

Повышение энергии инициирующего искрового разряда с целью уменьшения и стабилизации времени задержки в компактном вакуумном разряднике

С. Г. Давыдов, А. Н. Долгов, А. А. Козлов, Р. Х. Якубов

Установлено сходство механизмов коммутации компактных вакуумных искровых разрядников и разрядников с лазерным поджигом при сравнимом уровне плотности потока энергии в узле поджига – ионизация остаточного газа потоком коротковолнового излучения и быстрых электронов из плазмы катодного пятна или лазерной плазмы. Указанный механизм позволяет эффективно уменьшать задержку срабатывания разрядника путем повышения энергии поджига. Проведено экспериментальное исследование преимуществ использования схемы поджига с увеличенной энергией для управления малогабаритными вакуумными искровыми разрядниками. Наблюдается устойчивое снижение времени задержки срабатывания разрядника и повышение уровня стабильности задержки. Наиболее эффективно, с точки зрения минимизации и стабильности времени задержки срабатывания разрядника, вложение энергии в формирование инициирующей плазмы происходит на искровой стадии вспомогательного разряда по поверхности диэлектрика в узле поджига.

Ключевые слова: вакуумный разрядник, искровой разряд, дуга, время задержки, схема поджига, разрядник с лазерным управлением.

DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-5-393-401

Введение

В настоящее время высоковольтные управляемые вакуумные коммутаторы применяются в каротажной аппаратуре, высокоскоростной фотографии, устройствах под-

светки быстропротекающих процессов импульсами оптического и рентгеновского излучения, а также в ряде других областей, где определяющими требованиями являются отсутствие накальных цепей, миниатюрность, широкий диапазон коммутируемых токов, устойчивость к внешним воздействиям [1].

В процессе миниатюризации самих высоковольтных коммутаторов вполне естественным оказалось снижение уровня энергии их цепей управления вплоть до величин, приближающихся к энергии, выделяющейся в процессе функционирования нескольких единичных эктонов [2]. Однако допустимо предположить, что наряду с причинами, которые почти неизбежно вызывают явление взрывной эмиссии электронов (наличие микроострий, диэлектрические включения на поверхности катода и т. д.), существуют

Давыдов Сергей Геннадьевич, нач. научно-исследовательской лаб., к.т.н.

Долгов Александр Николаевич, в.н.с., д.ф.-м.н.

Козлов Александр Андреевич, инженер II кат.

E-mail: aleksandr-kozlov95@rambler.ru

Якубов Рустам Халимович, нач. научно-конструкторского отделения, к.т.н.

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова».

Россия, 127055, Москва, ул. Сушэвская, 22.

Статья поступила в редакцию 25 мая 2021 г.

© Давыдов С. Г., Долгов А. Н., Козлов А. А., Якубов Р. Х., 2021

причины, которые могут затруднять образование центров взрывной эмиссии электронов и развитие дугового разряда в коммутаторе. В работе [3] приводился пример затягивания процесса коммутации малогабаритного вакуумного искрового разрядника, вызванного, предположительно, воздействием облака газа, десорбированного с поверхности диэлектрика в узле поджига в результате развития паразитного слаботокового разряда. Некоторое увеличение энергии поджига сверх необходимого минимума может оказаться полезным для повышения надежности срабатывания и стабильности соответствующих параметров.

Цель представляемой работы – изучить возможные преимущества использования схемы поджига с увеличенной энергией для управления малогабаритными вакуумными искровыми разрядниками.

Постановка экспериментов

Влияние энергии схемы поджига на время задержки срабатывания разрядника

Используемые в проведённых исследованиях компактные управляемые вакуумные разрядники представляют собой трёхэлектродную коаксиальную систему, основными элементами которой являются анод, катод, поджигающий электрод и диэлектрическая шайба, разделяющая катод и поджигающий электрод (рис. 1).

Разрядное устройство размещается в отпаянном герметичном диэлектрическом корпусе, откачиваемом до давления не хуже 10^{-3} мм рт. ст. Electroды были выполнены из алюминиевого сплава, диэлектрическая шайба выполнялась из слюды толщиной 0,1 мм. Диаметр внутреннего цилиндрического электрода (катод) составляет 5 мм. Внешний электрод (анод) выполнен в виде полого цилиндра и имеет внутренний диаметр 7 мм. Между диэлектрической шайбой и прилегающими электродами соосно с ними размещаются дополнительные металлические втулки, каждая толщиной 0,1 мм и

соответствующего диаметра, причем втулка между диэлектрической шайбой и поджигающим электродом – коваровая, а между диэлектрической шайбой и катодом – коваровая и титановая. Таким образом, поджигающий электрод, ближайшая к нему кромка катода, дополнительные металлические прокладки и диэлектрическая шайба вместе составляют узел поджига.

