртути и ее объемной концентрации в ранее разработанных и выпускаемых промышленностью ртутных тиратронах.

2. Разработаны конструкция и технология изготовления твердотельных генераторов ртути в виде таблеток, спрессованных из порошков красной окиси ртути, титана и карбонильного железа. Создание твердотельных генераторов ртути позволило уменьшить и точно дозировать массу ртути, вводимой в тиратроны, с 20 мг до 1,4 мг. Сравнительными испытаниями тиратронов с массой ртути 20 мг установлено, что приборы, в которые ртуть вводится в виде твердотельных генераторов ртути, по электрическим параметрам ничем не отличаются от тиратронов, в которые вводится жидкая ртуть в ампулах.

3. Проведен цикл экспериментальных исследований зависимости напряжения возникновения и поддержания дугового разряда в парах ртути в трехэлектродных промежутках с накаленным катодом от массы ртути и ее объемной концентрации. Установлена возможность уменьшения массы ртути и ее объемной концентрации на два порядка величины: массы ртути с 500 мг до 1,4 мг, а ее объемной концентрации - с $4,3 \text{ мг/см}^3$ до $0,012 \text{ мг/см}^3$. При этом уменьшение массы ртути и ее объемной концентрации не оказывает влияния на напряжение поддержания разряда, но вдвое увеличивает напряжение возникновения разряда.

4. Проведено экспериментальное исследование стабильности напряжений возникновения и поддержания дугового разряда в парах ртути в трехэлектродных промежутках с накаленным катодом в зависимости от массы ртути и ее объемной концентрации в течение срока службы тиратронов. Установлено, что у тиратронов с уменьшенной массой ртути до 4 мг и ее объемной концентрацией до $0,035 \text{ мг/см}^3$ изменения контролируемых параметров – напряжений возникновения и поддержания разряда находятся в допустимых пределах в течение 12000 часов работы. Дальнейшее уменьшение массы ртути до 1,4 мг и ее объемной концентрации до $0,012 \text{ мг/см}^3$ приводит к установ-

ливаемому по увеличению напряжения возникновения разряда существенно-му снижению долговечности тиратронов – с 12000 часов до 2100 часов.

5. Проведено экспериментальное исследование влияния эмиссионной способности оксидного катода при снижении его температуры на величину возникновения разряда в ртутных тиратронах. Установлено, что увеличению напряжения возникновения разряда на 50 % в течение срока службы соответствует уменьшение эмиссионной способности оксидного катода при снижении его рабочей температуры на 170° (с 1070 до 900 K).

6. Проведено теоретическое и экспериментальное исследование влияния конструкции тиратрона, способа введения ртути и применения прямона-кального оксидного катода на время готовности прибора к работе. Установлена возможность уменьшения времени готовности к работе тиратронов с уменьшенными массой ртути и ее объемной концентрацией на порядок величины – до 10 – 30 секунд.

7. Проведено экспериментальное исследование влияния максимальной температуры окружающей среды на электрическую прочность ртутных тиратронов с уменьшенной до $0,17 \text{ мг/см}^3$ объемной концентрацией ртути. Установлена возможность повышения максимальной допустимой температуры окружающей среды до $+100^{\circ}\text{C}$.

8. Проведено исследование возможности уменьшения для ртутных тиратронов минимальной допустимой температуры окружающей среды до минус 60°C . Установлена принципиальная возможность обеспечения работоспособности при такой температуре окружающей среды ртутных тиратронов с установленным в нижней части баллона дополнительным подогревателем, обеспечивающим минимальную температуру баллона $+75^{\circ}\text{C}$.

9. Разработана конструкция откачиваемого генератора ртути с индивидуальным электронагревателем. Подана заявка на патент и получено положительное решение Федерального института промышленной собственности от 16.02.2005 г.

10. В процессе выполнения работы созданы ртутные тиратроны двух типов на средний ток анода 0,5 А и обратное напряжение анода 5 кВ и 10 кВ (ТР1-0,5/5 и ТР1-0,5/10) с уменьшенной до 20 мг массой ртути, что соответствует минимальной массе ртути в люминесцентных лампах дневного света. Разработанные тиратроны внедрены в производство, в аппаратуру и поставляются потребителям.

По теме диссертации опубликованы следующие работы.

