

На правах рукописи



ШАТИЛОВ СЕРГЕЙ GERMANOVICH

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ПРЕРЫВАТЕЛЕЙ ТОКА
В РЕЖИМЕ ГЕНЕРАЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ**

Специальность 05.27.02 – Вакуумная и плазменная электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2016

Работа выполнена на кафедре «Промышленная электроника» ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

Научный руководитель:

Круглов Сергей Александрович, канд. техн. наук, доцент.

Официальные оппоненты:

Волков Степан Степанович, д-р физ.-мат. наук, Рязанское высшее воздушно-десантное командное училище (военный институт) имени генерала армии В.Ф. Маргелова, профессор

Игнахин Владимир Станиславович, канд. физ.-мат. наук, Петрозаводский государственный университет, старший преподаватель

Ведущее предприятие: ООО «Импульсные технологии», г. Рязань

Защита состоится «27» декабря 2016 г. в зале заседаний ученого совета, аудитория 235, в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.211.03 ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

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

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Рязанского государственного радиотехнического университета и на сайте www.rsreu.ru.

Автореферат разослан « » 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета:

д-р физ.-мат. наук, профессор



Чиркин М.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Современная наука и промышленность остро нуждаются в технике, технологиях и услугах с низкой стоимостью, характеристики которых качественно находятся на высоком уровне. Одной из важнейших областей, которые обеспечивают развитие науки и производства, а также экономический рост, являются высоковольтные импульсные технологии. В рамках развития высоковольтных импульсных технологий одной из базовых задач являются разработка, конструирование, реализация и внедрение усовершенствованных или принципиально новых генераторов высоковольтных импульсов.

Высокая необходимость развития данного направления научных исследований определяется широтой применения его результатов и бесчисленным множеством новых возможностей для различных отраслей экономики. В промышленности генераторы высоковольтных импульсов широко применяются для разного рода операций, таких как дефектоскопия, определение мест повреждения подземных электрических кабелей, обогащение руд редкоземельных металлов, инициирование электрогидроудара для штамповки и вытяжки гибко-листовых пластических материалов, формирования струи жидкости высокого давления для резки листовых материалов или пробивки отверстий в них, трамбовки или забивки свай, копания мерзлых грунтов и т.д. В медицине высоковольтные импульсы применяются для неинвазивного локального воздействия на жировые отложения, дезинфекции, разрушения плотных опухолей, в рентгеновских и ультразвуковых аппаратах. В экологии технологии данного направления могут использоваться для очистки выбросов электрических и тепловых станций, удаления токсичных примесей из атмосферы, очистки природных водоемов, промышленных отстойников от техногенных загрязнений, очистки сточных вод, обеззараживания воды от бактериальной микрофлоры. Помимо выше перечисленного следует отметить потребность в высоковольтных генераторах импульсов в научных исследованиях в качестве лабораторного оборудования и в источниках питания ускорителей частиц, в лазерной технике для накачки лазеров, в радиолокации, эхолокации, георадиолокации.

Исходя из этого видно, что развитие данной области даст толчок усовершенствованию технологий, методов и приемов повседневной деятельности и позволит поднять характеристики существующих систем на качественно новый уровень в ряде социально, экономически и стратегически важных отраслей.

В настоящее время генераторы высоковольтных импульсов помимо прочего различают 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. Существует множество высокоскоростных коммутаторов с различными параметрами, использующихся при построении генераторов на основе ЕНЭ для

любых нужд. Альтернативой ЕНЭ может служить индуктивный накопитель энергии (ИНЭ), который накапливает энергию в магнитном поле индуктивного контура с током. Выгода от применения ИНЭ обусловлена рядом преимуществ перед ЕНЭ:

- в современных импульсных конденсаторах электрическое поле, длительно выдерживаемое диэлектриком, достигает значений порядка 10^6 В/см, при этом плотность энергии составляет около 10^5 Дж/м³. Плотность запасаемой энергии в ИНЭ определяется предельно допустимыми магнитными полями, которые ограничены механической прочностью материалов индуктивных накопителей. При этом плотность магнитной энергии может достигать величины 10^8 Дж/м³;
- питание генератора на основе ИНЭ осуществляется от низковольтных источников;
- генераторы с индуктивными накопителями имеют меньшие массогабаритные показатели по сравнению с генераторами на основе емкостного накопителя энергии;
- при использовании ИНЭ обеспечивается качественно иной способ передачи энергии в нагрузку.

Для использования ИНЭ и реализации их преимуществ помимо сильноточных наносекундных коммутаторов требуются мощные высокоскоростные прерыватели тока, выбор которых сильно ограничен. В этой связи в России и других странах проводят исследования перспективных технологий, которые позволят создать приборы такого класса. К ним можно отнести взрывающиеся проводники, плазменные прерыватели тока, прерыватели на SOS-диодах и прерыватели на основе газоразрядных коммутаторов тока и эффекта самообрыва тока.