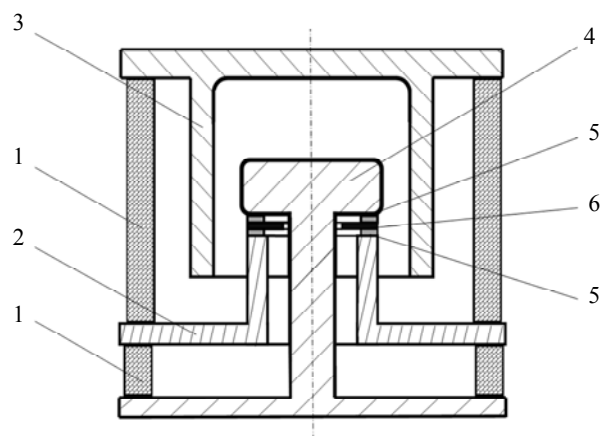


Рис. 1. Принципиальная конструкция компактного вакуумного искрового разрядника: 1 – диэлектрическая герметичная оболочка разрядника; 2 – поджигающий электрод; 3 – анод; 4 – катод; 5 – вспомогательные металлические втулки; 6 – диэлектрическая шайба.

В режиме работы разрядника с энергией поджига, близкой к минимальной, но обеспечивающей надежное срабатывание, для инициирования процесса его коммутации на поджигающий электрод подается положительный относительно катода (катод заземлен) импульс напряжения амплитудой 3,5 кВ и крутизной $(1-2) \times 10^9$ В/с. В узле поджига происходит пробой по поверхности диэлектрической шайбы между поджигающим электродом и катодом. При этом плазма, образованная продуктами эрозии, создает проводящую среду в промежутке катод–анод. Амплитуда силы тока поджига составляет 4–6 А при длительности основной части импульса тока около 20 нс (см. рис. 2, а). Далее в тексте электрическую схему, реализующую указанный режим поджига, для краткости будем называть первичной схемой.

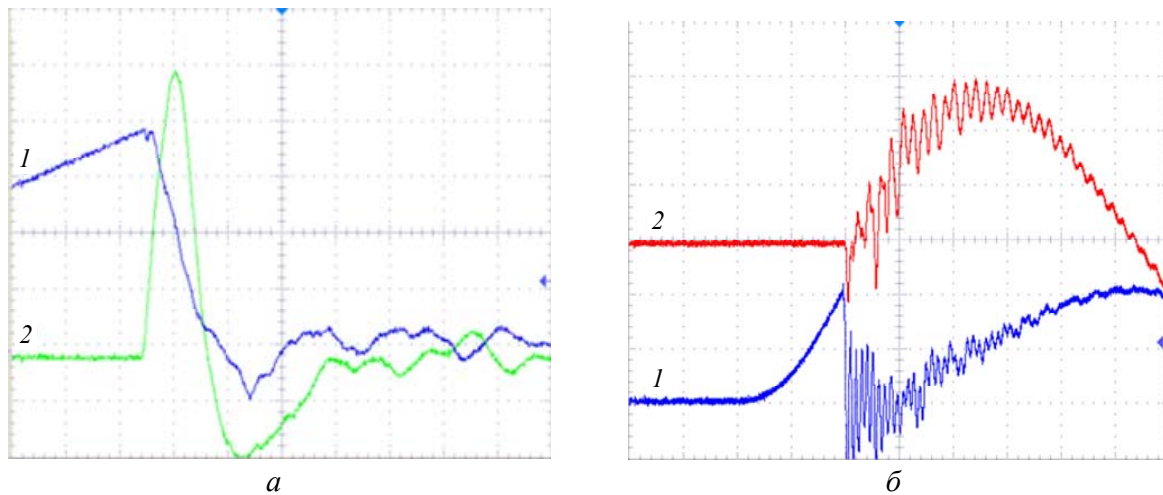


Рис. 2. Электрические процессы в разряднике. а) – Осциллограммы напряжения и тока в узле поджига при использовании первичной схемы: луч № 1 – напряжение в узле поджига, луч № 2 – ток в узле поджига. Чувствительность: луч № 1 – 250 В/дел, луч № 2 – 1 А/дел. Развертка: 20 нс/дел; б) – Осциллограммы напряжения поджига и коммутируемого тока в промежутке катод–анод: луч № 1 – напряжение поджига, луч № 2 – ток в промежутке катод–анод. Чувствительность: луч № 1 – 625 В/дел, луч № 2 – 1 кА/дел. Развертка: 200 нс/дел.

