УДК 615.472.03.615.847.8

АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ С УЧЕТОМ ПОТЕРЬ В ГАЗОРАЗРЯДНОМ КОММУТАТОРЕ ТОКА С СЕКТОРАЛЬНЫМ ОТВЕРСТИЕМ В ЭКРАНЕ

С. А. Круглов, д.т.н., заведующий кафедрой ПЭЛ РГРТУ, Рязань, Россия; orcid.org/0000-0001-5992-7319, e-mail: pel.rgrtu@yandex.ru A. А. Сережин, к.т.н., доцент кафедры ПЭЛ РГРТУ, Рязань, Россия; orcid.org/0000-0001-8134-8970, e-mail: andrei-serezhin@yandex.ru Д. С. Кусакин, к.ф.-м.н., доцент кафедры ЭП РГРТУ, Рязань, Россия; orcid.org/0000-0002-1596-2136, e-mail: kusakinds@yandex.ru К. Д. Агальцов, старший преподаватель кафедры ПЭЛ РГРТУ, Рязань, Россия; orcid.org/0000-0001-6475-9364, e-mail: agaltsov.k.d@list.ru

Работа посвящена исследованию энергетических потерь при протекании тока на стадии проводимости и коммутации в газоразрядном коммутаторе тока с экранирующим электродом, имеющим секторальное отверстие, и оценке эффективности работы прибора в схеме генератора высоковольтных импульсов с индуктивным накопителем энергии. Целью работы является исследование энергетических характеристик режима работы газоразрядного коммутатора тока с секторальным отверстием в экране в схеме с индуктивным накопителем энергии.

Ключевые слова: газоразрядные прерыватели тока, плазма низкого давления, эффект самообрыва тока, индуктивный накопитель энергии, критический заряд, энергетические потери газоразрядного коммутатора.

DOI: 10.21667/1995-4565-2022-80-200-205

Введение

Задачи, которые стимулировали создание мощных импульсных генераторов, исторически носили как исследовательский, так и практический характер. Это экстремальные испытания электрической прочности изоляции традиционных энергетических систем (грозозащита, изоляторы линии электропередач), рентгенография быстропротекающих процессов (взрыв, баллистика), неразрушающая дефектоскопия, физика электровзрыва проводников и детонационных процессов, нагрев термоядерной плазмы, радиолокация большой дальности, техника ядернофизического эксперимента и многое другое [1, 2].

В современной электронной технике часто возникает необходимость в формировании импульсов большой мощности. Решать эту задачу можно многими способами. Тем не менее используется метод накопления энергии и разряд накопителя на нагрузку. Таким образом, необходимо выбрать тип накопителя, используемого при построении генератора высоковольтных импульсов. Для передачи энергии от накопителя к нагрузке необходим дополнительный элемент, позволяющий коммутировать накопленную энергию в определенный момент времени. Оптимизация режима работы накопителя, совместно с коммутирующим устройством, на нагрузку является еще одной задачей, с решением которой связано построение генераторов высоковольтных импульсов [3, 4]. Геометрия отверстий сеточного узла в газоразрядном коммутаторе тиратронного типа с секторальным отверстием в экране позволяет исследовать явление обрыва в области отверстия в сеточном электроде, исключая влияние отверстия экранирующего электрода. В данном случае экранирующий электрод позволяет сохранить электропрочность газоразрядного коммутатора на достаточном уровне, однако не вносит искажения в процесс формирования дуги и не препятствует газонатеканию в область отверстия сеточного электрода. Исследование энергетических характеристик данного прибора позволит качественно улучшить методики расчета конфигураций сеточных узлов для следующих приборов.

Исследование энергетических характеристик газоразрядного коммутатора тока с секторальным отверстием в экране

Энергетические характеристики работы коммутатора определяют тепловой режим его работы, срок службы прибора и КПД генератора высоковольтных импульсов. Проведенные ранее исследования показали [5, 6], что процессы самообрыва разряда и распада плазмы в анодно-сеточной области сильно зависят от параметров генерируемых импульсов. Исследования проводились при помощи лабораторного стенда-модулятора с исследуемым газоразрядным коммутатором тока (рисунок 1).



