

На правах рукописи



**Серезин Андрей Александрович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРЫВА ТОКА В ДИАФРАГМИРОВАННОЙ  
ПЛАЗМЕ ГАЗОРАЗРЯДНОГО КОММУТАТОРА В СХЕМЕ  
ИНДУКТИВНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ**

Специальность 05.27.02 – Вакуумная и плазменная электроника

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Рязань 2012

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

Научный руководитель: канд. техн. наук, доцент  
Круглов Сергей Александрович

Официальные оппоненты:

Быстров Юрий Александрович, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», профессор

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

Ведущее предприятие: НИИ ГРП «Плазма» г. Рязань

Защита состоится «03» апреля 2012 г. в зале заседаний ученого совета, аудитория 235, в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.211.03 ФГБОУ ВПО «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, ученый совет РГРТУ.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Рязанского государственного радиотехнического университета.

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » февраля 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д-р техн. наук, профессор



Колотилин Б.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы

Высоковольтная наносекундная импульсная техника на настоящий момент имеет два основных направления развития. Одно из них заключается в проведении различных исследовательских программ в таких областях, как ускорительная техника, лазерная техника, мощная СВЧ-электроника, управляемый термоядерный синтез и пр. Второе, получившее интенсивное развитие в последнее время, основано на технологическом применении мощных наносекундных импульсов. В рамках этого направления разрабатываются новые технологии для решения экологических задач по очистке выбросов электрических и тепловых станций, удалению токсичных примесей из атмосферы, обработке отходов медицины и вредных производств, очистке воды, стерилизации различной продукции. Создаются новые радиолокационные и радиационные технологии, проектируются промышленные комплексы для обогащения руд редкоземельных металлов.

Для решения всех вышеперечисленных задач требуются надежные генераторы высоковольтных импульсов. Существует два способа построения таких генераторов: первый, классический, на основе емкостных накопителей энергии (ЕНЭ); второй – на основе индуктивных накопителей энергии (ИНЭ).

В настоящее время наибольший интерес проявляется к генераторам высоковольтных импульсов, построенных на основе ИНЭ. Для их создания требуются надежные прерыватели, способные многократно обрывать ток, в качестве которых применяются газоразрядные и полупроводниковые размыкатели тока (SOS-диоды). Использование газоразрядных коммутаторов с самообрывом разряда позволяет существенно упростить схему генератора, так как один и тот же коммутатор используется для накопления энергии в индуктивности (замыкания тока) и для передачи энергии от индуктивности в нагрузку (размыкания тока). Кроме того, в отличие от полупроводниковых коммутаторов, газоразрядные прерыватели тока способны восстанавливать свои свойства после срывов в работе (пробоев, перенапряжений, перегрузок и т.д.). Работа газоразрядных коммутаторов в схеме индуктивного накопителя энергии основана на явлении обрыва тока. Прерывание тока происходит в результате вытеснения нейтрального

газа из отверстий управляющего электрода под действием движения заряженных частиц. Однако процессы, протекающие в газоразрядном коммутаторе на стадии прерывания тока, изучены не полностью. Помимо этого, в настоящее время не существует специализированных газоразрядных приборов, работающих в частотном режиме и способных стабильно обрывать ток до 1 кА в схеме генератора высоковольтных импульсов до 100 кВ. Поэтому возникает необходимость в проведении подобных исследований, направленных на изучение процесса обрыва тока, результаты которых будут использоваться при разработке специализированных газоразрядных прерывателей тока и устройств на их основе. В этом плане тема диссертационной работы весьма актуальна.

*Целью данной работы является* повышение стабильности параметров генератора наносекундных импульсов мегаваттной мощности на основе индуктивного накопителя энергии и газоразрядного прерывателя тока.

*Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:*

- определение энергетических характеристик процесса прерывания тока газоразрядным коммутатором в генераторе мощных наносекундных импульсов с индуктивным накопителем энергии;
- выявление закономерностей изменения во времени тока анода и анодного напряжения на стадии выключения коммутатора;
- определение влияния параметров прерывателя на время выключения прибора;
- исследование зависимости параметров газоразрядного коммутатора тока от его температурного режима;
- определение влияния геометрии диафрагмы в плазменном столбе переменного сечения на процесс обрыва тока.

### *Научная новизна*

1. Разработана конструкция управляющего электрода с коническими отверстиями, являющегося одним из основных элементов газоразрядного прерывателя. Конструкция в два раза повышает временную стабильность процесса обрыва тока в схеме с индуктивным накопителем энергии.

2. Экспериментально установлено, что в зависимости от амплитуды напряжения на аноде газоразрядного коммутатора ( $U_m \leq 23$  кВ;  $23 \text{ кВ} < U_m \leq 45$  кВ;  $45 \text{ кВ} < U_m \leq 90$  кВ) существует три режима прерывания тока (нарастания напряжения на нагрузке), в каждом из которых динамика тока и напряжения описывается различными функциями.

3. Экспериментально определено, что с увеличением температуры коммутатора растет длительность протекания тока через прерыватель, что приводит к изменению его величины в момент обрыва и параметров генерируемых импульсов.

4. Экспериментально установлено, что перед обрывом тока возрастает напряжение на сетке, что свидетельствует об увеличении разности потенциалов на двойном слое зарядов перед сужением разрядного канала.

