

04

## Некоторые возможности для снижения эрозии узла поджига управляемого вакуумного разрядника

© А.А. Козлов, А.Н. Долгов, В.А. Максимов, С.Г. Давыдов, В.О. Ревазов, Р.Х. Якубов

Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва, Россия  
E-mail: vniia4@vniia.ru

Поступило в Редакцию 12 ноября 2024 г.

В окончательной редакции 31 декабря 2024 г.

Принято к публикации 11 января 2025 г.

Приведены результаты и анализ экспериментов, цель которых состоит в поиске и изучении возможностей снижения эрозии узла поджига управляемого вакуумного разрядника. Результаты свидетельствуют о том, что введение в состав узла поджига разрядника компактного ограничительного сопротивления, разделяющего катод на две гальванически связанные части, позволяет пространственно отделить область функционирования сильноточного дугового разряда от узла поджига. Таким образом удается значительно ослабить разрушающее воздействие дугового разряда на узел поджига.

**Ключевые слова:** дуговой разряд, искровой разряд, разрядник, эрозия.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.09.60227.20183

Эффект возникновения дугового разряда в вакууме, инициированного управляющим слаботочным кратковременным разрядом (искровым), уже давно и широко используется в электротехнике. Он положил начало целому классу коммутаторов — трехэлектродные управляемые вакуумные разрядники [1,2].

В разрядниках такого типа имеется два основных электрода (катод и анод) и один управляющий (поджигающий), который отделяется от катода диэлектрической вставкой (слюда). Совокупность катода, диэлектрической вставки и поджигающего электрода обычно называют узлом поджига (поджигающей системой) разрядника.

Указанные разрядники в миниатюрном исполнении нашли свою область применения в высоковольтных сильноточных цепях импульсной электроники высокой мощности. Они способны в широком диапазоне напряжений коммутировать токи килоамперной амплитуды внутри компактного герметичного корпуса, обладающего высокой прочностью. Их малые размеры (объем меньше  $2\text{ см}^3$ ) и малая масса (обычно менее 5 г) позволяют использовать данные приборы для быстрой коммутации токов, в том числе в крайне агрессивных условиях, например при сильном механическом ударе или вибрациях, возможно одновременно с воздействием экстремальных температур [3]. Указанная область применения обуславливает буквально штучный характер производства управляемых искровых разрядников в миниатюрном исполнении. Поэтому их совершенствование не обусловлено поиском путей расширения возможностей применения, а связано с решением некоторых узких технических задач. Количество соответствующих публикаций в научной периодике достаточно мало.

Протекание коммутирующего тока в вакуумном промежутке катод–анод разрядника сопряжено с функционированием катодных пятен, локализованных преимущественно вблизи диэлектрической вставки. Это при-

водит к эрозии обозначенных областей катода, эрозии и запылению диэлектрической вставки, что изменяет условия для возникновения вспомогательного разряда вдоль поверхности диэлектрика в узле поджига [4,5]. Как следствие, меняются характеристики срабатывания разрядника (временная задержка в срабатывании, напряжение пробоя по поверхности диэлектрика, ресурс и др.) [1,6].

Известен способ снижения эрозии электродов, основанный на использовании эффекта взаимодействия дугового разряда с магнитным полем. Применение магнитного поля является действенным способом, однако предполагает использование постоянных магнитов, что существенно увеличивает габариты систем, в которых используются разрядники, а в некоторых случаях магнитное поле и вовсе искажает работу данных систем [7,8]. Авторы [3] с той же целью применили тугоплавкие материалы: например, вспомогательный искровой разряд осуществляется по поверхности керамического (корунд) изолятора. Кроме того, разработчики в ряде случаев отказываются от использования вспомогательного разряда в пользу лазерного поджига. В этом случае коммутирующий дуговой разряд возникает в факеле лазерной плазмы, образующейся при воздействии сфокусированного излучения импульсного лазера на поверхность, например, катода [9–11].

Цель настоящей работы — поиск и изучение новых возможностей снижения эрозии узла поджига управляемого вакуумного разрядника.