В качестве испытуемого образца был выбран разрядник, функционирующий в режиме с напряжением 1,5 кВ на промежутке катод–анод. При использовании первичной схемы поджига задержка тока, коммутируемого разрядником, хаотично изменялась в интервале от 200 до 1500 нс. Кроме того, для поджига был использован набор схем с емкостным накопителем энергии, в которых накопитель энергии коммутировался на узел поджига испытуемого разрядника другим разрядником той же конструкции, запускаемым от первичной схемы поджига и имеющим фиксированную задержку <100 нс. Варьируя величину емкости накопителя энергии (100, 1000, 12000 пФ) и значение

напряжения на ее обкладках (1, 2, 3 кВ), можно было в широком диапазоне менять величину энергии, подводимой к поджигающему промежутку испытуемого разрядника.

Коммутируемый ток представляет собой импульсный сигнал амплитудой 2,5 кА, по форме близкий к синусоидальному с периодом 2 мкс. Продолжительность импульса тока составляла 1 или 2 полупериода (см. рис. 2, б). Измерения коммутируемого тока производились путем регистрации напряжения на низкоиндуктивном сопротивлении номиналом 0,1 Ом, включенном последовательно в цепь разрядника и конденсаторной батареи емкостью 0,5 мкФ (см. рис. 3).

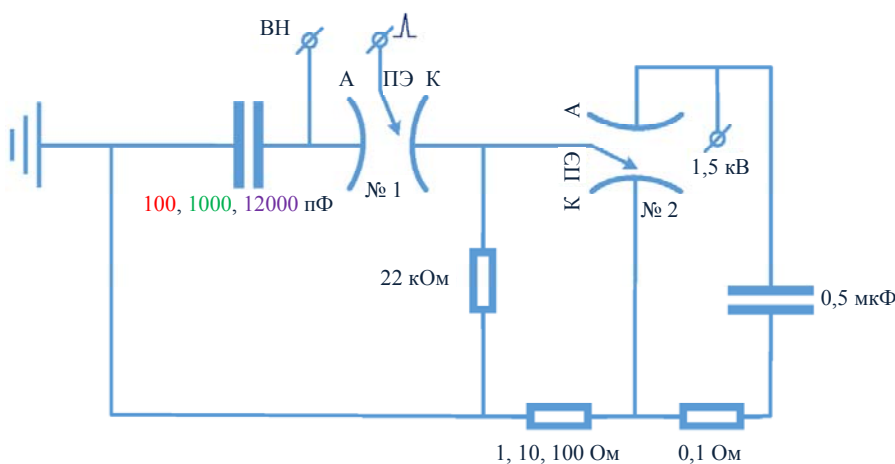


Рис. 3. Электрическая схема эксперимента. Обозначения: № 1 и № 2 – разрядник, работающий с первичной схемой поджига, и испытуемый разрядник. ВН – вход высокого напряжения для цепи, коммутируемой разрядником № 1, в которой формируется импульс поджига для испытуемого разрядника № 2. А, К и ПЭ – анод, катод и поджигающий электрод разрядников.

Измеряемыми параметрами процесса коммутации являлись задержка возникновения тока дугового разряда, импульсное напряжение пробоя и ток в промежутке катод–поджигающий электрод. Задержка измерялась как временной интервал от момента пробоя по поверхности диэлектрика в узле поджига (момент начала резкого спада напряжения поджига) до момента возникновения коммутируемого тока в цепи испытуемого разрядника (№ 2 на рис. 3). Напряжение на промежутке катод–поджигающий электрод в цепи испытуемого разрядника измерялось с помощью емкостного или резистивного делителя напряжения. Сила тока регистрировалась путем измерения напряжения на низкоиндуктивном сопротивлении номиналом 1–100 Ом (рис. 3).

Для анализа фиксируемых изменений задержки были построены диаграммы распределения задержки при разных уровнях энергии схемы поджига. Диаграммы представляют собой функции распределения задержек, нормированные на полное число коммутаций (рис. 4). Они позволяют визуально оценить величину задержки и её стабильность, а также наглядно увидеть изменение функции распределения задержек в

зависимости от уровня энергии схемы поджига.