При детальном рассмотрении для построения мощных генераторов на основе ИНЭ с током порядка 1 кА и напряжением несколько сотен киловольт наиболее перспективными являются прерыватели на SOS-диодах и газоразрядные прерыватели тока, основанные на эффекте самообрыва тока. При сравнении данных приборов у каждого из них обнаруживаются свои достоинства и недостатки. Прерыватели на SOS-диодах имеют малое (около десяти наносекунд) время выключения тока, а также параллельным и последовательным соединением этих структур обеспечиваются любые рабочие напряжения и токи без увеличения времени выключения. Газоразрядные прерыватели тока, основанные на эффекте самообрыва тока, способны как замыкать, так и размыкать ток, а значит, не требуют дополнительных коммутирующих устройств в составе генератора; в отличие от SOS-диодов не нуждаются в принудительном охлаждении; восстанавливают свои свойства после работы в критических режимах; массогабаритные показатели генераторов, построенных на основе таких приборов, в 5-10 раз меньше, чем генераторов на SOS-диодах. Генераторы высоковольтных импульсов с газоразрядным коммутатором тока и индуктивным накопителем энергии способны формировать

импульсы напряжением несколько сотен киловольт при токах в единицы килоампер.

Целью данной работы является создание односекционного газоразрядного прерывателя на основе газоразрядных коммутаторов тока низкого давления для повышения стабильности параметров выходных импульсов в генераторе мегаваттной мощности с индуктивным накопителем энергии.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- исследование физических процессов прерывания тока, предельных режимов работы коммутатора и существующих нестабильностей формирования импульсов в генераторе высоковольтных импульсов мегаваттной мощности с индуктивным накопителем энергии и тиратроном ТГИ2-500/20;
- разработка конструкций сеточных узлов газоразрядных коммутаторов тока для стабилизации процесса обрыва тока;
- определение рабочих параметров и предельных характеристик опытных газоразрядных коммутаторов;
- разработка физической и численной модели для определения факторов, влияющих на стабильность процесса обрыва тока.

Научная новизна:

1. Установлено, что в односекционных газоразрядных коммутаторах низкого давления тиратронной конструкции критический заряд, переносимый через сеточный узел и необходимый для обрыва тока, линейно зависит от величины обрываемого тока, если обрыв происходит до момента прохождения максимума тока.

2. Установлено, что зависимость временной нестабильности момента обрыва тока (джиттер) от тока обрыва имеет минимум. Его значение заключено в интервале 200-300 нс и наблюдается при плотностях тока обрыва в минимальном сечении разрядного канала 280-330 А/см².

3. Получены зависимости критического заряда и джиттера от температуры фланца сетки. Показано, что данные параметры значительно (критический заряд в 1,5-2 раза, джиттер в 3-5 раз) возрастают с разогревом прибора на 40 °С, что обусловлено повышением давления газа в области сеточного узла и величины диффузионного потока натекающего газа с увеличением температуры. Критический заряд и джиттер достигают некоторого установившегося значения через 20 минут работы.

4. Создана численная модель физических процессов в сеточном разрядном канале, позволяющая рассчитать количество кулоновских электрон-ионных столкновений в зависимости от давления и напряжения источника питания. С помощью модели показано, что рост критического заряда при увеличении тока обрыва происходит в результате перераспределения направленной составляющей скорости электронов при кулоновских столкновениях с ионами.

5. Показано, что устройства на основе газоразрядных прерывателей тока, работающих в схеме с индуктивным накопителем энергии, способны формировать высокоэнергетичные (до 100 кэВ) пучки электронов при определенных условиях.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. В односекционном газоразрядном коммутаторе низкого давления тиратронной конструкции, включенном в цепь генератора высоковольтных импульсов мегаваттной мощности, критический заряд, переносимый через сеточный узел и необходимый для обрыва тока, линейно нарастает с увеличением прерываемого тока при условии, что обрыв происходит до достижения максимального значения тока.

2. Минимальная нестабильность длительности импульса тока в односекционных газоразрядных коммутаторах низкого давления тиратронной конструкции составляет 200-300 нс и достигается при плотностях тока обрыва 280-330 А/см² в области с минимальной площадью сечения разрядного канала.

3. Применение щелевой конфигурации отверстий сеточного узла в газоразрядном коммутаторе тока силой 50-800 А при напряжениях до 100 кВ позволяет сократить на 25 % процесс прерывания тока.

Практическая значимость:

1. Установлен режим с минимальной величиной временной нестабильности во всех исследованных коммутаторах, которая составляет 200-300 нс.

2. Разработанные конструкции сеточных узлов позволили уменьшить величину критического заряда, необходимого для обрыва тока, из чего следует, что для достижения обрыва при фиксированном токе обрыва должно пройти меньше времени. Коммутатор при этом меньше разогревается, растет КПД генератора и увеличивается максимальная частота выходных импульсов.

3. Полученные в опытных коммутаторах величины джиттера в 2-3 раза ниже, чем в тиратроне ТГИ2-500/20, во всех диапазонах токов обрыва, кроме диапазона 200-400 А, в котором величина временной нестабильности минимальна и составляет 200-300 нс.

4. Достигнуто снижение времени выключения в опытных коммутаторах. Минимальное время выключения зарегистрировано в коммутаторе с щелевыми отверстиями и составляет 130 нс.

5. На основе экспериментальных исследований были сформулированы рекомендуемые значения параметров при работе тиратрона ТГИ2-500/20 в режиме обрыва тока.

Внедрение результатов работы

Результаты диссертационной работы использованы в НИИ ГРП «Плазма» (г. Рязань) в штатном технологическом процессе разработки и изготовления газоразрядных коммутаторов тока, в ООО «Импульсные технологии» при создании газоразрядных коммутаторов тока, при выполнении НИОКР

«Разработка специализированного коммутатора тока» Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, при выполнении НИР «Разработка основ технологии формирования функциональных тонкопленочных покрытий, их модификации и исследование устройств специального назначения», в учебном процессе РГРТУ в курсе «Высоковольтная импульсная техника».

