

На правах рукописи



Круглов Сергей Александрович

**ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ КОММУТАТОРЫ ТОКА В СХЕМЕ
С ИНДУКТИВНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ**

Специальность 2.2.1. Вакуумная и плазменная электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Рязань 2021

Работа выполнена на кафедре «Промышленная электроника» в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина»

Официальные
оппоненты:

Гавриш Сергей Викторович, доктор технических наук, начальник отдела источников света, Общество с ограниченной ответственностью «Научно–производственное предприятие «Мелитта», г. Москва

Кристя Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, Калужский филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Калуга

Степанов Владимир Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина», г. Рязань

Ведущая
организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится «19» октября 2021 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.375.02 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «РГРТУ» и на официальном сайте <http://www.rsreu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.375.02 д.ф.-м.н., доцент

В.Г. Литвинов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время для науки, техники и производства важное значение имеют высоковольтные импульсные технологии. Базовыми задачами их развития и совершенствования являются разработка, конструирование и внедрение принципиально новых генераторов высоковольтных импульсов. Необходимость решения этих задач определяется множеством новых возможностей для различных отраслей экономики. В промышленности генераторы высоковольтных импульсов широко применяются для дефектоскопии; определения мест повреждения подземных электрических кабелей; обогащения руд редкоземельных металлов; инициирования электрогидроудара при штамповке и вытяжке листовых пластических материалов; формирования струи жидкости высокого давления при резке листовых материалов или пробивке отверстий; трамбовки или завивки свай; копания мерзлых грунтов. В медицине высоковольтные импульсы используются в рентгеновских и ультразвуковых аппаратах; для дезинфекции; для неинвазивного локального воздействия на жировые отложения и разрушения плотных опухолей.

В экологии с помощью высоковольтных импульсных технологий очищают выбросы электрических и тепловых станций, удаляют токсичные примеси из атмосферы, очищают природные водоемы и промышленные отстойники от техногенных загрязнений, очищают сточные воды, обеззараживают воды от бактериальной микрофлоры. В научных исследованиях высоковольтные генераторы импульсов широко используются в качестве лабораторного оборудования, в источниках питания ускорителей частиц, в лазерной технике для накачки лазеров, в радиолокации, эхолокации и георадиолокации. Следует ожидать, что дальнейшее расширение применения высоковольтных импульсных технологий позволит поднять характеристики систем в ряде социально, экономически и стратегически важных отраслях на качественно новый уровень.

Генераторы высоковольтных импульсов различают, прежде всего, по применяемым в них накопителям энергии. Классическим считается емкостный накопитель энергии (ЕНЭ), который при помощи сильноточного наносекундного коммутатора передает накопленную энергию электрического поля в нагрузку. Альтернативой ему является индуктивный накопитель энергии (ИНЭ), в котором энергия накапливается в магнитном поле индуктивного контура с током. Такой накопитель, по сравнению с ЕНЭ, имеет целый ряд существенных неоспоримых преимуществ. Основное из них заключается в том, что максимально достигаемая плотность магнитной энергии в ИНЭ (10^5 Дж/дм³) на три порядка больше, чем плотность энергии электрического поля в ЕНЭ, что соответственно улучшает массогабаритные показатели генераторов высоковольтных импульсов. Немаловажное значение имеет то, что питание генераторов осуществляется от низковольтных источников, и при этом обеспечивается качественно иной способ передачи энергии в нагрузку. Однако существует необходимость детального исследования работы генераторов высоковольтных импульсов с ИНЭ на основе газоразрядных коммутаторов тока (ГКТ). Поэтому тема настоящей диссертационной работы весьма актуальна.

Степень разработанности темы. Для реализации преимуществ ИНЭ требуются мощные высокоскоростные прерыватели тока, разработке и исследованию которых в последние годы уделяется достаточно большое внимание. Изучаются устройства на основе взрывающихся проводников (В.А. Демидов, А.С. Борискин, А.Н. Григорьев), плазменные прерыватели (П.И. Блинов, С.А. Данько, С.В. Логинов), размыкатели тока на SOS-диодах (С.Н. Рукин, А.И. Гу-

сев) и газоразрядные коммутаторы в режиме самообрыва тока. Последние являются наиболее перспективными при токе до 1 кА и напряжении до 100 кВ. Их использование позволяет получать короткие (наносекунды), многократно повторяемые импульсы со стабильными параметрами, обеспечивать достаточно простую регулировку энергии в импульсе и генерировать высоковольтные импульсы от низковольтных источников питания. Кроме того, газоразрядные коммутаторы обеспечивают как замыкание, так и размыкание тока накопителя энергии. Они способны полностью восстанавливать свои свойства после срывов в работе, возникающих в критических режимах функционирования генератора.

Целью работы является создание специализированных прерывателей тока для генераторов периодических мегаваттных высоковольтных импульсов на основе изучения физических и переходных процессов, протекающих в ходе прерывания тока газоразрядными коммутаторами в схеме с индуктивным накопителем энергии и исследования влияния на них конструктивных особенностей коммутаторов.

Для достижения поставленной цели решались следующие основные задачи:

1. Исследование физических явлений, протекающих в процессе прерывания тока в серийных и специализированных водородных газоразрядных коммутаторах низкого давления в генераторах высоковольтных импульсов с ИНЭ.
2. Теоретический анализ процесса перераспределения энергии между накопительной индуктивностью, прерывателем и нагрузочным элементом генератора импульсов на стадии обрыва тока в газоразрядном коммутаторе при различных типах нагрузок.
3. Разработка численной модели кулоновских взаимодействий электронов на стадии проводимости в газоразрядном коммутаторе тока и выявление основных факторов, способных влиять на самообрыв тока.
4. Экспериментальная оценка предельных режимов работы серийных и специализированных ГКТ, а также существующих нестабильностей параметров импульсов в генераторах высоковольтных импульсов с ИНЭ.
5. Исследование влияния изменений температуры электродов и рабочего газа ГКТ в генераторе импульсов с ИНЭ на его предельные характеристики, процесс обрыва тока и стабильность выходных импульсов напряжения.
6. Разработка конструкций сеточных узлов специализированных газоразрядных прерывателей тока, обеспечивающих повышение характеристик генераторов высоковольтных импульсов мегаваттной мощности с ИНЭ.

Научная новизна работы определяется её следующими результатами.

1. На основании обобщения и анализа полученных в результате исследования данных разработаны конструкции специализированных газоразрядных прерывателей тока, которые существенно упрощают процесс формирования коротких мегаваттных высоковольтных импульсов и повышают характеристики генераторов с индуктивными накопителями энергии.
2. Для водородных тиратронных газоразрядных коммутаторов низкого давления выявлено условие самообрыва тока в процессе роста при вводе энергии в индуктивный накопитель. В качестве критериального параметра предложено использовать величину суммарного заряда, прошедшего через сеточный узел с момента открывания тиратрона. Система «опрокидывается», когда параметр по мере роста становится равным пороговому (критическому) значению. Величина критического заряда лежит в интервале (0,5 – 2) мКл (для различных условий

эксперимента) при росте тока до $\sim 0,5$ кА за время около 10 мкс.

3. Установлено, что критический заряд линейно возрастает с увеличением давления водорода в коммутаторе. Скорость роста определяется конструкцией сеточного узла и величиной обрываемого тока. При уменьшении сечения разрядного канала в области сетки критический заряд уменьшается.

4. Экспериментально показано, что при высокой частоте следования импульсов генератора с ИНЭ температура электродов ГКТ существенно повышается, что приводит к изменению величины критического заряда и параметров генерируемых импульсов. Характерные данные эксперимента: температура сеточного узла повышается до $(240 - 300)^\circ\text{C}$ (через ~ 30 минут после включения); критический заряд увеличивается на $\sim 45\%$; нестабильность момента самообрыва тока возрастает в 3 – 5 раз.

5. Установлено, что время выключения тиратронного ГКТ в схеме с ИНЭ уменьшается при увеличении амплитуды импульса напряжения на аноде и возрастает при увеличении значения обрываемого тока.

6. Показано, что при работе генератора высоковольтных импульсов с ИНЭ и ГКТ на активную и газоразрядную нагрузки энергия потерь проводимости в ГКТ пропорциональна величине критического заряда, а наибольший КПД передачи энергии от накопителя к нагрузке обеспечивается в режиме «длинного тока» (при большой постоянной времени разряда накопительной индуктивности).

7. Определена минимальная величина накопительной индуктивности, при которой в генераторе высоковольтных импульсов с ИНЭ и ГКТ, работающем на газоразрядную нагрузку, при выключении коммутатора рассеивается вся накопленная энергия.

8. Экспериментально обнаружено, что применение генератора высоковольтных импульсов с ИНЭ и ГКТ для питания активного элемента азотного лазера, с одновременным помещением его в магнитное поле накопительной индуктивности, позволяет значительно (в два раза) повысить выходную мощность прибора и более эффективно использовать объем разрядного канала лазера.

9. Определены условия, обеспечивающие режим работы генератора высоковольтных импульсов с ИНЭ и ГКТ на активную нагрузку, при котором длительность формируемого на ней импульса напряжения определяется временем выключения прерывателя.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. В газоразрядных коммутаторах тиратронного типа самообрыв тока, возрастающего при вводе энергии в индуктивный накопитель, вызывается уменьшением концентрации газовых молекул в разрядном канале в области сеточного узла по схеме «спускового (триггерного) опрокидывания» и происходит, когда величина суммарного заряда, перенесенного через сеточный узел с момента открывания тиратрона, достигает критического значения. Критический заряд увеличивается при повышении давления газа в коммутаторе.

2. Газоразрядные коммутаторы тока тиратронного типа наиболее пригодны для генераторов высоковольтных (до 100 кВ) импульсов с индуктивным накопителем энергии при токе порядка 1 кА и длительности около 400 нс. В сравнении с другими типами размыкателей тиратроны в режиме самообрыва тока обеспечивают высокую электрическую прочность, способность работать при высокой частоте следования импульсов, простоту и сравнительно низкую стоимость устройства.

3. В тиратроне ТГИ2–500/20, включенном в схему генератора высоковольтных импульсов с индуктивным накопителем энергии, при фиксированной амплитуде импульса напряжения на аноде время выключения увеличивается с ростом величины обрываемого тока. Повышение амплитуды импульса напряжения на аноде с 15 до 55 кВ приводит к уменьшению времени выключения тиратрона ТГИ2–500/20 на 7-20 % в интервале обрываемых токов от 50 до 400 А, влияние амплитуды импульса напряжения на аноде тем значительней, чем больше величина обрываемого тока.

4. Применение генератора высоковольтных импульсов с индуктивным накопителем энергии и тиратронным газоразрядным коммутатором тока для питания активного элемента азотного лазера обеспечивает более эффективное использование объема разрядного канала и в 3,6 раза повышает мощность генерируемого лазером излучения. При этом элемент размещается в магнитном поле накопительной индуктивности (внутри катушки), а параллельно ей подключается дополнительная емкость порядка 100 пФ.

5. В тиратронных газоразрядных коммутаторах тока сужение разрядного канала или увеличение его длины в области сетки, осуществляемые путем инверсного расположения отверстий или перехода к их щелевой конфигурации в 4 – 6 раз уменьшает величину критического заряда, на 500 – 1000 нс снижает нестабильность момента обрыва тока (джиттер) и на 20-25 % сокращает минимальное время выключения приборов по сравнению с серийным тиратроном ТГИ2-500/20.

Методы исследований и достоверность результатов

Достоверность результатов обеспечивается использованием в проводимых исследованиях прозрачной экспериментальной методики и современного калиброванного измерительного оборудования, а также применением при вычислениях и моделировании общеизвестного математического аппарата.

Практическая значимость работы

Разработана численная модель переходного процесса выключения ГКТ в схеме генератора высоковольтных импульсов с ИНЭ, работающего на газоразрядную нагрузку. Получены аналитические соотношения для оценки перераспределения энергии между накопительной индуктивностью, прерывателем и активной нагрузкой при самообрыве тока в ГКТ.

Экспериментально показано, что использование ИНЭ в генераторах импульсов существенно повышает (в сравнении с паспортными значениями) предельные параметры таких серийных ГКТ, как таситроны, тиратроны и псевдоискровые разрядники: максимальный коммутируемый ток – в (2 – 8) раз, а максимальную амплитуду импульсного напряжения на аноде – в (4 – 6) раз. Рекомендованы предельно допустимые значения параметров для тиратрона ТГИ2-500/20 в режиме обрыва тока в схеме генератора импульсов с ИНЭ, которые введены в технические условия эксплуатации приборов.

Разработаны и исследованы тиратронные ГКТ, в которых сеточные узлы выполнены с инверсным расположением круглых отверстий или использованы отверстия щелевой формы, что обеспечило значительное (в 4 – 6 раз) уменьшение величины критического заряда и существенное (на 500 – 1000 нс) снижение джиттера по сравнению с серийным тиратроном ТГИ2-500/20.

Предложен способ стабилизации параметров генератора высоковольтных импульсов с ИНЭ при повышении температуры электродов ГКТ в рабочем режиме. Разработан и исследован опытный образец разборного макета ГКТ с холодным катодом и с сеточным узлом, в котором использованы отверстия кони-

ческой формы, позволившие получить удовлетворительные характеристики процесса самообрыва тока. Установлено, что размещение активного элемента азотного лазера в магнитном поле накопительной индуктивности (внутри катушки) с возбуждением разряда в приборе с помощью генерируемого индуктором напряжения, существенно (в 2 раза) повышает мощность излучения.

Экспериментально показано, что серийный тиратронный ГКТ в режиме формирования коротких высоковольтных импульсов может быть использован для получения пучка высокоэнергетичных (до 90 кэВ) электронов, выходящих сквозь анод во внешнюю среду, при сравнительно низком (около 2 кВ) напряжении источника заряда ИНЭ.

Реализация и внедрение. Полученные в диссертации результаты использованы при выполнении НИР 41-09 «Исследование обрывных явлений в диафрагмированной плазме ГКТ, включенного в схему с ИНЭ» ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 гг.; НИР 17-18Г «Разработка и исследование специализированных газоразрядных прерывателей тока с конструкциями сеточных узлов, обеспечивающих улучшенные параметры разряда» РФФИ. Результаты диссертации внедрены в ТУ эксплуатации тиратронов ТГИ2–500/20 и использованы в штатном технологическом процессе разработки и изготовления ГКТ в АО «НИИ ГРП «Плазма» (г. Рязань), а также в ООО «Импульсные технологии» (г. Рязань) при разработке ГКТ. Полученные в работе результаты использованы в учебном процессе подготовки магистров в ГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» по направлению 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника» в дисциплине «Высоковольтная импульсная техника» и при подготовке бакалавров по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» в дисциплине «Техника высоких напряжений». Использование результатов диссертационной работы перечисленными выше организациями подтверждается соответствующими актами о внедрении.

