DOI: https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.12

УДК: 537.527.9

17-я Международная конференция

«Газоразрядная плазма и ее применения»

Екатеринбург, Россия, 8-12 сентября 2025

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ТРЕХЭЛЕКТРОДНОГО РАЗРЯДНИКА В СЖАТОМ ГАЗЕ С «ИСКАЖЕНИЕМ ПОЛЯ» И СРАВНЕНИЕ ЕГО КОММУТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК С ДВУХЭЛЕКТРОДНЫМ РАЗРЯДНИКОМ НА САМОПРОБОЕ

Г.Н. Курапов, А.А. Бухаркин, М.В. Журавлёв,
П. Глумац, Е.А. Курапова, Г.Е. Ремнёв

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, проспект Ленина, дом 30.

Статья поступила в редакцию 2 октября 2025 г.

Аннотация. В статье рассмотрены особенности конструктивного исполнения трехэлектродного разрядника с искажением поля по результатам итерационного расчёта конфигурации и результаты исследования его временных характеристик в сравнении с двухэлектродным разрядником на самопробое и трехэлектродным разрядником без расчета и выравнивания электрического поля в искровом промежутке. Конструкция разрядника обеспечивает поочередный пробой промежутков в условиях перенапряжения и неоднородной напряженности электрического поля определяемой специальной формой электродов. Разрядник входит в состав разрабатываемого экспериментального стенда по генерации пучков нейтронов мощными импульсными ускорителями заряженных частиц. При непрерывной работе ускорителя порядка 10^6 циклов остро встает проблема обеспечения требуемой эрозионной стойкости электродов коммутатора и

стабильности формирования разряда без ухудшения коммутационных характеристик. Несмотря на многолетние исследования, универсального решения этих проблем не найдено. Исходя из вышесказанного возникла необходимость проведения данной работы, связанной с разработкой таких разрядников. Коммутируемое напряжение лежало в диапазоне 147,5 ÷ 304,5 кВ с максимальной величиной коммутируемого тока – до 87 кА. В результате исследований показано, что введение искажающего электрода в искровой промежуток при конфигурировании электрического поля снижает пробивное напряжение незначительно (7,3 ÷ 12,8 %). Определен джиттер времени срабатывания относительно времени начала подачи зарядного импульса. Разрядник обеспечивал формирование ветвистой структуры искрового канала, что обеспечивало снижение эрозии электродов, времени коммутации и падения напряжения на искровом промежутке.

Ключевые слова: трехэлектродный разрядник, разрядник с «искажением поля», искровой разрядник в газе высокого давления, время запаздывания разряда, многоканальность, неоднородность поля, пробивное напряжение.

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23-19-00614).

Автор для переписки: Курапов Григорий Николаевич, kurapov@tpu.ru

Введение

Узел разрядника мощных импульсных ускорителей заряженных частиц – один из ключевых узлов, определяющих рабочее напряжение ускорителя, длительность фронта и частоту следования импульсов. В качестве разрядника для коаксиальных формирующих линий не редко выступает двухэлектродный разрядник в газах высокого давления, работающий на самопробое. Примерами использования таких разрядников могут выступать ускорители типа «Синус» [1,2]. Пробой в разряднике происходит при достижении на электродах так называемого статического пробивного напряжения [3,4,5]. Стабильность работы таких разрядников в режиме самопробоя описана в статье [6].

Большинство разрядников для генераторов высоковольтных наносекундных импульсов работают в атмосфере повышенного давления [7].

При эксплуатации двухэлектродного разрядника на самопробое возникает ряд процессов, снижающих стабильность работы и ресурс. Одним из этих факторов является эрозия электродов [8,9].

Для увеличения скорости спада напряжения в искровом промежутке и соответственно уменьшения времени коммутации разрядника, а также уменьшения эрозии электродов необходим многоканальный режим работы разрядника, который также влияет на уменьшение времени коммутации t_k из-за уменьшения индуктивности L искры [10]. Для осуществления многоканального режима работы необходимо создать определенные условия в искровом промежутке. Мартин в [11] указывает, что разброс времени срабатывания каналов может составлять 1 %, при этом в системе лезвие – плоскость напряжение пробоя на 18 % больше, чем в системе острие – плоскость. Многоканальность можно получить лишь в случае, когда время зажигания каналов много меньше времени коммутации, в противном случае снижение напряжения на электродах при зажигании одного канала не позволит образоваться другим. Отмечается также, что вероятность зажигания большого числа каналов возрастает с уменьшением внутреннего сопротивления генератора и ростом тока. Появление одного канала облегчает появление следующих из-за ультрафиолетового излучения от него. Чем круче фронт импульса, приложенного к промежутку, тем больше перенапряжение на промежутке и, соответственно, легче зажечь много каналов [10]. Получение многоканального разряда упрощается с введением третьего электрода, в этом случае получится разрядник, работающий на сжатом газе по принципу «искажения поля» [12]. При этом введение в искровой промежуток между заземленным и высоковольтным электродом третьего (искажающего) электрода вносит неоднородность в конфигурацию электрического поля этого промежутка, тем самым снижая напряжение самопробоя. Известно, что оптимальным расположением для третьего электрода является его нахождение на эквипоненциали равной V/3 [10,13,14]. Это значит,

что третий электрод расположен в искровом зазоре на расстоянии 1/3 от заземленного электрода и 2/3 от высоковольтного.

