

**Минимизация времени задержки и его разброса
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 иницирующей 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: 10.51368/1996-0948-2021-4-19-24

Введение

В настоящее время высоковольтные управляемые вакуумные коммутаторы применяются в каротажной аппаратуре, высокоскоростной фотографии, устройствах подсветки быстротекущих 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, минимально необходимой для образования центров взрывной эмиссии электронов [2]. Однако некоторое увеличение энергии поджига сверх необходимого минимума может оказаться полезным для повышения надежности срабатывания и стабильности соответствующих параметров коммутаторов.

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

Постановка экспериментов

Используемые в проведённых исследованиях компактные управляемые вакуумные

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: alexandr-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. Суцёвская, 22.

Статья поступила в редакцию 25 мая 2021 г.

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

разрядники представляют собой трёхэлектродную коаксиальную систему, основными элементами которой являются анод, катод, поджигающий электрод и диэлектрическая шайба, разделяющая катод и поджигающий электрод (см. рис. 1).

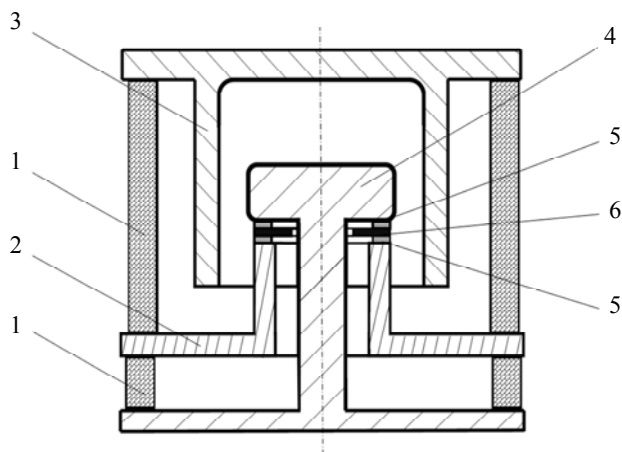


Рис. 1. Принципиальная конструкция компактного вакуумного искрового разрядника: 1 – диэлектрическая герметичная оболочка разрядника; 2 – поджигающий электрод; 3 – анод; 4 – катод; 5 – вспомогательные металлические втулки; 6 – диэлектрическая шайба.

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 (катода) 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: между диэлектрической шайбой и поджигающим электродом – коваровая, между диэлектрической шайбой и катодом – коваровая и титановая. Поджигающий электрод, ближайшая к нему кромка катода, дополнительные металлические прокладки и диэлектрическая шайба вместе составляют узел поджига. В качестве испытуемого образца был выбран разрядник, функционирующий в режиме с напряжением 1,5 кВ на промежутке катод–анод. Разрядник коммутирует цепь, формирующую импульс тока амплитудой

2,5 кА, по форме близкий к синусоидальному с периодом 2 мкс. Продолжительность импульса тока составляла 1 или 2 полупериода.

В режиме работы разрядника с энергией поджига, близкой к минимальной, обеспечивающей надежное срабатывание, для иницирования 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, и 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 (рис. 2). Далее в тексте электрическую схему, реализующую указанный режим поджига, для краткости будем называть первичной схемой.

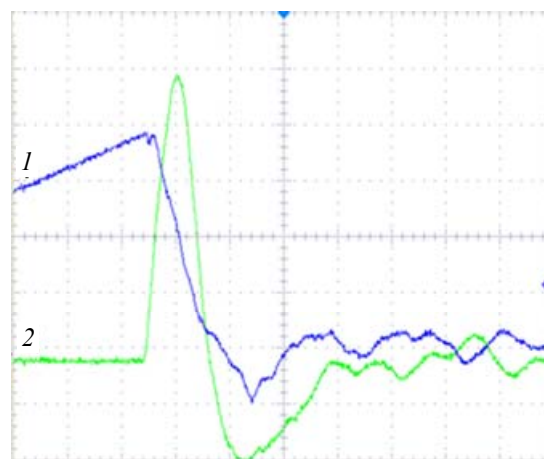


Рис. 2. Оциллограммы напряжения и тока в узле поджига при использовании первичной схемы: луч № 1 – напряжение в узле поджига, луч № 2 – ток в узле поджига. Чувствительность: луч № 1 – 250 В/дел, луч № 2 – 1 А/дел. Развертка: 20 нс/дел.

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 (100, 1000, 12000 пФ), заряжаемым до напряжений 1, 2, 3 кВ, что позволяло в широком диапазоне менять величину энергии, подводимой к узлу поджига испытуемого разрядника. Накопитель энергии коммутировался на узел поджига испытуемо-

го разрядника разрядником той же конструкции, запускаемым от стандартной схемы поджига и имеющим фиксированную задержку <math><100\text{ нс}</math>.