Апробация работы. Результаты исследований, представленные в диссертационной работе, обсуждались на 59-й студенческой научно-технической конференции (РГРТУ, Рязань, 2012), региональной конференции молодых ученых «Пути инновационного развития экономики Рязанской области» (Россия, Рязань, 2013), международной научно-практической конференции «Наука и образование в 21 веке» (Россия, Тамбов, 2013), IX Международной научно-практической конференции «Научное обозрение физико-математических и технических наук в XXI веке» (Россия, Москва, 2014), Beam Dynamics and Optimization (BDO) (Россия, Санкт-Петербург, 2014).

Публикации. Результаты диссертационной работы отражены в 15 публикациях.

Структура и объем работы. В диссертацию входят введение, 4 главы основного текста, заключение, список литературы и приложения. Диссертация содержит 164 страницы основного текста, иллюстрированных 58 рисунками, список литературы, включающий 37 источников на 3 страницах, 3 приложения на 3 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследований обрыва тока газоразрядным коммутатором в схеме с индуктивным накопителем энергии, сформулированы цели и задачи исследований, показаны научная новизна и практическая значимость работы, приведены положения и результаты, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор литературных источников об известных методах построения генераторов высоковольтных импульсов различной мощности, существующих накопителях энергии и современной коммутирующей аппаратуре. Приведены основные принципы построения современных мощных и сверхмощных генераторов высоковольтных импульсов на примерах существующих российских и зарубежных установок с указанием их характеристик.

Базовая идея функционирования всех мощных генераторов высоковольтных импульсов состоит в относительно длительном накоплении энергии в первичном накопителе и быстрой ее передаче в нагрузку. Фактически осуществляется сжатие энергии, то есть усиление мощности с преобразованием спектра электромагнитного сигнала в область более высоких частот. Преобразование производится при помощи нелинейных элементов, способных скачкообразно изменять проводи-

мость от состояния отсечки до состояния полной проводимости, и наоборот. В качестве нелинейных элементов используют коммутаторы – искровые разрядники, полупроводниковые ключи, насыщающиеся индуктивности и другие. Для увеличения предельных энергетических характеристик (импульсных напряжений, токов и мощностей) применяют принципы каскадирования и модульности. Ярким примером каскадирования являются схема Аркадьева - Маркса (для емкостных накопителей энергии) и обращенная схема Аркадьева - Маркса (для индуктивных накопителей), где энергия, накопленная в определенном количестве накопителей, разом передается в нагрузку. Модульный принцип заключается в заряде накопителя с большой емкостью и плотностью запасаемой энергии (например, водяной формирующей линии) множеством согласованных генераторов (модулей) и последующем его разряде при помощи мощного коммутатора на нагрузку.

Наиболее распространенными накопителями энергии являются емкостные и индуктивные. В пользу емкостного способа накопления энергии говорят следующие факторы: высокая степень компрессии, малые потери энергии и простота коммутирующей аппаратуры. Но, несмотря на очевидные достоинства, низкая плотность запасаемой энергии (порядка 10^5 Дж/м³) емкостного накопителя является причиной повышенных габаритов накопителя. При увеличении напряжения выходного импульса плотность запасаемой энергии падает. Для решения этой проблемы приходится увеличивать емкость накопителя, что ведет к еще большему росту габаритов.

Решить многие из этих проблем может использование индуктивных накопителей энергии. Данный вид накопителей обладает следующими преимуществами:

- большая плотность запасаемой энергии (порядка 10^8 Дж/м³);
- низкие массогабаритные показатели;
- при повышении входного напряжения увеличивается плотность запасаемой энергии, то есть растет КПД схемы;
- применение ИНЭ приводит к резкому сокращению времени нарастания переднего фронта формируемого импульса, что сильно увеличивает скорость ввода энергии в нагрузку.

Индуктивный накопитель энергии требует более сложного коммутирующего оборудования по сравнению с ЕНЭ, что является сдерживающим фактором для его использования. Создание мощных быстродействующих и надежных прерывателей тока позволит улучшить характеристики высоковольтных генераторов на основе ИНЭ и расширить возможности их применения. В данной работе исследуются газоразрядные коммутаторы низкого давления в режиме обрыва тока с целью получения наилучших параметров импульса на выходе генератора.

Во второй главе проведено комплексное исследование тиратрона ТГИ2-500/20 в генераторе высоковольтных импульсов с ИНЭ. Определены закономерности изменения величины прерываемого тока (тока обрыва) и длительно-

сти его протекания (времени обрыва) в зависимости от условий работы коммутатора, зависимости временной нестабильности момента обрыва тока (джиттера) и времени выключения от различных параметров, исследован температурный режим тиратрона во время работы генератора. Путем анализа зависимостей сформулированы рекомендации, позволяющие эффективно использовать тиратрон в качестве прерывателя тока в генераторе с индуктивным накопителем энергии.

Схема экспериментальной установки показана на рисунке 1. Поскольку в цепи заряда накопителя присутствуют индуктивность и емкость, ток через газоразрядный коммутатор протекает по синусоиде.