Необходимо распределить конструктивными емкостями деталей разрядника электрическое поле таким образом, чтобы оно имело минимальную неоднородность. Расчет конструктивного исполнения разрядника, обеспечивающего высокую степень однородности поля, потребует весьма объёмных и сложных математических вычислений.

Использование современного программного обеспечения (ПО) для расчёта конфигурации электрического поля позволяет создать конструкцию разрядника, обеспечивающую высокую степень однородности распределения напряженности в искровом промежутке между электродами.

Для стабильной работы разрядника, как правило, используют маленький зазор между электродами и давление газа в несколько десятков атмосфер [1,15].

Так как работа установки предполагается на напряжениях от 100 до 500 кВ и частоте 50 Гц, необходимо организовать продувку газа через разрядник. Таким образом, работа разрядника с продувкой газа при высоких давлениях видится проблематичной; в то же время при небольших зазорах в межэлектродном пространстве удаление продуктов эрозии с поверхности электродов также будет затруднительно. При этом увеличение зазора в межэлектродном пространстве ведет к увеличению индуктивности, для ее уменьшения необходимо организовать многоканальный пробой, который в свою очередь является благоприятным с точки зрения уменьшения эрозии электродов. С другой стороны, маленький зазор неблагоприятен с точки зрения многоканальности по причине того, что первый развившийся искровой канал не допустит развития других каналов.

Регулировку напряжения работы установки в широком диапазоне напряжений можно осуществлять как регулировкой давления газа, так и зазором между электродами, но, как было указано выше, при продувке газа через разрядник поддерживать высокое давление проблематично. В связи с этим исследования проводились при большом зазоре равном 22,4 мм. При работе

на давлениях от атмосферного до 2 атм. необходим большой зазор между электродами, поэтому было принято решение в качестве рабочего газа использовать гексофторид серы (SF6) более известный под названием «элегаз». Этот газ обладает наибольшей электрической прочностью и является одним из наиболее изученных и часто применяемых газов для разрядников.

1. Расчёт

При создании узла разрядника с равномерным распределением поля в искровом промежутке изначально был проведен итерационный расчёт конфигурации на максимальное напряжение равное 500 кВ. Конструкция разрядника, для которой проводился расчет распределения полей, представлена на рисунке 1.

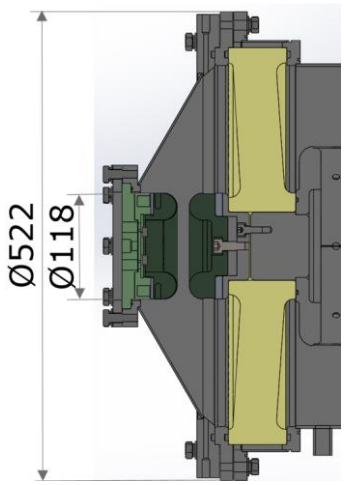

Рис. 1. Конструкция двухэлектродного разрядника.

Форма поля менялась путем изменения конфигурации и диаметра металлического корпуса искажающего электрода, диэлектрическим формирователем поля вблизи потенциального электрода, а также формой и диаметром диэлектрической опоры искажающего электрода. Расчёт распределения напряжения в искровом промежутке осуществлялся в программном пакете ELCUT. Конфигурация электрического поля в двухэлектродном разряднике, трехэлектродном разряднике с установкой третьего электрода в искровой промежуток двухэлектродного разрядника и итоговый результат расчета и

выравнивания электрического поля для трехэлектродного разрядника приведены на рисунке 2.

Для формирования поля искажающий электрод выполнен в виде диска, переходящего в цилиндр опоясывающий потенциальный электрод, на конце цилиндра имеется кольцевой наплыв выталкивающий часть поля в сторону потенциального электрода. Также для этой цели служит диэлектрический изолятор искажающего электрода, а также установлен дополнительный диэлектрический формирователь поля на поверхности потенциального электрода.