Возможным решением для снижения эрозии узла поджига является использование двух разделенных пространственно межэлектродных промежутков с гальванически несвязанными катодами. Первый из них — основной коммутируемый промежуток, второй — узел поджига. Замыкание основного промежутка происходит в результате ионизации остаточного газа потоком

быстрых электронов и излучения из вспомогательного искрового разряда в узле поджига [12]. Однако в таком варианте возможно увеличение паузы между управляющим разрядом в узле поджига и стартом дугового разряда в основном промежутке из-за уменьшения плотности потока быстрых электронов и излучения [12]. В данной работе был предложен вариант с включением резистора между двумя используемыми катодами. В этом случае на первом этапе можно ожидать пробой и быстрое развитие искрового разряда по поверхности диэлектрика в узле поджига за счет заряда, накопленного в его емкости. В результате эмиссии из поверхностного разряда в первую очередь быстрых электронов и ионизации остаточного газа электронным ударом [12] в промежутке катод–анод возникнет первичная проводящая среда. Резистор ограничивает силу тока, протекающего в промежутке между „первым“ катодом, участвующим в протекании вспомогательного искрового разряда, и анодом и обеспечивает поддержание высокого напряжения на промежутке между „вторым“, накоротко заземленным катодом и анодом. Таким образом будут созданы условия для возникновения катодного пятна на поверхности накоротко заземленного катода. Далее наступит второй этап процесса коммутации. Развитие искрового разряда в основном промежутке обеспечит быстрое распространение плазменного факела от заземленного накоротко катода к аноду благодаря механизму амбиполярной диффузии. Таким образом будет обеспечено развитие дугового разряда, способного осуществить короткое замыкание коммутируемой цепи.

Достаточно простым и надежным способом создания компактного резистора является формирование пленки с заданными параметрами на диэлектрической поверхности. При этом следует учитывать, что указанный конструктивный элемент будет находиться вблизи области протекания дугового разряда, но не должен быть подвержен его воздействию. В противном случае такое воздействие неизбежно приведет к разрушению и изменению характеристик пленочного резистора.

При включении ограничивающего резистора в узел поджига прикладываемое от высоковольтного генератора напряжение будет делиться между емкостью поджигающего промежутка и ограничивающим сопротивлением. Коэффициент деления будет определяться отношением величин реактивного сопротивления емкости промежутка ( $Z_c$ ) и добавленного сопротивления  $R_{lim}$ . Для того чтобы произошел пробой, большая часть подаваемого напряжения должна приходиться на поджигающий промежуток:

$$Z_c \gg R_{lim},$$

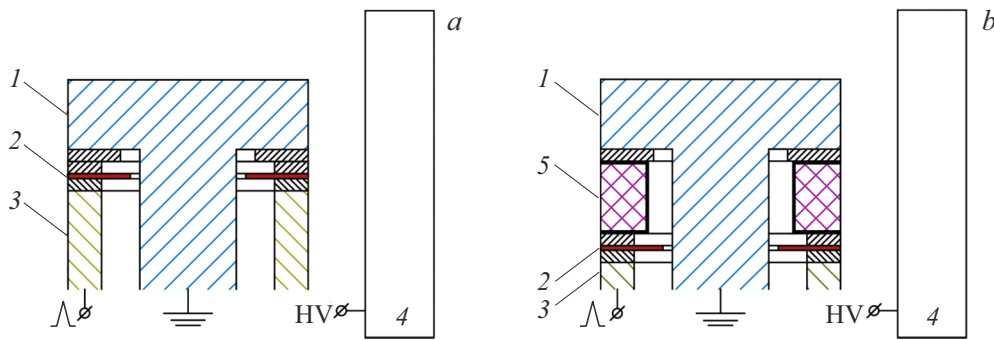
$$Z_c = \frac{1}{\omega C} \approx \frac{\tau}{C} \approx 10^4 \Omega,$$

где  $\tau \approx 10^{-7}$  s — длительность пробоя в узле поджига,  $C \approx 10^{-11}$  F — емкость поджигающего промежутка (определяется толщиной и материалом диэлектрической вставки). Таким образом, получается, что  $R_{lim} \ll 10^4 \Omega$ .