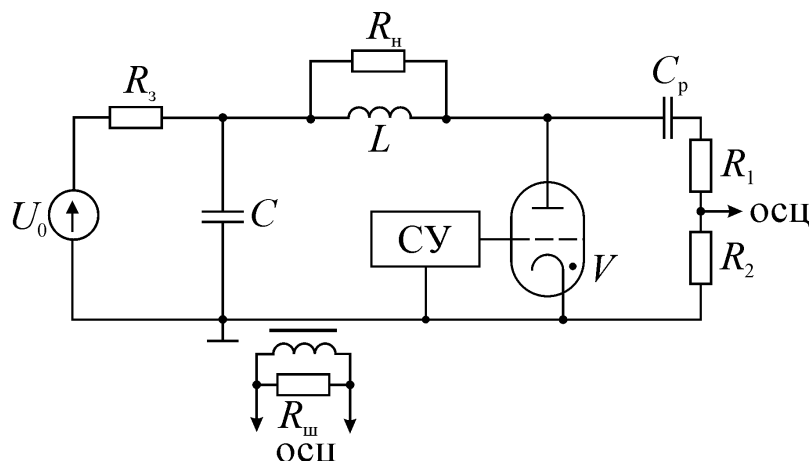


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки: U_0 – напряжение источника питания генератора; R_3 – сопротивление, ограничивающее зарядный ток; C – входной конденсатор; L – индуктивность накопителя энергии; R_n – сопротивление нагрузки; СУ – схема управления; C_p – разделительный конденсатор; R_1, R_2 – делитель напряжения; ток через прибор измеряется с помощью пояса Роговского с коэффициентом деления 1:100; импульсное напряжение на аноде измеряется с помощью делителя напряжения, подключенного через разделительный конденсатор, с коэффициентом деления 1:3200

Известно, что параметры процесса обрыва тока целесообразно оценивать при помощи величины критического заряда, переносимого через сеточный узел и необходимого для обрыва тока. Критический заряд численно равен интегралу от функции тока по времени в пределах от нуля до времени обрыва и показывает количество заряженных частиц, перенесенных через сеточный узел до момента обрыва. В ходе экспериментов установлено, что критический заряд зависит от тока обрыва (рисунок 2). Зависимость критического заряда от величины тока обрыва имеет минимум, который наблюдается при обрыве, происходящем в максимуме тока ($I_{обр} = I_{max}$). Причем область токов справа от минимума соответствует обрыву тока до прохождения максимума (в первой четверти периода синусоиды), а область токов слева от минимума соответствует обрыву тока после прохождения максимума тока (во второй четверти периода синусоиды). Вправо от минимума

критический заряд линейно возрастает с увеличением тока обрыва, что обусловлено перераспределением направленной составляющей скорости электронов в результате упругих электрон-ионных столкновений (снижается эффективность вытеснения газа из области сеточного узла), а также разогревом газа и краев отверстий сеточного узла (растет поток натекающего за счет диффузии газа). Влево от минимума критический заряд возрастает в связи с падением эффективности вытеснения нейтрального газа из области сеточного узла при уменьшении тока. Рост давления водорода приводит к смещению минимума зависимости вверх и вправо, а также к увеличению крутизны линейного участка кривой. С ростом давления увеличивается начальная концентрация молекул водорода в области сеточного узла, что приводит к увеличению времени, необходимого для вытеснения газа, и критического заряда (происходит смещение зависимости вверх и вправо). Кроме того, с увеличением давления растет эффективность ионизации, следовательно, количество кулоновских электрон-ионных столкновений при одном и том же токе увеличивается, что приводит к росту крутизны линейного участка зависимости.

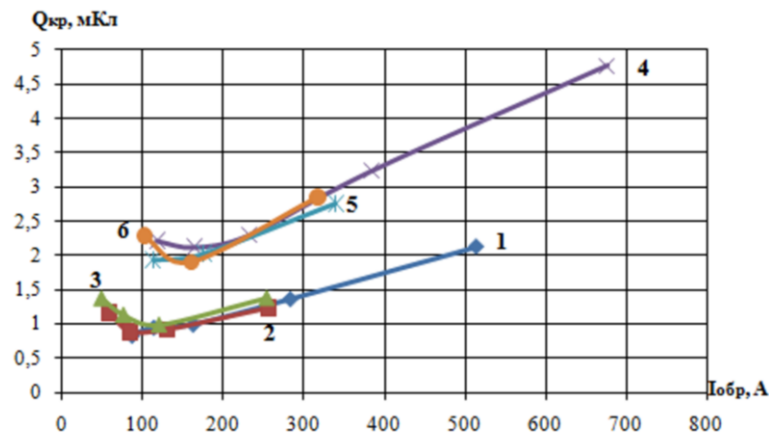


Рисунок 2. Зависимости критического заряда от тока обрыва при амплитуде импульса напряжения 16 кВ и параметрах:

- $p = 32$ Па: $L - 23$ мкГн (1), 72 мкГн (2), 123 мкГн (3);
- $p = 40$ Па: $L - 23$ мкГн (4), 72 мкГн (5), 123 мкГн (6)

Установлено, что временная нестабильность момента обрыва тока (джиттер) зависит от тока обрыва (рисунок 3). В области малых токов величина джиттера достигает достаточно больших значений (2-5 мкс). Поскольку вытеснение газа из области сеточного узла производится чередой импульсов тока в результате перемещения разряда по сечению отверстий сетки и малый ток характеризуется низкой эффективностью вытеснения газа, потоки вытесняемого газа и натекающего обратно в результате диффузии имеют величину одного порядка. В таких условиях временная нестабильность момента обрыва тока значительна. С ростом тока и соответственно увеличением эффективности вытеснения нейтрального газа величина джиттера снижается. Обратный диффузионный поток

газа становится пренебрежимо мал по сравнению с потоком газа из области сеточного узла.