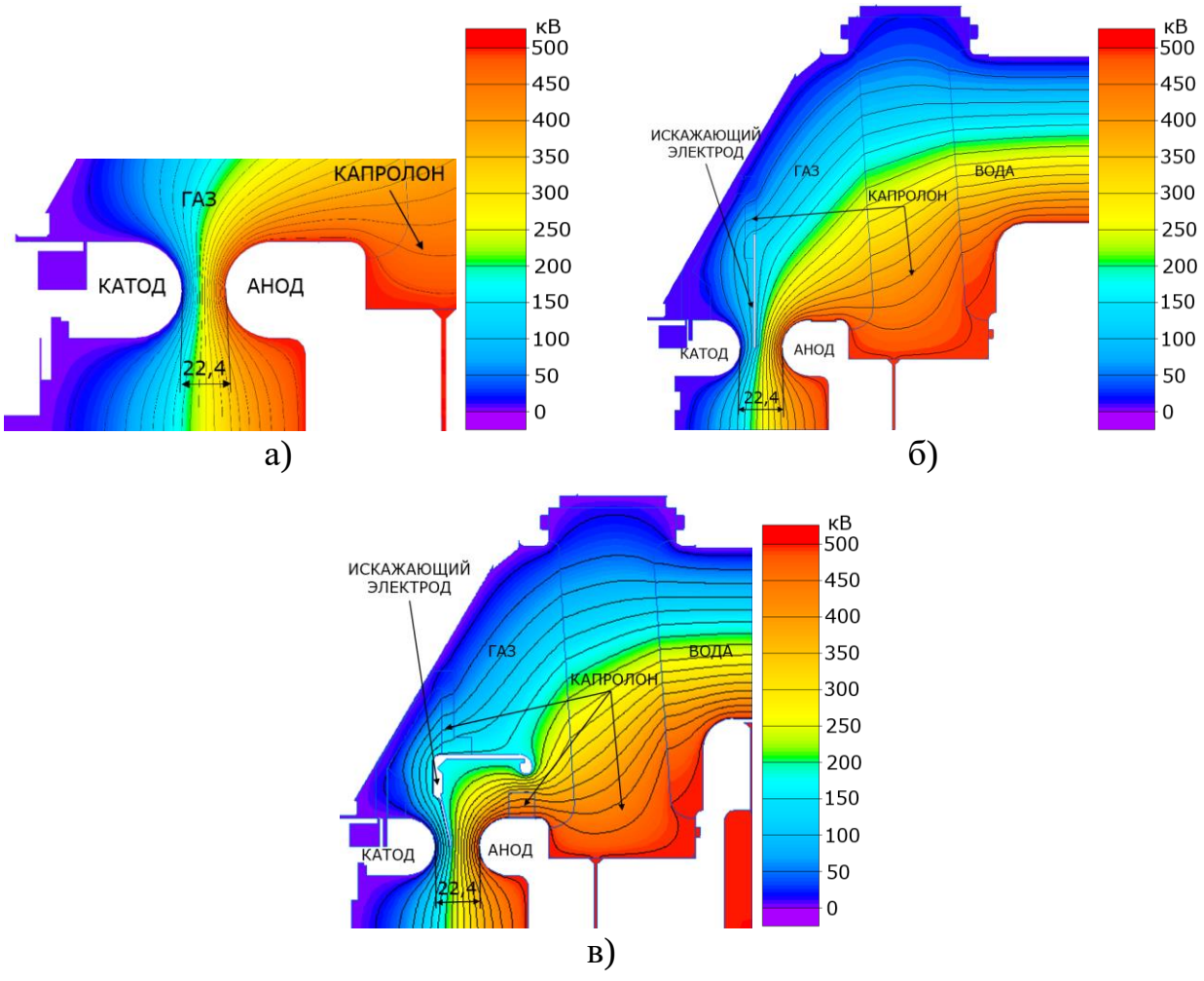

Рис. 2. Конфигурация электрического поля двухэлектродного разрядника (а), расчёт конфигурации электрического поля трехэлектродного разрядника (б), распределение поля в трехэлектродном разряднике после выравнивания (в). Шаг эквипотенциальных линий – 30 кВ.

Графики распределения напряжения и напряженности в искровом зазоре исследуемых конфигураций разрядника приведены на рисунке 3. Из графиков

видно, что подбором конструктивных емкостей удалось получить распределение напряжения и напряженности в искровом зазоре трехэлектродного разрядника практически идентичными распределениям в двухэлектродном разряднике. Тем самым, внедрение третьего (искажающего) электрода не должно существенным образом влиять на максимальное напряжение срабатывания разрядника.