#### Положения и результаты, выносимые на защиту

1. При обрыве тока односекционным газоразрядным коммутатором в генераторе наносекундных импульсов мегаваттной мощности динамика процессов определяется величиной максимального напряжения на аноде. Получены математические соотношения, характеризующие спад тока анода и рост напряжения на нагрузке в зависимости от амплитуды анодного напряжения ( $U_m \leq 23$  кВ;  $23 \text{ кВ} < U_m \leq 45$  кВ;  $45 \text{ кВ} < U_m \leq 90$  кВ).

2. Температура сетки газоразрядного коммутатора, включенного в схему генератора высоковольтных импульсов с индуктивным накопителем энергии, значительно (до  $300$  °С) увеличивается после включения прибора, что приводит к заметному (до 35 - 40 %) росту количества электронов, проходящих через сетку, необходимого для обрыва тока.

3. Напряжение сетки газоразрядного коммутатора перед обрывом тока существенно (в 2 раза) повышается, что свидетельствует о соответственном увеличении разности потенциалов на двойном слое зарядов перед сужением разрядного канала. Приращение напряжения увеличивается на 4 В с ростом амплитуды прерываемого тока на 100 А.

### Практическая значимость

1. Получены соотношения, описывающие динамику уменьшения тока и возрастания напряжения на аноде прибора в зависимости от амплитуды анодного напряжения ( $U_m \leq 23$  кВ;  $23$  кВ  $< U_m \leq 45$  кВ;  $45$  кВ  $< U_m \leq 90$  кВ), которые позволяют на этапе разработки генераторов определять форму импульса на нагрузке в зависимости от заданной амплитуды напряжения и тока.

2. Получены выражения, позволяющие при заданных значениях величины обрываемого тока (до 1 кА) и амплитуды напряжения на аноде (до 100 кВ) рассчитывать энергию, выделяющуюся в коммутаторе.

3. Установлено, что увеличение амплитуды напряжения на нагрузке в диапазоне 10 – 70 кВ приводит к уменьшению времени выключения коммутатора с 200 нс до 150 нс. Увеличение амплитуды обрываемого тока в диапазоне 0,1 – 0,4 кА приводит к росту времени с 155 нс до 200 нс.

4. Разработан и изготовлен разборный макет газоразрядного коммутатора с холодным катодом, обеспечивающий прерывание тока до 0,5 кА и получение наносекундных импульсов напряжения до 60 кВ.

5. Для газоразрядных коммутаторов тока разработана конструкция сетки с коническими отверстиями, которая в два раза увеличивает временную стабильность обрыва тока в схеме с индуктивным накопителем энергии.

### Внедрение результатов работы

Результаты диссертационной работы использованы НИИ ГРП “Плазма” (г. Рязань) в штатном технологическом процессе разработки и изготовления газоразрядных коммутаторов тока; при выполнении НИОКР «Разработка и оптимизация разборного макета газоразрядного прерывателя тока для электроники» Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере; при выполнении НИР «Исследование обрывных явлений в диафрагмированной плазме газоразрядного коммутатора тока, включенного в схеме индуктивного накопителя энергии» Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг.; в учеб-

ном процессе РГРТУ в курсах «Основы преобразовательной техники» и «Импульсная электроника».

Апробация работы. Результаты исследований, представленные в диссертационной работе, обсуждались на международной конференции “16th International Symposium on High-Current Electronics (16th SHCE)”, Tomsk, 2010, на международной научно-практической конференции “Современные вопросы науки XXI век”, Россия, Тамбов, 2011.

Публикации. Результаты диссертационной работы отражены в 8 публикациях, из них 2 в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК. 2 печатные работы опубликованы в трудах международных конференций, подана заявка о выдаче патента РФ на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения; содержит 144 страницы основного текста, иллюстрированных 68 рисунками, список литературы, включающий 71 источник на 6 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 по современным способам накопления энергии и существующим коммутаторам тока.

Рассмотрены основные методы генерации высоковольтных импульсов. Приведен сравнительный анализ использования емкостных и индуктивных накопителей энергии при построении генераторов высоковольтных импульсов. Показано, что использование ИНЭ имеет существенные преимущества перед применением ЕНЭ:

- 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.

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

Описаны известные размыкатели тока для построения схем на основе ИНЭ. Проанализированы конструкции известных газоразрядных коммутаторов тока (тиратрона, таситрона, псевдоискрового разрядника). Представлены основные параметры рассмотренных коммутаторов тока. Показана актуальность проводимых исследований, сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

*Во второй главе* приведены результаты исследований энергетических характеристик процесса прерывания тока газоразрядным коммутатором в генераторе мощных наносекундных импульсов с индуктивным накопителем энергии и влияния параметров генерируемых импульсов на время выключения коммутатора. Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 1.

Энергия, выделяющаяся в коммутаторе на стадии выключения  $W_n$ , определяется формой анодного тока  $i_k(t)$  и напряжения на аноде  $u_a(t)$  в момент коммутации:

$$W_n = \int_0^{t_k} u_a(t) i_k(t) dt, \quad (1)$$

где  $t_k$  – время коммутации.