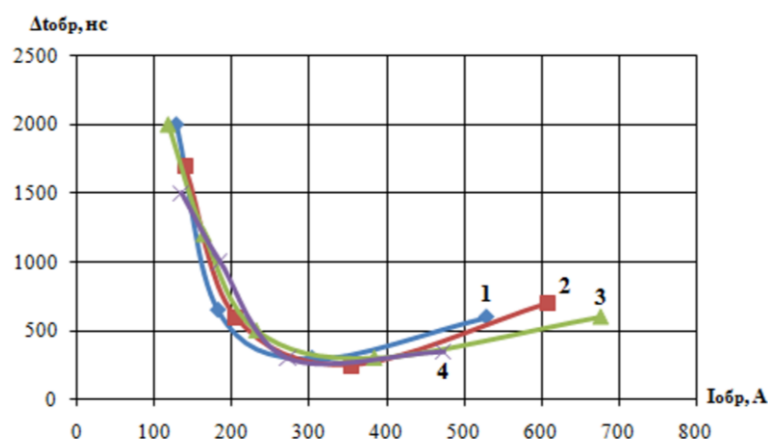


Рисунок 3. Зависимости временной нестабильности обрыва тока (джиттера) от тока обрыва при индуктивности накопителя энергии $L = 23$ мкГн и амплитудах импульса напряжения на выходе $U_m - 12$ кВ (1), 14 кВ (2), 16 кВ (3), 20 кВ (4)

При токе 300 А наблюдается минимум нестабильности величиной 200-300 нс. При этом максимальная плотность тока в области с минимальной площадью сечения разрядного канала составляет $318,3$ А/см². В области больших токов величина джиттера снова возрастает (до 0,8-1 мкс) в результате значительного разогрева газа и краев сеточных отверстий.

В ходе исследований получены зависимости критического заряда и джиттера от температуры. Критический заряд возрастает в 1,5-2 раза, а джиттер - в 3-5 раз при разогреве сеточного узла прибора на 40 °С. Через 20 минут работы происходит установление режима по температуре, критический заряд и джиттер более не изменяются. Установлено, что время выключения увеличивается с ростом тока обрыва и снижается с ростом амплитуды импульса на выходе.

В результате экспериментальных исследований получены рекомендуемые значения параметров генератора и тиратрона ТГИ2-500/20 при формировании высоковольтных импульсов (в таблице указаны значения параметров для сопротивления нагрузки 50 Ом).

Рекомендуемые значения параметров генератора и тиратрона ТГИ2-500/20 при формировании высоковольтных импульсов

Диапазон напряжений накала генератора водорода	3,5..4,6 В
Диапазон давлений водорода	28..60 Па
Диапазон токов обрыва	50..1000 А
Диапазон индуктивностей накопителя	15..125 мкГн
Амплитуда импульса на выходе генератора	5..50 кВ
Характерный диапазон времен выключения	170..400 нс
Предельная частота в непрерывном режиме	500 Гц

В третьей главе проведено экспериментальное исследование опытных образцов газоразрядных коммутаторов, созданных благодаря исследованиям тиратрона ТГИ2-500/20. Дана сравнительная характеристика всех исследованных приборов. Даны рекомендации по конструированию сеточных узлов газоразрядных коммутаторов.

Установлено, что зависимости критического заряда и джиттера от тока обрыва имеют сходный характер для трех исследованных приборов (рисунок 4). В опытных образцах газоразрядных коммутаторов благодаря изменению конструкции сеточного узла удалось снизить рабочее давление. Снижение давления способствовало уменьшению величины критического заряда и ослаблению его зависимости от тока обрыва. При меньшей величине критического заряда одно и то же значение тока обрыва достигается за меньшее время, что позволяет снизить потери на проводимость в приборе. Меньший нагрев прибора, а также слабая зависимость критического заряда от тока обрыва позволяют снизить временную нестабильность момента обрыва тока. Следует отметить, что пропускная способность по току снижается с уменьшением минимальной площади сечения разрядного канала. Наименьший предельный ток при одинаковых условиях эксперимента оказался в коммутаторе с щелевой конфигурацией отверстий сеточного узла (минимальная площадь сечения разрядного канала 67 мм^2), наибольший – в тиратроне ТГИ2-500/20 (минимальная площадь сечения разрядного канала $94,25 \text{ мм}^2$), а третий прибор занял промежуточное положение (минимальная площадь сечения разрядного канала $78,5 \text{ мм}^2$).