Схема с параметрами $C = 100$ пФ, $U = 1$ кВ являлась самой близкой по энергии к первичной схеме (5×10^{-5} Дж и 1×10^{-5} Дж соответственно), в связи с этим они имеют близкие распределения задержек. Увеличение напряжения на конденсаторе в этой же схеме приводит к сокращению диапазона задержек до 300 нс, к увеличению стабильности времени задержки (на диаграмме появляются столбцы, высота которых значительно превышает высоту других) и к уменьшению разброса (ширина столбцов уменьшается). Использование схемы с ещё большей энергией ($C = 1000$ пФ, $U = 1$ кВ) привело к сокращению диапазона задержек до 200 нс. Увеличение напряжения на конденсаторах данной схемы до 2 и 3 кВ также привело к дальнейшему уменьшению диапазона задержек до 100 нс и значительному увеличению стабильности задержки, что наглядно показывает диаграмма на рис. 4. Дальнейшее увеличение энергии схемы ($C = 12000$ пФ, $U = 1, 2, 3$ кВ) не привело к значительному уменьшению диапазона задержек (рис. 5), но все же позволило достичь большей стабильности в значениях задержки.

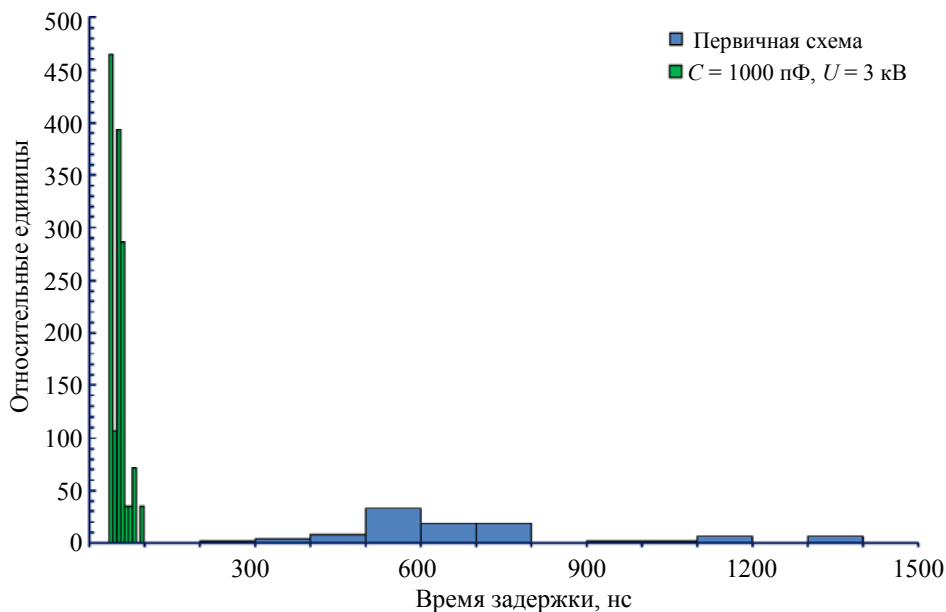


Рис. 4. Сравнение диаграмм распределения задержек для первичной схемы поджига (1×10^{-5} Дж) и схемы с энергией $4,5 \times 10^{-3}$ Дж ($C = 1000$ пФ, $U = 3$ кВ).

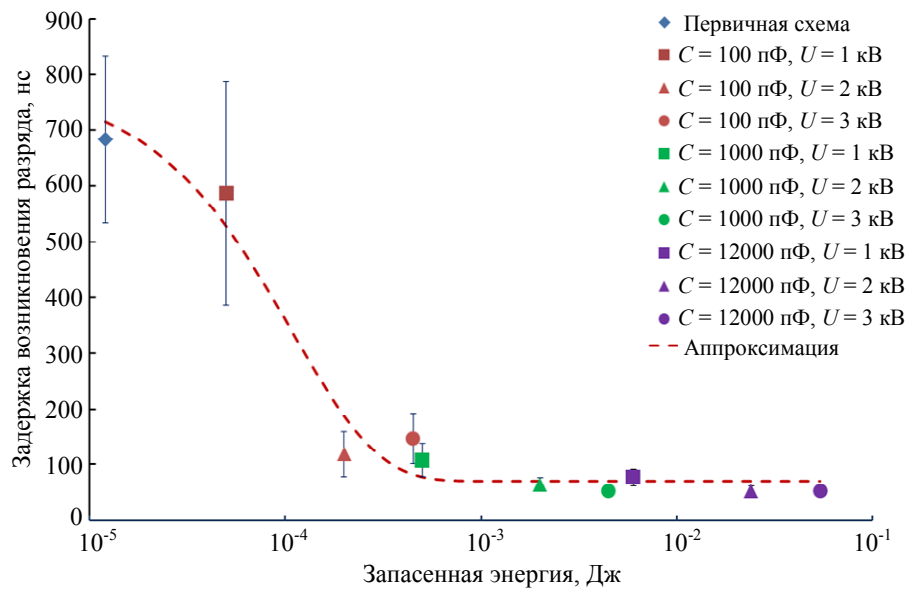


Рис. 5. График зависимости времени задержки возникновения дугового разряда в промежутке катод–анод от энергии, запасенной в схеме поджига.