Личный вклад автора. Основные результаты представленной диссертации, в том числе постановка задач, разработка методики экспериментов и исследование серийных ГКТ, разработка конструкций сеточных узлов специализированных прерывателей тока, способов формирования и стабилизации генерируемых импульсов, основные научные результаты, выводы и рекомендации, принадлежат лично автору. Программные средства, реализующие численные модели, разработаны под руководством и при непосредственном участии автора. Работы, выполненные в соавторстве, посвящены детализации данных о работе ГКТ в генераторах высоковольтных импульсов с ИНЭ.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 2.2.1. «Вакуумная и плазменная электроника» в части пункта 1 «Экспериментальные и теоретические исследования физических явлений, происходящих при движении заряженных частиц (электронов, ионов) в вакууме и газе и их взаимодействии с постоянными и переменными электромагнитными полями»; пункта 2 «Теоретические и экспериментальные исследования и разработка методов расчета (включая методы анализа и оптимизации с использованием ЭВМ) различных типов вакуумных и газоразрядных приборов или отдельных их узлов и устройств с целью улучшения характеристик приборов» и пункта 3 «Исследование и разработка новых конструкций приборов в целом или их отдельных узлов, а также совершенствование конструкций существующих вакуумных и газоразрядных приборов или их отдельных узлов с целью улучшения характеристик приборов».

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих международных и всероссийских научно-технических конференциях: IX конференции по физике газового разряда (Рязань, 1998 г.), 4-й международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-98 (Новосибирск, 1998 г.), 2-й международной конференции «Проблемы и прикладные вопросы физики» (Саранск, 1999 г.), X конференции по физике газового разряда (Рязань, 2000 г.), VII международной конференции «Лазерные и лазерно-информационные технологии: фундаментальные проблемы и приложения» (Владимир – Суздаль, 2001 г.), III международной научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы физики» (Саранск, 2001 г.), 10-й международной конференции «Газоразрядная плазма и ее применение в технологиях» (Томск, 2007 г.), «16th International Symposium on High-Current Electronics (16th SHCE)» (Томск, 2010 г.), VII международной научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы физики» (Саранск, 2012 г.) 20th International Workshop on Beam Dynamics and Optimization (BDO) (Санкт-Петербург, 2014 г.), 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe) (Палермо, Италия, 2018 г.), 2018 ELEKTRO (Микулов, 2018 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 38 печатных работ, в том числе 12 работ из перечня, рекомендованного ВАК РФ, 5 работ входят в реферативные базы данных Scopus и Web of Science, получено 4 патента на изобретение, 6 патентов на полезную модель, 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав основного текста, заключения, списка литературы и приложения. Основной текст работы содержит 296 страниц, 128 рисунков и 6 таблиц. Список литературы на 13 страницах включает 122 наименования. В приложении приведены копии актов о внедрении результатов работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дана краткая характеристика работы, обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи исследования, выносимые на защиту научные положения, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В **первой главе** рассмотрены основные принципы построения генераторов высоковольтных импульсов, основанные на различных способах накопления электрической энергии. Выявлены преимущества схем генераторов, построенных на основе индуктивного накопителя энергии (ИНЭ):

1. Использование ИНЭ позволяет резко сократить число элементов схемы и соответственно ее массогабаритные показатели.
2. В современных импульсных конденсаторах электрическое поле, длительно выдерживаемое диэлектриком, достигает значений порядка 10^6 В/см, при этом плотность энергии составляет около 10^2 Дж/дм³. Плотность запасаемой энергии в индуктивных накопителях определяется предельно допустимыми магнитными полями, которые ограничены механической прочностью материалов индуктивных накопителей. При этом плотность магнитной энергии может достигать величины 10^5 Дж/дм³.

3. Накопление энергии в индуктивности происходит за счет протекания через нее нарастающего тока, таким образом, дозировать долю запасаемой энергии можно изменяя время протекания тока. Что также позволяет получать мощные импульсы от сравнительно низковольтных источников питания.

Для формирования импульсов с помощью ИНЭ требуются надежные размыкатели тока, в отличие от емкостных накопителей и формирующих линий, которые при работе используют замыкающие устройства. Размыкатели должны надежно и быстро обрывать ток в частотном режиме и выдерживать большие обратные напряжения. Приведен обзор основных типов существующих размыкателей тока, табл. 1.

Таблица 1. Параметры известных размыкателей тока

Тип размыкателя	Обрываемый ток	Напряжение на нагрузке	Время коммутации
Взрывающиеся проводники	600 кА	500 кВ	25 мс
SOS диоды	10-100 кА	100-300 кВ	20 нс
Вакуумные дугогасительные камеры	20 кА	35 кВ	1-10 мс
Плазменные прерыватели	5 МА	30 МВ	10 нс
Таситрон	100-500 А	30-40 кВ	100-300 нс

Сделан вывод об отсутствии размыкателя в диапазоне напряжений до 100 кВ и токов до 1 кА, способного многократно надежно прерывать ток за время 100-150 нс. Предложено использовать для этих целей газоразрядные коммутаторы тока тиратронной конструкции. Приведен обзор существующих схем применения и физических принципов работы таситрона – газоразрядного коммутатора тока тиратронного типа с полным управлением. Также проведено обзорное исследование физических процессов, приводящих к обрыву разряда в диафрагмированных газоразрядных промежутках, в том числе и в классических водородных тиратронах. Сделан вывод о необходимости проведения исследований работы серийных газоразрядных коммутаторов тока (таситрона, тиратрона и псевдоискрового разрядника) в схеме генератора высоковольтных импульсов с ИНЭ.

Вторая глава посвящена исследованию работы серийных газоразрядных коммутаторов тока в схеме генератора высоковольтных импульсов с индуктивным накопителем энергии. На первом этапе в качестве коммутаторов тока для индуктивного накопителя энергии использовались серийные таситроны ТГУ1-60/7 и ТГУ1-5/12. Данные таситроны представляют собой приборы несамостоятельного дугового разряда тиратронного типа с накаливаемым катодом и мелкоструктурной сеткой. В ТГУ1-5/12 сетка изготовлена из отдельных проводников, сплетенных между собой. Из-за этого диаметр ячеек сетки может быть различным. В ТГУ1-60/7 сетка выполнена с помощью фотолитографии, что значительно увеличивает точность размера каждой ячейки. Конструкцией ТГУ1-5/12 предусмотрена возможность охлаждения сеточного и анодного узлов жидким теплоносителем.

Рабочие параметры ТГУ1-60/7: коммутируемый ток 60 А, напряжение на аноде 7 кВ, для ТГУ1-5/12 коммутируемый ток составляет 5 А, напряжение на аноде 12 кВ. Рабочее напряжение накала катода 6,3 В.

Схема проводимых исследований и измерений представлена на рис. 1. В начальный момент времени на сетке коммутатора V_2 присутствует напряжение $E_{cm} = -140$ В, удерживающее его в закрытом состоянии. В момент прихода по-

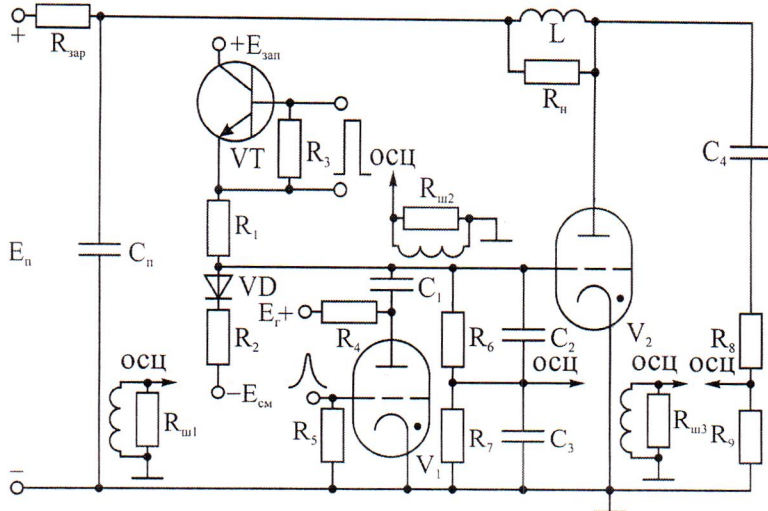


Рисунок 1. Схема проводимых исследований и измерений

Время разрядки конденсатора C_n не может превышать максимального времени открытого состояния газоразрядного коммутатора V $t_{\text{открп}}$, которое ограничено интервалом протекания положительного тока в контуре $C_n - L$ и равно половине периода собственных колебаний контура T_c :

$$t_{\text{открп}} = \frac{T_c}{2} = \pi \omega_c = \pi \sqrt{LC_n}. \quad (1)$$

Передача импульса напряжения в нагрузку осуществляется следующим образом. Пока на сетке таситрона присутствует отрицательное напряжение смещения, он закрыт. Ток через индуктивность равен нулю. В момент прихода положительного управляющего импульса таситрон открывается и по цепи емкость питания C_n - индуктивность накопителя L - газоразрядный коммутатор V - земля начинает протекать ток. Он запасает в индуктивности энергию

$$W_{\text{нак}} = LI^2 / 2. \quad (2)$$

На этом интервале времени напряжение на емкости $u_{C_n}(t) = u_L(t) + U_V$, где $u_L(t)$ - напряжение на накопительной индуктивности, U_V - падение напряжения на газоразрядном коммутаторе тока в открытом состоянии. Для газоразрядных коммутаторов несамостоятельного дугового разряда с накаливаемым катодом величина U_V составляет $60 \div 70$ В. Исходя из используемых при исследовании напряжений источника питания $E_n = 500 \div 5000$ В, величиной U_V можно пренебречь и считать, что $u_{C_n}(t) = u_L(t)$. В проводимых исследованиях используется параллельное соединение сопротивления нагрузки и накопительной индуктивности. Соответственно ток $i_V(t)$, протекающий через коммутатор на стадии проводимости, разветвляется. При этом ток, протекающий через сопротивление нагрузки, определяется как

$$i_{\text{пр}}(t) = i_V(t) \cdot \rho / (R_n + \rho), \quad (3)$$

где $\rho = \sqrt{L/C_n}$ - характеристическое сопротивление контура $C_n - L$, R_n - сопротивление нагрузки. В схеме экспериментов с таситроном в качестве коммутатора величина $C_n = 2$ мкФ, а величина накопительной индуктивности варьировалась от 12 мкГн до 60 мкГн. Соответственно значение характеристического сопротивления контура составляет от 2,44 Ом до 5,48 Ом. При исследовании в качестве сопротивления нагрузки использовались безиндуктивные резисторы

положительного импульса управления коммутатор V_2 открывается. Конденсатор C_n через сопротивление $R_{\text{зар}}$ заряжается до напряжения источника питания E_n , а процесс его разряда определяется частотой собственных колебаний контура $C_n - L$. Для исключения влияния источника питания на процесс разрядки необходимо, чтобы время зарядки конденсатора C_n было значительно больше времени его разрядки. Вре-

марки ТВО мощностью 60 Вт с номиналом от 100 до 1000 Ом. При указанных параметрах схемы величина тока, протекающего через сопротивление нагрузки на стадии проводимости, составит $0,052 i_V(t)$. Для задач исследования этой величины можно пренебречь и считать, что $i_L(t) = i_V(t)$.

В получившемся RLC контуре ток через индуктивность при добротности больше 0,5 в общем случае определяется как

$$i_L(t) = (E_n / \rho) e^{-\alpha t} \sin \omega t, \quad (4)$$

где $\alpha = 1/2R_n C_n$ – коэффициент затухания, $\omega = 2\pi/T_c = 1/\sqrt{LC_n}$ – собственная частота колебаний контура.

В случае когда постоянная времени затухания контура $\tau_{\text{зат}} = 1/\alpha = 2R_n C_n$ значительно больше интервала времени протекания положительного тока в контуре, уменьшением амплитуды тока во времени можно пренебречь. При указанных параметрах схемы минимальная величина $\tau_{\text{зат}} = 400$ мкс, а максимальное значение половины периода собственных колебаний контура составит 34,4 мкс, что в 11,6 раза меньше. Минимальное значение $T_c/2$ составит 15,4 мкс. Следовательно, можно считать, что ток в индуктивности изменяется по закону

$$i_L(t) = (E_n / \rho) \sin \omega t. \quad (5)$$

В случае малых значений углов $\sin x \approx x$. Тогда

$$i_L(t) \approx (E_n / \rho) \cdot \omega t \approx E_n \cdot t_u / L, \quad (6)$$

где t_u – длительность положительного импульса управления. В диапазоне исследуемых токов (до 600 А) и параметров схемы экспериментов $E_n = 3000$ В, $L = 12$ мкГн. Величина $i_L(t)$, определенная по (6), составит 600 А при $t_u = 2,4$ мкс, а значение тока через индуктивность для этой длительности импульса, определенное по (5), 578 А, отклонение от линейной функции составило 3,7 %. Соответственно при указанных параметрах в интервале t_u от 0 до 2,4 мкс изменение $i_L(t)$ можно считать линейным. Тогда

$$I_{\text{обр}} \approx E_n \cdot t_u / L, \quad (7)$$

где $I_{\text{обр}}$ – ток обрыва дугового разряда в коммутаторе (ток через индуктивность и коммутатор в момент выключения коммутатора). С увеличением значения L интервал времени, в котором зависимость тока обрыва от длительности импульса управления можно считать линейной, растет.

При возрастании тока увеличивается запасаемая в индуктивности энергия. Таким образом, меняя длительность положительного импульса управления, можно менять запасаемую накопителем энергию, регулируя напряжение и мощность импульса в нагрузке.

В момент окончания положительного управляющего импульса второй канал формирует импульс управления, который открывает тиратрон V_1 . При его отпирании с конденсатора C_4 к сетке коммутатора V_2 прикладывается отрицательный потенциал гашения разряда E_r , запирающий его.

Для исследования форм токов и напряжений использовались осциллографы С 1-75 и С 7-8. Схема проводимых измерений представлена на рис. 1. С учетом того, что постоянная времени заряда конденсатора C_n $\tau_{\text{зар}} = R_3 C_n$ много больше $T_c/2$, для схемы ИНЭ он будет являться источником питания. Соответственно ток через него равен току через индуктивность на стадии накопления энергии и стадии выключения коммутатора.

Учитывая, что на этом временном интервале $i_L(t) = i_V(t)$ ток конденсатора C_n будет равен току, протекающему через анод коммутатора V_2 . Токи через ос-

новые электроды газоразрядного коммутатора измерялись трансформаторами тока, выполненными в виде пояса Роговского, которые обозначены на схеме в виде параллельного соединения обмотки трансформатора и соответствующего сопротивления шунта $R_{ш}$. Ток анода измерялся с помощью $R_{ш1}$, ток сетки $R_{ш2}$, а ток катода $R_{ш3}$.