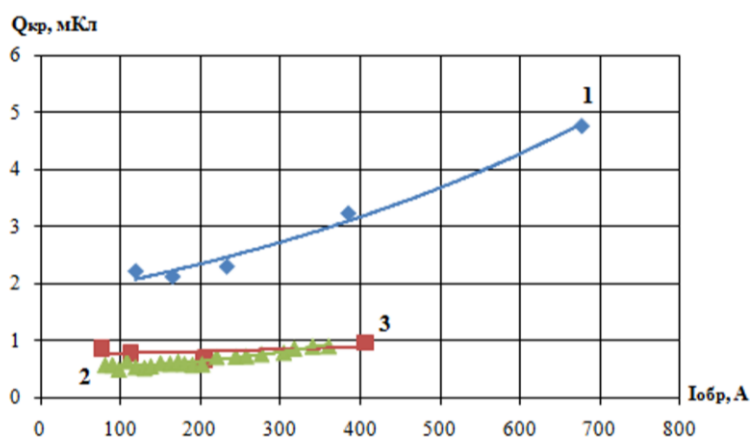


Рисунок 4. Зависимости критического заряда от тока обрыва при амплитуде импульса на нагрузке 16 кВ, индуктивности накопителя энергии 23 мкГн для тиратрона ТГИ2-500/20 ($p = 40 \text{ Па}$) (1), коммутатора с многодырочной конфигурацией сеточного узла ($p = 28 \text{ Па}$) (2) и коммутатора с щелевой конфигурацией отверстий сеточного узла ($p = 12 \text{ Па}$) (3)

Зависимости джиттера от тока обрыва также имеют сходный характер для исследованных приборов (рисунок 5). Минимум нестабильности заключен в ин-

тервале 200-300 нс и достигается при плотностях тока 280-330 А/см² в области с минимальной площадью сечения разрядного канала. Полученные экспериментальные данные показывают, что кривые зависимостей для опытных образцов газоразрядных коммутаторов проходят ниже, чем для тиратрона. При сравнении величины временной нестабильности момента обрыва при токе 150 А получаем: для тиратрона ТГИ2-500/20 она составляет порядка 1,5 мкс, для коммутатора с многодырочной конфигурацией отверстий сетки – 0,75 мкс, а для коммутатора с щелевыми отверстиями – 300 нс.

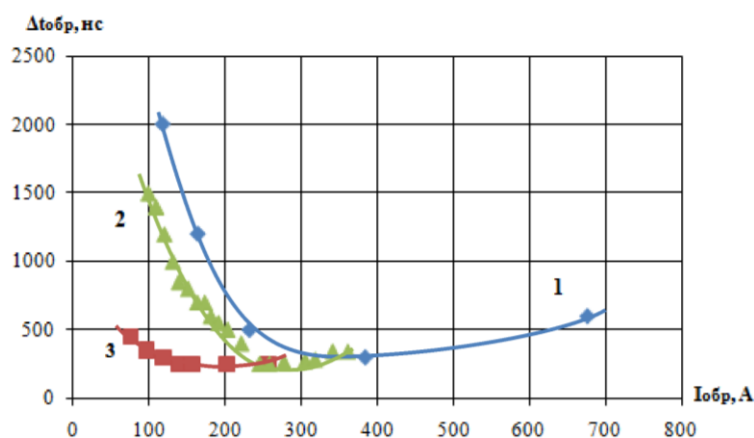


Рисунок 5. Зависимости временной нестабильности момента обрыва тока от тока обрыва индуктивности накопителя энергии 23 мкГн для тиратрона ТГИ2-500/20 ($p = 40$ Па) (1), коммутатора с многодырочной конфигурацией сеточного узла ($p = 28$ Па) (2) и коммутатора со щелевой конфигурацией отверстий сеточного узла ($p = 12$ Па) (3)

В опытных образцах газоразрядных коммутаторов достигнуто снижение времени выключения (рисунок б). Наименьшее время выключения наблюдается в приборе с щелевой конфигурацией отверстий сеточного узла. Минимальное время выключения в данном приборе составляет 130 нс (170 нс для тиратрона ТГИ2-500/20). Снижение времени выключения позволяет увеличить КПД за счет сокращения потерь на коммутацию, а также добиться большей амплитуды импульса при том же токе обрыва.

В четвертой главе описаны физические процессы, ведущие к обрыву тока. Получены путем численного моделирования параметры плазмы в области сеточного узла. Выявлены и доказаны причины зависимости критического заряда от тока обрыва. Показана возможность формирования высокоэнергетичных пучков электронов с использованием явления обрыва в газоразрядных коммутаторах тока.

Современное представление о причине обрыва тока в газоразрядных коммутаторах тока низкого давления заключается в перераспределении плотности нейтрального газа в рабочей области вследствие ряда физических процессов и достижения локального разрежения, при котором невозможно поддержание

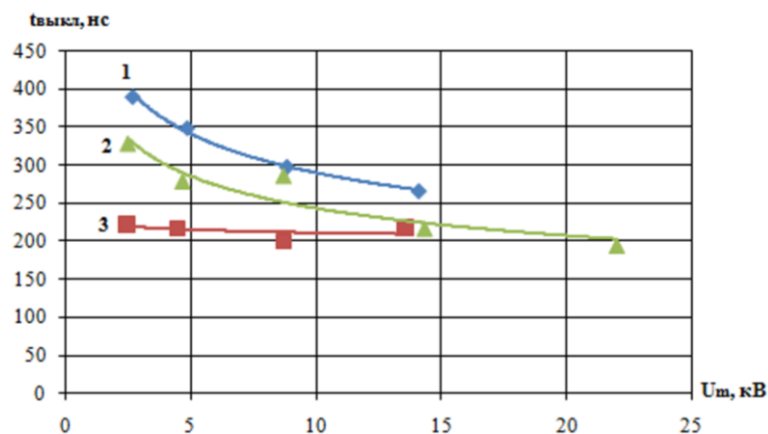


Рисунок 6. Зависимости времени выключения от амплитуды импульса на нагрузке при токе обрыва 100 А и индуктивности накопителя энергии 72 мкГн для тиратрона ТГИ2-500/20 ($p = 40$ Па) (1), коммутатора с многодырочной конфигурацией сеточного узла ($p = 28$ Па) (2) и коммутатора с щелевой конфигурацией отверстий сеточного узла ($p = 12$ Па) (3)