В качестве аппроксимации экспериментальной зависимости времени задержки t от энергии, запасаемой в схеме поджига E , на рис. 5 пунктирной линией показан график функции:

$$t[\text{нс}] = 70 + 832 \times \exp\left(-\frac{E[\text{Дж}] - 1,58 \times 10^{-5}}{1,10 \times 10^4}\right).$$

Приведенная функция может быть полезна для практического использования. Например, при заданном времени задержки с помощью указанной функции можно определить минимальную необходимую энергию поджига.

Оценка эффективности использования схемы поджига

При варьировании энергии, запасаемой в схеме поджига, надо было сравнивать не только то, в какой степени изменение параметров используемой схемы улучшает коммутационные характеристики разрядника, но и сравнивать эффективность конверсии запасенной энергии схемы в энергию искрового разряда по поверхности диэлектрика, который инициирует срабатывание прибора.

Чтобы оценить эффективность использования вкладываемой в поджиг энергии,

необходимо установить, какая энергия выделяется в искровом разряде по поверхности диэлектрика. С этой целью были использованы зарегистрированные осциллограммы тока и напряжения разряда в узле поджига испытуемого разрядника. По ним восстанавливались зависимости выделяемой мощности от времени, которые затем интегрировались по времени, что позволяло установить величину энергии, выделившейся в разряде. Чтобы установить на какой именно стадии разряда по поверхности диэлектрика вложение энергии наиболее эффективно, интегрирование мощности производилось с варьированием верхнего предела интегрирования, а именно: до момента достижения максимума напряжения, до первого максимума вкладываемой мощности, до первого нуля вкладываемой мощности. В дальнейшем проводился анализ графиков, выражающих зависимость отношения энергии, выделившейся в разряде, к энергии, запасенной в схеме поджига, от энергии, запасенной в схеме поджига.

На рис. 6 и рис. 7 приведены в качестве примера график зависимости мощности, выделяющейся в разряде по поверхности диэлектрика в узле поджига первичной схемы, от времени и диаграмма зависимости доли энергии, вложенной в инициирующий про-

цесс коммутации разряд (при интегрировании до первого нуля мощности – примерно

25 нс после старта разряда), от энергии, запасенной в схеме поджига.

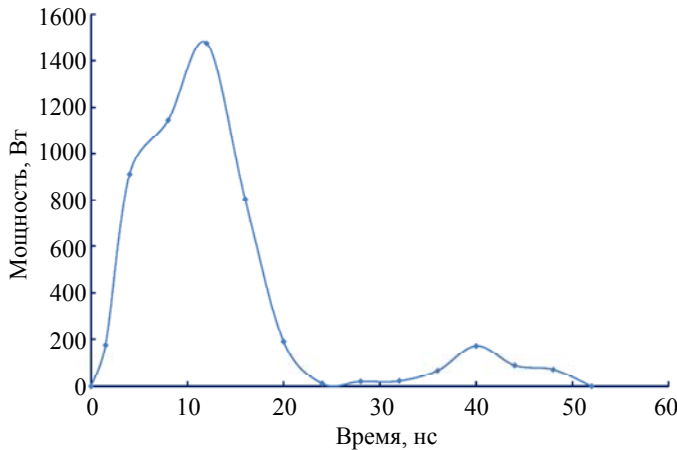


Рис. 6. График зависимости мощности, выделяющейся в разряде по поверхности диэлектрика в узле первичной схемы, от времени.