Рисунок 1 – Схема лабораторного стенда-модулятора с исследуемым газоразрядным коммутатором тока. U_0 – напряжение первичного источника питания; R_3 – сопротивление, ограничивающее зарядный ток; С – входной конденсатор; L – индуктивность накопителя энергии; $R_{\rm H}$ – сопротивление нагрузки; CV – схема управления; C_p – разделительный конденсатор; R₁, R₂ – делитель напряжения. Ток через прибор измеряется с помощью пояса Роговского с коэффициентом деления 1:100; импульсное напряжение на аноде измеряется делителем напряжения, включенным через разделительный конденсатор, с коэффициентом деления 1:3200 Figure 1 – Schematic diagram of experimental device. U_0 – stand-alone power supply voltage; R_{ch} – resistance limiting the charging current; C – input capacitor; R₁, R₂ – voltage dividers. The current through the device is measured using Rogowski coil with a division ratio of 1:100; pulse voltage at the anode is measured with a voltage divider, which is connected through a blocking capacitor; with division ratio of 1:3200

Для оценки энергии, выделяющейся в газоразрядных коммутаторах тиратронного типа на стадиях проводимости и выключения при различных параметрах генерируемых импульсов, необходимо определить энергетические характеристики процесса прерывания тока. Зная характер изменения напряжения на нагрузке (оно же напряжение на аноде на стадии выключения $u_L(t)=u_a(t)$), токов через коммутатор $i_k(t)$ и нагрузку $i_L(t)$ на стадии выключения, можно получить аналитические соотношения, которые описывают энергетические характеристики работы прибора на различные типы нагрузки. Как было отмечено в предыдущей работе [4] газоразрядный коммутатор с секторальным отверстием в экране отличается от остальных подобных газоразрядных прерывателей с улучшенными параметрами разряда большим соотношением между площадью отверстия в сеточном электроде и экранирующим в сторону последнего (рисунок 2), что обусловливает его предельные электрические параметры: максимальное значение анодного напряжения $U_m = 50$ кВ, и предельным значением тока обрыва $I_m = 450$ А. КПД передачи запасенной энергии индуктивного накопителя в нагрузку определяется соотношением, энергий, выделяющихся в коммутаторе на стадии выключения и в нагрузке. Запасаемая в момент самообрыва тока в накопительной индуктивности энергия определяется выражением:

$$W = L I_{\rm obp}^2 / 2, \tag{1}$$

где I_{obp} – величина обрываемого тока в момент процесса коммутации прибора, L – индуктивность накопителя энергии.

Энергия, которая выделяется в приборе во время работы, равна сумме энергий, выделяющихся на стадиях включения, проводимости и выключения. Процесс включения происходит при нулевом токе, напряжение на аноде составляет до 5 кВ, а время включения 2-5 нс, соответственно, в случаях, когда характеристическое сопротивление колебательного контура

 $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ много меньше сопротивления индуктивного накопителя энергии, энергией, выде-

ляющейся на стадии включения, можно пренебречь.



Рисунок 2 – Изометрическое изображение сеточного узла газоразрядного коммутатора тиратронного типа с секторальным отверстием в экране

$Figure \ 2-3D \ view \ of \ a \ grid \ node \ of \ thy ratron-type \ gas-discharge \ switch \ with \ sectoral \ screen \ hole$

Энергия потерь проводимости W_{np} в газоразрядных коммутаторах тиратронного типа определяется функцией изменения протекающего тока, а также напряжением поддержания разряда в приборе (3). За время проводимых экспериментов установлено, что в исследуемом диапазоне давлений среднее значение напряжения поддержания разряда U_{cp} практически не изменяется и составляет порядка 130 В. Тогда:

$$W_{\rm np} = CU_{\rm cp} \cdot E_{\rm n} (1 - \cos \omega t_{\rm obp}) = U_{\rm cp} Q_{\rm kp}, \qquad (3)$$

где $Q_{\rm kp}$ – критический заряд, конструктивный параметр газоразрядного коммутатора, определяющий количество заряда переносимого через отверстие сеточного узла за временной интервал от 0 до момента начала обрыва тока $t_{\rm oбp}$.

Энергия, выделяющаяся в газоразрядных коммутаторах тиратронного типа на стадии выключения (энергия потерь на коммутацию) $W_{\text{ком}}$, определяется формой тока через коммутатор $i_a(t)$ и напряжением на его аноде $u_a(t)$ на стадии выключения (4):

$$W_{\rm KOM} = \int_{0}^{t_{\rm BMRT}} u_{\rm a}(t) i_{\rm a}(t) dt .$$
 (4)

В исследуемом приборе наибольшее приближение к реальным осциллограммам имеют аппроксимирующие функции вида $x \cdot e^{x-1}$ [6] (5):

$$u_{\rm a}(t) = U_{\rm m} \frac{t}{t_{\rm bulk JI}} \frac{e^{\frac{t}{t_{\rm bulk JI}}}}{e},$$

$$i_{a}(t) = I_{obp} \left(1 - \frac{t}{t_{BbiK\pi}} \frac{e^{\frac{t}{t_{BbiK\pi}}}}{e} \right).$$
(5)

Ток через нагрузку при выбранной аппроксимирующей функции определяется выражением (6):

$$i_{\rm L}(t) = I_{\rm obp} e^{\frac{t}{t_{\rm BMKT}} - 1} \left(A + \frac{t}{t_{\rm BMKT}} - \frac{t}{\tau + t_{\rm BMKT}} \right) - I_{\rm BMKT} A e^{-\frac{t}{\tau} - 1},$$
(6)

где $\frac{\tau t_{\text{выкл}}}{\tau^2 + 2\tau t_{\text{выкл}} + t_{\text{выкл}}^2} = A$.