горения разряда. Перераспределение нейтрального газа вызвано следующими процессами:

- ионизация;
- перенос молекул газа в результате движения ионов к стенкам электродов и последующей рекомбинации, а также в результате происходящей при этом резонансной перезарядки;
- вытеснение газа в результате его разогрева и локального повышения давления;
- вытеснение молекул газа при получении импульса количества движения от заряженных частиц.

При решении уравнения Больцмана получены распределения электронов по энергиям при различных значениях приведенного поля, степени ионизации, плотности плазмы. По распределениям рассчитаны основные параметры плазмы, такие как средняя энергия электронов, температура электронов, коэффициент диффузии, подвижность, частоты рассматриваемых столкновений, потери энергии при данных столкновениях в единицу времени.

В ходе экспериментов было выдвинуто предположение, что критический заряд увеличивается с ростом тока обрыва на линейном участке зависимости в результате увеличения концентрации ионов и, как следствие, доли направленной составляющей скорости электронов, рассеиваемой на ионах. При этом эффективность вытеснения газа из области сеточного узла падает, а критический заряд растет. Однако увеличение тока обрыва при постоянных давлении и напряжении источника питания приводит к уменьшению времени обрыва. При меньшем времени обрыва происходит меньшее количество актов кулоновских электрон-ионных столкновений. Таким образом, нельзя однозначно говорить о росте количества

электрон-ионных столкновений при увеличении тока. Чтобы доказать, что на рост критического заряда оказывает влияние перераспределение скорости электронов, было проведено численное моделирование, в результате которого были получены зависимости количества электрон-ионных столкновений от давления и напряжения источника питания (рисунок 7). Из рисунка видно, что число кулоновских столкновений растет с увеличением давления водорода. Это объясняется увеличением начальной концентрации молекул водорода в приборе, что приводит к росту частоты ионизаций и, следовательно, к увеличению плотности ионов и количества электрон-ионных столкновений. Увеличение напряжения источника питания, которое сопровождается ростом тока обрыва, несмотря на падение времени обрыва, также приводит к росту количества кулоновских столкновений. Результаты моделирования качественно сходны с экспериментальными данными и показывают, что перераспределение направленной составляющей скорости электронов при рассеивании на ионах является одним из факторов, определяющих рост критического заряда, необходимого для обрыва тока, при увеличении тока обрыва.

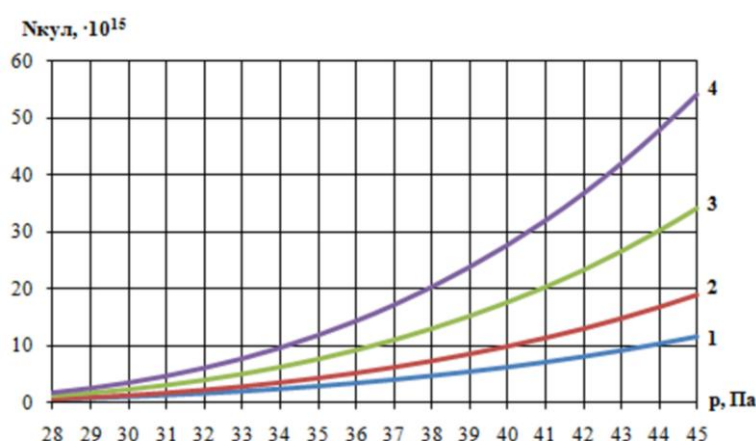


Рисунок 7. Зависимости количества кулоновских столкновений от давления водорода при напряжениях источника питания 950 В (1), 1220 В (2), 1670 В (3), 2130 В (4)

В заключении сделаны основные выводы по результатам проведенной работы.

В приложении представлены акты о практическом использовании результатов диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследований работы газоразрядных коммутаторов тока в генераторе высоковольтных импульсов с индуктивным накопителем энергии получены следующие основные научные и технические результаты:

1. Установлено, что критический заряд, переносимый через сеточный узел и необходимый для обрыва тока в газоразрядных коммутаторах низкого давления тиратронного типа, зависит от величины тока обрыва. Зависимость имеет минимум, который наблюдается при обрыве тока равном максимальному ($I_{обр} = I_{max}$). Слева от минимума с уменьшением тока критический заряд возрастает из-за падения эффективности вытеснения нейтрального газа из области сеточного узла. Справа от минимума с увеличением тока критический заряд линейно возрастает. Обрыв при этом происходит до достижения током своего максимального значения. С увеличением давления возрастают величина критического заряда и крутизна линейного участка характеристики.

2. Установлено, что индуктивность накопителя, сопротивление нагрузки и время обрыва слабо влияют на критический заряд.

3. Установлено, что зависимость временной нестабильности момента обрыва тока от тока обрыва имеет минимум. Его значение заключено в интервале 200-300 нс и наблюдается при плотностях тока обрыва 280-330 А/см² в области с минимальной площадью сечения разрядного канала.