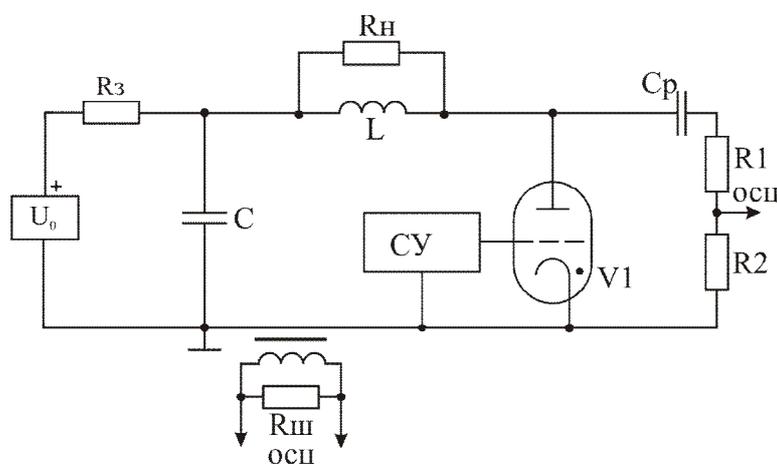


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки.  
 СУ – схема управления, V1 – газоразрядный прерыватель тока,  
 L – накопительная индуктивность

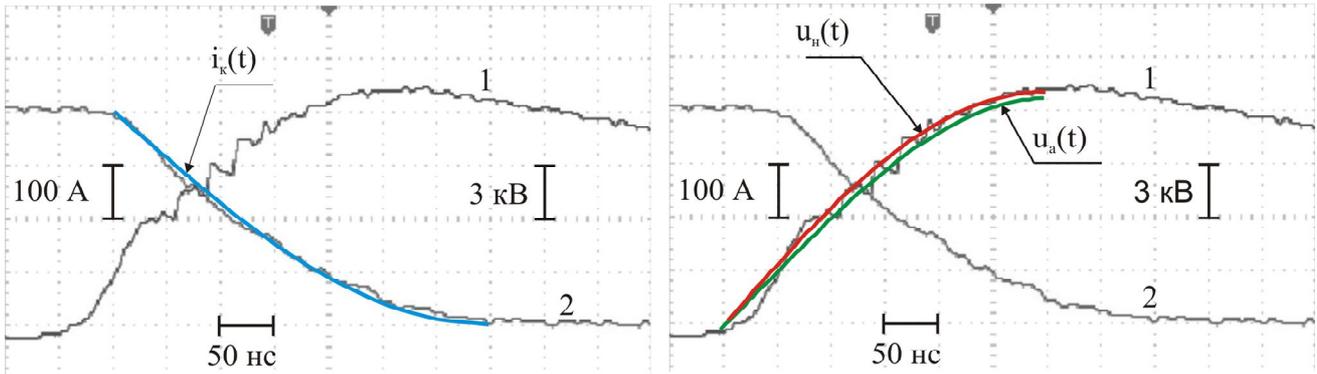


Рисунок 2 – Осциллограммы напряжения на аноде (1) и тока анода (2) для первого режима.  $i_k(t)$  – аппроксимирующая функция тока анода,  $u_a(t)$  – аппроксимирующая функция напряжения,  $u_n(t)$  – функция напряжения на нагрузке, рассчитанная с использованием аппроксимирующей функции тока через коммутатор

Экспериментально установлено, что в зависимости от максимальной амплитуды напряжения на аноде газоразрядного коммутатора ( $U_m \leq 23$  кВ;  $23$  кВ  $< U_m \leq 45$  кВ;  $45$  кВ  $< U_m \leq 90$  кВ) существует три режима прерывания тока (нарастания напряжения на нагрузке), в каждом из которых динамика тока и напряжения описывается различными функциями.

В первом режиме ( $U_m \leq 23$  кВ) зависимость изменения тока анода  $i_k(t)$  и напряжения на аноде  $u_a(t)$  во времени близка к синусоидальной. Поэтому в качестве аппроксимирующих функций выбрана синусоида (рисунок 2):

$$i_k(t) = I_m(1 - \sin(t\pi/2t_k)), \quad u_a(t) = U_m \sin(t\pi/2t_k), \quad (2)$$

где  $I_m$  – амплитуда тока,  $U_m$  – амплитуда напряжения на нагрузке,  $t_k$  – время коммутации.

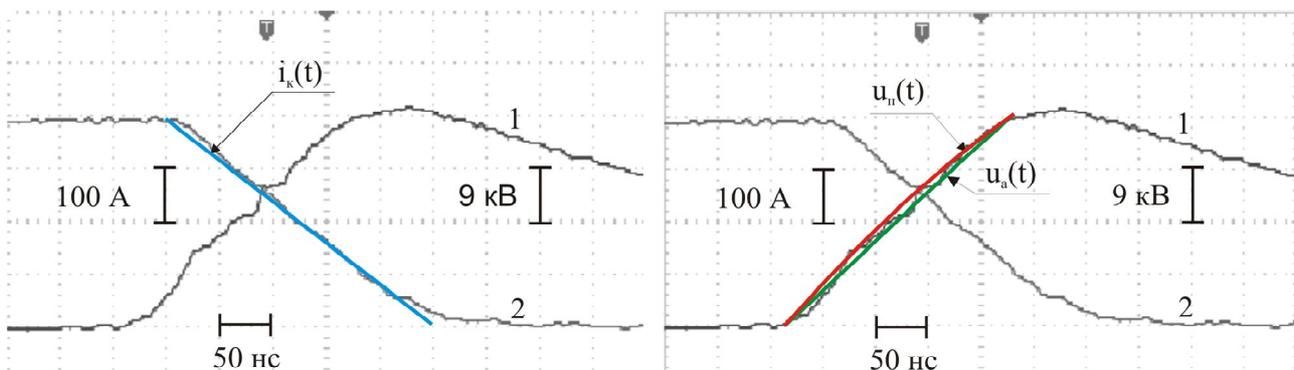


Рисунок 3 – Осциллограммы напряжения на аноде (1) и тока анода (2) для второго режима.  $i_k(t)$  – аппроксимирующая функция тока анода,  $u_a(t)$  – аппроксимирующая функция напряжения,  $u_n(t)$  – функция напряжения на нагрузке, рассчитанная с использованием аппроксимирующей функции тока через коммутатор