Напряжение на сетке коммутатора V_2 измерялось с помощью скомпенсированного делителя ($R_6/R_7=C_3/C_2$). Амплитуда импульса напряжения на аноде измерялась через разделительный конденсатор C_4 делителем R_8R_9 .

Для индуктивного накопителя энергии наибольший интерес представляет процесс выключения тока, во время которого происходит передача энергии от накопителя в нагрузку. Поэтому основная часть исследований посвящена именно процессу выключения газоразрядных прерывателей тока. Первоначально для исследований был выбран таситрон ТГУ1-60/7. Гашение разряда начинается в момент подачи на сетку импульса отрицательного напряжения. Ток через накопительную индуктивность и таситрон в этот момент равен току обрыва дугового разряда в коммутаторе $I_{обр}$. Выключение таситрона протекает в интервал времени $t_{вык}$, за который ток через коммутатор уменьшается от $I_{обр}$ до нуля, а напряжение на аноде прибора достигает своего максимального значения U_m . В момент окончания положительного управляющего импульса к сетке скачком прикладывается отрицательное напряжение. Вокруг витков сетки увеличивается положительный объемный заряд, который увеличивает эффективную поверхность сетки. Ток сетки растет, число ионов, из анодно-сеточной области проникающих в катодно-сеточную, уменьшается, и ток катода начинает падать. В момент времени, когда ионные оболочки вокруг витков сетки смыкаются, катодный ток становится равным нулю. С этого момента разряд горит только в анодно-сеточной области. Ток разряда начинает уменьшаться, и в конечном итоге разряд гаснет. Проведенные исследования показали, что в любой момент времени ток анода $I_a(t)$ равен сумме токов катода $I_k(t)$ и сетки $I_c(t)$. В процессе нарастания напряжения на аноде таситрона можно выделить две стадии:

- медленную, характеризующуюся напряжением U_1 и временем протекания $t_{фр1}$. Медленная стадия протекает за время, необходимое для смыкания ионных оболочек в ячейках сетки;
- быструю, характеризующуюся напряжением U_m-U_1 и временем протекания $t_{фр2}=t_{вык}-t_{фр1}$. Быстрая стадия формирования напряжения на аноде таситрона протекает за время распада плазмы в анодно-сеточной камере.

В результате проведенных экспериментов выявлено влияние на длительность медленной стадии формирования анодного напряжения $t_{фр1}$ величины напряжения гашения разряда E_r . Эта зависимость имеет ярко выраженный спадающий характер, что объясняется ростом скорости смыкания ионных оболочек вокруг витков сетки и приводит к более раннему завершению процесса переключения анодного тока с катода на сетку таситрона. Скорость протекания быстрой стадии формирования анодного напряжения от величины E_r не зависит.

Проведенные исследования показали, что значительное влияние на процесс выключения таситрона оказывает давление водорода в его объеме. Давление газа в замкнутом объеме зависит от его температуры:

$$p = NkT, \quad (8)$$

где N - концентрация газа, k - постоянная Больцмана, T - температура. Рабочая температура таситрона во время его функционирования изменяется, и для исключения влияния этого изменения на процесс выключения было решено проводить дальнейшие исследования с использованием таситрона ТГУ1-5/12, в котором предусмотрена возможность охлаждения сеточного и анодного узлов жидким теплоносителем. При проведении экспериментов в качестве теплоносителя использовалась вода в проточном режиме.

Рабочее давление водорода в коммутаторе определяется напряжением накала генератора водорода $U_{ГВ}$. Одним из основных параметров, характеризующих работу коммутатора в схеме с индуктивным накопителем, является время его выключения. Поэтому были проведены исследования (рис. 2) зависимости полного $t_{\text{вык}}$ и $t_{\text{фр1}}$ таситрона ТГУ1-5/12 от величины $U_{ГВ}$ в различных температурных режимах (с использованием охлаждения анодного и сеточного узлов и без их охлаждения) при фиксированных амплитуде обрываемого тока и напряжении гашения разряда. Рост $t_{\text{фр1}}$ и $t_{\text{вык}}$ с увеличением напряжения накала генератора водорода обусловлен возрастанием давления рабочего газа в объеме прибора, который приводит к уменьшению скорости смыкания ионных оболочек и скорости распада плазмы в анодно-сеточной камере. Применение охлаждения анодного и сеточного узлов снижает давление в объеме прибора, и процессы смыкания ионных оболочек и распада плазмы ускоряются. С увеличением времени уменьшаются амплитуды анодного напряжения соответствующих стадий, что обусловлено увеличением потерь энергии в коммутаторе на стадии выключения при фиксированной энергии, запасенной в накопительной индуктивности.

В результате проведенных исследований было выявлено два различных режима работы таситрона, в которых происходят срывы его функционирования. Первый режим - пробой промежутка сетка-анод из-за большой амплитуды напряжения на аноде в момент выключения таситрона. Было установлено, что предельное напряжение на аноде таситрона для обоих типов прибора составляет порядка 40 кВ. Основной причиной, приводящей к этому типу пробоя, является автоэлектронный ток в промежутке сетка-анод, так как величина напряженности электрического поля в нем составляет порядка $1,5 \cdot 10^7$ В/см.

Во втором случае переход прибора в неуправляемое состояние происходит при превышении определенной величины обрываемого тока, независимо от амплитуды импульса напряжения на аноде, что обусловлено возникновением ионно-электронной эмиссии с сетки. Для таситрона ТГУ1-5/12, как в случае охлаждения сеточного узла, так и без него, при достижении анодным током величины 250 А в момент выключения происходит зажигание разряда на сетку,

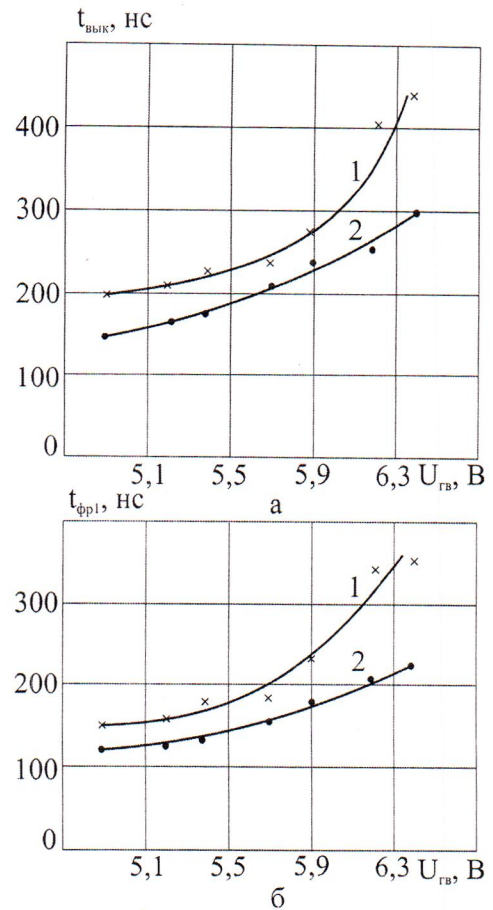


Рис. 2. Зависимость $t_{\text{вык}}$ - а и $t_{\text{фр1}}$ - б от $U_{ГВ}$ для ТГУ1-5/12, 1 - без охлаждения, 2 - с охлаждением. $L=35$ мкГн, $R_H=300$ Ом, $E_G=400$ В, $I_{\text{обн}}=150$ А

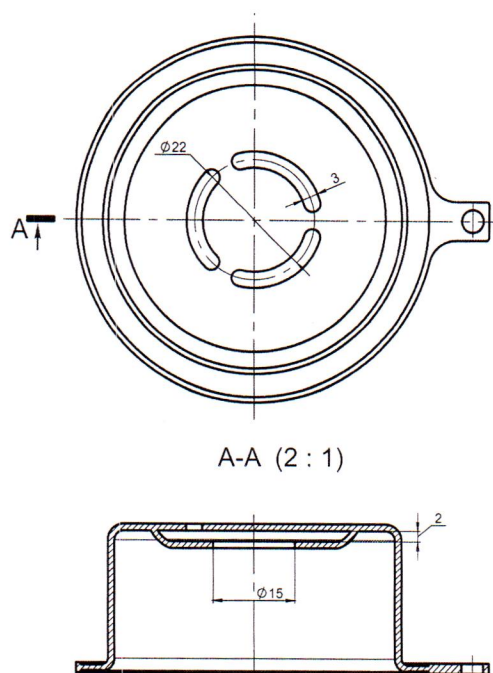


Рис. 3. Конструкция сеточного узла тиратрона ТГИ2-500/20, вид сверху и в разрезе

мм. Отверстие в экране сетки имеет круглую форму и диаметр 15 мм. Величина перекрытия отверстий или кратчайшее расстояние между краями отверстий экрана и сетки составляет 2 мм. Расстояние между сеткой и экраном составляет 2 мм, толщина материала электродов 1,25 мм.

Схема проводимых исследований и измерений аналогична рис. 1. Процесс включения тиратрона аналогичен процессу включения таситрона. После зажигания разряда между анодом и катодом через тиратрон начинает протекать ток, длительность которого ограничена либо временем перезарядки конденсатора C_3 , либо временем возникновения самообрыва тока. Наличие или отсутствие отрицательного гасящего импульса и время его подачи не оказывают влияния на процесс самообрыва тока в тиратроне. В схеме экспериментов с тиратроном в качестве коммутатора величина $C_n=2$ мкФ, а величина накопительной индуктивности варьировалась от 12 мкГн до 60 мкГн. При исследовании в качестве сопротивления нагрузки использовались безиндуктивные резисторы марки ТВО мощностью 60 Вт с номиналом от 47 до 1000 Ом. При указанных параметрах схемы максимальное время протекания тока будет равно половине периода собственных колебаний контура, что составит 34,4 мкс, и окажется в 5,5 раза меньше $\tau_{\text{заг}}=188$ мкс. Таким образом, для описания тока через индуктивность и тиратрон можно использовать выражение (5).

Для построения генераторов высоковольтных импульсов на основе индуктивного накопителя энергии представляет интерес процесс выключения тиратрона, вызванный явлением самообрыва тока в нем. Проведенные исследования показали, что после протекания через тиратрон тока определенной амплитуды и длительности происходит его самообрыв. Чем меньше время протекания тока через тиратрон, тем выше его амплитуда в момент самообрыва, и больше амплитуда импульса напряжения, формируемого на нагрузке (рис. 4).

Для описания процесса выключения тиратрона, по сравнению с таситроном, необходимо ввести дополнительный параметр – время протекания тока

таситрон переходит в неуправляемый режим. Часть тока анода течет через сетку, а часть через катод.

В таситроне ТГУ1-60/7 предельный ток обрываемый составил 570 А. После достижения током предельной величины происходит пробой на сетку с дальнейшим горением разряда на катод. В момент срыва ток анода течет через катод и сетку.

Следующим этапом стало исследование работы в схеме генератора высоковольтных импульсов металлокерамического водородного тиратрона ТГИ2-500/20. Рабочие характеристики: коммутируемый ток 500 А, анодное напряжение 20 кВ, напряжение накала катода 6,3 В. Конструкция сеточного узла тиратрона ТГИ2-500/20 представляет собой многодырчатую диафрагму, состоящую из сетки и сеточного экрана (рис. 3). В сетке есть три отверстия в форме радиальной прорези шириной 3 мм. Перемычка между прорезями имеет ширину 3 мм. Диаметр центральной линии прорезей 22

через прибор до его самообрыва $t_{обр}$ (рис. 4). Величина тока через тиратрон в момент обрыва согласно (5) будет определяться как

$$I_{обр} = (E_{п} / \rho) \sin \omega t_{обр}. \quad (9)$$

Энергия, запасаемая в накопительной индуктивности, и амплитуда импульса напряжения на нагрузке определяются амплитудой обрываемого тока. Таким образом, изменяя величины $t_{обр}$ и $E_{п}$, можно регулировать энергию в накопительной индуктивности и амплитуду импульса напряжения на нагрузке. В проводимых экспериментах величина $E_{п}$ варьировалась от 500 В до 4 кВ.

Обрыв дуги в газонаполненных промежутках низкого давления возникает при наличии изменения сечения по длине разряда. В тиратроне ТГИ2-500/20 изменение сечения разряда происходит в области сеточного узла. Характер полученных зависимостей величины обрываемого тока при разных временах его протекания через тиратрон позволил сделать предположение, что процесс обрыва определяется величиной, в формировании которой участвует как ток, так и длительность его протекания через разрядный промежуток. Такой величиной является заряд, переносимый через сетку тиратрона в проводящем состоянии. Так как величина этого заряда характеризует процесс самообрыва тока в тиратроне, в дальнейшем будем называть его критическим зарядом, переносимым через сеточный узел, необходимым для обрыва тока $Q_{кр}$. Учитывая выражение (5) и то, что при указанных условиях эксперимента $i_L(t) = i_V(t)$, величину $Q_{кр}$ определяем как

$$Q_{кр} = \int_0^{t_{обр}} i_V(t) dt = E_{п} C_{п} (1 - \cos \omega t_{обр}). \quad (10)$$

В результате проведенных исследований была получена зависимость критического заряда, необходимого для обрыва тока, от напряжения накала генератора водорода. Эксперимент проводился при фиксированном значении напряжения источника питания, для сохранения неизменной скорости нарастания тока через тиратрон. На полученных осциллограммах тока определялось время его протекания $t_{обр}$, и по выражению (10) вычислялся критический заряд.