4. Получены зависимости критического заряда и джиттера от температуры фланца сетки. Показано, что данные параметры значительно (критический заряд в 1,5-2 раза, джиттер в 3-5 раз) возрастают с разогревом прибора на 40 °С, что обусловлено повышением давления газа в области сеточного узла и величины диффузионного потока натекающего газа с увеличением температуры. Критический заряд и джиттер достигают некоторого установившегося значения через 20 минут работы.

5. Опытные конструкции сеточных узлов позволяют уменьшить величину критического заряда, необходимого для обрыва тока. При заданном токе обрыва это позволяет понизить время заряда индуктивности, разогрев прибора, увеличить КПД генератора и его частоту. Помимо этого, за счет уменьшения рабочего давления снижается зависимость критического заряда от тока обрыва, что уменьшает джиттер.

6. Полученные в опытных коммутаторах величины джиттера значительно меньше (в 2-3 раза), чем в тиратроне при одинаковой минимальной временной нестабильности момента обрыва тока.

7. В опытном коммутаторе с щелевыми отверстиями минимальное время выключения составляет 130 нс (170 нс для тиратрона ТГИ2-500/20).

8. Рассчитаны стационарные распределения электронов по энергиям и параметры плазмы при различных давлениях, плотностях плазмы и степенях ионизации. Полученные величины подвижности электронов, коэффициента диффузии, частоты столкновений, коэффициентов потерь энергии целесообразно использовать для моделирования плазмы.

9. Создана численная модель физических процессов в сеточном разрядном канале, позволяющая рассчитать количество кулоновских электрон-ионных

столкновений в зависимости от давления и напряжения источника питания. С помощью модели показано, что рост критического заряда при увеличении тока обрыва происходит в результате перераспределения направленной составляющей скорости электронов при кулоновских столкновениях с ионами.

10. Показана возможность формирования пучков высокоэнергетичных (до 100 кэВ) электронов при обрыве тока в газоразрядных коммутаторах тиратронной конструкции.

11. На основе экспериментальных исследований были сформулированы рекомендуемые значения параметров при работе тиратрона ТГИ2-500/20 в режиме обрыва тока (см. таблицу).

ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ СЛЕДУЮЩИЕ РАБОТЫ:

1. Шатилов С.Г. Разработка системы управления и питания генератора высоковольтных импульсов // 59-я студенческая научно-техническая конференция. – РГРТУ. – Рязань. – 2012.

2. Шатилов С.Г. Разработка специализированного коммутатора тока // Региональная конференция молодых ученых «Пути инновационного развития экономики Рязанской области». – Рязань. – 2013.

3. Верещагин Н.М., Павлов М.Б., Круглов С.А., 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. 100-102.

4. Верещагин Н.М., Круглов С.А., Серезин А.А., Шатилов С.Г. Исследование влияния сеточного узла тиратрона на его электропрочность // Межвузовский сборник научных трудов «Электроника 2013» - Рязань. – 2013. – С. 64-69.

5. Верещагин Н.М., Круглов С.А., Серезин А.А., Шатилов С.Г. Исследование влияния температурного режима работы газоразрядного коммутатора тока на параметры генератора высоковольтных импульсов с индуктивным накопителем энергии // Международная научно-практическая конференция “Наука и образование в 21 веке” .- Россия .- Тамбов. – 2013.

6. Верещагин Н.М., Круглов С.А., Шатилов С.Г., Агальцов К.Д. Применение мощных наносекундных импульсов // IX Международная научно-практическая конференция: «Научное обозрение физико-математических и технических наук в XXI веке» .- Россия .- Москва .- 26-27.09.2014.

7. Vereshyagin N.M., Trubitsin A.A., Kruglov S.A., Serezhin A.A., Shatilov S.G. Formation of high-energy beams of electrons // Beam Dynamics and Optimization (BDO), 2014, 20th, International Workshop on Print ISBN: 978-1-4799-5319-6, INSPEC Accession Number: 14565578, Conference Location: St. Petersburg, DOI: 10.1109/BDO.2014.6890093, Publisher: IEEE.

8. Шатилов С.Г. Моделирование процесса формирования высокоэнергетических пучков электронов // Межвузовский сборник научных трудов «Электроника 2015» .- Рязань. – 2015.

9. 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.

10. 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.

11. Верещагин Н.М., Круглов С.А., Серезин А.А., Шатилов С.Г., Кислов Д.С. Исследование неустойчивости параметров генерируемых импульсов в генераторе с индуктивным накопителем энергии и газоразрядным прерывателем тока // Радиотехника .– 2016 .– №8 .– С. 175-183.

12. Верещагин Н.М., Круглов С.А., Серезин А.А., Шатилов С.Г. Разборный макет газоразрядного прибора // Патент на полезную модель № 137430. – Зарегистрирован 10.02.2014.

13. Верещагин Н.М., Круглов С.А., Серезин А.А., Шатилов С.Г. Способ стабилизации параметров высоковольтных импульсов // Патент на изобретение № 2549171. – Зарегистрирован 25.03.2015.

14. Верещагин Н.М., Круглов С.А., Серезин 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.

15. Верещагин Н.М., Круглов С.А., Серезин 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.

ШАТИЛОВ СЕРГЕЙ GERMAHOVИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ПРЕРЫВАТЕЛЕЙ ТОКА
В РЕЖИМЕ ГЕНЕРАЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

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

Тираж 80 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.