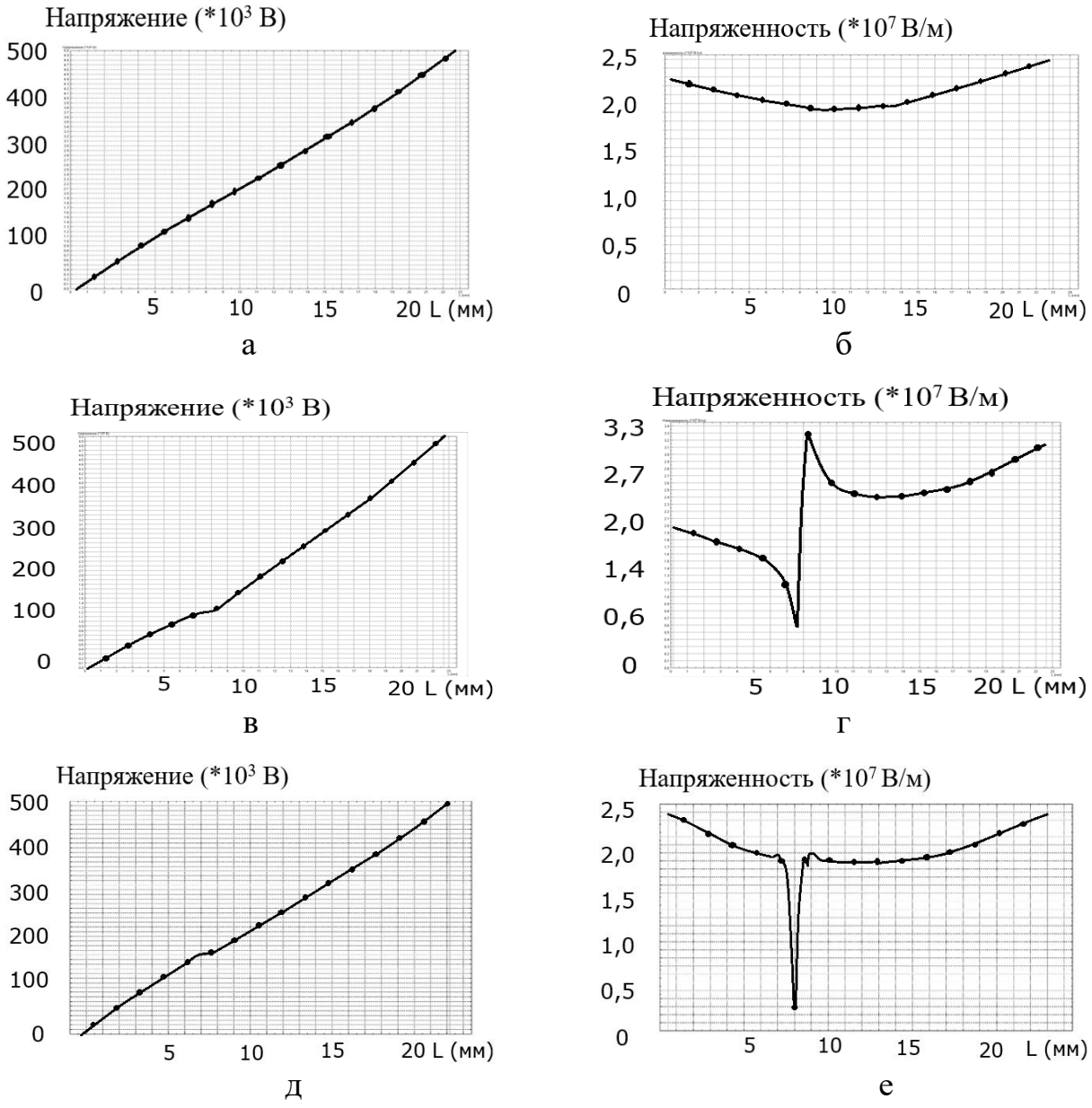

Рис. 3. Распределение напряжения (а) и напряженности (г) в межэлектродном зазоре двухэлектродного разрядника, распределение напряжения (б) и напряженности (д) в межэлектродном зазоре трехэлектродного разрядника без выравнивания поля и распределение напряжения (в) и напряженности (е) в межэлектродном зазоре трехэлектродного разрядника с выравниванием поля.

Стоит отметить, что просадка напряженности на рисунке 3г обусловлена наличием металлического острия третьего электрода в искровом промежутке. В конфигурации без принудительного распределения поля можно заметить, что распределение напряжения в искровом промежутке неравномерно, а напряженность поля носит неоднородный характер. Это означает, что внедрение искажающего электрода должно существенно влиять на максимальное напряжение срабатывания разрядника.

Степень неоднородности электрического поля между электродами характеризуется коэффициентом неоднородности $К_н$, который равен отношению максимальной напряженности $Е_{макс}$ к средней напряженности $Е_{ср}$ поля между электродами:

$$К_н = \frac{Е_{макс}}{Е_{ср}}. \quad (1)$$

Средняя напряженность поля между электродами равна отношению разности напряжений между электродами U к величине зазора l между электродами:

$$Е_{ср} = \frac{U}{l}. \quad (2)$$

Используя соотношения можно вычислить степень неоднородности поля для каждой конфигурации разрядника. Для двухэлектродной конфигурации разрядника степень неоднородности равняется 1,17, для трехэлектродной конфигурации степень неоднородности соответственно 1,43 без формирования электрического поля и 1,1 при формировании равномерного электрического поля в искровом промежутке.

2. Конструкция

Конструкция исследуемого разрядника приведена на рисунке 4. Основные электроды двухэлектродной конфигурации (Рис. 4а) имеют тороидальную форму с внешним диаметром 118 мм, внутренним диаметром 58 мм со скругленными в рабочей зоне торцами и выполнены из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Межэлектродное расстояние равно 22,4 мм. В конфигурации с введением в искровой промежуток искажающего электрода без выравнивания электрического поля (Рис. 4б) электрод представляет собой диск из нержавеющей стали 12Х18Н10Т толщиной 1 мм со скругленной кромкой, закрепленный на изоляторе диаметром 272 мм, изготовленном из капролона. В конфигурации с выравниванием электрического поля (Рис. 4в, г) искажающий электрод представляет собой диск из нержавеющей стали 12Х18Н10Т толщиной 1 мм, искривленный вблизи заземленного электрода для совпадения его поверхности с направлением эквипотенциали электрического поля в искровом зазоре. Внутренняя кромка имеет закругление радиусом 0,5 мм. Далее искажающий электрод приобретает цилиндрическую форму для формирования электрического поля. Внешний диаметр цилиндра равен 184 мм с толщиной стенки 2 мм и общей длиной 50,5 мм. Данная поверхность охватывает потенциальный электрод, на конце цилиндрической части имеется каплевидный наплыв радиусом 3 мм. Он необходим, прежде всего, для исключения зажигания коронного разряда на острой кромке, а также для формирования требуемой конфигурации электрического поля. Искажающий электрод крепится на диэлектрическом держателе в виде чашки диаметром 272 мм, выполненной из капролона. На поверхности потенциального электрода также имеется диэлектрический формирователь поля из капролона внешним диаметром 144 мм и толщиной 13,5 мм. Формирователь поля служит для окончательного формирования электрического поля необходимой конфигурации.