Полученная зависимость (рис. 5, кривая 1) практически совпадает с зависимостью давления водорода в тиратроне от напряжения накала генератора водорода для данного типа приборов (рис 5, кривая 2). Исходя из характера данных зависимостей, можно говорить о том, что обрыв тока в тиратроне определяется зарядом, переносимым через сеточную область. Для конкретной конструкции тиратрона при фиксированном значении напряжения накала генера-

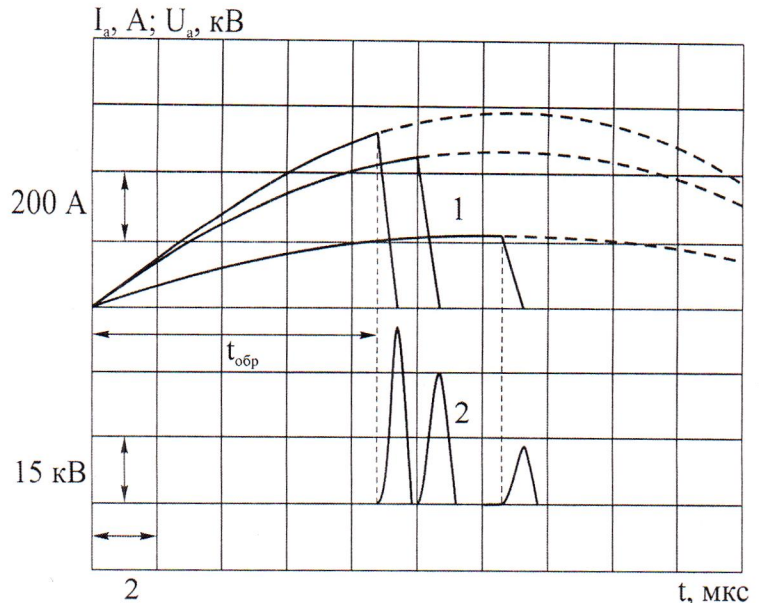


Рис. 4. Характерные осциллограммы тока анода – 1 и напряжения на аноде – 2 тиратрона ТГИ2-500/20 в режиме самообрыва протекающего тока

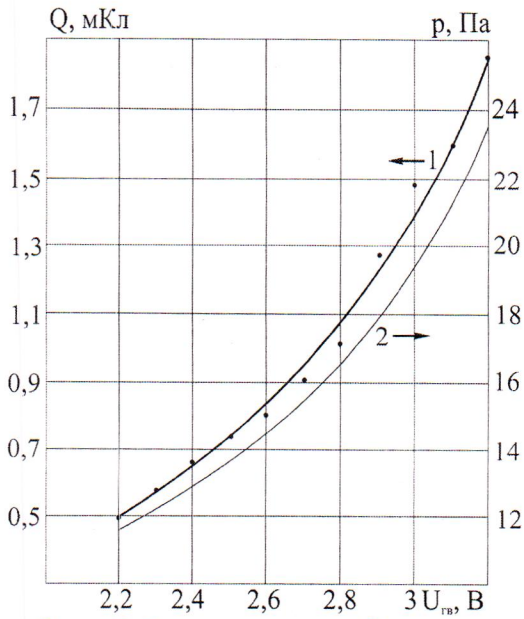


Рис. 5. Зависимость $Q_{кр} - 1$ и давления водорода в тиратроне ТГИ2-500/20 - 2 от $U_{гв}$. $L=25$ мкГн, $C_{п}=2$ мкФ, $R_{п}=200$ Ом, $E_{п}=900$ В

тора водорода и неизменной скорости нарастания протекающего тока заряд, необходимый для обрыва, – величина постоянная.

Рост критического заряда с увеличением давления газа в объеме прибора обусловлен появлением большего количества частиц в сужении разрядного канала. В этом случае растет число взаимодействий носителей заряда с атомами водорода, которое необходимо для создания условий для самообрыва разряда. Соответственно увеличивается и количество носителей заряда, которые должны пройти через сеточный узел. Таким образом, зная экспериментальную зависимость заряда от напряжения накала генератора водорода для конкретного типа прибора, можно задать параметры схемы, при которых произойдет самообрыв тока.

С учетом данных, полученных при исследовании работы таситрона, было при-

нято решение провести исследования по применению дополнительного гашения разряда в тиратроне. Для этого на тиратрон V_1 (рис. 1) подавались напряжения $E_{г}$, накала генератора водорода, накала катода и импульс управления. При своей работе V_1 начинает формировать на сетке тиратрона V_2 импульсы отрицательной полярности.

Проведенные исследования показали, что если отрицательный управляющий импульс подается на сетку V_2 значительно раньше или позже (более 500 нс) момента самообрыва тока через прибор, то это не приводит к улучшению каких-либо характеристик процесса обрыва тока. Однако если отрицательный управляющий импульс подается в момент самообрыва тока, то улучшается стабильность выключения, уменьшается время выключения и соответственно увеличивается амплитуда импульса напряжения на аноде.

Эффективность работы индуктивного накопителя энергии определяется временем размыкания ключа (время выключения тиратрона $t_{вык}$). На рис. 6 приведены зависимости суммарного времени выключения тиратрона от напряжения накала генератора водорода для случая самообрыва и случая дополнительного гашения. Для всех случаев повышение давления водорода в приборе приводило к увеличению полного времени выключения. Рост времени выключения с увеличением давления обусловлен повышением концентрации плазмы в приборе, что требует большего времени на ее полный распад.

В присутствии большого отрицательного напряжения на сетке происходит отбор части ионов из пространства, прилегающего к сетке, что уменьшает концентрацию носителей заряда в плазме, и ее распад происходит быстрее. При увеличении амплитуды отрицательного управляющего импульса от 0 до 250 В происходит непрерывное уменьшение времени выключения тиратрона и рост амплитуды импульса напряжения на его аноде. Это обусловлено тем, что с ростом амплитуды отрицательного управляющего импульса увеличивается число ионов, отбираемых из плазмы присеточного пространства, уменьшается кон-

центрация носителей заряда в плазме и скорость ее распада увеличивается. Дальнейшее увеличение амплитуды не приводит к улучшению рабочих характеристик. Это обусловлено тем, что сетка не способна обеспечить отбор большего количества ионов из присеточной плазмы за интервал времени, равный длительности выключения тиратрона.

При создании генераторов высоковольтных импульсов с индуктивным накопителем энергии параметры и энергетические характеристики формируемых импульсов зависят от амплитуды обрываемого тока. Величина тока в момент обрыва определяется выражением (9) и зависит от величины $t_{обр}$. В ходе проведения экспериментов было выявлено, что время протекания тока через тиратрон до момента его обрыва изменяется от импульса к импульсу, то есть возникает временная нестабильность (джиттер) момента обрыва протекающего тока относительно времени подачи положительного импульса управления (времени включения тиратрона) $\Delta t_{обр}$, которую необходимо учитывать при создании генераторов мощных импульсов на основе индуктивного накопителя энергии и тиратроне.

Были проведены исследования по определению зависимости $\Delta t_{обр}$ от напряжения накала генератора водорода (рис. 7). Зависимость имеет спадающую от давления характеристику. Подача в момент самообрыва на сетку дополнительного отрицательного импульса напряжения позволяет сократить число путей горения разряда между анодом и катодом, из-за того что уменьшается концентрация носителей плазмы в присеточной области за счет отбора из нее ионов сеткой. Использование дополнительного гашения позволяет значительно, в 2,5-3 раза, уменьшить нестабильность обрыва тока в тиратроне ТГИ2 – 500/20 по сравнению со схемой без гашения (рис. 7, кривая 2).

В проведенных экспериментах минимальное время выключения тиратрона ТГИ2 – 500/20 составило 200-250 нс, предельный обрываемый ток 850 А, что в 1,7 раза превышает его рабочий ток при классическом использовании, а максимальная амплитуда импульса напряжения на аноде тиратрона составила более 90 кВ, что в 4,5 раза превышает его паспортные характеристики. Необходимо отметить, что при амплитуде импульса напряжения на аноде тиратрона выше 30 кВ возникает тормозное рентгеновское излучение, прони-

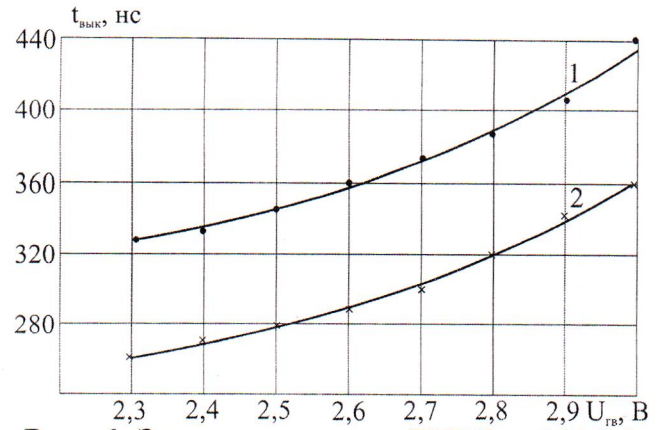


Рис. 6. Зависимость $t_{вык}$ ТГИ2 – 500/20 от $U_{гв}$: 1 – в случае самообрыва тока, 2 – с использованием дополнительного гасящего импульса. $L=25$ мкГн, $C_{п}=4$ мкФ, $R_{н}=200$ Ом, $I_{обр}=120$ А

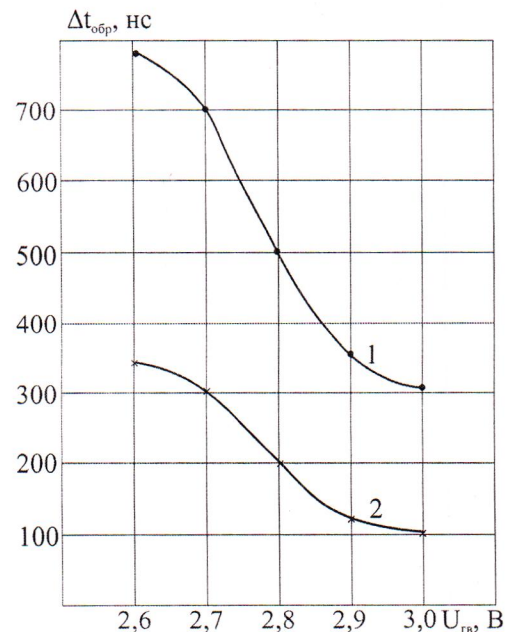


Рис. 7. Зависимость $\Delta t_{обр}$ ТГИ2 – 500/20 от $U_{гв}$: 1 – $E_{г}=0$ В, 2 – $E_{г}=200$ В. $L=13$ мкГн, $C_{п}=2$ мкФ, $R_{н}=200$ Ом, $I_{обр}=400$ А

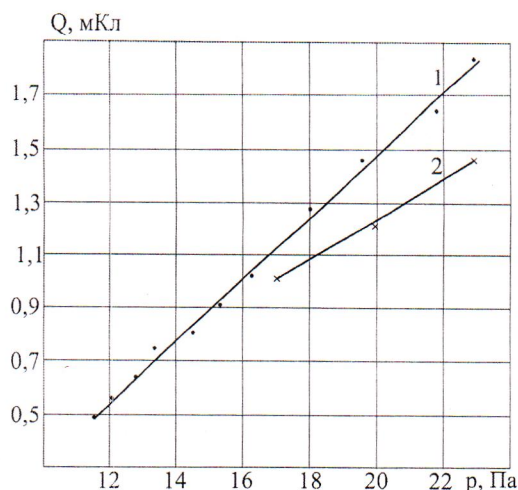


Рис. 8. Зависимость $Q_{кр}$ от давления водорода в тиратроне ТГИ2 – 500/20 – 1 и псевдоискровом разряднике – 2

Диаметры отверстий в сеточном электроде составляют 3 мм, а диаметр отверстия в сеточном экране 10 мм, величина перекрытия между краем сеточных отверстий и краем отверстия в сеточном экране 6 мм. Экспериментальные исследования псевдоискрового разрядника показали, что в диапазоне напряжений накала генератора водорода от 2,8 до 3,4 В в нем происходит самообрыв протекающего тока. Величины критического заряда в ТГИ2 – 500/20 и исследуемом приборе близки и линейно зависят от давления водорода (рис. 8), что обусловлено схожестью конструкций и близкими значениями характерных геометрических размеров сеточных узлов тиратрона и псевдоискрового разрядника.

В результате проведенных исследований установлено, что $\Delta t_{обр}$ в псевдоискровом разряднике в 3,5 раза больше, чем у тиратрона ТГИ2 – 500/20. Характерное время выключения в 2 раза меньше времени выключения тиратрона и составило порядка 100 нс, что обусловлено отсутствием в псевдоискровом разряднике накаливаемого катода. Предельный обрываемый ток составил 1 кА, максимальная амплитуда импульсов напряжения на аноде 110 кВ.

Выполненные исследования показали, что наиболее перспективным серийным газоразрядным коммутатором тока для генераторов высоковольтных импульсов с индуктивным накопителем энергии является тиратрон ТГИ2 – 500/20. Несмотря на стабильность процесса выключения тиратрона, при схожих временных характеристиках параметры генерируемых импульсов значительно уступают по предельным значениям параметрам импульсов, полученных в случае использования тиратрона в качестве коммутатора. Использование псевдоискрового разрядника влечет за собой значительное усложнение схемы управления коммутатором, а высокая нестабильность процесса самообрыва тока и узкий диапазон рабочих давлений значительно сужают область применения генераторов высоковольтных импульсов, созданных на его основе.

Третья глава посвящена детальному исследованию работы тиратрона ТГИ2 – 500/20. Для расширения диапазона рабочих давлений амплитуда положительных импульсов управления $E_{зап}$ была увеличена до 2 кВ. С целью исключения выхода из строя полупроводниковых компонентов схемы управления и снижения времени включения прерывателя в качестве формирователя положительных импульсов управления вместо транзистора используется тиратрон ТГИ1 – 50/6. Схема проводимых измерений не изменилась. Для измерения пол-

кающее во внешнюю среду сквозь боковую поверхность керамической оболочки в области анода. Наличие выхода рентгеновских квантов в процессе обрыва тока в тиратроне дает возможность использовать газоразрядный прерыватель тока как импульсный источник рентгеновского излучения.

Следующим этапом стало исследование работы в качестве прерывателя тока предсерийного образца псевдоискрового разрядника, который в дальнейшем пошел в серийное производство как ТГИ1-10к/20 с максимальным коммутируемым током 10 кА и максимальным постоянным напряжением на аноде 20 кВ. Конструкция сеточного узла данного прибора схожа с конструкцией сеточного узла ТГИ2 – 500/20.

ного напряжения на аноде и напряжения на сетке использовался высоковольтный осциллографический щуп TESTEC HVP-15HF с коэффициентом деления 1:1000. Для получения осциллограмм токов и напряжений применялись осциллографы Tektronix TDS-2022 и Tektronix TPS-2024. Для вычисления критического заряда проводилась оцифровка осциллограмм тока через прибор с последующим численным интегрированием кривой тока по времени. Контроль температуры поверхности коммутатора осуществлялся тепловизором SDS HOTFIND DXS.

В процессе экспериментов установлено, что в частотном режиме работы через некоторое время, при неизменных напряжениях $E_{п}$ и $U_{гв}$, происходит увеличение критического заряда, амплитуды обрываемого тока и времени его протекания. Данный эффект обусловлен ростом температуры и соответственно давления водорода в объеме тиратрона. Была проведена серия экспериментов по определению изменения во времени температуры фланца катода, фланца сетки и анода при различных мощностях, потребляемых схемой генератора высоковольтных импульсов от источника $E_{п}$. При этом напряжение источника питания и параметры схемы оставались неизменными. Эксперименты были проведены для двух величин потребляемой от $E_{п}$ мощности – 530 Вт и 260 Вт, при этом частота следования импульсов составила 400 и 200 Гц соответственно. Для компенсации изменения с ростом температуры $t_{обр}$ и $I_{обр}$ проводилось уменьшение напряжения накала генератора водорода в течение функционирования прибора.

