УДК 615.472.03.615.847.8

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СЕТОЧНОГО УЗЛА ГАЗОРАЗРЯДНОГО КОММУТАТОРА ТОКА ТИРАТРОННОГО ТИПА НА ВНУТРЕННИЙ РАЗОГРЕВ ПРИБОРА

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

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния изменения рабочей температуры на режим работы газоразрядных коммутаторов тока тиратронного типа в схеме с индуктивным накопителем энергии. Анализ полученных результатов позволил установить, что среднее время установления в непрерывном частотном режиме газоразрядного коммутатора составляет 20 мин. С учетом распределений температуры поверхности функциональных узлов прибора с течением времени видно, что степень нагрева анодного, сеточного и катодного узлов увеличивается в сторону анодного узла при U_m≥30 кВ, при U_m≤30 кВ степень нагрева увеличивается в сторону сеточного и катодного узлов, вследствие изменения соотношения потерь на коммутацию и потерь на проводимость. В новом газоразрядном коммутаторе удалось снизить разогрев сеточного узла в среднем на 15 – 20 % по сравнению с первыми конструкциями газоразрядных коммутаторов тока. Целью работы является исследование влияния температуры на режим работы газоразрядных коммутатора тока в схеме с индуктивным накопителем энергии.

Ключевые слова: газоразрядные прерыватели тока, плазма низкого давления, эффект самообрыва тока, индуктивный накопитель энергии, критический заряд, температура фланца сеточного электрода.

DOI: 10.21667/1995-4565-2022-80-206-211

Введение

При проведении экспериментов по обрыву тока газоразрядными коммутаторами тока тиратронного типа, спроектированными на основе серийного водородного тиратрона ТГИ2-500/20 [1-3], включенном в схеме генератора высоковольтных импульсов с индуктивным накопителем энергии, в непрерывном частотном режиме через определенный промежуток времени, при неизменных напряжении питания E_n и напряжении генератора водорода $U_{rв}$, происходит увеличение времени протекания тока через прибор до момента его самообрыва и, как следствие, увеличение критического заряда [3]. Контроль температуры поверхности коммутатора показывает, что проявление данного эффекта происходит за счет повышения температуры всей поверхности прибора и роста температуры поверхности сеточного узла в частности. Изменение температуры поверхности свидетельствует о росте температуры внутри объема газоразрядного коммутатора, что приводит к увеличению рабочего давления водорода при той же концентрации молекул газа. Таким образом, изменение температуры газоразрядного прерывателя тока в течение функционирования, включенного в схеме генератора высоковольтных импульсов с индуктивным накопителем энергии, дестабилизирует режим его работы и параметры генерируемых импульсов:

– изменяется время протекания тока до момента его самообрыва, что приводит к изменению величины критического заряда;

– изменяется величина обрываемого тока в момент самообрыва и время выключения, что приводит к изменению амплитуды генерируемых импульсов (рисунок 1).



Рисунок 1 – Осциллограммы тока анода водородного тиратрона при различных температурах сеточного узла: 1 – 205 °C, 2 – 278 °C Figure 1 – Oscillograms of hydrogen thyratron anode current at different temperatures of grid node: 1 – 205 °C, 2 – 278 °C

Водородный тиратрон и другие подобные газоразрядные коммутаторы являются газоразрядными приборами, отпаянными от вакуумной системы, и контролировать температуру непосредственно в объеме не представляется возможным, но температура поверхности напрямую связана с температурой внутри коммутатора.

Исследование влияния температуры на режим работы газоразрядных коммутаторов тока в схеме с индуктивным накопителем энергии

Энергетические характеристики работы коммутатора определяют тепловой режим его работы, срок службы прибора и КПД генератора высоковольтных импульсов. Проведенные ранее исследования показали [4, 5], что процессы самообрыва разряда и распада плазмы в анодно-сеточной области сильно зависят от параметров генерируемых импульсов.

Водородный тиратрон ТГИ2-500/20 и подобные ему газоразрядные коммутаторы являются приборами несамостоятельного дугового разряда с накаленным катодом. Рабочее напряжение накала катода составляет 6,3 В, при этом его температура составляет от 1040 до 1120 К [5]. Помимо накаленного катода в приборах присутствует генератор водорода, который также подогревается, при этом его температура зависит от напряжения, подаваемого на подогреватель $U_{\rm rB}$. Так как процессы перераспределения температуры инерционны, для создания одинаковых условий эксперимента перед подачей напряжения от источника питания E_{π} и управляющих импульсов проводился прогрев тиратрона при поданных напряжениях накала катода и $U_{\rm rB}$ в течение 30 минут.