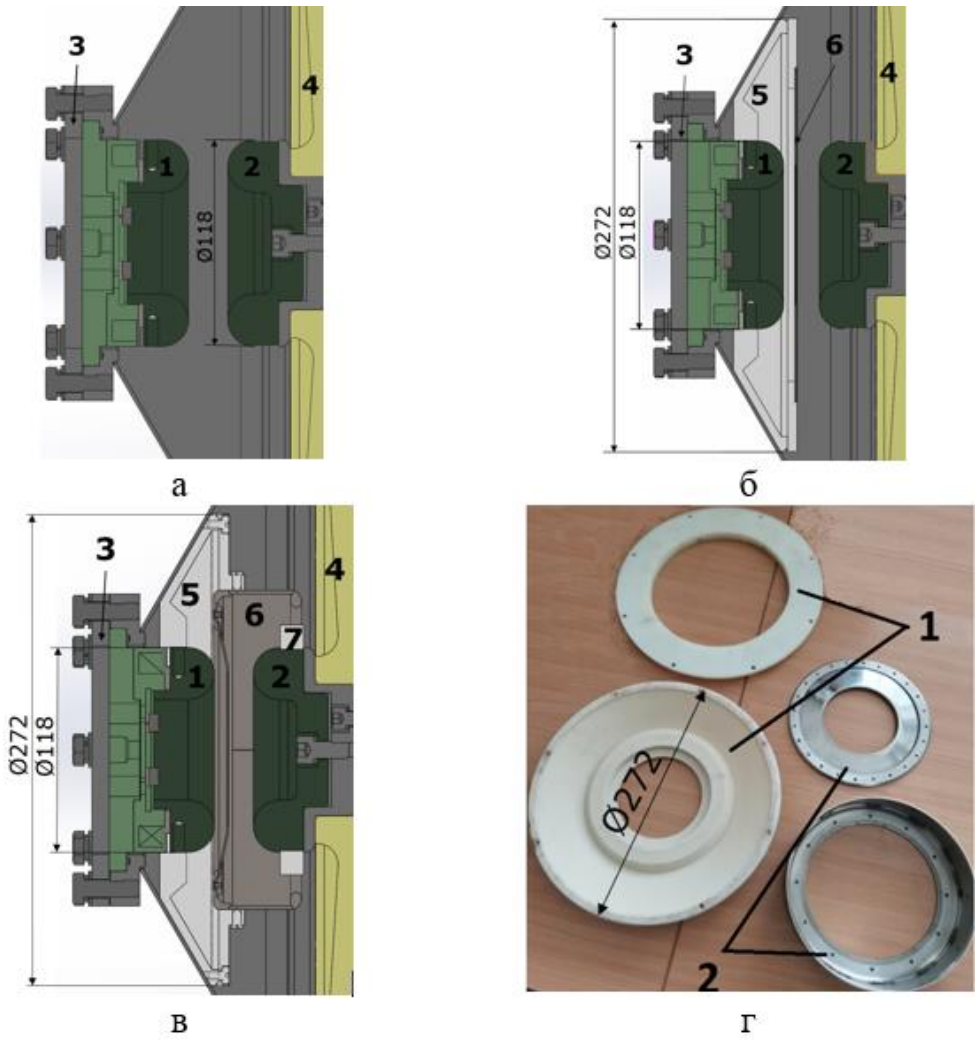

Рис. 4. Разрез модели двухэлектродного разрядника (а), трехэлектродного разрядника без выравнивания поля (б), трехэлектродного разрядника с выравниванием электрического поля (в) и фотография деталей искажающего электрода с диэлектрическим держателем трехэлектродного разрядника с выравниванием поля (г). Обозначения на рисунках: 1 – заземленный электрод, 2 – высоковольтный электрод, 3 – корпус разрядника, 4 – капролоновый шайбовый изолятор, 5 – изолятор искажающего электрода, 6 – искажающий электрод, 7 – формирователь поля из капролона.

3. Испытания

Изготовленная конструкция поочередно устанавливалась на генератор ускорителя, представляющий собой двойную формирующую линию (ДФЛ) с водяной изоляцией (Рис. 5). Измерения напряжения проводились с помощью двухкаскадного делителя напряжения, первый каскад жидкостный, второй – резистивный. Делитель напряжения находится на расстоянии порядка 300 мм по направлению от узла разрядника к вакуумной камере с нагрузкой.

Из-за малого времени пробега волны от узла разрядника до делителя напряжения погрешность измерения напряжения можно считать ничтожно малой. Пояс Роговского для измерения тока, протекающего в разряднике, находится в теле заземленного электрода. В качестве рабочей нагрузки используется передающая линия либо вакуумный диод.

Волновое сопротивление линии 9,3 Ом, электрическая длина 60 нс, Время зарядки формирующей линии порядка 1 мкс, разрядник настраивался так, чтобы пробой происходил на уровне 0,9 от напряжения удержания.

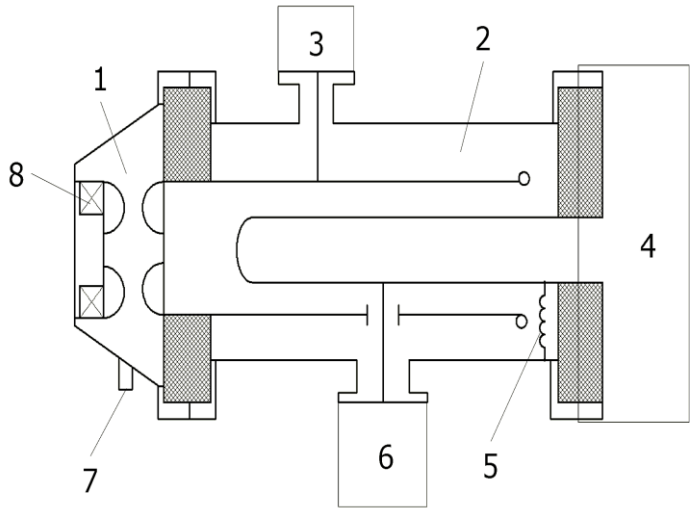

Рис. 5. Схема эксперимента. 1 – узел разрядника, 2 – ДФЛ,
3 – делитель напряжения, 4 – нагрузка, 5 – зарядная индуктивность,
6 – зарядный генератор, 7 – штуцер для подачи газа, 8 – пояс Роговского.