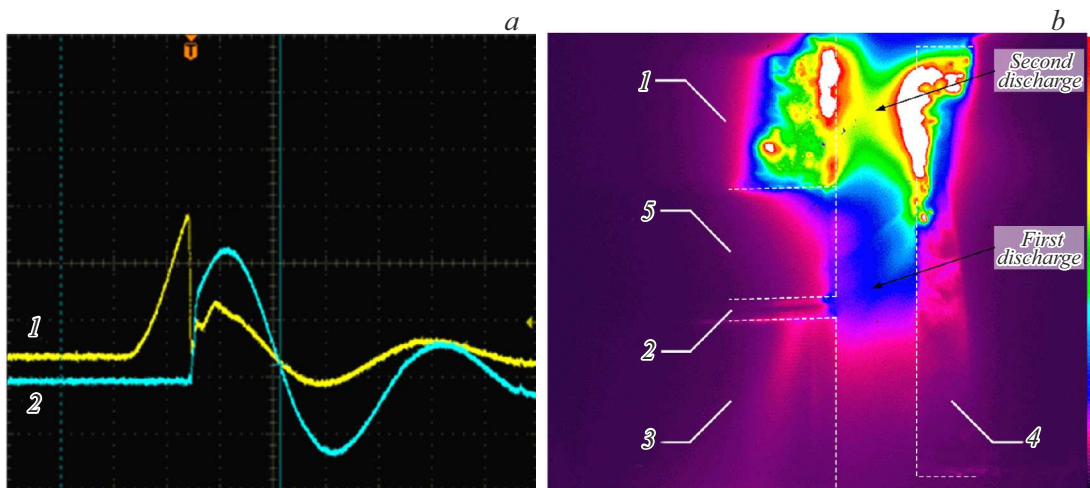
Этому условию будет удовлетворять величина сопротивления  $\sim 1000 \Omega$  и менее, в таком случае напряжение на нем при среднем пробойном напряжении 2 kV не будет превышать 200 V, что позволит использовать такое компактное сопротивление и в то же время снизит величину тока через катод, расположенный вблизи диэлектрической шайбы, примерно в 1000 раз на стадии горения дугового разряда.

Экспериментальная проверка описанной выше схемы переброски разряда выполнялась с помощью фотосъемки разряда в промежутке между катодом и анодом. Наряду с этим проводился анализ картины эрозии узла поджига путем визуальной оценки степени эрозионного разрушения элементов узла поджига с помощью стереоскопического микроскопа. В соответствующих экспериментах были использованы как контрольный макет с обычным узлом поджига, в котором имеется единственный катод, так и макет с двумя гальванически связанными через резистор катодами. Оба макета были изготовлены в виде геометрически подобных конструкций (рис. 1).

Узел поджига имел коаксиальную конфигурацию. Резистор — тонкая пленка, сформированная на внутренней поверхности керамической шайбы (рис. 1, b). Анод плоский. Толщина диэлектрической вставки в узле поджига составляет 0.1 mm. Материал электродов — алюминиевый сплав, в связи с чем были использованы достаточно тугоплавкие металлические (ковар) вставки, непосредственно между которыми зажималась диэлектрическая вставка и которые обеспечивали стабильное срабатывание поджига. Алюминиевый сплав в качестве материала электродов был выбран потому, что, во-первых, он дает отчетливо наблюдаемую рельефную картину эрозии. Во-вторых, он обеспечивает высокую тепловую скорость ионов в разряде и, следовательно, высокую скорость распространения катодного факела. Кроме того, высокая тепловая скорость ионов означает высокую скорость ионного звука, а данное обстоятельство служит стабилизации разряда на стадии искры [13]. Разрядное устройство размещалось в вакуумной камере, откачанной до давления 0.1–1 Pa. Анод до старта процесса коммутации находился под постоянным потенциалом +3 kV. С целью регистрации тока в коммутируемой цепи в ее состав был включен низкоиндуктивный резистор с сопротивлением 0.1  $\Omega$ . Процесс коммутации стартовал при подаче на поджигающий электрод импульса потенциала положительной полярности амплитудой 5 kV. Измерение напряжения в узле поджига производилось с помощью омического делителя. Регистрация токов и напряжений осуществлялась с помощью цифрового осциллографа Wavesurfer 510R (Teledyne LeCroy). Вспомогательный искровой разряд имел продолжительность 30–50 ns и амплитуду 10 A. В таких условиях в вакуумном промежутке развивался дуговой разряд с амплитудой синусоидального тока 5 kA и периодом 1.6  $\mu$ s (рис. 2), фотосъемка которого производилась с помощью высокоскоростной видеокамеры OPHIR Spiricon



**Рис. 1.** Схематическое изображение используемых в экспериментах узлов поджига, их размещение совместно с анодом при фотосъемке. *a* — обычный узел поджига: 1 — катод, 2 — диэлектрическая вставка, 3 — поджигающий электрод, 4 — анод. *b* — узел поджига с модификацией: 1 — катод, 2 — диэлектрическая вставка, 3 — поджигающий электрод, 4 — анод, 5 — шайба-резистор (жирной линией показаны области нанесения проводящей металлической пленки с заданным сопротивлением).

