УДК 621.317.75:519.2

Н.М. Верещагин, С.А. Круглов, А.А. Сережин, С.Г. Шатилов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧЕГО РЕЖИМА ГАЗОРАЗРЯДНОГО ПРЕРЫВАТЕЛЯ ТОКА В ГЕНЕРАТОРЕ С ИНДУКТИВНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

Проведено экспериментальное исследование рабочих режимов тиратрона ТГИ2-500/20 в схеме с индуктивным накопителем энергии. Определено влияние условий работы и параметров схемы на время выключения прибора. Установлено, что время обрыва тока и выключения уменьшается с ростом импульсного напряжения на аноде и напряжения источника питания генератора, но увеличивается с ростом давления. Увеличение тока обрыва дуги и индуктивности накопителя увеличивает время выключения. Показано, что тиратрон стабильно обрывает ток при давлении от 30 до 60 Па. Максимальный ток обрыва дуги в тиратроне равен 1 кА, максимальное значение напряжения на нагрузке – 83 кВ, минимальное время выключения – 170 нс.

Ключевые слова: *тиратрон, индуктивный накопитель энергии, режимы работы тиратрона, время обрыва, время выключения, ток обрыва, импульсное напряжение на аноде.*

Введение. Современная мощная наносекундная импульсная техника имеет две основные тенденции развития. Одна из них заключается в проведении различных исследовательских программ в таких областях, как ускорительная техника, лазерная техника, мощная СВЧ-электроника, управляемый термоядерный синтез [1]. Здесь основные усилия сосредоточены на получении рекордно высоких параметров по выходной мощности, что важно для разработки и создания импульсных источников энергии с максимально высокими величинами напряжения и тока.

Другая тенденция, получившая наиболее интенсивное развитие в последние 10 – 15 лет, связана с технологическим применением мощных наносекундных импульсов.

Разрабатываются новые перспективные технологии для решения экологических задач по очистке выбросов электрических и тепловых станций, удалению токсичных примесей из воздуха. Исследуется коронный разряд в воздухе атмосферного давления [2-4]. Проводятся исследования оптического и рентгеновского излучения из импульсного коронного разряда в воздухе атмосферного давления при различных параметрах импульса напряжения, и предложен механизм предионизации промежутка при формировании коронного разряда в неоднородном электрическом поле. Изучаются параметры импульсов рентгеновского излучения при переходе от диффузного к коронному разряду, моделирование нестационарного процесса развития коронного разряда атмосферного давления при подаче высоковольтного наносекундного импульса.

Разрабатываются технологии обработки отходов медицины и вредных производств, очистки питьевой воды, стерилизации различной продукции, в том числе и продуктов питания. Импульсное электрическое поле используется для сохранения качества продуктов и увеличения срока хранения. Генератор мощных импульсов является неотъемлемой частью этой системы.

Проектируются промышленные комплексы для обогащения руд редкоземельных металлов. Мощные наносекундные импульсы применяются в процессах дезинтеграции минеральных комплексов. Наносекундные импульсные воздействия обеспечивают высокую эффективность и селективность дезинтеграции минеральных комплексов при существенном снижении расхода электроэнергии, что обусловливает перспективность их применения для обработки упорных руд благородных металлов и продуктов их обогащения в сверхсильных электрических полях с целью вскрытия микро- и наночастиц благородных металлов и повышения их извлечения в процессах обогащения и гидрометаллургии. Новая технология позволит вовлечь в переработку огромные запасы техногенного сырья и забалансовых руд благородных металлов.

Таким образом, потребность в эффективных генераторах высоковольтных импульсов неуклонно растет наряду с требованиями к их характеристикам, что обусловливает необходимость более глубокого и детального исследования существующих в данной области технологий.

Целью работы является определение рабочих режимов газоразрядного прерывателя тока в схеме генератора на основе индуктивного накопителя энергии, обеспечивающих увеличение эффективности генерации мощных импульсов.