До подачи импульсов управления в установившемся режиме после прогрева прибора температура фланца катода составляла 168°C, фланца сетки 157°C, анода 105°C. Полученные в установившемся режиме результаты показывают, что при работе тиратрона в режиме самообрыва тока, независимо от потребляемой от $E_{п}$ мощности, максимальные потери энергии происходят в анодном и сеточном узлах. Изменение температуры контрольных точек поверхности прибора происходит в первые 12-14 минут (рис. 9), после этого динамика изменения температуры всех контролируемых участков одинакова. Выход на установившийся температурный режим всех контрольных точек происходит приблизительно на 20-й минуте работы, и в дальнейшем их температура не изменяется, что обусловлено равенством подводимой и рассеиваемой мощностей в приборе. Динамика изменения температуры поверхности прибора при различных потребляемых от источника энергии мощностях одинакова.

В случае отсутствия регулировки $U_{гв}$ происходит рост $Q_{кр}$. Увеличение критического заряда с ростом температуры фланца сетки обусловлено ростом хаотической составляющей движения нейтральных и заряженных частиц как в объеме тиратрона в целом, так и в области сеточного узла. Помимо этого в процессе разогрева возрастает $\Delta t_{обр}$. При повышении температуры фланца сетки на 40°C происходит возрастание величины критического заряда, необходимого

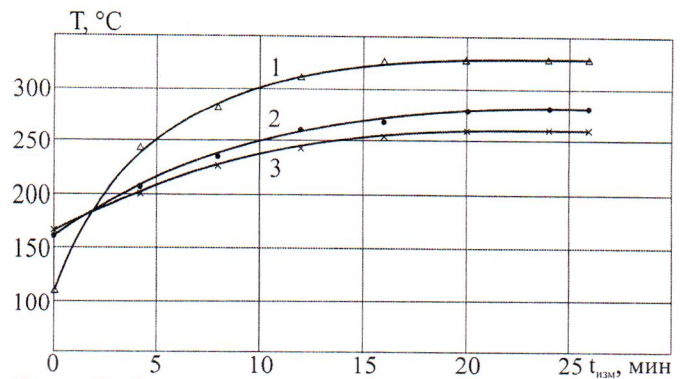


Рис. 9. Зависимости изменения температуры анода – 1, фланца сетки – 2 и фланца катода – 3 ТГИ2 – 500/20 от продолжительности работы при потребляемой от источника питания мощности 530 Вт.

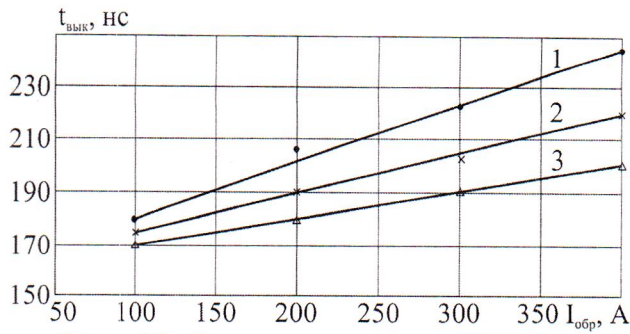


Рис. 10. Зависимость $t_{вык}$ ТГИ2–500/20 от величины $I_{обр}$ при фиксированной U_m . 1 – $U_m = 15$ кВ, 2 – $U_m = 35$ кВ, 3 – $U_m = 55$ кВ

для обрыва тока, на 35 %, а временная нестабильность момента обрыва увеличивается в 5 раз.

По результатам вышеприведенных экспериментов были разработаны способ стабилизации параметров высоковольтных импульсов и алгоритм его реализации путем введения отрицательной обратной связи на источник напряжения накала генератора водорода по температуре фланца катода.

Для исключения влияния процесса изменения температуры на результаты экспериментов все дальнейшие исследования проводятся при следующих условиях: частота следования управляющих импульсов 10 Гц, время нахождения прибора в рабочем режиме минимизируется, временной интервал между получением экспериментальных точек составляет 3-4-минуты.

В ходе дальнейших экспериментов было выявлено влияние значения $I_{обр}$ и U_m на величину $t_{вык}$ (рис. 10). Увеличение $t_{вык}$ с ростом $I_{обр}$ при фиксированном U_m обусловлено увеличением количества заряженных частиц в анодно-сеточной камере тиратрона и увеличением времени их рекомбинации после самообрыва разряда. При этом увеличение U_m при неизменном $I_{обр}$ приводит к значительному увеличению скорости рекомбинации и соответственно к снижению $t_{вык}$.

Были проведены исследования влияния $I_{обр}$ на величины $\Delta t_{обр}$ и $Q_{кр}$. При малых значениях $I_{обр}$ джиттер достигает значительных величин, после чего снижается и, переходя через минимум зависимости, начинает возрастать (рис. 11). Минимум зависимости $\Delta t_{обр}$ наблюдается при величине $I_{обр}$ порядка 300 А и составляет 300 нс. Величина минимального значения $\Delta t_{обр}$ не зависит от номинала накопительной индуктивности. Величина U_m не оказывает влияния на процессы, протекающие до момента самообрыва разряда. Эффективность откачки газа небольшими токами невелика, так как по величине поток частиц из области сетки в направлении анода сравним с диффузионным потоком, направленным в обратную сторону. С ростом тока увеличивается заполняемость разрядом площади каждого отверстия, повышается эффективность откачки

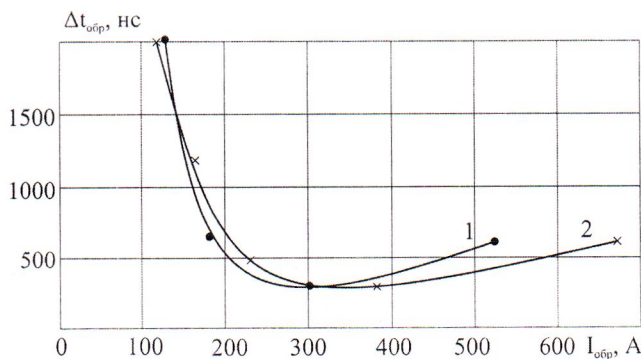


Рис. 11. Зависимости $\Delta t_{обр}$ от величины $I_{обр}$ при различных значениях U_m : $L = 23$ мкГн, 1 – $U_m = 12$ кВ, 2 – $U_m = 16$ кВ

нейтрального газа из области сеточного узла и обратный диффузионный поток газа не способен оказать заметного влияния на процесс самообрыва разряда. Временная нестабильность уменьшается и достигает минимума при величине обрываемого тока порядка 300 А. Рост $\Delta t_{обр}$ при дальнейшем увеличении значения обрываемого тока обусловлен повышением температуры газа и краев отверстий в сетке протекающим током.

Наличие минимума характери-

стики зависимости $Q_{кр}$ от $I_{обр}$ (рис. 12) обусловлено следующими причинами. При фиксированном значении L и давления газа в тиратроне изменение $I_{обр}$ приводит к изменению величины $t_{обр}$. Чем меньше $I_{обр}$, тем больше время протекания тока через тиратрон до момента его самообрыва. Повышение $Q_{кр}$ слева от точки минимума соответствует случаю самообрыва разряда после прохождения максимума тока через прибор, во второй четверти периода синусоиды. В этой части зависимости рост $Q_{кр}$ обусловлен падением эффективности вытеснения нейтрального газа из области сеточного узла, вызванной уменьшением значения протекающего через сеточный узел тока во времени. Справа от минимума критический заряд линейно возрастает с увеличением $I_{обр}$, что обусловлено перераспределением направленной составляющей скорости, а также разогревом плазмы и краев сеточных отверстий. С повышением $I_{обр}$ растет количество носителей заряда в плазме разряда, а вслед за этим увеличивается число кулоновских взаимодействий между ними, что приводит к росту хаотической составляющей в скорости потока носителей зарядов в плазме, увеличению $t_{обр}$ и критического заряда соответственно.

Для проверки данного предположения была разработана программа для расчета количества кулоновских столкновений на стадии протекания тока через газоразрядный коммутатор в схеме индуктивного накопителя энергии. Полученные в результате расчета данные хорошо коррелируют с зависимостью $Q_{кр}$ от давления водорода в приборе при различных значениях протекающего тока. Рост числа кулоновских столкновений с увеличением давления водорода обусловлен повышением начальной концентрации молекул газа в тиратроне, что приводит к возрастанию частоты ионизаций и количества электрон-ионных столкновений. Соответственно на величину критического заряда при повышении давления оказывает влияние не только повышение начальной концентрации молекул водорода, но и увеличение числа кулоновских столкновений. Проведенные расчеты носят качественный характер и предназначены для подтверждения тенденции изменения величины критического заряда с ростом величины обрываемого тока.

Четвертая глава посвящена исследованию энергетических характеристик и переходных процессов при работе индуктивного накопителя энергии с тиратроном ТГИ2 – 500/20 в качестве коммутатора на активную и газоразрядную нагрузку.

Энергия, которая выделяется в тиратроне во время его функционирования, равна сумме энергий, выделяющихся на стадиях включения, проводимости и выключения. Процесс включения тиратрона происходит при нулевом токе,

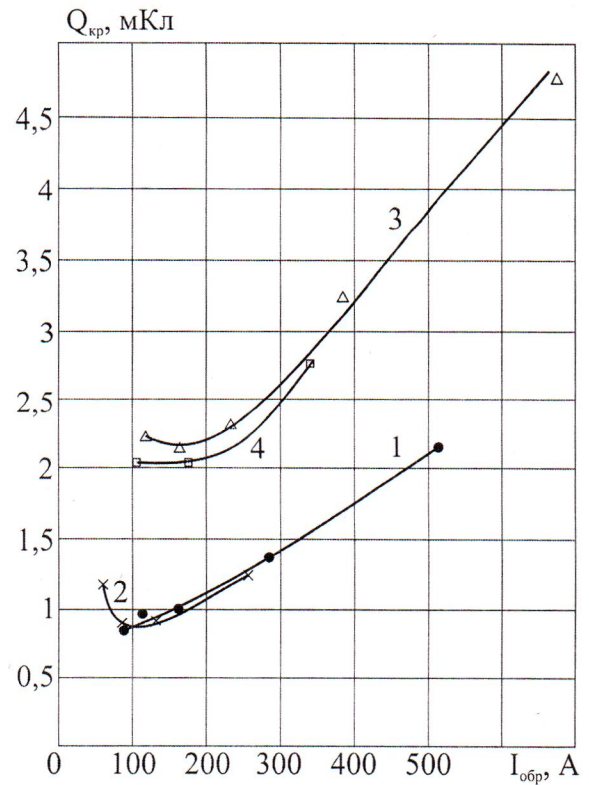


Рис. 12. Зависимости $Q_{кр}$ от тока обрыва при различных значениях L и давления водорода в приборе:

- 1 – $L=23$ мкГн, $p=13$ Па;
- 2 – $L=72$ мкГн, $p=13$ Па;
- 3 – $L=23$ мкГн, $p=16$ Па;
- 4 – $L=72$ мкГн, $p=16$ Па

напряжение на аноде составляет до 5 кВ, а время включения 2-5 нс, соответственно в случаях, когда $\rho \ll R_n$, энергией, выделяющейся на стадии включения, можно пренебречь.

Энергия потерь проводимости $W_{пп}$ в тиратроне определяется функцией изменения протекающего тока, а также напряжением поддержания разряда в приборе. Среднее значение напряжения поддержания разряда $U_{ср}$ практически не изменяется и составляет порядка 130 В. Тогда

$$W_{пп} = \int_0^{t_{обр}} (U_{ср} \cdot E_n / \rho) \sin \omega t dt = CU_{ср} \cdot E_n (1 - \cos \omega t_{обр}) = U_{ср} Q_{кр}. \quad (11)$$

Энергия, выделяющаяся в тиратроне на стадии выключения $W_{пк}$, определяется как $W_{пк} = \int_0^{t_{вык}} u_a(t) i_k(t) dt$. В результате проведенных исследований обнаружено, что, при работе на активную нагрузку в зависимости от U_m существует три различных режима протекания процесса выключения коммутатора ($U_m \leq 23$ кВ; $23 \text{ кВ} < U_m \leq 45$ кВ; $45 \text{ кВ} < U_m \leq 90$ кВ), в каждом из которых характер убывания тока в приборе и нарастания напряжения на его аноде описывается различными функциями:

$u_a(t) = U_m \sin(t\pi / 2t_{вык})$, $i_k(t) = I_{обр} (1 - \sin(t\pi / 2t_{вык}))$ при $U_m \leq 23$ кВ,
 $u_a(t) = U_m t / t_{вык}$, $i_k(t) = I_{обр} (1 - t / t_{вык})$ при $23 \text{ кВ} < U_m \leq 45$ кВ,
 $u_a(t) = U_m te^{(t-t_{вык})/t_{вык}} / t_{вык}$, $i_k(t) = I_{обр} (1 - te^{(t-t_{вык})/t_{вык}} / t_{вык})$ при $45 \text{ кВ} < U_m \leq 90$ кВ.

В качестве проверки правильности выбранных аппроксимаций был проведен расчет токов через L и нагрузку на стадии выключения тиратрона с использованием аппроксимированной функции тока через прибор. Результаты этих вычислений использовались при определении функции напряжения на нагрузке на стадии выключения, которая должна повторять форму переднего фронта импульса напряжения на аноде коммутатора. Функция изменения напряжения на нагрузке, полученная с использованием аппроксимации тока, протекающего через тиратрон на стадии выключения для всех диапазонов U_m с погрешностью не хуже 5 %, совпадает с выбранной аппроксимацией функции

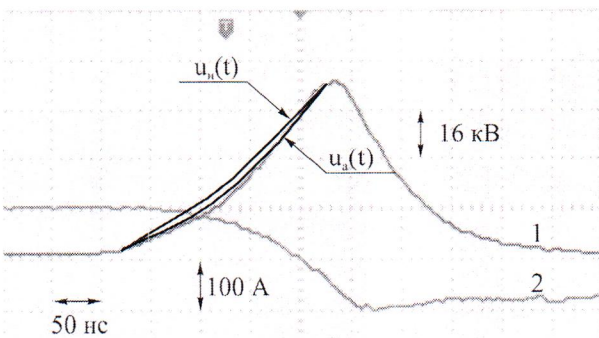


Рис.13. Осциллограммы напряжения на аноде – 1 и тока анода – 2 тиратрона ТГИ2 – 500/20 на стадии выключения с наложенными аппроксимирующими функциями и рассчитанной функцией напряжения на нагрузке при $45 \text{ кВ} < U_m \leq 90$ кВ.
 $R_n = 620$ Ом, $L = 54$ мкГн, $U_{гв} = 2,6$ В

напряжения на аноде тиратрона (рис. 13). Решая уравнение $W_{пк}$ для всех диапазонов получаем $W_{пк} = K_n U_m I_{обр} t_{вык}$, где $K_1 = 0,136$ при $U_m \leq 23$ кВ, $K_2 = 0,167$ при $23 \text{ кВ} < U_m \leq 45$ кВ, $K_3 = 0,152$ при $45 \text{ кВ} < U_m \leq 90$ кВ.