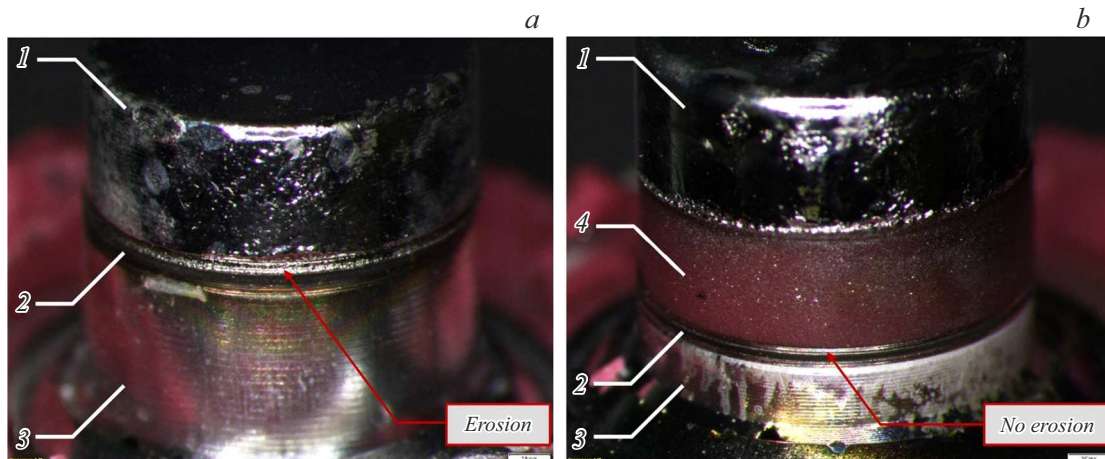


**Рис. 2.** *a* — осциллограммы сигналов, регистрируемых в эксперименте. Луч 1 — напряжение в промежутке катод–поджигающий электрод, луч 2 — ток в промежутке катод–анод. Чувствительность: луч 1 — 1 kV/div, луч 2 — 2 kA/div. Развертка 400 ns/div. *b* — изображение разряда в промежутке между анодом и узлом поджига с модификацией. 1 — катод, 2 — диэлектрическая вставка, 3 — поджигающий электрод, 4 — анод, 5 — шайба-резистор. Штриховыми линиями показаны границы составных частей разрядного устройства. Экспозиция кадра значительно превышает длительность разряда. При перемещении снизу вверх по цветовой шкале, показанной справа, интенсивность излучения увеличивается. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

BGS-USB-SP928-OSI через смотровое окно вакуумной камеры в спектральном диапазоне 190–1100 nm с экспозицией кадра 60  $\mu$ s. Время экспозиции кадра значительно превышало длительность протекания разряда, что позволяло зарегистрировать изображение области разряда за все время его протекания. На рис. 2, *b* приведено одно из зарегистрированных изображений разряда. Цветом показано пространственное распределение относительного флюенса энергии излучения, испускаемого плазмой разряда или, другими словами, средняя за время разряда интенсивность источников излучения.

На приведенном изображении (рис. 2, *b*) видно, что в пространстве между узлом поджига и анодом горит два разряда: первый — разряд между катодом, расположенным вблизи диэлектрической вставки, и анодом в нижней части системы, второй — разряд между катодом,

расположенным над шайбой-резистором, и анодом в верхней части системы. В целом средняя по продолжительности разряда интенсивность излучения второго разряда явно превышает аналогичный показатель для первого, что свидетельствует в пользу преимущественного выделения энергии во втором разряде. Аналогичная картина свечения разряда наблюдалась при каждой последующей коммутации. В свою очередь в случае фотосъемки разряда при использовании обычного узла поджига, как и ранее [12], наблюдалась привязка разряда к областям катода вблизи слюдяной шайбы. Следует заметить, что изменений в амплитудно-временных характеристиках регистрируемых осциллограмм (рис. 2, *a*) не отмечалось. Локализация следов эрозии на элементах использованных узлов поджига (рис. 3) полностью подтверждает результаты, полученные при фотосъемке



**Рис. 3.** Картины эрозии узлов поджига. *a* — обычный узел поджига: 1 — катод, 2 — диэлектрическая вставка, 3 — поджигающий электрод. *b* — узел поджига с модификацией: 1 — катод, 2 — диэлектрическая вставка, 3 — поджигающий электрод, 4 — шайба-резистор. В обычном узле поджига поверхность металлической шайбы, расположенной над диэлектрической вставкой 2, сильно оплавлена, в узле поджига с модификацией оплавление данной шайбы не отмечается, что и является свидетельством снижения эрозии узла поджига.