Экспериментальная установка

В работах [5, 6] приведены схема и принцип работы генератора высоковольтных импульсов с индуктивным накопителем энергии и газоразрядными прерывателями тока (рисунок 1). Основным элементом генератора является газоразрядный прерыватель тока, в качестве которого используется тиратрон ТГИ2-500/20. При проведении экспериментов варьировались следующие параметры: накопительная индуктивность L (7,5, 25, 80 и 125 мкГн), сопротивление нагрузки Rн (24, 45, 90 и 155 Ом), напряжение накала генератора водорода (от 3,5 до 4,5 В) и напряжение источника питания генератора U_0 (до 7 кВ). Температура в приборе, напряжение накала катода, частота и амплитуда управляющих импульсов поддерживались неизменными. Емкость конденсатора C равнялась 2 мкФ.

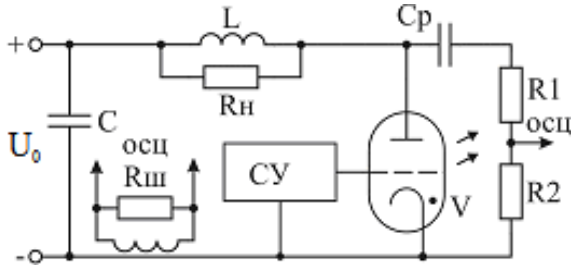


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки: U_0 – напряжение источника питания генератора; С – входной конденсатор; L – индуктивность накопителя энергии; Rн – сопротивление нагрузки; СУ – схема управления; Ср – разделительный конденсатор; R1, R2 – делитель напряжения

Температура фланца сетки прибора контролировалась с помощью тепловизора *SDS HOTFIND DXS* и поддерживалась на уровне 160 °С, напряжение накала катода – 6,3 В, амплитуда управляющих импульсов от блока СУ – 800 В, частота импульсов – 10 Гц. Ток через прибор регулировался изменением напряжения питания и измерялся с помощью пояса Роговского. Напряжение на аноде измерялось с помощью делителя $R1$, $R2$, подключенного через разделительный конденсатор Cр, осциллографом *Tektronix TDS-2022*.

Теоретическая часть. Обрыв дуги возникает в газонаполненных промежутках низкого давления с переменным сечением по длине разряда.

Переход от широкого к узкому сечению в разряде сопровождается «уплотнением» плазмы. Непосредственно перед сужением формируется плазменный «полушар», охватываемый так называемым «двойным слоем зарядов». Слой представляет собой пространство с повышенной напряженностью электрического поля, ускоряющей электроны в направлении анода. В двойном слое, благодаря его выпуклой сферической форме, происходит «втягивание» электронов из широкого пространства с низкой плотностью плазмы в отверстие [7].

В результате стягивания электронов увеличивается плотность электронного тока в узком сечении. «Анодом» для «втянутых» электронов служит выступающий в отверстие диафрагмы «плазменный полушар». За двойным слоем имеет место почти полная взаимная компенсация зарядов, которая обеспечивается повышенной ионизационной способностью электронов, получивших в двойном слое добавочную энергию. Поэтому пространство за двойным слоем имеет высокую проводимость, низкую напряженность поля, а поверхность «плазменного полушара» имеет потенциал, близкий к анодному.

Если в силу каких-либо причин компенсация зарядов перед диафрагмой нарушается, то существование плазменного анода у входа в сужение, а вместе с ним и выпуклого двойного слоя, становится невозможным. В условиях неполной компенсации зарядов картина поля перед диафрагмой определяется краевыми эффектами стенок сужения. Эти эффекты в совокупности с уменьшением проводимости пространства препятствуют втягиванию электронов из катодной области промежутка в сужение и приводят к ограничению (или прекращению) разрядного тока. Поддержание прежнего тока за счет увеличения потенциала анода не может быть обеспечено, если при этом не будет достигнута полная компенсация зарядов перед сужением.

Причинами снижения концентрации атомов газа в устье сужения диафрагмированного промежутка могут быть высокая направленность движения электронов и ионов в двойном слое зарядов и связанное с этим выталкивание (откачка) газа из сужения. Когда в диафрагмированном промежутке протекает постоянный ток,

условием обрыва дуги является достижение такой величины тока, при которой концентрация молекул в сужении уменьшается ниже критического значения.