Энергия, выделяющаяся в нагрузке, состоит из двух частей. Это энергия, выделяющаяся в нагрузке на стадии выключения тиратрона $W_{пк}$, и энергия, выделяющаяся в нагрузке за счет разряда накопительной индуктивности после выключения тиратрона $W_{пн}$. Для диапазона $U_m \leq 23$ кВ $W_{пк} = U_m^2 t_{вык} / (2R_n)$, для диапазона $23 \text{ кВ} < U_m \leq 45$ кВ $W_{пк} = U_m^2 t_{вык} / (3R_n)$, для диапазона $45 \text{ кВ} < U_m \leq 90$ кВ $W_{пк} = 0,87 U_m^2 t_{вык} / (4R_n)$. Энергия $W_{пн}$ не зависит от формы анодного напряжения и

определяется как $W_{\text{нн}} \approx U_m^2 \tau / (2R_{\text{н}}) W_{\text{нн}}$, где $\tau = L/R_{\text{н}}$ – постоянная времени процесса разряда накопительной индуктивности в нагрузку. Коэффициент полезного действия передачи энергии индуктивного накопителя в нагрузку $\text{КПД} = [(W_{\text{нн}} + W_{\text{нк}}) / W_{\text{нак}}] 100 \%$. Проведенные расчеты показали, что при малых значениях U_m $W_{\text{пп}}$ значительно больше $W_{\text{нк}}$. С ростом напряжения их соотношение выравнивается и при $U_m > 50$ кВ $W_{\text{нк}}$ становится больше энергии $W_{\text{пп}}$. Наибольший КПД при передаче энергии от индуктивного накопителя в активную нагрузку соответствует режиму протекания через нее длинного тока (большой постоянной времени разряда накопительной индуктивности).

При работе генератора высоковольтных импульсов с ИНЭ и газоразрядным коммутатором тока на газоразрядную нагрузку (например, активный элемент азотного лазера, рис. 14) сложно провести аналитический расчет протекающих переходных процессов и соответственно оценить энергетические характеристики схемы. Для решения данной задачи была разработана программа для ЭВМ, позволяющая численно решить систему дифференциальных уравнений, описывающих переходный процесс в такой схеме. Сопротивление коммутатора на стадии выключения аппроксимировано функцией $R_{\text{к}}(t) = R_{\text{к min}} \cdot e^{t/\tau_{\text{к}}}$, где $\tau_{\text{к}}$ – постоянная времени выключения коммутатора, $R_{\text{к min}}$ – сопротивление коммутатора в проводящем состоянии. Выражение для сопротивления нелинейной нагрузки имеет вид $R_{\text{н}}(t) = R_{\text{н ост}} + R_{\text{н max}} \cdot e^{-(t-t_{\text{зак}})/\tau_{\text{н}}}$, где $(R_{\text{н ост}} + R_{\text{н max}})$ – сопротивление нагрузки до зажигания в ней разряда, $R_{\text{н ост}}$ – остаточное сопротивление разрядного промежутка после развития разряда, $t_{\text{зак}}$ – время зажигания разряда в нагрузке, $\tau_{\text{н}}$ – постоянная времени развития разряда в нагрузке. По результатам расчетов проведена оценка эффективности передачи энергии от индуктивного накопителя в газоразрядную нагрузку. Анализ полученных результатов показал: максимальный КПД достигается в случае, когда суммарное время запаздывания и развития разряда в нагрузке в 6-7 раз меньше времени выключения коммутатора; существует минимальное значение накопительной индуктивности, при котором вся накопленная энергия будет рассеиваться при выключении коммутатора: $L_{\text{min}} = 0,304 U_{\text{зак}} t_{\text{вык}} / I_{\text{обр}}$, где $U_{\text{зак}}$ – напряжение зажигания разряда в нагрузке; в зависимости от соотношения параметров схемы генератора, существует два режима горения разряда в нагрузке: режим длинного тока с КПД более 90 % и режим короткого тока с КПД менее 50; при подключении параллельно накопительной индуктивности дополнительной емкости C' процессы выключения коммутатора и развития разряда в нагрузке разносятся между собой во времени в случае, когда период собственных колебаний контура LC' больше $t_{\text{вык}}$; комбинация индуктивного и емкостного накопителей энергии позволяет увеличить КПД генератора в режиме короткого тока до 90-95 %.

Для проверки полученных результатов численного моделирования были проведены исследования работы генератора с ИНЭ и тиратроном ТГИ2-500/20 отпаянный активный элемент азотного лазера с продольным разрядом (V_1 на рис. 14).

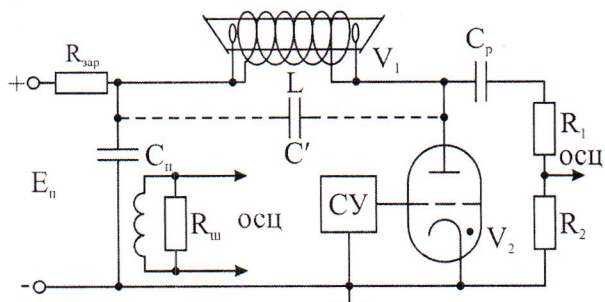


Рис. 14. Экспериментальная схема генератора с ИНЭ и тиратроном ТГИ2-500/20 работающего на активный элемент азотного лазера

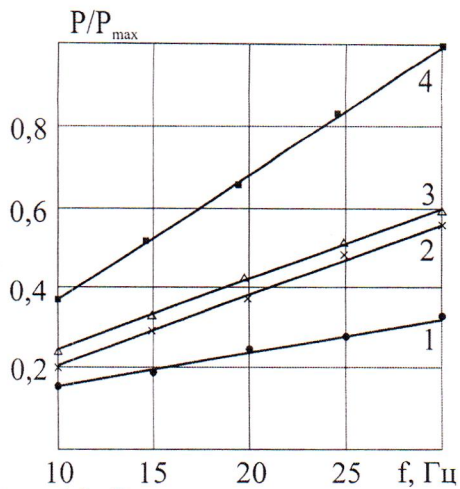


Рис. 15. Зависимости приведенной средней мощности излучения от частоты следования импульсов при различных режимах работы генератора: 1, 2 – активный элемент вне соленоида; 3, 4 – активный элемент внутри соленоида, емкость C' отключена; 1, 3 – емкость C' отключена; 2, 4 – емкость C' подключена

65 кВ, а мощность излучения возрастает почти в 2 раза (прямая 3, на рис. 15). В эксперименте световое кольцо генерируемого излучения превращалось в пятно.

При применении в схеме генератора емкости величиной 100 пФ, подключенной параллельно L , мощность излучения выросла в 1,8 раза при обоих способах подключения индуктивности (прямые 2 и 4, рис. 15). Данный результат подтверждает, что в схеме с использованием параллельно подключенной к L емкости влияние параметров разряда в нагрузке на процесс выключения тиратрона значительно снижается.

Пятая глава посвящена разработке и исследованию работы специализированных газоразрядных прерывателей тока для ИНЭ и перспективным областям их применения.

На первом этапе исследований для оценки влияния конструкции сеточного узла на величину критического заряда и параметры процесса выключения прерывателя был разработан разборный макет газоразрядного прибора, конструкция которого позволяет осуществлять замену сеточного узла, не нарушая при этом работоспособности коммутатора.

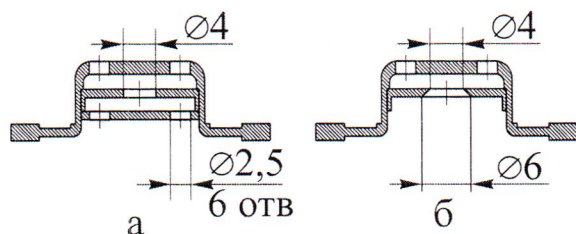


Рис. 16. Чертежи сеточного узла газоразрядного прерывателя тока: а – с двумя областями сужения на пути горения разряда, б – с коническим отверстием в управляющем электроде

Разрядный канал образован бериллиевой керамикой с длиной активной зоны 200 мм и внутренним диаметром 3 мм, давление азота составило 20 мм рт. ст. Средняя мощность излучения измерялась калориметром ИМО – 2Н. Исследования проводились при 2-х способах подключения накопительной индуктивности к нагрузке. В первом случае нагрузка подключалась параллельно накопительной индуктивности, но находилась снаружи ее витков. При этом $U_{зак}$ составило 50 кВ, а излучение генерируется только в пристеночной области разрядной трубки (свет излучался в виде кольца). Мощность излучения возрастает с увеличением частоты (прямая 1, рис. 15).

На следующем этапе исследований разрядная трубка была помещена внутрь соленоида, что позволяет возбуждать активную среду лазера электрическим полем с одновременным воздействием на нее изменяющегося магнитного поля. При таком способе включения $U_{зак}$ увеличивается до

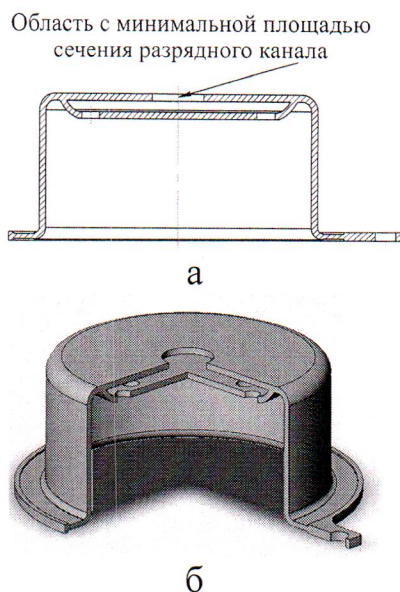


Рис. 17. Сечение – а и изометрическое изображение – б сеточного узла с инверсным расположением отверстий

щим 2 сужения на пути горения разряда (рис. 16, а) не было зафиксировано обрыва тока. Однако анализ полученных данных показал, что в момент самообрыва тока, протекающего через сеточный узел, в основном промежутке происходит переход сверхплотного тлеющего разряда в самостоятельный дуговой с последующим каскадным зажиганием на сетку и сеточный экран и образованием на них катодных пятен. Сверхплотный тлеющий и самостоятельный дуговой разряды характеризуются распылением материала катода. Катод в исследуемом разборном макете выполнен из меди, соответственно в плазму разряда помимо ионов водорода добавляются ионы меди, масса которых значительно больше массы атомов водорода. Накапливаясь в объеме сеточного узла с двумя областями сужения на пути горения разряда, ионы и атомы меди значительно снижают эффективность вытеснения нейтрального газа из отверстий управляющего электрода.

С целью повышения эффективности вытеснения нейтрального газа из отверстий управляющего электрода была разработана конструкция сеточного узла с коническим отверстием в управляющем электроде (рис. 16, б). В экспериментах, проводимых с такой конструкцией сеточного узла, удалось получить самообрыв тока до момента времени перехода сверхплотного тлеющего разряда в самостоятельный дуговой. Характерное время выключения составило порядка 500 нс , диапазон рабочих давлений составил менее $5 \cdot 10^{-3} \text{ мм рт. ст.}$ С учетом данных факторов, наличия в плазме исследуемого разряда ионов меди, сложности и высокой мощности схемы управления было принято решение о проведении дальнейших исследований с новыми конструкциями сеточного узла на отпаянных газоразрядных приборах тиратронного типа с накалимым катодом.

За основу разрабатываемых конструкций сеточного узла взят сеточный узел тиратрона ТГИ2-500/20 (рис. 3). Длительность процесса выключения коммутатора обусловлена длительностью распада плазмы, заключенной в пространстве между анодом и областью с минимальной площадью сечения разрядного канала. Уменьшение объема с распадающейся плазмой должно привести к снижению времени выключения прерывателя тока. Помимо этого, для уменьшения потерь на проводимость необходимо снизить величину критического заряда, значение которого, очевидно, зависит от минимальной площади сечения разрядного канала. Была разработана конструкция сеточного узла с инверсным расположением отверстий (рис. 17), в которой в сетке изготавливается одно отверстие диаметром 10 мм , площадью $78,5 \text{ мм}^2$. В экране сетки изготавливаются 24 отверстия, центры которых расположены на двух концентричных окружностях диаметром 25 и 34 мм . Диаметр отверстий в экране сетки $3,5 \text{ мм}$, а их суммарная площадь – $230,9 \text{ мм}^2$. Величина перекрытия между отверстием в сетке и отверстиями первого ряда в сеточном экране равна $5,75 \text{ мм}$. Минимальное значение площади сечения разрядного канала совпадает с площадью отверстия в сетке.

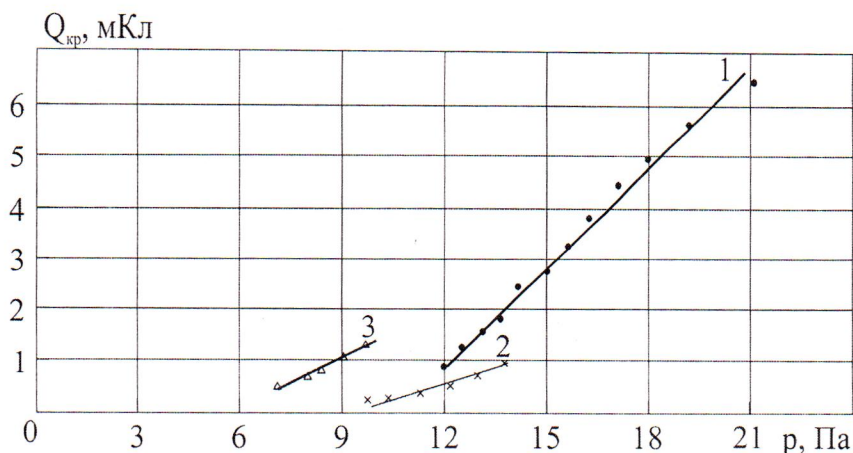


Рис. 18. Зависимости $Q_{кр}$ от давления водорода для тиратрона ТГИ2-500/20-1, коммутатора с инверсным расположением отверстий в сеточном узле-2 и коммутатора с щелевой конфигурацией отверстий сеточного узла-3. $L=23$ мкГн, $E_{п}=1670$ В, $R_{н}=75$ Ом.

величины давления водорода в приборе при неизменной скорости нарастания анодного тока (рис. 18, прямая 2). Характер изменения $t_{вык}$ при изменении давления водорода, U_m и $I_{обр}$ аналогичен зависимостям, полученным для ТГИ2-500/20. Минимальное $t_{вык}$ прибора, определенное по уровню 0,1-0,9 изменения тока, составило 170 нс, предельный $I_{обр}=400$ А. Максимальная величина $U_m=50$ кВ, время нарастания импульса напряжения на нагрузке 100 нс. Минимальное значение джиттера составляет 200-250 нс и соответствует величине обрываемого тока 250 А (рис. 19, кривая 2). Минимум аналогичной характеристики для тиратрона имеет то же значение и наблюдается при величине обрываемого тока 400 А (рис. 19, кривая 1). Максимальное значение джиттера при обрываемых токах менее 100 А составляет 2 мкс. Множественность пути горения разряда в сеточном узле приводит к тому, что явление самообрыва тока локализуется не в области отверстия сетки, а в пространстве между сеткой и сеточным экраном. Из-за данного факта в представленной конструкции не удалось добиться снижения времени выключения по сравнению с ТГИ2-500/20.