разряда. Для макета с единым катодом наблюдается значительная эрозия катода на границе с диэлектрической вставкой как свидетельство привязки к ней катодных пятен коммутационного дугового разряда (рис. 3, *a*). Для макета с модифицированным разрядным устройством (т.е. с двумя разделенными резистором катодами) эрозия катода, находящегося в узле поджига, практически отсутствует. Наблюдается значительная эрозия катода, находящегося в основном промежутке, причем наиболее выделяется эрозия в области, прилегающей к керамической шайбе (шайба-резистор на рис. 3, *b*). Таким образом, картина эрозии также свидетельствует о реализации ожидаемого режима с переброской разряда в основном промежутке из узла поджига в пространственно удаленную от узла поджига область.

Эксперименты показали, что включение резистора в узел поджига разрядника позволяет пространственно разделить область вспомогательного искрового и основного дугового разрядов. Как следствие, значительно снижается разрушающее воздействие коммутационного дугового разряда на узел поджига, при этом временные параметры и амплитуда коммутационного импульса тока сохраняются.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] А.А. Бриш, А.Б. Дмитриев, Л.Н. Космарский, Ю.Н. Сачков, Е.А. Сбитнев, А.Б. Хейфец, С.С. Цицашвили, Л.С. Эйг, ПТЭ, № 5, 53 (1958).
- [2] Д.Ф. Алферов, В.П. Иванов, В.А. Сидоров, ЭЛЕКТРО, № 2, 31 (2002).

- [3] В.М. Coaker, R.J. Seddon, J.S. Bower, C. Bell, in *2012 Abstracts IEEE Int. Conf. on plasma science* (IEEE, 2012), p. 1P-108. DOI: 10.1109/PLASMA.2012.6383436
- [4] В.А. Лавринович, *Разработка коммутационной аппаратуры для импульсной техники и энергетики*, докт. дис. (ИСЭ СО РАН, НИИ высоких напряжений, Томск, 2005).
- [5] Р.А. Бунин, *Управляемый вакуумный разрядник с высокой отключающей способностью*, канд. дис. (НИУ „МЭИ“, М., 2014).
- [6] Д.Ф. Алферов, Р.А. Бунин, Д.В. Евсин, В.А. Сидоров, Вестн. НИЯУ МИФИ, **1** (2), 195 (2012).
- [7] В.И. Асюнин, С.Г. Давыдов, А.Н. Долгов, А.А. Пшеничный, Р.Х. Якубов, *Физика плазмы*, **41** (2), 216 (2015). DOI: 10.7868/S0367292115020018 [V.I. Asyunin, S.G. Davydov, A.N. Dolgov, A.A. Pshenichnyi, R.Kh. Yakubov, *Plasma Phys. Rep.*, **41** (2), 198 (2015). DOI: 10.1134/S1063780X15020014].
- [8] Д.Ф. Алферов, М.Р. Ахметгареев, В.А. Сидоров, *Успехи прикладной физики*, **1** (2), 154 (2013).
- [9] I. Fuukushi, V. Watanabe, E. Hotta, A. Okino, K.-C. Ko, in *Proc. 19th Int. Symp. on discharges and electrical insulation in vacuum (ISDEIV)* (IEEE, 2000), vol. 2, p. 511. DOI: 10.1109/DEIV.2000.879039
- [10] V.L. Paperny, I.V. Romanov, Yu.V. Korobkin, N.G. Kiselev, in *2012 25th Int. Symp. on discharges and electrical insulation in vacuum (ISDEIV)* (IEEE, 2012), p. 266. DOI: 10.1109/DEIV.2012.6412504
- [11] X. Mao, Z. He, Y. Wang, W. Fan, H. Lin, Z. Liu, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **42** (11), 3592 (2014). DOI: 10.1109/TPS.2014.2362612
- [12] С.Г. Давыдов, А.Н. Долгов, А.А. Козлов, Р.Х. Якубов, *ЖТФ*, **91** (12), 1916 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.12.51757.153-21 [S.G. Davydov, A.N. Dolgov, A.A. Kozlov, R.Kh. Yakubov, *Tech. Phys.*, **67** (15), 2372 (2022). DOI: 10.21883/TP.2022.15.55262.153-21].
- [13] Г.А. Месяц, *Взрывная электронная эмиссия* (Физматлит, М., 2011).