Характерные осциллограммы напряжения и тока при обрыве тока дуги (рисунок 2) объясняются следующим образом. При подаче импульса управления на сетку ток через тиратрон увеличивается. Зарядный контур включает емкость C и накопительную индуктивность L, что обусловливает изменение тока по синусоидальному закону (формула 1) в течение времени, меньшего половины периода синусоиды (кривая 1 на рисунках 2, а и 2, б). Причем в зависимости от комбинации величин давления, накопительной индуктивности и напряжения источника питания генератора обрыв тока может происходить как во второй четверти синусоиды (рисунок 2, а), так и в первой четверти синусоиды (рисунок 2, б).

$$i = U_0 / \rho \cdot \sin(2\pi t / T), \qquad (1)$$

где период T определяется по формуле:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}\ . \qquad (2)$$

Амплитуда тока равна:

$$I_{\max} = \frac{U_0}{\rho}, \qquad (3)$$

где ρ – характеристическое сопротивление зарядного контура:

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}\ . \qquad (4)$$

После обрыва дуги, за время выключения, ток через тиратрон спадает до нуля, а ток через индуктивность замыкается через сопротивление нагрузки, на котором возникает высокое (до 90 кВ) напряжение. Ток и напряжение индуктивности экспоненциально убывают с постоянной времени $\tau = L/R_н$. Длительность выходного высоковольтного импульса (на уровне 0,5) приблизительно равна $0{,}5t_{выкл}+\tau$ (кривые 2 на рисунке 2, а, 2, б и 2, в). Причем при больших сопротивлениях нагрузки длительность импульса определяется передним фронтом импульса, а при маленьких сопротивлениях нагрузки – задним фронтом.

Время с момента открытия прибора до начала обрыва – время обрыва, а время с начала обрыва тока до полного выключения – время выключения, измеряемое между уровнями 0,1 и 0,9.