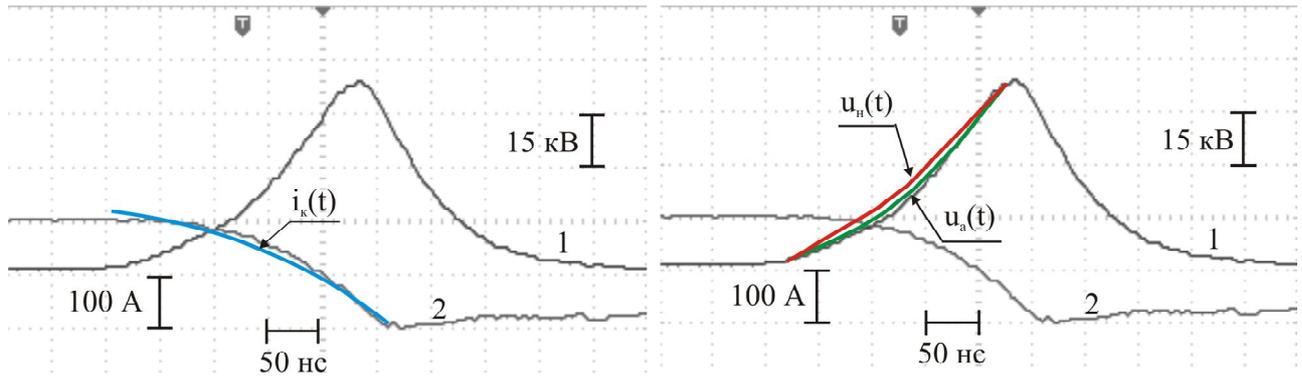


Рисунок 4 – Осциллограммы напряжения на аноде (1) и тока анода (2) для третьего режима.  $i_k(t)$  – аппроксимирующая функция тока анода,  $u_a(t)$  – аппроксимирующая функция напряжения,  $u_n(t)$  – функция напряжения на нагрузке, рассчитанная с использованием аппроксимирующей функции тока через коммутатор

В результате подстановки предложенных аппроксимирующих функций (2) в уравнение (1) была рассчитана энергия, выделяющаяся в коммутаторе на стадии выключения  $W_n$  при  $U_m \leq 23$  кВ:

$$W_n = 0,136 U_m I_m t_k. \quad (3)$$

Во втором режиме ( $23 \text{ кВ} < U_m \leq 45 \text{ кВ}$ ) динамика тока анода  $i_k(t)$  и напряжения на аноде  $u_a(t)$  была аппроксимирована линейной функцией (рисунок 3):

$$i_k(t) = I_m (1 - t/t_k), \quad u_a(t) = U_m t/t_k. \quad (4)$$

Энергия, выделяющаяся в коммутаторе на стадии выключения  $W_n$ , рассчитывается по формуле:

$$W_n = 0,166 U_m I_m t_k. \quad (5)$$

В третьем режиме ( $45 \text{ кВ} < U_m \leq 90 \text{ кВ}$ ) зависимость изменения тока анода  $i_k(t)$  и напряжения на аноде  $u_a(t)$  была аппроксимирована экспоненциальной функцией (рисунок 4):

$$i_k(t) = I_m \left( 1 - \frac{t}{t_k} e^{t/t_k - 1} \right), \quad u_a(t) = U_m \frac{t}{t_k} e^{t/t_k - 1}. \quad (6)$$

Энергия, выделяющаяся в коммутаторе на стадии выключения  $W_n$  при  $45 \text{ кВ} < U_m \leq 90 \text{ кВ}$ , определяется по формуле:

$$W_n = 0,152 U_m I_m t_k. \quad (7)$$

Для всех трех режимов с использованием предложенных аналитических выражений для  $i_k(t)$ , были рассчитаны функции напряжения на

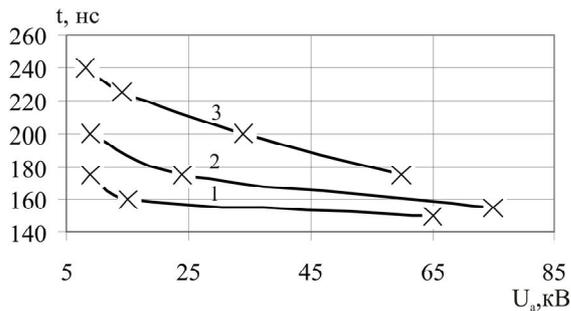


Рисунок 5 – Зависимости времени выключения коммутатора от анодного напряжения для различных токов анода (1 – 100 А, 2 – 200 А, 3 – 400 А)