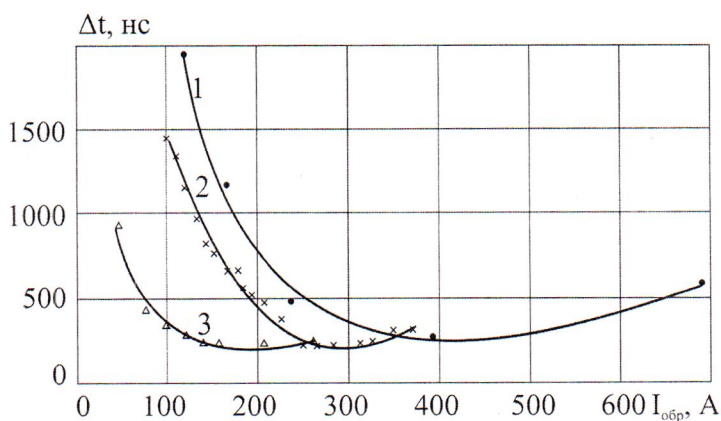


Рис. 19. Зависимости $\Delta t_{обр}$ от $I_{обр}$ для ТГИ2-500/20-1, коммутатора с инверсным расположением отверстий в сеточном узле-2 и коммутатора с щелевой конфигурацией отверстий сеточного узла-3.

$L=23$ мкГн, $R_{н}=75$ Ом

Схема проводимых исследований и измерений аналогична схеме исследований ТГИ2-500/20. В процессе проведенных исследований установлено, что рабочий диапазон давлений, в котором данный прибор обеспечивает надежный обрыв тока, составляет от 9–14 Па. Величина $Q_{кр}$ при этом меняется от 0,2 до 1,2 мкЛ и линейно зависит от ве-

Снижение предельного напряжения на аноде по сравнению с ТГИ2-500/20 обусловлено повторным зажиганием разряда через отверстие сетки и одним из отверстий сеточного экрана, расположенных на второй окружности от центра сеточного узла.

С целью минимизации числа путей горения разряда и перемещения области, в которой происходит самообрыв тока, максимально близко к аноду коммутатора была разработана конструкция управляющего электрода газоразрядного коммутатора тока с щелевой конфигурацией отверстий сеточного узла (рис. 20).

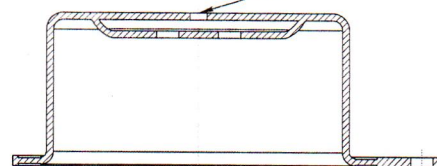
Конструкция предусматривает два отверстия в сеточном экране и одно в сетке, выполненных в виде прямой прорези длиной 20. Ширина отверстия в сетке составляет 3 мм, а отверстий в сеточном экране 4 мм. Расстояние между центральными линиями отверстий экрана сетки составляет 11 мм, что позволяет обеспечить величину перекрытия на пути развития разряда между сеткой и сеточным экраном 2 мм. Площадь отверстия в сетке составляет $67,07 \text{ мм}^2$, что в 2,6 раза меньше, чем совокупная площадь отверстий сетки тиратрона ТГИ2-500/20. Площадь каждого отверстия в сеточном экране равна $92,57 \text{ мм}^2$. Площадь сечения разрядного канала снижается от катода к аноду и достигает минимума в отверстиях сетки.

В ходе экспериментов установлено, что устойчивый обрыв тока в данном приборе происходит в диапазоне давлений от 7 до 10 Па. Величина $Q_{\text{кр}}$ при этом изменяется от 0,5 до 2 мКл в зависимости от давления водорода в приборе и скорости нарастания анодного тока (рис. 18, прямая 3). Величина джиттера при малых обрываемых токах составляет порядка 1 мкс, уменьшается с ростом обрываемого тока, достигая минимума в 200 – 250 нс при значениях тока порядка 200 А (рис. 19, кривая 3). Характер изменения $t_{\text{вык}}$ при изменении давления водорода, U_m , и $I_{\text{обр}}$ аналогичен зависимостям, полученным для ТГИ2-500/20 и коммутатора с инверсным расположением отверстий в сеточном узле. Минимальное $t_{\text{вык}}$ составило 130 нс, предельный $I_{\text{обр}}=1 \text{ кА}$. Максимальная величина $U_m=80 \text{ кВ}$.

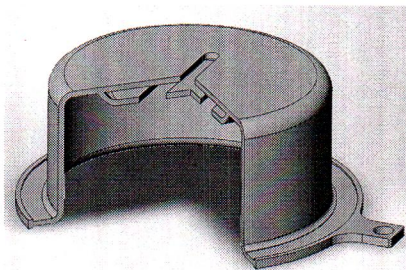
Экспериментальные прерыватели имеют большую по сравнению с ТГИ2-500/20 стабильность процесса самообрыва разряда во всем диапазоне коммутируемых токов, за исключением минимального значения джиттера, которое одинаково для всех трех приборов и составляет 200-250 нс. Временная нестабильность момента обрыва разряда при токе 150 А для тиратрона ТГИ2-500/20 составляет порядка 1,5 мкс, для коммутатора с инверсным расположением отверстий в сеточном узле уменьшена в 2 раза – 0,75 мкс, а для коммутатора с щелевой конфигурацией отверстий в сеточном узле уменьшена в 5 раз – 300 нс. Предельные характеристики газоразрядного прерывателя тока с щелевой конфигурацией отверстий в сеточном узле близки к предельным характеристикам ТГИ2-500/20, при этом время выключения в нем снижено на 25 % и составляет 130 нс.

В ходе проводимых экспериментов выявлен режим работы, при котором длительность импульса на нагрузке определяется временем выключения прерывателя. Для достижения максимальной величины U_m накопленная в индуктивности энергия должна быть больше или равна энергии потерь на стадии коммутации $W_{\text{нар}} \geq W_{\text{нк}}$, а для получения минимальной длительности τ процесса разряда L в нагрузку должна быть меньше $t_{\text{вык}}$, откуда $0,304 U_m t_{\text{вык}} / I_{\text{обр}} \leq L < R_{\text{н}} t_{\text{вык}}$. Длительность импульса напряжения на аноде прибора, измеренная по уровню 0,5, составляет 90 нс для коммутатора со щелевой конфигурацией отверстий се-

Область с минимальной площадью сечения разрядного канала



а



б

Рис. 20. Сечение – а и изометрическое изображение – б сеточного узла с щелевой конфигурацией отверстий

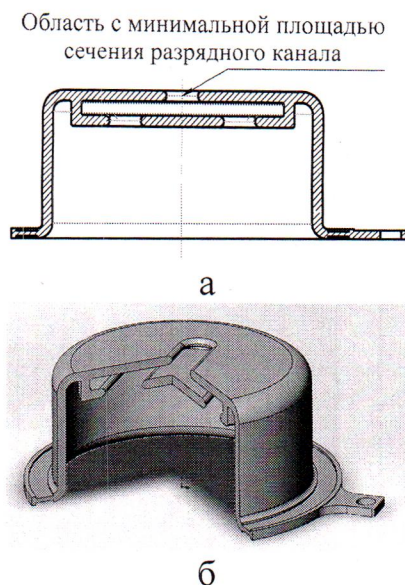


Рис. 21. Сборочный чертеж – а и изометрическое изображение – б сеточного узла прибора с щелевой конфигурацией отверстий сеточного узла и улучшенными параметрами разряда

точного узла при напряжении $U_m=80$ кВ и 25 нс для тиратрона ТГИ2-500/20 при напряжении $U_m=95$ кВ.

В анодно-сеточной области благодаря ЭДС самоиндукции накопительной индуктивности процесс рекомбинации заряженных частиц протекает в условиях воздействия нарастающего электрического поля, максимальная величина которого может достигать значения $3 \cdot 10^5$ В/см. Под действием этого поля электроны из остаточной плазмы анодно-сеточной камеры ускоряются в направлении анода, приобретая на своем пути энергию, максимальная величина которой составит 90 кэВ. Присутствие в распадающейся плазме высокоэнергетических электронов подтверждается характером изменения температуры по поверхности коммутатора во время работы (наиболее интенсивно разогревается анод) и выходом рентгеновского излучения во внешнюю среду сквозь боковую поверхность керамической оболочки прибора в области анода. Было проведено моделирование конструкции газоразрядного прерывателя тока, которая может использоваться в качестве источника потока высокоэнергетических электронов. По-

лученные в результате расчета данные показывают, что для достижения высоких показаний фокусировки и числа электронов в пучке при больших амплитудах импульса напряжения на аноде необходимо снижать длительность импульса на аноде до 5 – 10 нс, что требует дальнейшего снижения времени выключения коммутатора.

Для достижения указанного результата, а также для дальнейшего снижения величины $Q_{кр}$, повышения временной и температурной стабильности процесса выключения была разработана серия конструкций сеточных узлов специализированных газоразрядных прерывателей тока дугового несамостоятельного разряда с накаливаемым катодом: прибор тиратронного типа с улучшенными параметрами разряда; прибор с щелевой конфигурацией отверстий сеточного узла и улучшенными параметрами разряда; прибор с двухщелевой конфигурацией отверстий сеточного узла (рис. 21); прибор с секторальным отверстием в экране и асимметрично расположенным относительно центральной оси круговым отверстием в сетке. У всех разработанных приборов произведено утолщение элементов сеточного узла, что позволяет увеличить количество теплоты, необходимое для его разогрева. Скругление краев отверстий позволяет снизить напряженность электрического поля посредством устранения элементов с малым радиусом кривизны, что обеспечивает снижение автоэлектронной эмиссии с краев отверстий, а также уменьшает разогрев краев отверстий, вызванный бомбардировкой ионами из плазмы разряда. Совокупность вышеуказанных факторов приводит к снижению разогрева прибора, повышению стабильности процесса самообрыва разряда, уменьшению времени выключения, увеличению максимального обрываемого тока в приборе и повышению амплитуды импульса напряжения, формируемого на нагрузке.

В **заклучении** сформулированы основные результаты работы.

В процессе выполнения представленной работы получены теоретические и экспериментальные результаты, позволившие выработать новые решения по построению схем генераторов высоковольтных импульсов (ГВИ) с индуктивным накопителем энергии (ИНЭ) и газоразрядными коммутаторами тока (ГКТ), а также разработать конструкции специализированных газоразрядных прерывателей тока, которые повышают надежность, долговечность и выходные характеристики указанных генераторов. В соответствии с целью и задачами диссертационного исследования в работе получены следующие основные результаты:

1. Экспериментально установлено, что в ГКТ тиратронного типа самообрыв тока порядка сотен ампер, нарастающего в микросекундном диапазоне времени, происходит после переноса через сеточный узел прибора электрического заряда определенной величины. Критический заряд имеет характерные значения (0,2 – 2) мКл и с ростом давления водорода в коммутаторе в интервале (5 – 50) Па линейно увеличивается. Угловой коэффициент прямой и её смещение определяются конструкцией сеточного узла тиратрона. Рост заряда обусловлен увеличением количества газовых молекул в разрядном канале в области сетки, для вытеснения которых требуются более высокие значения тока и времени его воздействия на частицы. Рост критического заряда при увеличении значения обрываемого тока обусловлен перераспределением направленной составляющей энергии электронов при кулоновских столкновениях с ионами.

2. Выявлено, что время выключения тока в тиратронном ГКТ в схеме ГВИ с ИНЭ составляет (170 – 250) нс и зависит от давления водорода в приборе, величины обрываемого тока, амплитуды импульса напряжения на аноде, применяемой схемы управления и конструкции сеточного узла тиратрона. Уменьшение времени выключения может быть обеспечено снижением давления водорода или величины обрываемого тока, а также увеличением амплитуды импульса напряжения на аноде или конструктивным смещением области самообрыва разряда в сторону анода.

3. Установлено, что при высокой (сотни герц) частоте следования импульсов напряжения в ГВИ с ИНЭ температура оболочки тиратрона значительно (до 300 °С) повышается в течение (10 – 20) минут после включения источника анодного напряжения, что приводит к снижению стабильности и ухудшению параметров устройства в результате дополнительного нагрева генератора водорода и повышения давления газа в приборе. Предложен и реализован способ стабилизации момента самообрыва тока и параметров генерируемых импульсов путем автоматического уменьшения напряжения накала генератора водорода по мере разогрева тиратрона при входе в рабочий режим.

4. Экспериментальным путем показано, что при самообрыве разряда в тиратроне ТГИ2-500/20, включенном в схему ГВИ с ИНЭ, динамика процессов на стадии выключения определяется, в основном, амплитудой импульса напряжения на аноде. Определены три характерных диапазона изменений напряжения с течением времени ($U_m \leq 23$ кВ; 23 кВ $< U_m \leq 45$ кВ; 45 кВ $< U_m \leq 90$ кВ), для каждого из которых предложены соотношения, аппроксимирующие экспериментальные кривые спада тока в коммутаторе и роста напряжения на нагрузочном резисторе при формировании импульсов с погрешностью не более 5 %. С использованием этих соотношений определены значения энергии потерь на коммутацию в тиратроне по формуле $W_{\text{пк}} = K_n U_m I_{\text{обр}} t_{\text{вык}}$, где $K_1 = 0,136$ для первого диапазона, $K_2 = 0,167$ для второго и $K_3 = 0,152$ – для третьего.

5. Установлено, что энергия потерь на проводимость в ГКТ тиратронной конструкции в схеме ГВИ с ИНЭ равна произведению напряжения поддержания разряда на величину критического заряда. Выявлено, что при амплитуде генерируемых импульсов свыше 50 кВ энергия потерь на проводимость значительно меньше, чем на выключение, а при малых амплитудах наблюдается противоположная ситуация.

6. Проведено численное моделирование работы ГВИ с ИНЭ и ГКТ на газоразрядную и активную нагрузку, которое показало, что максимальный КПД устройства (до 80 %) достигается в режиме «длинного» тока, когда постоянная времени разряда накопительной индуктивности через нагрузочное сопротивление значительно превышает время выключения коммутатора. Для случая газоразрядной нагрузки определена величина индуктивности, при которой вся накопленная в ней энергия рассеивается в процессе выключения коммутатора: $L_{\min} = 0,304 U_{\text{зак}} t_{\text{вык}} / I_{\text{обр}}$, где $U_{\text{зак}}$ – напряжение зажигания разряда в нагрузке. Установлено, что временной сдвиг зажигания разряда за верхний предел времени выключения коммутатора, осуществляемый подключением параллельно индуктивности небольшой (100 пФ) дополнительной емкости, значительно (до 95 %) повышает КПД генератора.