Для контроля размеров и количества отпечатков искровых каналов на поверхности разрядника применялся спирторастворимый краситель «нигрозин». Краситель наносился на поверхность электродов перед каждым срабатыванием разрядника с последующей разборкой и фотографированием поверхностей электродов с отпечатками искровых каналов.

В экспериментах для фиксации характеристик существующего конструктива для начала использовался двухэлектродный разрядник.

4. Результаты и обсуждения

На рисунке 6 представлены синхронизированные по времени характерные осциллограммы тока разрядника и напряжения на ДФЛ.

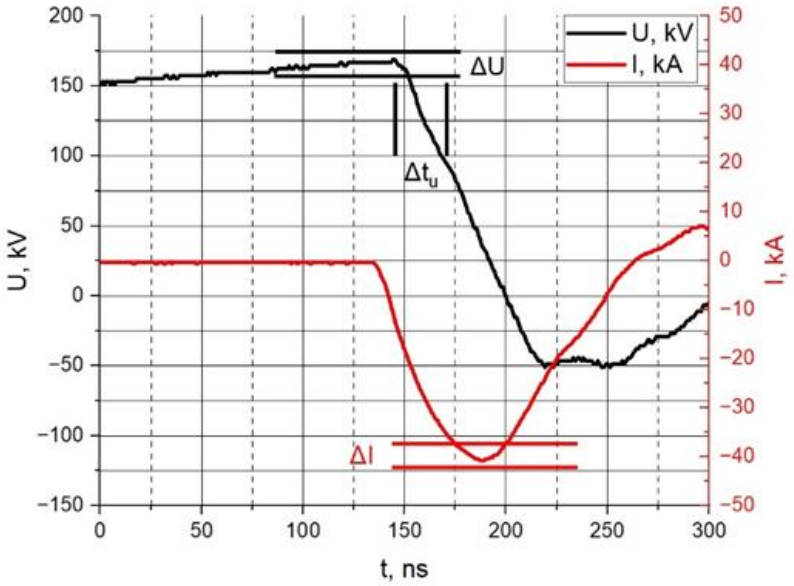

Рис. 6. Характерные осциллограммы тока разрядника и напряжения на ДФЛ (двухэлектродный разрядник при атмосферном давлении).

Сравнительная оценка результатов работы различных конфигураций разрядника производилась по пятидесяти одиночным срабатываниям разрядника при различных давлениях газа. В таблице 1 представлены значения превышения давления газа (P, атм.) над уровнем атмосферного давления; среднего тока, протекающего через разрядник (Iср, кА); разброса значения тока, протекающего через разрядник (ΔI, кА); среднего напряжения на ДФЛ при срабатывании разрядника (Uср, кВ); разброса напряжения на ДФЛ при срабатывании разрядника (ΔU, кВ); времени нарастания фронта тока в искровом промежутке (tф, нс); джиттера времени срабатывания относительно времени начала подачи зарядного импульса (Δtu, нс), а также количества срабатываний, при которых произошла многоканальная коммутация в % от их общего количества.

Проанализировав данные из таблицы 1 можно заметить, что напряжение самопробоя для двухэлектродного разрядника, заполненного элегазом несколько ниже теоретических данных, которые составляют 89,5 кВ/см [16]. Это происходит по причине изначально неоднородного распределения напряженности электрического поля в искровом зазоре, в результате которого напряженность вблизи высоковольтного электрода имеет более высокое значение (Рис. 3в).

Таблица 1. Основные характеристики коммутации.

Конфигурация	P, атм.	$I_{ср}$, кА	ΔI, кА	$U_{ср}$, кВ	ΔU, кВ	$t_ф$, нс	Δtu, нс	%
2-х электродный разрядник	0	39,7	11,7	168,5	8,3	34,9	8,5	0
	0,5	55,2	15,2	228,7	6,9	34,0	8,2	0
	1	76,4	21,9	301,5	5,8	33,5	6,7	4
3-х электродный разрядник без моделирования	0	35,3	11,0	154,0	11,6	35,9	5,2	4
	0,5	49,0	14,4	202,1	12,9	34,7	4,9	20
	1	61,0	15,9	257,7	14,3	33,2	4,6	36
3-х электродный разрядник с моделированием	0	35,2	11,3	156,2	7,7	34,5	5,6	16
	0,5	50,3	13,4	203,8	7,3	32,4	5,4	60
	1	67,4	15,2	262,8	7,3	32,3	5,3	74

На рисунке 7 представлены характерные фотографии электродов узла разрядника с отпечатками, отмеченными контуром, после искрового пробоя разрядного промежутка. На рисунке 7в изображен заземленный электрод трехэлектродного разрядника с видимой кромкой искажающего электрода. Красным контуром обведены отпечатки после многоканального искрового пробоя с кромки искажающего электрода в сторону высоковольтного электрода (3 видимых канала), а зеленым контуром – отпечаток после искрового пробоя с искажающего электрода на заземленный электрод. Для двухэлектродного разрядника после срабатывания наблюдался один искровой канал при давлении газа равном атмосферному и 0,5 атм. При давлении равном 1 атм., в подавляющем большинстве случаев наблюдается одноканальный пробой искрового промежутка. Многоканальный пробой искрового промежутка фиксировался два раза. При сравнении осциллограмм одноканального и многоканального пробоя искрового промежутка в двухэлектродном разряднике различий не выявлено. При визуальном исследовании поверхности электродов трехэлектродного разрядника многоканальный характер пробоя искрового промежутка наблюдался во всем диапазоне исследуемых давлений газа. При повышении давления газа от атмосферного на 1 атм. количество многоканальных пробоев возрастает до 74 % в конфигурации с вырваниванием поля.