1. Егорова Н.С., Зильберман М.М., Киселев Ю.В., Потапенко Н.В. Высоковольтный тиратрон с ртутным наполнением // Тез. докл. X конференции по физике газового разряда. Ч. 2. Рязань, 2000. С. 177-178.
2. Егорова Н.С., Зильберман М.М., Киселев Ю.В., Потапенко Н.В. Влияние количества вводимой ртути на электрические параметры тиратрона // Тез. докл. X конференции по физике газового разряда. Ч. 2. Рязань, 2000. С. 178-180.
3. Егорова Н.С., Зильберман М.М., Киселев Ю.В., Потапенко Н.В. Особенности откачки ртутных тиратронов нового поколения // Тез. докл. X международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития вакуумной техники. Вакуум -2001». Казань. 2001. С. 96-97.
4. Егорова Н.С., Зильберман М.М., Киселев Ю.В., Потапенко Н.В. Прямокальный оксидный катод для газоразрядных приборов// Тез. докл. III международной научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы физики». Саранск, 2001. С. 35.
5. Зильберман М.М., Киселев Ю.В., Потапенко Н.В. Влияние нового способа введения ртути на надежность работы тиратрона // Тез. докл. XI конференции по физике газового разряда. Ч. 1. Рязань, 2002. С. 101-102.
6. Зильберман М.М., Киселев Ю.В., Потапенко Н.В. Исследование долговечности тиратрона с ртутным наполнением // Тез. докл. XI конференции по физике газового разряда. Ч. 1. Рязань, 2002. С. 102-103.
7. Зильберман М.М., Киселев Ю.В., Потапенко Н.В. Уменьшение времени готовности к работе ртутного тиратрона// Тез. докл. IV международной научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы физики». Саранск, 2003. С. 19.
8. Зильберман М.М., Киселев Ю.В., Потапенко Н.В. Расширение диапазона рабочих температур тиратрона с ртутным наполнением // Тез. докл. IV международной научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы физики». Саранск, 2003. С. 20.
9. Зильберман М.М., Киселев Ю.В., Потапенко Н.В. Стабильность напряжений возникновения и поддержания дугового несамостоятельного разряда в парах ртути // Известия АН. Сер. Физическая, 2003. Т. 67. № 9. С. 1284-1285.
10. Зильберман М.М., Потапенко Н.В., Юдаев Ю.А. Экспериментальное исследование напряжений возникновения и поддержания разряда в ртутных

тиратронах для создания математической модели // Тез. докл. IX всероссийской научно-технической конференции «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании НИТ-2004». Рязань: РГРТА, 2004. С. 119-120.

11. Зильберман М.М., Потапенко Н.В., Юдаев Ю.А. Численное моделирование электрического режима ртутного тиратрона в обратный полупериод // Тез. докл. IX всероссийской научно-технической конференции «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании НИТ-2004». Рязань: РГРТА, 2004. С. 120-122.

12. Зильберман М.М., Потапенко Н.В., Юдаев Ю.А. Моделирование теплового режима ртутного тиратрона // Тез. докл. IX всероссийской научно-технической конференции «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании НИТ-2004». Рязань: РГРТА, 2004. С. 122-123.

13. Зильберман М.М., Потапенко Н.В., Юдаев Ю.А. Численное моделирование электрического и теплового режимов ртутного тиратрона // Информационные технологии в электронике: Межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГРТА, 2004. С. 80-83.

14. Зильберман М.М., Потапенко Н.В., Юдаев Ю.А. Исследование электрической прочности ртутного тиратрона // Информационные технологии в электронике: Межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГРТА, 2004. С. 83-87.

15. Зильберман М.М., Потапенко Н.В. Исследование электрических параметров ртутных тиратронов с генераторами ртути // Материалы XII научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника». Судак, Украина, 2005. С. 25-27.

16. Зильберман М.М., Потапенко Н.В. Исследование обратных зажигания в ртутных тиратронах при повышенной температуре окружающей среды // Материалы XII НТК «Вакуумная наука и техника». Судак, Украина, 2005. С. 27-28.

17. Зильберман М.М., Потапенко Н.В. Исследование работоспособности прямонакального оксидного катода при многократных включениях и выключениях напряжения накала // Электроника: Межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГРТА, 2005. С. 88-90.

18. Баринов Е.Н., Зильберман М.М., Потапенко Н.В., Юдаев Ю.А. Экспериментальное исследование теплового режима баллонов ртутных тиратронов // Электроника: Межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГРТА, 2005. С. 90-92.

Потапенко Надежда Викторовна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДУГОВОГО РАЗРЯДА В ПАРАХ РТУТИ
В ТРЕХЭЛЕКТРОДНЫХ ПРОМЕЖУТКАХ
С НАКАЛЕННЫМ КАТОДОМ
И РАЗРАБОТКА ДОЛГОВЕЧНЫХ РТУТНЫХ ТИРАТРОНОВ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 31.05.06. Формат бумаги 60x84 1/16.

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

Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.