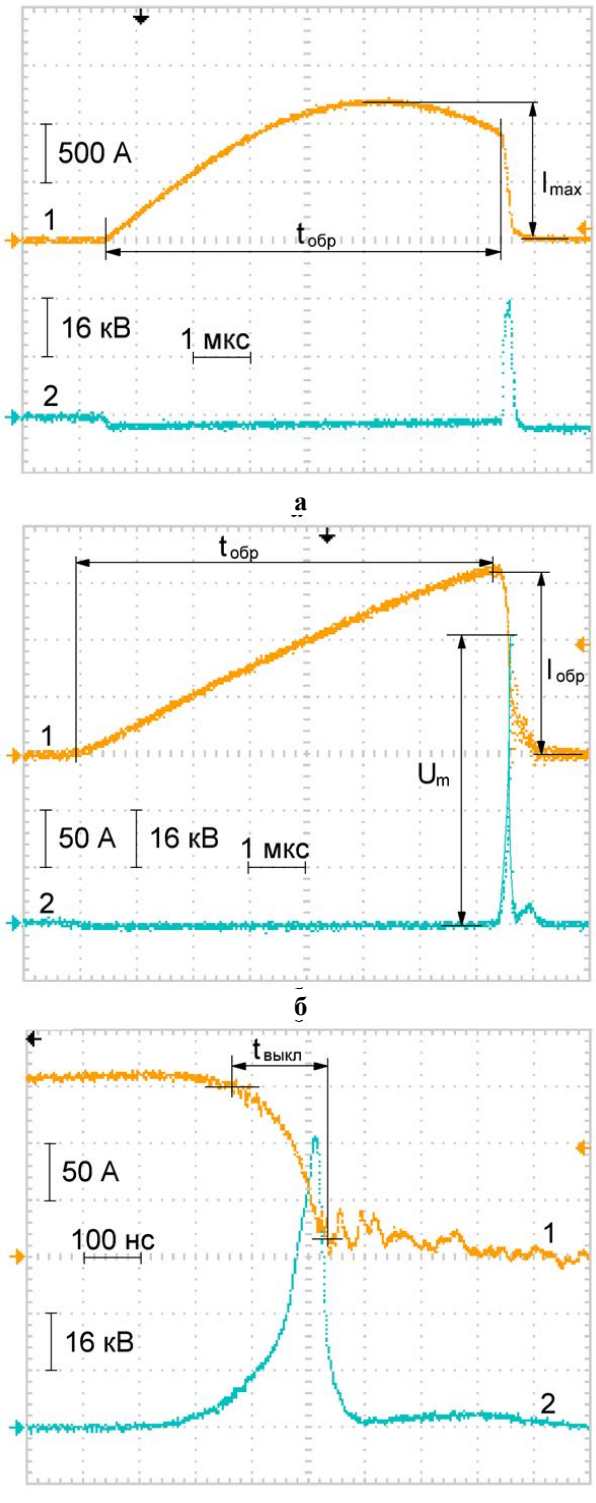


Рисунок 2 – Осциллограммы тока через прибор (1) и напряжения на аноде (2) при скорости развертки 1 мкс/дел (а, б) и 100 нс/дел (в), индуктивности накопителя энергии 7,5 мкГн (а) и 25 мкГн (б, в), давлении 40 Па (а) и 30 Па (б, в); tобр – время обрыва тока дуги; $t_{выкл}$ – время выключения; $I_{обр}$ – ток обрыва дуги; I_{max} – максимальный ток; U_m – амплитуда импульса

Экспериментальная часть

В ходе экспериментов исследованы зависимости времени обрыва дуги и тока обрыва от

напряжения накала водородного генератора в диапазоне (3,5 – 4,5 В), соответствующем интервалу давлений водорода в тиратроне (30 – 56,5 Па). При напряжении меньше 3,5 В тиратрон не открывался, а при напряжении больше 4,5 В начинались повторные зажигания разряда.

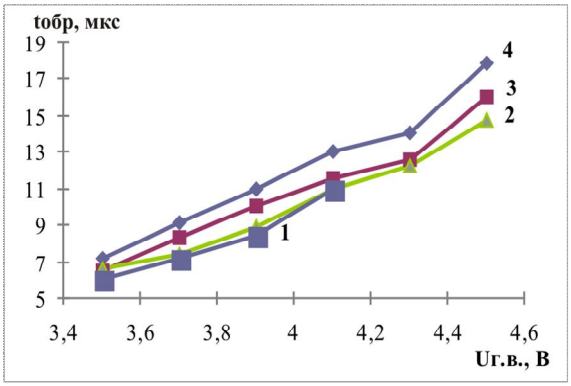


Рисунок 3 – Зависимости времени обрыва от напряжения накала генератора водорода при напряжении источника питания: 2000 В (1), 1500 В (2), 1000 В (3), 500 В (4)

Зависимости снимались при различных значениях напряжения источника питания генератора. Графики представлены на рисунках 3 и 4 для индуктивности накопителя 25 мкГн и сопротивления нагрузки 90 Ом.

Эксперименты показали, что время обрыва существенно (от 6 мкс до 18 мкс) увеличивается с ростом давления в указанном диапазоне (рисунок 3). От напряжения источника питания время обрыва зависит сравнительно слабо: увеличение напряжения источника питания от 500 В до 2 кВ уменьшает время обрыва на 10 – 20%.

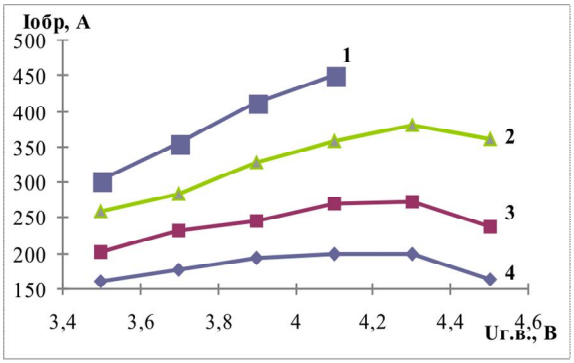


Рисунок 4 – Зависимости тока обрыва от давления при напряжении источника питания: 2000 В (1), 1500 В (2), 1000 В (3), 500 В (4)

Ток обрыва с ростом давления газа, напротив, увеличивается слабо, но существенно (в 2 раза) повышается с увеличением напряжения источника питания генератора (рисунок 4).