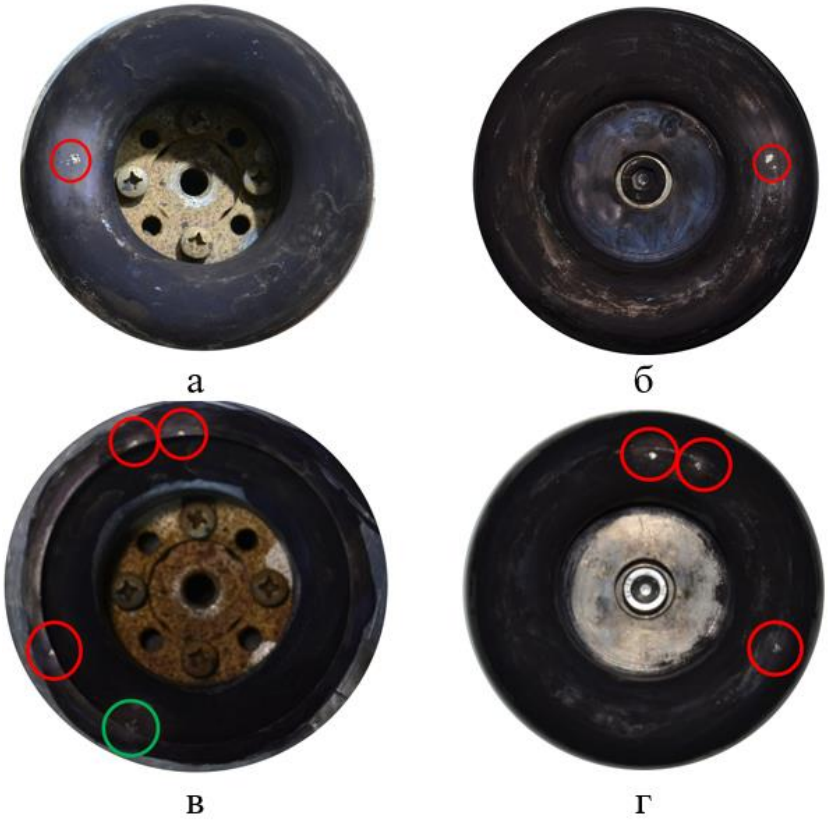

Рис. 7. Характерные фотографии электродов узла разрядника с отпечатками после искрового пробоя разрядного промежутка для заземленного электрода двухэлектродного разрядника (а), высоковольтного электрода двухэлектродного разрядника (б), заземленного электрода трехэлектродного разрядника с выравниванием электрического поля и видимой кромкой искажающего электрода (в) и высоковольтного электрода трехэлектродного разрядника с выравниванием электрического поля (г).

Для разрядника с выравниванием поля процент многоканальных срабатываний выше при одинаковом давлении газа. Характер искрового пробоя также отличается. В разряднике без выравнивания электрического поля большое количество пробоев происходит через поверхность искажающего электрода одним искровым каналом, в то время как в разряднике с выравниванием электрического поля многоканальный пробой в основном происходит по кромке искажающего электрода. Отсутствие многоканальности негативно сказаться на ресурсных характеристиках разрядника.

Заключение

Введение третьего электрода в искровой зазор после моделирования электрических полей и их выравнивания по длине искрового зазора в зависимости от давления газа в разряднике снижает напряжение срабатывания на 7,3 ÷ 12,8 % относительно двухэлектродной конфигурации разрядника, что является незначительной величиной. Без выравнивания электрического поля снижение напряжения срабатывания относительно двухэлектродной конфигурации составляет 8,6 ÷ 14,5 %. Вероятность возникновения многоканального пробоя в трехэлектродной конфигурации разрядника в сравнении с двухэлектродной конфигурацией возрастает, достигая 74 % от числа всех срабатываний при условии выравнивания электрического поля. В трехэлектродной конфигурации без выравнивания электрического поля при максимальном исследуемом давлении многоканальность наблюдалась только в 36 % срабатываний, что значительно меньше чем в случае выравнивания электрического поля в искровом зазоре.

Выполнение моделирования электрического поля и его выравнивание в искровом зазоре не имеет большого смысла с точки зрения максимального напряжения срабатывания, но имеет смысл с точки зрения получения многоканального пробоя и уменьшения эрозии электродов.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что третий электрод можно использовать для подачи на него управляющего импульса при управляемом режиме работы разрядника имея незначительное понижение напряжения.