Характерные тепловизионные изображения поверхности тиратрона ТГИ2-500/20 в режиме функционирования при мощности 530 Вт приведены на рисунке 2. Полученные в установившемся режиме результаты показывают, что при работе в непрерывно частотном режиме независимо от потребляемой от Е_п мощности, максимальные потери энергии происходят в анодном и сеточном узлах. В случае потребляемой от Е_п мощности 530 Вт изменение температуры анодного узла составляет 230 °C по сравнению с исходным, притом что анодный узел конструктивно имеет максимальную площадь контакта с окружающей средой по сравнению с остальными функциональными узлами, и процессы теплообмена между анодным узлом и окружающим пространством протекают более интенсивно.



Рисунок 2 – Тепловизионные изображения поверхности тиратрона при потребляемой от источника питания мощности 530 Вт Figure 2 – Thermal images of thyratron surface at consumption power 530 W

Разогрев анодного узла обусловлен потерями в приборе на стадиях проводимости и коммутации, в первую очередь на стадии обрыва тока. Процесс выключения протекает в анодносеточной области и сопровождается бомбардировкой поверхности анодного узла высокоэнергетическим электронным потоком в условиях нарастающего электрического поля, где амплитуда напряжения на аноде U_m≥30 кВ, что вызывает значительный разогрев анодного узла. За время функционирования до выхода на установившийся режим температура фланца сетки увеличивается на 120 °C, потери на стадии проводимости в сеточном узле невелики, основной разогрев происходит на стадии выключения, когда весь ионный ток замыкается на сетку.

Кроме того, разогрев сеточного узла обусловлен передачей тепла излучением от более разогретого анодного узла, который находится на расстоянии 3 мм от сетки. Температура фланца катода за время выхода на устоявшийся режим работы увеличивается на 90 °C. Отличительной особенностью работы тиратрона в схеме генератора высоковольтных импульсов с индуктивным накопителем энергии является отсутствие потерь на коммутацию в катодном узле. Включение прибора происходит при нулевом токе, а процесс выключения происходит в анодно-сеточной области. Таким образом, выделение тепла в катодном узле происходит только на стадии проводимости. В исследуемых режимах потери проводимости значительно меньше (от 20 % и менее) потерь на стадии выключения при условии U_m≥30 кВ. Этим объясняется такой незначительный, по сравнению с анодным узлом, разогрев фланца катода.

По данным, полученным в результате обработки серии тепловизионных изображений поверхности ТГИ2 – 500/20 при потребляемой от E_{n} мощности 530 Вт, построены зависимости температуры анода, фланца сеточного узла и фланца катодного узла от продолжительности работы прибора (рисунок 3). Из них видно, что наиболее значительное изменение температуры контрольных точек поверхности прибора происходит в первые 12-14 минут, после этого динамика изменения температуры всех контролируемых участков одинакова. Выход на установившийся температурный режим всех контрольных точек происходит приблизительно на 20-й минуте работы и в дальнейшем их температура не изменяется, что обусловлено равенством подводимой и рассеиваемой мощности в приборе [5].

Как было отмечено ранее, новые экспериментальные образцы газоразрядных коммутаторов тока с улучшенными параметрами разряда были построены на основе серийного прибора ТГИ2-500/20, один из приборов имеет схожую конструкцию с оригиналом, однако в нем реализованы конструктивные особенности, направленные на оптимизацию режима работы прибора [5]. Что касается работы новых коммутаторов в непрерывно-частотном режиме, в них были реализованы следующие конструктивные особенности: было произведено увеличение толщины электродов сеточного узла (сеточного и экранирующего), за счет этого происходило повышение количества теплоты, необходимого для нагрева сеточного узла до определенной температуры. Скругление краев отверстий позволяет снизить их разогрев посредством устранения элементов с малым радиусом кривизны, который вызван бомбардировкой ионами из плазмы разряда. Начальная температура сеточного узла нового экспериментального прибора после прогрева составляет 145 °C, после выхода на рабочий режим по истечении 20 минут работы усредненные значения температур нагрева основных функциональных узлов представлены на тепловизионном изображении (рисунок 4).



Рисунок 3 – Зависимости изменения температуры анода – 1, фланца сетки – 2 и фланца катода – 3 от продолжительности работы при потребляемой от источника питания мощности 530 Вт Figure 3 – Dependences of temperature change of anode – 1, grid – 2 and cathode – 3 nodes on the operation time with power consumption of 530 W



Рисунок 4 – Тепловизионные изображения поверхности нового газоразрядного коммутатора с улучшенными параметрами разряда после 20 минут работы Figure 4 – Thermal image of the surface for new gas-discharge current switch with improved discharge parameters after 20 minutes of operation