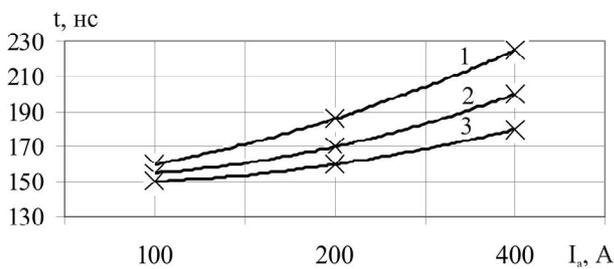


Рисунок 6 – Зависимости времени выключения коммутатора от тока анода при неизменной амплитуде анодного напряжения (1 – 15 кВ, 2 – 35 кВ, 3 – 55 кВ)

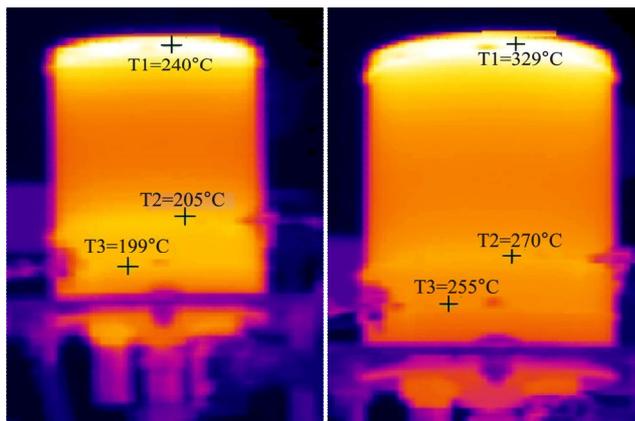


Рисунок 7 – Тепловизионные изображения тиратрона ТГИ2 500/20 в процессе разогрева, а – через 4 мин; б – через 16 мин. Т1 – температура анода, Т2 – температура сетки, Т3 – температура катода

нагрузке  $u_n(t)$ , которые с погрешностью не более 5 % совпадают с выбранными аппроксимациями напряжения  $u_a(t)$  (рисунки 2, 3, 4).

Для индуктивных накопителей энергии важным параметром является время выключения коммутатора. Оно определяет время нарастания импульса напряжения на нагрузке. Проведенные исследования показали, что на время выключения оказывают влияние амплитуда напряжения на нагрузке и амплитуда обрываемого тока. Установлено, что увеличение амплитуды напряжения на нагрузке приводит к уменьшению времени выключения газоразрядного коммутатора (рисунок 5), причиной этого является увеличение напряженности поля в пространстве сетка – анод и в области между дисками сетки, которое ускоряет распад плазмы. Увеличение амплитуды обрываемого тока приводит к росту времени выключения (рисунок 6), что обусловлено увеличением концентрации зарядов в коммутаторе.

В третьей главе приведены результаты исследований тепловых режимов работы газоразрядного

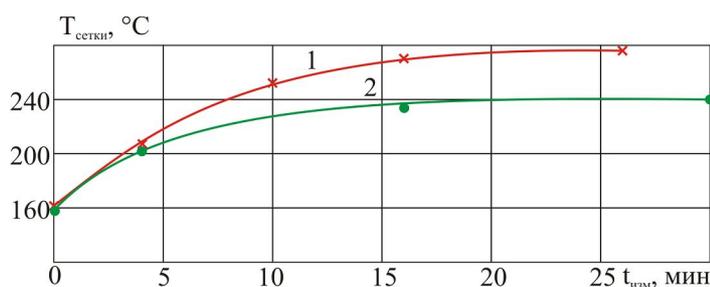


Рисунок 8 – Экспериментальные зависимости температуры сетки от времени работы коммутатора при различной мощности, потребляемой от источника (1 – 530 Вт, 2 – 260 Вт)

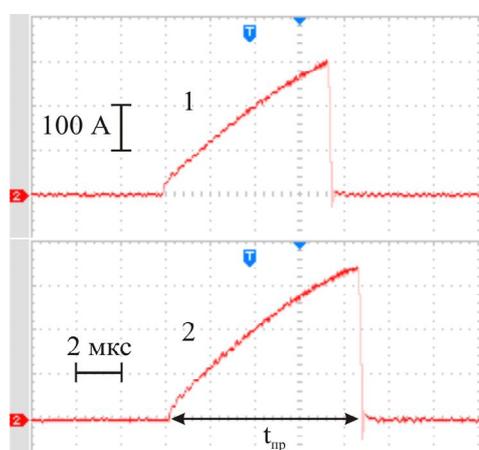


Рисунок 9 – Осциллограммы тока через прибор при различных температурах сетевого узла (1 – 205 °С, 2 – 278 °С).  $t_{пр}$  – время протекания тока через прибор

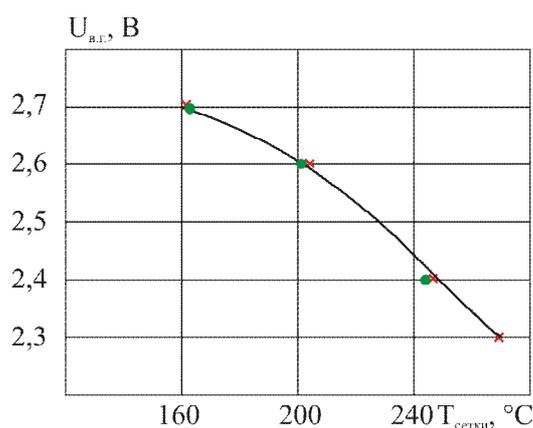


Рисунок 10 – Изменение напряжения на генераторе водорода, необходимого для постоянства времени обрыва тока и его амплитуды в процессе разогрева коммутатора, при различной мощности, потребляемой от источника (x – 530 Вт, • – 260 Вт)

коммутатора тока в схеме с индуктивным накопителем энергии.