Определён джиттер времени срабатывания разрядника. Сравнение с двухэлектродной конфигурацией показало уменьшение джиттера времени (Δtu, нс) на 20,9 ÷ 34,1 % при использовании третьего электрода и выравнивании электрического поля и 31,3 ÷ 40,2 % без выравнивания электрического поля. Время нарастания фронта тока (tф, нс) при этом изменилось менее значительно. Для трехэлектродной конфигурации с выравниванием электрического поля в зависимости от давления снижение составило 1,4 ÷ 4,7 %, а без выравнивания электрического поля при атмосферном давлении газа и превышении давления на 0,5 атм. произошло небольшое увеличение фронта тока на 2,9 % и 2,1 %

соответственно. При давлении на 1 атм. выше атмосферного уменьшение фронта тока составило 0,9 %. Столь малое изменение фронта тока связано вероятнее всего с тем, что индуктивность искры составляет порядка 10 % от индуктивности всего разрядного контура. Поэтому получить время нарастания фронта тока короче 30 нс в данной конфигурации разрядника представляется маловероятным вследствие большой индуктивности всего разрядного контура. В дальнейшем планируется испытание низкоиндуктивного разрядника.

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23-19-00614).

Литература

1. Mesyats G. A. Repetitively pulsed high-current accelerators with transformer charging of forming lines / G. A. Mesyats, S. D. Korovin, A. V. Gunin [et al.] // Laser and Particle Beams. – 2003. – Vol. 21, No. 2. – P. 197-209. – https://doi.org/10.1017/S0263034603212076.
2. Rostov V. V. High-Current Pulsed-Repetitive Electron Accelerator "Sinus-320": Formation and Diagnostics of a Wide-Aperture Beam / V. V. Rostov, V. V. Barmin, V. F. Landl [et al.] // Russian Physics Journal. – 2019. – Vol. 62, No. 7. – P.1253-1259. – https://doi.org/10.1007/s11182-019-01842-5
3. Meek J. M. Electrical Breakdown of Gases / J. M. Meek, J. D. Craggs / / Oxford: Clarendon Press, 1953. – 542c.
4. Козлов Б. А. Времена срабатывания искровых разрядников-обострителей при давлениях до 140 атмосфер / Б. А. Козлов, Д. С. Маханько // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2023. – № 84. – С.234-245. – https://doi 10.21667/1995-4565-2023-84-234-245
5. Bykov N. M. Operating features of a high-voltage spark gap switch with gas blow normal to the breakdown path in a repetitively pulsed mode / N. M. Bykov, A. V. Gunin, S. D. Korovin, Yu. D. Korolev // Instruments and Experimental Techniques. – 2008. – Vol. 51, No. 6. – P.838-845. – https://doi.org/10.1134/S0020441208060110

6. Ландль Н. В. Стабильность срабатывания двухэлектродных разрядников высокого давления в режиме самопробоя при напряжениях несколько сотен киловольт / Н. В. Ландль, Ю. Д. Королев, В. В. Ростов // Proceedings of 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE–2024) / Tomsk, Russia. 2024. С.406 – 411.
7. Воробьев Г. А. Техника формирования высоковольтных наносекундных импульсов / Г. А.Воробьев, Г. А. Месяц // М., Госатомиздат, 1963.
8. Kharlov V. A. Arc Motion and Electrode Erosion in High-Current Rail Spark Gaps / A. V. Kharlov // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2010. – Vol. 38, No. 9. P.2474-2478. – https://doi.org/10.1109/TPS.2010.2052929
9. Engel T. G. Review of the mechanisms of electrode and insulator erosion and degradation in high current arc environments / T. G. Engel, S. L. Wester, M. Kristiansen and A. L. Donaldson // IEEE Transactions on Magnetics. –1995. – Vol. 31, No. 1. – P.709 – 713. – https://doi.org/10.1109/20.364606
10. Месяц Г. А. Генерирование мощных наносекундных импульсов / Месяц Г. А. – М.: Советское радио, 1974. – 256с.
11. Martin J. C. Multichannel gaps. Aldermaston, Berks, 1970, SSWA(JCM).
12. Bell W. R. Tarantula—100 kV pinch discharge apparatus for studying shock waves / W .R. Bell, A. E. Bishop, H. J. Crawley, G. D. Edmonds [et al.] // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers Volume 113, Issue 12. – https://doi.org/10.1049/piee.1966.0365
13. Ковальчук Б. М. Сильноточные наносекундные коммутаторы / Б. М. Ковальчук, В. В. Кремнев, Ю. Ф. Поталицын. – Новосибирск: Наука, 1979. – 175 с.
14. Bluhm H. Pulsed Power Systems: Principles and Applications / H. Bluhm / Springer. – 2006. – https://doi.org/10.1007/3-540-34662-7
15. Маханько Д. С. Электрическая прочность конструкции неуправляемого разрядника-обострителя на напряжение до 500 кВ / Д. С. Маханько // Вестник Рязанского Государственного Радтотехнического Университета. – 2021. – №78. – С.188-197. – https://DOI 10.21667/1995-4565-2021-78-188-197

16. Гохберг Б. М. Элегаз — электрическая газовая изоляция / Б. М. Гохберг // «Электричество». – Москва: Госэнергоиздат. – 1947. – №3. – С.15.

Для цитирования:

Курапов Г.Н., Бухаркин А.А., Журавлёв М.В., Глумац П., Курапова Е.А., Ремнёв Г.Е. Моделирование электрических полей трехэлектродного разрядника в сжатом газе с «искажением поля» и сравнение его коммутационных характеристик с двухэлектродным разрядником на самопробое. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. №. 11. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.12