Наибольшее влияние на процессы обрыва тока и выключения в данном классе приборов оказывает сеточный узел. Соответственно, контролируя температуру фланца сеточного узла, можно определить изменения основных параметров, характеризующих процессы самообрыва тока и выключения, возникающие в течение времени выхода газоразрядного коммутатора в установившийся режим работы. Кроме того, при использовании контактных методов измерения температуры поверхности определение температуры фланца сеточного узла обеспечить значительно проще, чем определение температуры анодного узла из-за наличия на нем гораздо более низкого потенциала. По результатам обработки серии тепловизионных изображений поверхности газоразрядных коммутаторов при потребляемой от Е_п мощности 260 Вт была получена зависимость температуры фланца сеточного узла для двух приборов (рисунок 5). Таким образом, независимо от потребляемой от источника питания мощности, используя температурную зависимость фланца сеточного узла, можно контролировать изме-

нение характерных параметров работы газоразрядного коммутатора, включенного в схеме генератора высоковольтных импульсов с индуктивным накопителем энергии.

Исходя из представленной зависимости видно, что кривая зависимости для нового экспериментального коммутатора располагается ниже аналогичной кривой для тиратрона ТГИ2-500/20, это обусловлено уменьшением потерь на коммутацию в анодно-сеточной области, что приводит к уменьшению разогрева сеточного узла в целом и подтверждает эффективность введенных ранее конструктивных изменений.



Рисунок 5 – Зависимости изменения температуры фланцев сеточных узлов от продолжительности работы при потребляемой от источника питания мощности 260 Вт, для водородного тиратрона – 1, для нового газоразрядного коммутатора с улучшенными параметрами разряда – 2 Figure 5 – Dependences of temperature change in grid nodes on operation time at power consumption of 260W, for hydrogen thyratron – 1, for a new gas-discharge current switch with improved discharge parameters – 2

Изменения величины обрываемого тока и длительности его протекания через прибор приводят к изменению величины критического заряда. Для определения характера этих изменений была проведена серия экспериментов по определению величины критического заряда в зависимости от температуры фланца сеточного узла. Определение величины критического заряда проводилось по осциллограмме тока, протекающего через прибор до момента его самообрыва. Эксперименты проводились при условии самообрыва тока в первой четверти периода собственных колебаний разрядного LC контура. В этом случае самообрыв происходит на стадии нарастания анодного тока при непрерывном росте накапливаемой в индуктивности энергии. Обеспечить выполнение данных условий оказалось возможным при потребляемой от источника питания мощности 130 Вт.

Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие заключения. При работе газоразрядных коммутаторов тока в схеме с индуктивным накопителем энергии происходит значительный разогрев всех его электродов, в том числе и сеточного узла. Это приводит к изменению длительности протекания тока через прибор и его величины в момент обрыва, что влечет за собой изменение значения критического заряда и параметров генерируемых импульсов. Величина изменения температуры электродов зависит от коммутируемой в нагрузку мощности. Получены серии тепловизионных изображений и распределений температуры по поверхности приборов при потребляемой от источника питания средней мощности 200 – 500 Вт. Равновесное температурное состояние поверхности прибора устанавливается через 20 – 25 минут работы. В новом газоразрядном коммутаторе удалось снизить разогрев сеточного узла в среднем на 15-20 % по сравнению с первыми конструкциями газоразрядных коммутаторов тока.

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. Фогельсон Т. Б., Бреусова Л. Н., Вагин Л. Н. Импульсные водородные тиратроны. М: Сов. радио. 1974.

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.

UDC 615.472.03.615.847.8

INFLUENCE OF GRID NODE DESIGN PARAMETERS IN GAS-DISCHARGE THYRATRON-TYPE CURRENT SWITCH ON DEVICE INTERNAL HEATING

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

This paper presents the results of experimental studies of the effect of changing operating temperature on the operation mode of gas-discharge thyratron-type current switches in a circuit with inductive energy storage. The analysis of the results obtained made it possible to establish that the average settling time of a gas-discharge switch in continuous frequency mode is 20 min. Based on surface temperature distributions of functional units of the device over time, it can be seen that the degree of heating of anode, grid and cathode nodes increases towards anode unit at $U_m \ge 30 \text{ kV}$, at $U_m \le 30 \text{ kV}$ the degree of heating increases towards grid and cathode units , due to a change in the ratio of switching losses and conduction losses. In a new gasdischarge switch, it was possible to reduce the heating of grid node by an average of 15 - 20 %. The aim of the work is to study the effect of temperature on the operation mode of gas-discharge current switches in a circuit with inductive energy storage.

Key words: gas-discharge current interrupters, low-pressure plasma, current self-cutting effect, inductive energy storage, critical charge, grid electrode flange temperature.

DOI: 10.21667/1995-4565-2022-80-206-211

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. Fogel'son T. B., Breusova L. N., Vagin L. N. *Impul'snye vodorodnye tiratrony*. Moscow: Sov. radio. 1974. (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).