На рисунке 4 видно, как ток обрыва при увеличении давления сначала растет, а затем, перейдя через максимум, начинает падать. При этом большему напряжению источника питания соответствует больший ток, поскольку скорость роста тока в цепи с индуктивностью увеличивается с ростом напряжения:

$$\frac{di}{dt} = U_0 / L . \qquad (5)$$

Время обрыва дуги при этом уменьшается (рисунок 3), а в течение его через сеточные отверстия должен пройти определенный заряд Q [5], определяемый по формуле (6).

$$Q = CU_0(1 - \cos(2\pi t / T)) . \qquad (6)$$

На рисунке 5 представлены зависимости предельного тока обрыва от времени обрыва при сопротивлениях нагрузки 95 Ом и 155 Ом. Индуктивность накопителя – 25 мкГн. Из рисунка видно, что с увеличением времени обрыва предельный обрываемый ток снижается. Можно предполагать, что с физической точки зрения данные зависимости обусловлены следующим процессом. При протекании тока через тиратрон происходит локальный перегрев краев отверстий сетки, что приводит к возрастанию термоэлектронной эмиссии с поверхности сетки в этих областях. С увеличением времени обрыва температура «разогретых» областей сетки увеличивается, растет эмиссионная способность сетки, что облегчает зажигание повторных разрядов и снижает предельный обрываемый ток.

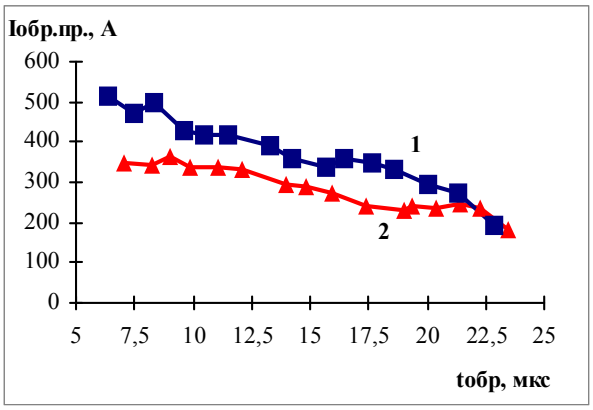


Рисунок 5 – Зависимости предельного тока обрыва от времени обрыва дуги при сопротивлении нагрузки: 95 Ом (1), 155 Ом (2)

От отношения сопротивления нагрузки и сопротивления плазмы в приборе в каждый момент времени в течение процесса выключения зависит соотношение энергий, выделяющихся в нагрузке и в коммутаторе в виде тепловых коммутационных потерь [8]. При большем сопротивлении нагрузки коммутационные потери возрастают, вызывая более сильный локальный нагрев краев отверстий сетки, что также ведет к уменьшению предельного обрываемого тока.

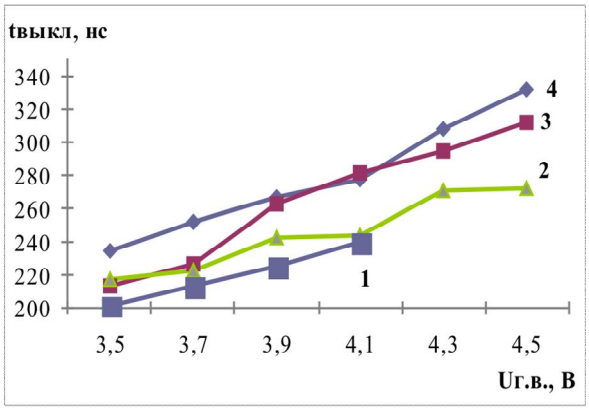


Рисунок 6 – Зависимости времени выключения от напряжения накала генератора водорода при напряжении источника питания: 2000 В (1), 1500 В (2), 1000 В (3), 500 В (4)

Кривые на рисунке 6 показывают монотонный рост времени выключения при росте давления и соответственно концентрации водорода. Предположительно это связано с увеличением концентрации зарядов в остаточной плазме. Помимо этого, растет и время обрыва дуги. Следует отметить, что падение тока обрыва после перехода через максимум не вызывает падения времени выключения, значит, влияние давления и времени обрыва на время выключения в данном случае гораздо сильнее.