Энергия потерь на выключение будет определяться как:

$$W_{\rm KOM} = U_{\rm m} I_{\rm obp} t_{\rm BLIKT} \left(\frac{1}{e} + \frac{1}{4e^2} - \frac{1}{4}\right) = 0,152 U_{\rm m} I_{\rm obp} t_{\rm BLIKT} \,. \tag{7}$$

График зависимости приведенной энергии потерь на выключение от соотношения постоянной времени электрической цепи к времени выключения представлена на рисунке 3 для t = L/R:



Рисунок 3 – Зависимость приведенной энергии потерь на выключение $\Delta W_{\text{ком}}$ от соотношения постоянной времени электрической цепи к времени выключения Figure 3 – Dependence of reduced energy losses for switch off ΔW on the ratio of time constant of electric circuit to switch off time

Функция изменения напряжения на нагрузке на стадии выключения исследуемого прибора, рассчитанная с учетом аппроксимации тока коммутатора $x \cdot e^{x-1}$, имеет вид:

$$u_{\rm L}(t) = I_{\rm obp} R e^{\frac{t}{t_{\rm BMRT}} - 1} \left(A + \frac{t}{t_{\rm BHRT}} - \frac{t}{\tau + t_{\rm BHRT}} \right) - I_{\rm obp} R A e^{-\frac{t}{\tau} - 1}.$$
(9)

Для определения КПД необходимо знать энергию, выделившуюся в нагрузке. Она состоит из двух частей. Это энергия, выделяющаяся в нагрузке на стадии выключения прибора $W_{\rm H}$, и энергия, выделяющаяся в нагрузке за счет разряда накопительной индуктивности после выключения $W_{\rm H}$, (рисунок 4), при этом кпд определяется как:

$$\eta = \frac{W - W_{_{\rm KOM}}}{W},\tag{10}$$

Энергия, выделяющаяся в активной нагрузке на стадии выключения газоразрядного коммутатора тока, определяется формой и амплитудой импульса напряжения на аноде коммутатора, для исследуемого газоразрядного коммутатора:

(12)

$$W_{\rm H} = \frac{U_m^2}{2e^2 t_{\rm BMKT} R_l} \left(\frac{t_{\rm BMKT}^2}{2} e^2 - \frac{t_{\rm BMKT}^2}{2} \right) = \frac{U_m^2 t_{\rm BMKT}}{4R} \left(1 - 1/e^2 \right), \tag{11}$$

Энергия, выделяющаяся в нагрузке за счет разряда накопительной индуктивности после выключения коммутатора рассчитывается как:



Рисунок 4 – Зависимость коэффициента полезного действия η от постоянной времени электрической цепи t Figure 4 – Dependence of efficiency η on time constant t of electric circuit

Заключение

Энергия потерь на проводимость в газоразрядном коммутаторе тока, включенном в схеме генератора высоковольтных импульсов с индуктивным накопителем энергии, прямо пропорциональна величине критического заряда. С использованием предложенных аналитических соотношений получены выражения, позволяющие оценивать энергию, выделяющуюся в коммутаторе на стадии выключения, при известных значениях величины обрываемого тока и амплитуды импульса напряжения на аноде. При функционировании газоразрядного коммутатора в генераторе высоковольтных импульсов с индуктивным накопителем энергии, работающим на активную нагрузку при малых значениях амплитуды генерируемых импульсов энергия потерь на проводимость значительно больше энергии потерь на выключение. С ростом напряжения их соотношение выравнивается, и при $U \ge 30$ кВ энергия потерь на выключение становится больше энергии потерь на проводимость. Наибольший КПД при передаче энергии от индуктивного накопителя в активную нагрузку соответствует режиму протекания через нее длинного тока (большей постоянной времени разряда накопительной индуктивности).

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (2020-0003).

Библиографический список

1. Месяц Г. А., Яландин М. И. Пикосекундная электроника больших мощностей // УФН. 2005. Т. 175. № 3.

2. Месяц Г. А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Сов. радио. 1974.