После подачи анодного напряжения и импульса управления коммутатор переходит в рабочий режим, начиная замыкать и обрывать ток. На его электродах начинает выделяться мощность, что приводит к их постепенному разогреву (рисунок 7). Так как на обрыв тока наибольшее воздействие оказывают процессы, протекающие в сеточном узле, то были построены зависимости температуры сетки от времени работы коммутатора. Из рисунка 8 видно, что выход на установившийся режим работы прибора осуществляется приблизительно за 20 – 25 минут.

Проведенные исследования показали, что с увеличением температуры сетки растет интервал времени протекания тока через прибор, что приводит к изменению его амплитуды (рисунок 9). Экспериментально установлено, что компенсировать температурное изменение времени протекания тока можно уменьшением напряжения на генераторе водорода (рисунок 10).

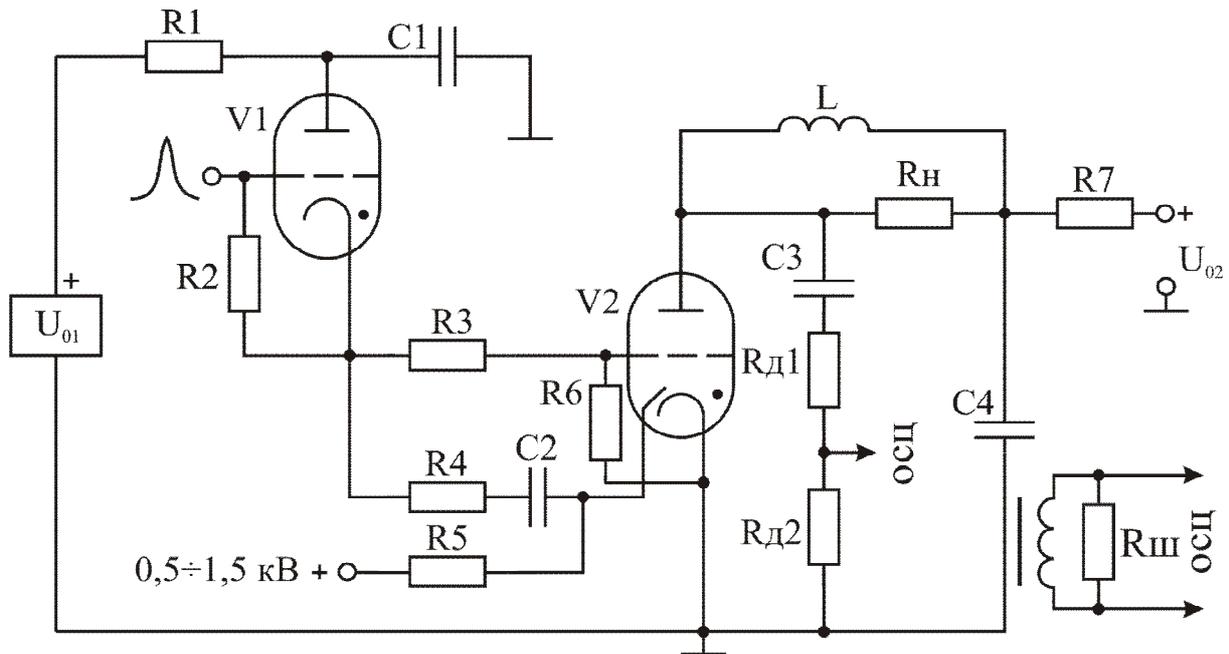


Рисунок 11 – Схема экспериментальной установки импульсного генератора.  
*V1* – вспомогательный тиратрон для формирования управляющего импульса напряжения;  
*V2* – разборный макет газоразрядного прерывателя тока

В четвертой главе приведены результаты исследований влияния конструкции газоразрядного коммутатора на процесс прерывания тока при формировании высоковольтных импульсов напряжения. Для определения влияния конструкции диафрагмы на механизм обрыва тока был разработан и изготовлен разборный макет газоразрядного прерывателя тока с холодным катодом. Макет разработан таким образом, чтобы максимально упростить процесс замены сеточного узла. Исследования макета проводились на экспериментальной установке, схема которой представлена на рисунке 11.

Для повышения стабильности обрыва тока была изготовлена сетка с двумя экранирующими диафрагмами. Однако в приборе с такой конструкцией управляющего электрода при токах, на порядок меньших рабочей величины, наблюдается переход тлеющего разряда в дуговой с последующими каскадными зажиганиями и образованием катодных пятен, что приводит к потере работоспособности коммутатора.

Дальнейшие исследования макета проводились при конструкции сетки с коническими отверстиями, ширина которых со стороны катода в два раза больше, чем со стороны анода. Меньший диаметр отверстия со стороны анода задаёт величину прерываемого тока и обеспечивает высоковольтность прибора.