Из рисунка 6 также следует, что увеличение напряжения питания при неизменном давлении ведет к заметному уменьшению времени выключения, несмотря на выросший при этом ток обрыва. Причиной является рост амплитуды импульса напряжения на аноде, что способствует уменьшению времени распада остаточной плазмы. При этом влияние роста амплитуды импульса напряжения больше, чем влияние роста тока обрыва, поскольку время выключения уменьшается. Заметим, что изменение сопротивления нагрузки изменит коэффициент пропорциональности между напряжением и током, а значит, при меньшей нагрузке влияние тока может быть больше влияния амплитуды импульса напряжения. Доказательство данного предположения требует дополнительных экспериментов.

Рассмотрим экспериментальные кривые зависимостей времени выключения от тока обрыва при различных амплитудах импульса на аноде (рисунок 7). Они получены при накопительной индуктивности 80 мкГн, напряжении накала генератора водорода 4 В (соответствует давлению 40 Па) (рисунок 7). Изменение тока обрыва при постоянной амплитуде импульса достигалось изменением сопротивления нагрузки. При неизменной амплитуде импульса на аноде с увеличением тока обрыва растет время выключения. При большем токе в анодной и катодной областях накапливается больше зарядов, увеличивается время распада плазмы, что приводит к более длительному выключению.

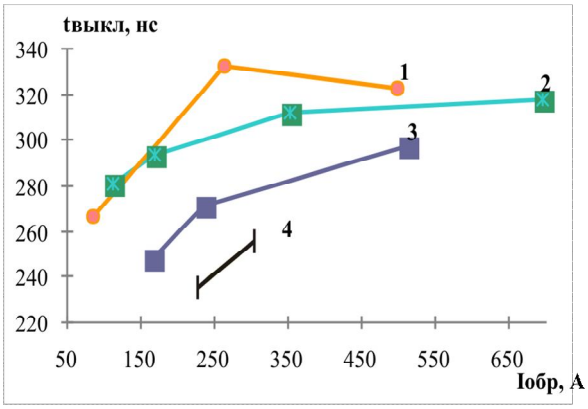


Рисунок 7 – Зависимости времени выключения от тока обрыва дуги при индуктивности накопителя 80 мкГн и амплитуде импульса: 12 кВ (1), 16 кВ (2), 24 кВ (3), 32 кВ (4)

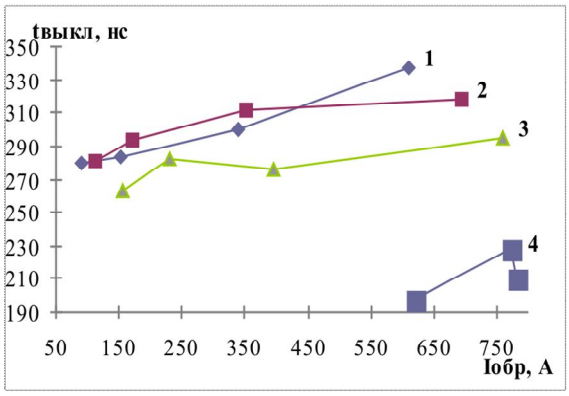


Рисунок 8 – Зависимости времени выключения от тока обрыва дуги при импульсном напряжении 16 кВ и накопительной индуктивности: 125 мкГн (1), 80 мкГн (2), 25 мкГн (3) 7,5 мкГн (4)

Из рисунка 7 также следует, что увеличение амплитуды импульса напряжения уменьшает время выключения, поскольку ускоряется распад плазмы.