3. Бочков В. Д., Бочков Д. В., Салынов И. А., Николаев В. Н., Крестьянинов А. С., Соковнин С. Ю., Балезин М. Е., Понизовский А. З. Исследование тиратронов нового поколения на коммутируемую среднюю мощность до 0,5 МВт. Опыт работы в электрофизической аппаратуре // Письма в журнал «Физика элементарных частиц и атомного ядра». 2018. № 7. С. 894-897.

4. Верещагин Н. М., Круглов С. А., Сережин А. А., Шатилов С. Г., Агальцов К. Д., Павлов М. Б. Газоразрядные прерыватели тока низкого давления в генераторе высоковольтных наносекундных импульсов с индуктивным накопителем энергии // ПТЭ. 2017. № 6. С. 811-817.

5. Сережин А. А., Верещагин Н. М., Круглов С. А., Шатилов С. Г., Агальцов К. Д. Исследования генератора высоковольтных импульсов с индуктивным накопителем энергии и газоразрядным прерывателем тока // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2017. № 60. С. 148-153.

6. Бакшт Е. Х., Панченко А. Н., Тарасенко В. Ф. Эффективный длинно импульсный XeCl – лазер с предымпульсом, формируемым индуктивным накопителем энергии // Квантовая электроника. 2000. № 6. С. 506.

UDC 615.472.03.615.847.8

ANALYSIS OF TRANSIENT PROCESSES CONSIDERING LOSSES IN GAS-DISCHARGE CURRENT SWITCH WITH SECTORAL SCREEN HOLE

S. A. Kruglov, Dr. Sc. (Tech.), full professor, Department of industrial electronics, Head of the Department, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0001-5992-7319, e-mail: pel.rgrtu@yandex.ru

A. A. Serezhin, Ph.D. (Tech.), associate professor, Department of industrial electronics, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0001-8134-8970, e-mail: andrei-serezhin@yandex.ru

D. S. Kusakin, Ph.D. (Phys. and Math.), associate professor, Department of electronic devices, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0002-1596-2136, e-mail: kusakinds@yandex.ru

K. D. Agaltsov, senior lecturer, Department of industrial electronics, RSREU, Ryazan, Russia; orcid.org/0000-0001-6475-9364, e-mail: agaltsov.k.d@list.ru

The work is devoted to the study of energy losses during the flow of current at the stage of conduction and switching, in a gas-discharge current switch with a shielding electrode having a sector hole, and to evaluate the efficiency of the device in the circuit of a high-voltage pulse generator with inductive energy storage. **The aim of the work** is to study energy characteristics of operating mode of a gas-discharge current switch with a sectoral screen hole in a circuit with inductive energy storage.

Keywords: gas-discharge current interrupters, low-pressure plasma, effect of current self-break, inductive energy storage, critical charge, energy losses of a gas-discharge switch.

DOI: 10.21667/1995-4565-2022-80-200-205

References

1. Mesyac G. A., Yalandin M. I. Pikosekundnaya elektronika bol'shih moshchnostej. UFN. 2005, vol. 175, no. 3. (in Russian).

2. Mesyac G. A. *Generirovanie moshchnyh nanosekundnyh impul'sov* (Generating Nanosecond Pulse Rates). Moscow: Sov. Radio. 1974. (in Russian).

3. Bochkov V. D., Bochkov D. V., Salynov I. A., Nikolaev V. N., Krest'yaninov A. S., Sokovnin S. Yu., Balezin M. E., Ponizovskij A. Z. Issledovanie tiratronov novogo pokoleniya na kommutiruemuyu srednyuyu moshchnost' do 0,5 MVt. Opyt raboty v elektrofizicheskoj apparature. *Pis'ma v zhurnal «Fizika elementarnyh chastic i atomnogo yadra»*. 2018, no. 7, pp. 894-897. (in Russian).

4. Vereshchagin N. M., Kruglov S. A., Serezhin A. A., Shatilov S. G., Agal'cov K. D., Pavlov M. B. Gazorazryadnye preryvateli toka nizkogo davleniya v generatore vysokovol'tnyh nanosekundnyh impul'sov s induktivnym nakopitelem energii. *PTE*. 2017, no. 6, pp. 811-817. (in Russian).

5. Serezhin A. A., Vereshchagin N. M., Kruglov S. A., Shatilov S. G., Agal'cov K. D. Issledovaniya generatora vysokovol'tnyh impul'sov s induktivnym nakopitelem energii i gazorazryadnym preryvatelem toka. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotehnicheskogo universiteta*. 2017, no. 60, pp. 148-153. (in Russian).

6. **Baksht E. H., Panchenko A. N., Tarasenko V. F.** Effektivnyj dlinno impul'snyj XeCl – lazer s predympul'som, formiruemym induktivnym nakopitelem energii. *Kvantovaya elektronika*. 2000, no. 6, 506 p. (in Russian).