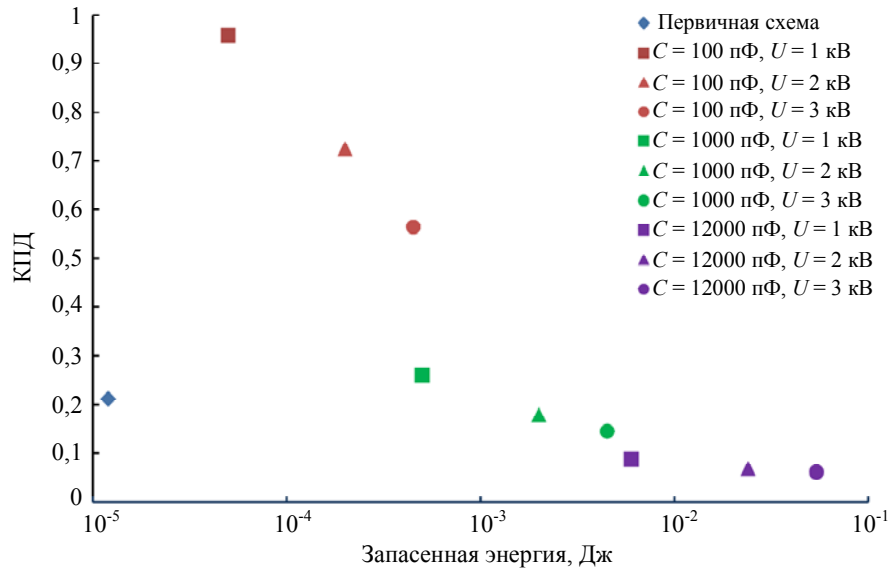


Рис. 7. Диаграмма зависимости доли энергии, вложенной в инициирующий процесс коммутации разряд (при интегрировании до первого нуля мощности), от энергии, запасенной в схеме поджига.

Влияние энергии поджига на стабильность срабатывания разрядника

В описываемых экспериментах энергия, запасенная в коммутируемой испытуемым разрядником цепи, по крайней мере, на порядок величины превышает энергию, запасенную в схеме поджига. Соответственно, эрозионное воздействие разряда в промежутке катод–анод значительно превышает эрозионное воздействие инициирующего разряда в узле поджига на элементы электродной системы разрядника. Важным обстоятельством в данном случае является то, что область возникновения катодного пятна

инициирующего разряда становится областью формирования катодного пятна дугового разряда в промежутке катод–анод [4]. Эрозионное воздействие разряда приводит к постепенному разрушению диэлектрической шайбы в узле поджига, выносу материала электродов и дополнительных металлических втулок. Происходит изменение конфигурации и состояния поверхностей элементов разрядного устройства. В частности, возрастает шероховатость поверхностей, происходит напыление металла на поверхность диэлектрика с одной стороны и появление диэлектрических включений на поверхности электродов с другой. Таким

образом, по крайней мере, изменяются условия зажигания инициирующего разряда, например, импульсное напряжение пробоя по поверхности диэлектрической шайбы.

Существуют определенные возможности для уменьшения воздействия разряда в промежутке катод-анод на элементы узла поджига, связанные с внесением некоторых изменений в конструкцию разрядника, которые ведут к разделению областей формирования инициирующего разряда по поверхности диэлектрика и разряда в промежутке катод-анод [5]. Представляет интерес попытка уменьшить роль эрозионных процессов путем увеличения энергии, запасаемой в схеме поджига.

Проделанные измерения при достаточно большом количестве коммутаций (порядка нескольких сотен) показали, что удается путем повышения используемой энергии поджига сделать процесс функционирования разрядника более стабильным, причем как с точки зрения уменьшения разброса регистрируемых значений импульсного напряжения пробоя так и с точки зрения эволюции среднего значения указанного параметра. Последнее означает увеличение ресурса коммутирующего устройства.

Более того, при увеличении промежутка катод-анод с целью поднять величину коммутируемого напряжения удается путем повышения энергии поджига не допустить увеличения задержки срабатывания разрядника.

Анализ полученных результатов

Проведенные исследования показали возможность управления процессом срабатывания малогабаритного вакуумного искрового разрядника с помощью варьирования энергии, вкладываемой в поджигающий разряд по поверхности диэлектрика. С увеличением энергии схемы поджига наблюдается устойчивое снижение времени задержки срабатывания разрядника и повышение уровня стабильности задержки. Аналогичное явление наблюдалось при варьировании энергии поджигающего излучения для миниатюрных вакуумных разрядников с лазерным поджигом с интенсивностью излучения

в диапазоне 10^8 – 10^9 Вт/см² [6]. При использовании управляющего импульса лазерного излучения длительностью ~ 20 нс, что, кстати, близко к длительности инициирующего импульса напряжения в наших последних экспериментах, наблюдается значительное сокращение времени задержки при увеличении энергии импульса лазерного излучения в диапазоне 10^4 – 10^3 Дж примерно на порядок величины.