На рисунке 8 показано, что время выключения увеличивается с ростом обрываемого тока при неизменной амплитуде импульса напряжения на аноде и различных величинах накопительной индуктивности. Согласно формулам (2), (3) и (4) при увеличении индуктивности уменьшается амплитуда тока *Imax*, кривая нарастания тока становится более пологой. При постоянном давлении это приводит к увеличению времени обрыва. Увеличение времени обрыва приводит к росту концентрации зарядов в остаточной плазме и увеличению времени выключения.

В ходе экспериментов были определены

предельные режимы работы, при которых ток обрыва и амплитуда импульса напряжения на аноде достигают максимально возможных значений при нестабильности амплитуды импульса не более 10 %. Предельное значение тока обрыва было получено при накопительной индуктивности 7,5 мкГн, сопротивлении нагрузки 270 Ом в диапазоне давлений 30 – 40 Па. Максимальный ток обрыва при этом был равен 1 кА, амплитуда импульсов – 40 кВ, напряжение источника питания – 1,6 кВ, время выключения – 200 нс, длительность импульсов (на уровне 0,5) – около 170 нс. Предельное значение амплитуды импульса напряжения на нагрузке было получено при накопительной индуктивности 25 мкГн, сопротивлении нагрузки 1,2 кОм и давлении 30 Па. Максимальная амплитуда импульса при этом была равна 83 кВ, ток обрыва – 160 А, напряжение источника питания – 1 кВ, время выключения – 170 нс, длительность импульсов (на уровне 0,5) – около 60 нс.

Заключение. В ходе исследований для тиратрона ТГИ2-500/20 были получены зависимости времени обрыва и тока обрыва дуги от давления и напряжения источника питания, времени выключения от давления, тока обрыва, амплитуды импульса, напряжения источника питания и индуктивности накопителя. Также получена зависимость предельного обрываемого тока от времени обрыва при различных сопротивлениях нагрузки.

Установлено, что время выключения растет с увеличением давления, тока обрыва и индуктивности накопителя и уменьшается при увеличении амплитуды импульса и напряжения источника питания. Время обрыва тока увеличивается с ростом давления и уменьшается при увеличении напряжения источника питания. Ток обрыва дуги, напротив, растет с увеличением напряжения источника питания. Рост давления приводит к увеличению тока обрыва в первой четверти периода синусоиды и к уменьшению во второй четверти.

На основе анализа зависимостей определены диапазоны давления, тока обрыва дуги и амплитуды импульса, при которых тиратрон ТГИ2-500/20 способен надежно обрывать ток с высокой стабильностью. Определены максимально возможные значения тока обрыва дуги и амплитуды импульса, а также минимальное время выключения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания № 2014/178.

Библиографический список

1. *Месяц Г.А.* Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Сов. радио, 1974. 256 с.

2. *Токарев А.В.* Коронный разряд и его применение. Бишкек: КРСУ, 2009 138 с.

3. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2009. 736 с.

4. *Рыбка Д.В., Андроников И.В., Евтушенко Г.С., Козырев А.В., Кожевников В.Ю., Костыря И.Д.* Коронный разряд в воздухе атмосферного давления при модулированном импульсе напряжения длительностью 10 мс // Оптика атмосферы и океана. 26. № 1 (2013).

5. *Верещагин Н.М., Круглов С.А.* Генератор высоковольтных импульсов с индуктивным накопителем энергии и тиратроном // Приборы и техника эксперимента. 2002. № 2. С. 82-85.

6. *Верещагин Н.М., Круглов С.А., Павлов М.Б., Сережин А.А., Шатилов С.Г.* Исследование теплового режима газоразрядного прерывателя тока в схеме с индуктивным накопителем энергии // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 4-2 (46). С. 100-102.

7. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. М.: Наука, 1971. 543 с.

8. *Верещагин Н.М., Круглов С.А., Сережин А.А., Майсурадзе А.И.* Энергетические характеристики процесса прерывания тока газоразрядным коммутатором в генераторе мощных наносекундных импульсов с индуктивным накопителем энергии // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2011. № 35. С. 98-102.