Увеличение диаметра со стороны катода приводит к уменьшению падения напряжения перед сужением и в сужении, что способствует уменьшению температуры сетки, уменьшению вероятности образования катодных пятен и сдвигает область повторных зажигания в сторону больших токов. Данная конструкция позволила в два раза повысить временную стабильность обрыва тока до 0,5 кА при генерации импульсов напряжения до 60 кВ. Длительность нарастания переднего фронта импульса составляет порядка 250 нс.

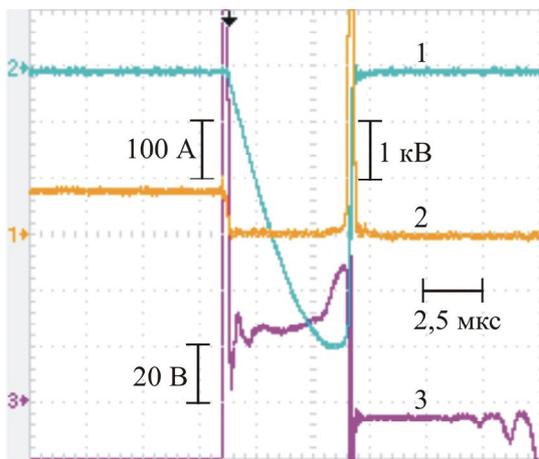


Рисунок 12 – Осциллограммы тока через коммутатор (1), напряжения на аноде (2) и напряжения на сетке (3)

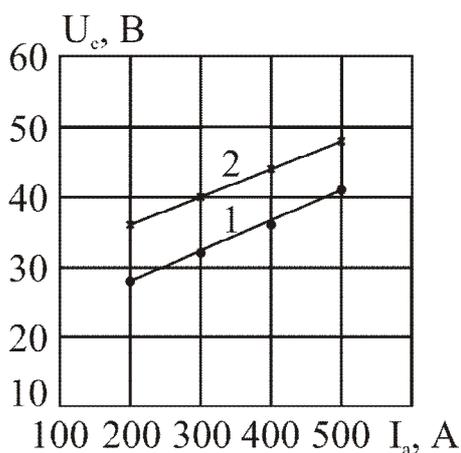


Рисунок 13 – Зависимость напряжения на управляющей сетке от амплитуды обрываемого тока при различном давлении водорода (1 – 0,08 мм рт. ст., 2 – 0,09 мм рт. ст.)

В ходе проведения исследований было обнаружено, что перед обрывом тока возрастает падение напряжения на разрядном промежутке. В случае отсутствия обрыва изменение амплитуды тока и давления водорода в приборе не приводит к изменению напряжения на сетке. Скачок потенциала на сетке перед обрывом тока свидетельствует о возрастании напряжения на двойном слое зарядов перед сужением (рисунок 12).

Установлено, что увеличение амплитуды прерываемого тока на 100 А приводит к росту приращения напряжения на управляющем электроде на 4 В (рисунок 13), что свидетельствует о соответственном увеличении разности потенциалов на двойном слое зарядов.

В пятой главе приведены рекомендации по разработке специализированных газоразрядных прерывателей тока и устройств на их основе.

Предложена конструкция управляющего электрода с коническими отверстиями, ширина которых со стороны катода больше, чем со стороны анода.

Разработанная конструкция в два раза повышает временную стабильность процесса обрыва тока.

Разработана методика расчета генератора высоковольтных импульсов минимально возможной длительности. Получено соотношение для расчета накопительной индуктивности в зависимости от сопротивления нагрузки, времени выключения, амплитуды прерываемого тока и напряжения на аноде коммутатора:

$$\frac{U_m}{3I_m} t_k \leq L_n \leq R_n t_k, \quad (8)$$

где  $U_m$ ,  $I_m$  – амплитуды напряжения и тока в коммутаторе,  $t_k$  – время выключения прибора,  $R_n$  – сопротивление нагрузки.

При выполнении предложенного условия длительность импульса напряжения на нагрузке будет определяться длительностью этапа выключения коммутатора.

Разработаны рекомендации по увеличению стабильности параметров генератора высоковольтных импульсов на основе индуктивного накопителя энергии в зависимости от температурного режима работы газоразрядного прерывателя тока.

В заключении сделаны основные выводы по результатам проведенной работы.

В приложении представлены акты о практическом использовании результатов диссертационной работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментально определено, что при обрыве тока односекционным газоразрядным коммутатором в генераторе наносекундных импульсов мегаваттной мощности динамика процессов определяется величиной максимального напряжения на аноде. Получены математические соотношения с погрешностью не более 5 %, характеризующие спад тока и рост напряжения, позволяющие на этапе разработки генераторов определять форму импульса на нагрузке в зависимости от заданной амплитуды напряжения и тока:

$$i_k(t) = I_m (1 - \sin(t\pi/2t_k)), \quad u_a(t) = U_m \sin(t\pi/2t_k) \quad \text{при } U_m \leq 23 \text{ кВ},$$

$$i_k(t) = I_m (1 - t/t_k), \quad u_a(t) = U_m t/t_k \quad \text{при } 23 \text{ кВ} < U_m \leq 45 \text{ кВ},$$

$$i_{\kappa}(t) = I_m \left( 1 - \frac{t}{t_{\kappa}} e^{t/t_{\kappa} - 1} \right), u_a(t) = U_m \frac{t}{t_{\kappa}} e^{t/t_{\kappa} - 1} \text{ при } 45 \text{ кВ} < U_m \leq 90 \text{ кВ},$$

где  $I_m$  – амплитуда тока анода,  $U_m$  – амплитуда напряжения на нагрузке,  $t_{\kappa}$  – время коммутации.