Исследования процесса коммутации вакуумного (давление остаточного газа 10^{-3} мм рт. ст.) разрядника с лазерным поджигом при уровне интенсивности на мишене (катод разрядника) $\sim 10^9$ Вт/см² показали, что лазерная плазма является эффективным источником быстрых электронов (скорость $\sim 2 \times 10^8$ м/с и более) и вакуумного ультрафиолетового излучения. Воздействие указанных факторов на остаточный газ приводит к его ионизации и быстрому формированию проводящей среды, т. е. плазмы [7, 8]. В центрах взрывной эмиссии электронов, возникающих в узле поджига вакуумного искрового разрядника на стадии разряда по поверхности диэлектрика, плотность потока энергии также составляет $\sim 10^9$ Вт/см². Имеются данные о том, что и в этом случае поток быстрых электронов и вакуумного ультрафиолета (на этот раз из плазмы катодного пятна) создает начальную проводящую среду путем ионизации остаточного газа [9, 10].

Обнаруживаемое сходство процессов развития разряда в вакууме при его инициировании плазмой катодного пятна вспомогательного разряда по поверхности диэлектрика и лазерной плазмой, формируемой на поверхности катода, при сравнимой энергии поджига и близкого времени формирования инициирующей плазмы обусловлено несомненным сходством механизмов инициирования. Совокупность полученных экспериментальных данных позволяет утверждать, что механизмом, запускающим процесс коммутации при приведенных выше условиях (давление остаточного газа), является ионизация остаточного газа потоком испускаемого из плазмы катодного пятна коротковолнового излучения и быстрых электронов.

Результаты проведенных исследований показали, что при использовании вспомогательного разряда эффективность вложения энергии в формирование инициирующей плазмы падает с увеличением продолжительности импульса протекающего по поверхности диэлектрика тока. Для первичной схемы поджига удалось с учетом индуктивности контура с использованием зарегистрированных осциллограмм тока и напряжения проследить динамику омического сопротивления канала вспомогательного разряда (см. рис. 8).

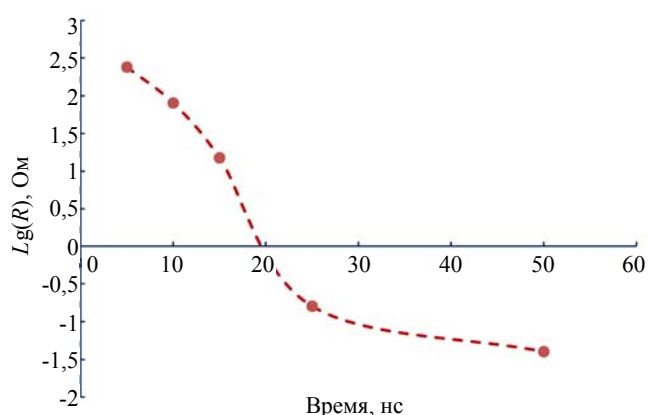


Рис. 8. Зависимость омического сопротивления канала разряда по поверхности диэлектрика в узле поджига разрядника при использовании стандартной схемы поджига.

Как оказалось, наиболее эффективное вложение энергии в формирование инициирующей плазмы происходит в течение первых 20–25 нс вспомогательного разряда, а именно, на его искровой стадии. Т. к. в целом увеличение энергии, запасаемой в схеме поджига, сопровождается увеличением ее индуктивности и емкости, то происходит увеличение продолжительности вспомогательного разряда и падение эффективности использования схемы поджига.

Увеличение энергетики схемы поджига малогабаритного вакуумного искрового разрядника помимо того, что позволяет повысить коммутируемое напряжение (т. е. позволяет повысить электропрочность разрядника без увеличения задержки срабатывания), ведет к увеличению стабильности параметров срабатывания разрядника.

Заключение

Проведенный цикл экспериментов показал, что с увеличением энергии схемы поджига малогабаритного вакуумного искрового разрядника наблюдается устойчивое снижение времени задержки срабатывания разрядника и повышение уровня стабильности задержки.

Наблюдается сходство процессов развития разряда в вакууме при его инициировании плазмой катодного пятна вспомогательного разряда по поверхности диэлектрика и лазерной плазмой, формируемой на поверхности катода, причем при сравнимой энергии поджига и близком времени формирования инициирующей плазмы. Это обусловлено несомненным сходством механизмов инициирования основного разряда. Таким механизмом является ионизация остаточного газа потоком коротковолнового излучения и быстрых электронов из плазмы вспомогательного разряда или лазерной плазмы.

Наиболее эффективно, с точки зрения минимизации и стабильности времени задержки срабатывания разрядника, вложение энергии в формирование инициирующей плазмы происходит на искровой стадии вспомогательного разряда по поверхности диэлектрика в узле поджига.