7. Для возбуждения генерации излучения в активном элементе азотного лазера, питаемом от ГВИ с ИНЭ и ГКТ, предложено использовать совокупную энергию электрического и магнитного полей накопительной индуктивности. Экспериментально показано, что такое решение обеспечивает существенное (почти в 2 раза) повышение мощности лазерного излучения и более эффективное использование объема разрядного канала. Подключение параллельно накопительной индуктивности дополнительной емкости величиной 100 пФ позволяет увеличить мощность генерируемого излучения в 1,8 раза.

8. Разработаны и экспериментально исследованы газоразрядные коммутаторы тока тиратронного типа, в которых конструкции сеточных узлов позволяют повысить эффективность работы ГВИ с ИНЭ. В коммутаторе с инверсным расположением отверстий «перекрытие» приблизительно в 2 раза увеличено в сравнении с базовой конструкцией тиратрона ТГИ2-500/20, а диаметр отверстия в сетке уменьшен от 15 мм до 10 мм, что позволило значительно (в 6 раз) уменьшить величину критического заряда и снизить приблизительно на 30 % джиттер в области малых значений тока обрыва. В коммутаторе с щелевой конфигурацией сеточных отверстий обеспечены уменьшение критического заряда в 4 раза, снижение джиттера в 2 раза и сокращение времени выключения прибора на ~ 20 %.

9. Определены условия работы ГВИ с ИНЭ и ГКТ на активную нагрузку, при которых длительность формируемого импульса напряжения определяется временем выключения прерывателя: $0,304 U_{\text{м}} t_{\text{вык}} / I_{\text{обр}} \leq L < R_{\text{н}} t_{\text{вык}}$. Показано, что в режиме формирования коротких импульсов на аноде ГКТ тиратронного типа может быть использован в качестве источника потока электронов с энергией до 90 кэВ. Установлено, что с ростом амплитуды импульса напряжения на аноде для обеспечения вывода формируемого потока электронов за пределы объема коммутатора необходимо сокращать длительность этого импульса.

10. По результатам проведенных исследований разработана серия перспективных конструкций сеточных узлов для газоразрядных прерывателей тока несамостоятельного дугового разряда с накаливаемым катодом, использование которых должно способствовать повышению КПД коммутаторов, стабильности

формируемых импульсов напряжения и предельных значений их амплитуды и обрываемого тока.

Применение в ГВИ с ИНЭ серийных газоразрядных коммутаторов и специализированных прерывателей тока позволяет создавать надежные устройства для получения коротких, высоковольтных и сильноточных импульсов напряжения при сравнительно высокой частоте следования. Параметры разработанных генераторов с различными типами размыкателей представлены в табл. 2. Таблица 2. Параметры ГВИ с ИНЭ и исследованными ГКТ.

Тип прибора	$I_{обр}$	U_m	$t_{вык}$
Таситрон	20..550 А	2..40 кВ	100..200 нс
Псевдоискровой разрядник	200..1000 А	10..110 кВ	~100 нс
Тиратрон ТГИ2–500/20	50..1000 А	5..90 кВ	170..400 нс
Прерыватель с конструкцией сеточного узла с инверсным расположением отверстий	50..400 А	5..50 кВ	170..350 нс
Прерыватель с конструкцией сеточного узла с щелевой конфигурацией отверстий	50..1000 А	5..80 кВ	130..350 нс

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из перечня ВАК

1. Верещагин Н.М., Круглов С.А. Моделирование переходного процесса в индуктивном накопителе энергии с нелинейной нагрузкой// Вестник РГРТА. – Рязань. – 2001. – Вып. 8. – С. 104.
2. Верещагин Н.М., Круглов С.А. Генератор высоковольтных импульсов с индуктивным накопителем энергии и тиратроном// ПТЭ. - 2002. - №2. – С.82.
3. Верещагин Н.М., Круглов С.А. Водородный тиратрон как размыкатель тока в схеме с индуктивным накопителем энергии// Вестник РГРТА. – Рязань. – 2002. – Вып. 10. – С. – 71.
4. Верещагин Н.М., Бочков В.Д., Круглов С.А. Псевдоискровой разрядник в схеме с индуктивным накопителем энергии// ПТЭ. – 2002. – №6. – С. 56.
5. Верещагин Н.М., Круглов С.А., Серезин А.А. Исследование сопротивления распадающейся плазмы в тиратроне, включенном в схему с индуктивным накопителем энергии// Вестник РГРТУ. – Рязань. – 2010. – Вып. 33 – С. 107-110.
6. Верещагин Н.М., Круглов С.А., Серезин А.А., Майсурадзе А.И. Энергетические характеристики процесса прерывания тока газоразрядным коммутатором в генераторе мощных наносекундных импульсов с индуктивным накопителем энергии// Вестник РГРТУ. – Рязань. – 2011. – Вып. 35 – С. 98-102.
7. Верещагин Н.М., Круглов С.А., Павлов М.Б., Серезин А.А., Шатилов С.Г. Исследование теплового режима работы газоразрядного прерывателя тока в схеме с индуктивным накопителем энергии// Вестник РГРТУ. – Рязань. – 2013. – Вып. 46. Ч. 2. – С. 100.
8. Верещагин Н.М., Круглов С.А., Серезин А.А., Шатилов С.Г. Режимы работы газоразрядного прерывателя тока в схеме с индуктивным накопителем энергии// Вестник РГРТУ. – Рязань. – 2014. – Приложение к вып. 50. Ч. 2. – С. 34-39.

9. Верещагин Н.М., Круглов С.А., Серезин А.А., Шатилов С.Г. Определение рабочего режима газоразрядного прерывателя тока в генераторе с индуктивным накопителем энергии// Вестник РГРТУ. – Рязань. – 2015. – Вып. 54. Ч. 2. – С. 121-126.
10. Верещагин Н.М., Кислов Д.С., Круглов С.А., Серезин А.А., Шатилов С.Г. Исследование неустойчивости параметров генерируемых импульсов в генераторе с индуктивным накопителем энергии и газоразрядным прерывателем тока// Радиотехника. – 2016. – №8. – С. 175–183.
11. Верещагин Н.М., Кислов Д.С., Круглов С.А., Серезин А.А., Шатилов С.Г., Агальцов К.Д. Разработка системы управления и контроля генератором высоковольтных импульсов с индуктивным накопителем энергии и тиратроном в качестве газоразрядного прерывателя тока// Радиотехника. – 2016. – №11. – С. 146–151.
12. Верещагин Н.М., Круглов С.А., Серезин А.А., Шатилов С.Г., Агальцов К.Д. Исследования генератора высоковольтных импульсов с индуктивным накопителем энергии и газоразрядным прерывателем тока// Вестник РГРТУ. – Рязань. – 2017. – № 60. – С. 148-153.

Публикации в изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus

13. Arefev A.S., Vereshchagin N.M, Gorlov A.I., Kruglov S.A., Kun V.V. Nitrogen laser pumped from inductive energy store// VII International Conference on Laser and Laser-Information Technologies. – Suzdal, Russia. – 2001. – ISBN 5 – 89368 – 254 – 8.
14. S.A. Kruglov, N.M. Vereschagin, A.A. Serezhin, S.G. Shatilov, A.A. Trubitsyn. Formation of high-energy beams of electrons// Proceedings of 20th International Workshop on Beam Dynamics and Optimization, Russia, 2014. DOI: 10.1109/BDO.2014.6890093 Publisher: IEEE.
15. S.A. Kruglov, N. M. Vereshagin, A. A. Serezhin, S. G. Shatilov, K. D. Agaltsov, M. B. Pavlov. Low-Pressure Gas-Discharge Current Interrupters in a Generator of High-Voltage Nanosecond Pulses with an Inductive Energy Storage// Instruments and Experimental Techniques. – 2017. – Vol. 60. – No. 6. – P. 811–817.
16. Kruglov S.A., Serezhin A.A., Karabanov S.M., Vereschagin N.M., Shatilov S.G., Agaltsov K.D., Zimin A.I., Suvorov D.V. Modeling and Development of Thyatron Type Grid Node with Improved Discharge Parameters for Specialized Gas-discharge Current Interrupter// Proceedings - 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC/I and CPS Europe. 2018 DOI: 10.1109/EEEIC.2018.8493958.
17. Kruglov S.A., Serezhin A.A., Vereschagin N.M., Shatilov S.G., Agaltsov K.D., Serov S.S. Modeling and development of grid node with slotted hole configuration and extended charge parameters for specialized gas discharged current breaker// 2018 ELEKTRO, DOI: 10.1109/ELEKTRO.2018.8398273 Publisher: IEEE Conference Location: Mikulov, Czech Republic Electronic ISBN: 978-1-5386-4759-2 USB ISBN: 978-1-5386-4758-5 Print on Demand(PoD) ISBN: 978-1-5386-4760-8.

Патенты на изобретение, полезную модель и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

18. Верещагин Н.М., Круглов С.А. Способ формирования высоковольтных импульсов// Патент на изобретение №2210180. - Выдан 10.09.2003.
19. Верещагин Н.М., Круглов С.А., Сережин А.А. Газоразрядный коммутирующий прибор// Патент на изобретение № 2476950. – Зарегистрирован 27.02.2013.
20. Верещагин Н.М., Круглов С.А., Сережин А.А., Шатилов С.Г. Разборный макет газоразрядного прибора// Патент на полезную модель № 137430. – Зарегистрирован 10.02.2014.
21. Верещагин Н.М., Круглов С.А., Сережин А.А., Шатилов С.Г. Способ стабилизации параметров высоковольтных импульсов// Патент на изобретение № 2549171. – Зарегистрирован 25.03.2015.
22. Верещагин Н.М., Круглов С.А., Сережин А.А., Шатилов С.Г. Программа для расчета переходных процессов в генераторе на основе индуктивного накопителя энергии и газоразрядного прерывателя тока с нелинейной нагрузкой// Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015662650. – Зарегистрировано 30.11.2015.
23. Верещагин Н.М., Круглов С.А., Сережин А.А., Шатилов С.Г. Программа для расчета количества кулоновских столкновений на стадии протекания тока через газоразрядный коммутатор в схеме индуктивного накопителя энергии// Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016618196. – Зарегистрировано 22.07.2016.
24. Верещагин Н.М., Круглов С.А., Сережин А.А., Шатилов С.Г., Агальцов К.Д. Газоразрядный коммутирующий прибор с щелевой конфигурацией отверстий сеточного узла// Патент на полезную модель № 170980. – Зарегистрирован 17.05.2017.
25. Верещагин Н.М., Круглов С.А., Сережин А.А., Шатилов С.Г., Агальцов К.Д. Газоразрядный коммутирующий прибор с инверсным расположением отверстий в сеточном узле// Патент на полезную модель № 171094. – Зарегистрирован 19.05.2017.
26. Верещагин Н.М., Круглов С.А., Сережин А.А., Шатилов С.Г., Агальцов К.Д., Зимин А.И. Газоразрядный прибор тиратронного типа с улучшенными параметрами разряда// Патент на полезную модель № 181255. – Зарегистрирован 06.07.2018.
27. Верещагин Н.М., Круглов С.А., Сережин А.А., Шатилов С.Г., Агальцов К.Д., Серов С.С. Газоразрядный прибор с щелевой конфигурацией отверстий сеточного узла и улучшенными параметрами разряда// Патент на полезную модель № 183972. – Зарегистрирован 11.10.2018.
28. Верещагин Н.М., Круглов С.А., Сережин А.А., Шатилов С.Г., Агальцов К.Д., Сережин С.А. Газоразрядный прерыватель тока с двухщелевой конфигурацией отверстий сеточного узла// Патент на полезную модель № 187851. – Зарегистрирован 20.03.2019.
29. Верещагин Н.М., Круглов С.А., Сережин А.А., Шатилов С.Г., Агальцов К.Д. Газоразрядный прерыватель тока с секторальным отверстием в экране и асимметрично расположенным относительно центральной оси круговым отверстием в сетке// Патент на изобретение № 2726140. – Зарегистрирован 09.07.2020.

Статьи и тезисы конференций.

30. Арефьев А.С., Верещагин Н.М., Круглов С.А. Таситрон – эффективный прерыватель тока для индуктивного накопителя энергии// Труды 4-й международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-98. – Новосибирск. - 23-26 сентября 1998. – Т.2. – С. 142.
31. Арефьев А.С., Верещагин Н.М., Круглов С.А., Мартынов А.Н., Шарова О.Ю. Эффективность передачи энергии от индуктивного накопителя энергии плазме газового разряда// Тезисы докладов IX конференции по физике газового разряда. – Рязань. – 1998. – Ч.1. – С. 109-111.
32. Верещагин Н.М., Круглов С.А. Распределение тока по электродам таситрона на стадии гашения разряда// 2-й международная конференция «Проблемы и прикладные вопросы физики». - Саранск. - 16- 19 июня 1999.
33. Верещагин Н.М., Горлов А.И., Круглов С.А., Кюн В.В. Моделирование работы ИНЭ на нелинейную нагрузку// Тезисы докладов X конференции по физике газового разряда. – Рязань. – 2000. – Ч.2. – С. 216-218.
34. Верещагин Н.М., Круглов С.А. Индуктивный накопитель энергии на тиратроне// Электроника: меж вуз. сб. научн. тр. – Рязань. – РГРТА. – 2001. – С. 40.
35. Верещагин Н.М., Круглов С.А. Азотный лазер с возбуждением от индуктивного накопителя энергии// Фундаментальные и прикладные проблемы физики: тезисы докладов III международной научно-технической конференции/ под. ред. В.К. Свешникова. Мордов. гос. пед. ин-т. – Саранск. – 2001. – С. 22.
36. Vereshchagin N.M., Kruglov S.A. Discharge breaking time in a gas-discharge device with diaphragm, operating in inductive energy storage circuit// Известия вузов. Физика. – 2007. – № 9. Приложение. – С 149.
37. Верещагин Н.М., Круглов С.А., Серезин А.А. The Influence Of Generated Pulses Parameters On The Work Conditions Of Thyatron Included In The Scheme Of The Inductive Energy Storage// 16th International Symposium on High-Current Electronics (16th SHCE). – Tomsk. – Publishing House of IOA SB RAS. – 2010. – P. 278-280.
38. Верещагин Н.М., Круглов С.А., Серезин А.А. Исследование динамики напряжения на управляющем электроде газоразрядного коммутатора тока в схеме с индуктивным накопителем энергии// VII Международная научно-техническая конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы физики». Россия. – Саранск. – 2012.

Круглов Сергей Александрович

**ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ КОММУТАТОРЫ ТОКА В СХЕМЕ
С ИНДУКТИВНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук
Специальность 2.2.1. Вакуумная и плазменная электроника