2. Исследованы энергетические характеристики процесса прерывания тока газоразрядным коммутатором в генераторе мощных наносекундных импульсов с индуктивным накопителем энергии. С использованием предложенных аналитических соотношений получены выражения, позволяющие оценивать энергию, выделяющуюся в коммутаторе, при известных значениях величины обрываемого тока и амплитуды напряжения на аноде:

$$W_n = C_n U_m I_m t_{\kappa}, C_1 = 0,136; C_2 = 0,167; C_3 = 0,152.$$

Достоверность результатов расчета по полученным формулам подтверждена хорошим (не менее 95 %) совпадением с экспериментальными данными.

3. Экспериментально установлено, что увеличение амплитуды напряжения на нагрузке в диапазоне 10 – 70 кВ приводит к уменьшению времени выключения газоразрядного коммутатора с 200 нс до 150 нс. Причиной данного эффекта является, увеличение напряженности поля в пространстве сетка – анод и в области между дисками сетки, которое ускоряет распад плазмы. Увеличение амплитуды обрываемого тока в диапазоне 0,1 – 0,4 кА приводит к росту времени выключения с 155 нс до 200 нс, что обусловлено увеличением концентрации зарядов в коммутаторе.

4. Получены тепловизионные изображения газоразрядного коммутатора в рабочем режиме в схеме с индуктивным накопителем при амплитуде напряжения 60 кВ, тока – 0,4 кА, длительности переднего фронта импульса около 250 нс и частоте следования импульсов 10 – 100 Гц (средняя мощность, потребляемая от источника питания 200 – 500 Вт). Показано, что тепловой режим устанавливается через 20 – 25 минут, при этом температура сетки повышается до 240 – 300 °С. Длительность протекания тока через прерыватель увеличивается, что приводит к изменению его величины в момент обрыва и параметров генерируемых импульсов.

5. Разработан и изготовлен разборный макет газоразрядного коммутатора тока с холодным катодом.

6. Для газоразрядных прерывателей тока разработана конструкция сетки с коническими отверстиями, ширина которых со стороны катода в два раза больше, чем со стороны анода. Конструкция в два раза повышает временную стабильность обрыва тока газоразрядным коммутатором в схеме с индуктивным накопителем энергии. При данной конструкции коммутатор с холодным катодом обеспечивал устойчивый обрыв тока до 0,5 кА и генерацию импульсов напряжения до 60 кВ при длительности нарастания напряжения около 250 нс. Подана заявка на получение патента РФ.

7. Экспериментально установлено, что в случае выполнения сетки с двумя экранирующими диафрагмами газоразрядный коммутатор с холодным катодом не обеспечивает прерывание тока в результате перехода тлеющего разряда в дуговой с последующими каскадными зажиганиями.

8. Экспериментально определено, что перед обрывом тока возрастает напряжение на сетке, что свидетельствует об увеличении разности потенциалов на двойном слое зарядов перед сужением разрядного канала. Приращение напряжения увеличивается на 4 В с ростом амплитуды прерываемого тока на 100 А.

#### ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ СЛЕДУЮЩИЕ РАБОТЫ:

1. Серезин А.А., Круглов С.А., Верещагин Н.М. Влияние напряжения анода и тока анода на время выключения тиратрона в схеме индуктивного накопителя энергии// Электроника: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань. – 2009.
2. Серезин А.А., Круглов С.А., Верещагин Н.М. 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. – Pp. 278-280.

3. Серезин А.А., Круглов С.А., Верещагин Н.М. Исследование сопротивления распадающейся плазмы в тиратроне, включенном в схеме с индуктивным накопителем энергии// Вестник РГРТУ. – Рязань. – 2010. – Вып. 33. – С. 107-110.
4. Серезин А.А., Круглов С.А., Верещагин Н.М., Майсурадзе А.И. Оценка энергии потерь на выключение тиратрона, включенного в схеме индуктивного накопителя энергии// Электроника: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань. – 2010. – С. 18 – 24.
5. Серезин А.А., Круглов С.А., Верещагин Н.М., 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.
6. Серезин А.А., Круглов С.А., Верещагин Н.М. Исследование распределения температуры по поверхности газоразрядного коммутатора тока, включенного в схеме индуктивного накопителя энергии// Современные вопросы науки XXI век: междунар. науч.-практ. конф. Россия. – Тамбов. – 2011.
7. Серезин А.А., Круглов С.А., Верещагин Н.М., Москвин А.В., Абабков А.В. Научно-технический отчет о выполнении Государственного контракта № П2523 от 20 ноября 2009 г. Рег. № 01201051743, инв. №02201051921. – Рязань. – 2011.
8. Серезин А.А., Круглов С.А., Верещагин Н.М. Заявка № 2011137621 от 13.09.2011 о выдаче патента на изобретение «Газоразрядный коммутирующий прибор».

Серезин Андрей Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРЫВА ТОКА В ДИАФРАГМИРОВАННОЙ  
ПЛАЗМЕ ГАЗОРАЗРЯДНОГО КОММУТАТОРА В СХЕМЕ  
ИНДУКТИВНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 21.02.2012. Формат бумаги 60 × 84 1/16.

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

Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