ЛИТЕРАТУРА

1. Месяц Г. А. Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004.
2. Месяц Г. А. Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. – М.: Наука, 2000.
3. Асюнин В. И., Давыдов С. Г., Долгов А. Н., Корнеев А. В., Пшеничный А. А., Якубов Р. Х. // Электричество. 2018. № 7. С. 31.
4. Асюнин В. И., Бушин С. А., Давыдов С. Г., Долгов А. Н., Пилушенко А. В., Пшеничный А. А., Ревазов В. О., Якубов Р. Х. // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 6. С. 542.
5. Давыдов С. Г., Долгов А. Н., Якубов Р. Х. Вакуумный искровой разрядник. Патент на изобретение № 2654494 (РФ). 2018.
6. Давыдов С. Г., Долгов А. Н., Каторов А. С., Ревазов В. О., Якубов Р. Х. // ПТЭ. 2019. № 6. С. 56.
7. Давыдов С. Г., Долгов А. Н., Каторов А. С., Ревазов В. О., Якубов Р. Х. // ЖТФ. 2020. Т. 90. Вып. 6. С. 919.
8. Давыдов С. Г., Долгов А. Н., Каторов А. С., Ревазов В. О., Якубов Р. Х. // Прикладная физика. 2021. № 1. С. 39.

9. Давыдов С. Г., Долгов А. Н., Корнеев А. В., Пшеничный А. А., Якубов Р. Х. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 1. С. 3.

10. Давыдов С. Г., Долгов А. Н., Корнеев А. В., Якубов Р. Х. // Электричество. 2019. № 8. С. 17.

PACS: 52.80.-s, 52.80.Vp

Increasing the energy of the initiating spark discharge in order to reduce and stabilize the delay time in a compact vacuum breaker

S. G. Davydov, A. N. Dolgov, A. A. Kozlov, and R. H. Yakubov

Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA)
22 Sushchevskaya st., Moscow, 127055, Russia
E-mail: aleksandr-kozlov95@rambler.ru

Received May 25, 2021

The similarity of the switching mechanisms of compact vacuum spark breakers and spark breakers with laser ignition is established at a comparable level of energy flux density in the ignition node—ionization of the residual gas by a stream of short-wave radiation and fast electrons from the cathode spot plasma or laser plasma. This mechanism allows you to effectively reduce the delay in triggering the spark gap by increasing the ignition energy. An experimental study of the advantages of using an ignition circuit with increased energy for controlling small-sized vacuum spark breakers is carried out. There is a steady decrease in the delay time of the spark gap and an increase in the level of delay stability. From the point of view of minimization and stability of the delay time of the spark gap, the energy investment in the formation of the initiating plasma occurs most effectively at the spark stage of the auxiliary discharge along the surface of the dielectric in the ignition node.

Keywords: vacuum spark gap, spark discharge, arc, delay time, ignition circuit, laser-controlled spark gap.

DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-5-393-401

REFERENCES

1. G. A. Mesyats, *Pulsed Power and Electronics* (Nauka, Moscow, 2004) [in Russian].
2. G. A. Mesyats, *Ectons in Vacuum Discharges: Breakdown, Spark, and Arc* (Nauka, Moscow, 2000) [in Russian].
3. V. I. Asyunin, S. G. Davydov, A. N. Dolgov, A. V. Korneev, A. A. Pshenichnyi, and R. K. Yakubov, *Elektrichestvo*, No. 7, 31 (2018).
4. V. I. Asyunin, S. A. Bushin, S. G. Davydov, A. N. Dolgov, A. V. Pilyushenko, A. A. Pshenichnyi, V. O. Revazov, and R. K. Yakubov, *Usp. Prikl. Fiz.* **3** (6), 542 (2015).
5. S. G. Davydov, A. N. Dolgov, and R. K. Yakubov, Vacuum Spark Breaker, Patent for the invention No. 2654494 (Russian Federation), 2018.
6. S. G. Davydov, A. N. Dolgov, A. S. Katorov, V. O. Revazov, and R. K. Yakubov, *Instrument and Experimental Techniques*, **62** (6), 794 (2019).
7. S. G. Davydov, A. N. Dolgov, A. S. Katorov, V. O. Revazov, and R. K. Yakubov, *Tech. Phys.* **90** (6), 919 (2020).
8. S. G. Davydov, A. N. Dolgov, A. S. Katorov, V. O. Revazov, and R. K. Yakubov, *Applied Physics*, No. 1, 39 (2021) [in Russian].
9. S. G. Davydov, A. N. Dolgov, A. V. Korneev, A. A. Pshenichnyi, and R. K. Yakubov, *Usp. Prikl. Fiz.* **7** (1), 3 (2019).
10. S. G. Davydov, A. N. Dolgov, A. V. Korneev, and R. K. Yakubov, *Elektrichestvo*, No. 8, 17 (2019).