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. Напряжение на промежутке катод–поджигающий электрод в цепи испытуе-

мого разрядника измерялось с помощью емкостного или резистивного делителя напряжения. Сила тока регистрировалась путем измерения напряжения на низкоиндуктивном сопротивлении номиналом 1–100 Ом.

Для анализа фиксируемых изменений задержки были построены диаграммы распределения задержки при разных уровнях энергии схемы поджига. Диаграммы рис. 3 представляют собой функции распределения задержек, нормированные на полное число коммутаций. Они позволяют визуально оценить величину задержки и её стабильность, а также наглядно увидеть изменение функции распределения задержек в зависимости от уровня энергии схемы поджига.

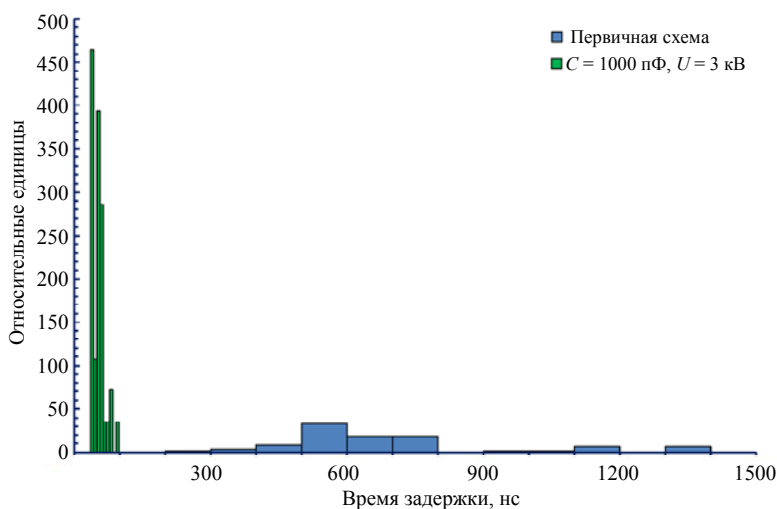


Рис. 3. Сравнение диаграмм распределения задержек для первичной схемы поджига (1×10^{-5} Дж) и схемы с энергией $4,5 \times 10^{-3}$ Дж ($C = 1000$ пФ, $U = 3$ кВ).

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.

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 (см. рис. 3 и 4).

Аналогичное явление наблюдалось при варьировании энергии поджигающего излучения для миниатюрных вакуумных разрядников с лазерным поджигом с интенсивностью излучения в диапазоне $\sim 10^8 - 10^9$ Вт/см² [3]. При использовании управляющего импульса лазерного излучения длительностью ~ 20 нс, что, кстати, близко к длительности иницирующего импульса напряжения в наших экспериментах, наблюдается значительное сокращение времени задержки при увеличении энергии импульса лазерного излучения в диапазоне $10^{-4} - 10^{-3}$ Дж, а именно, примерно на порядок величины.

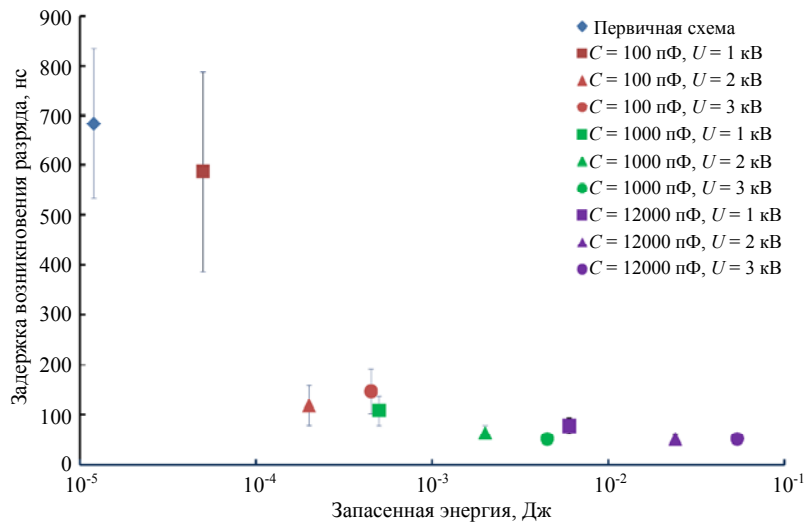


Рис. 4. График зависимости времени задержки возникновения дугового разряда в промежутке катод-анод от энергии, запасенной в схеме поджига.

Исследования процесса коммутации вакуумного (давление остаточного газа 10^{-3} мм рт. ст.) разрядника с лазерным поджигом при уровне интенсивности на мишени (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 в виде плазмы [4, 5].

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 [6, 7].

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. 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.

Заключение

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, при сравнимой энергии поджига и близком времени формирования инициирующей плазмы, что обусловлено несомненным сходством механизмов инициирования.

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.

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. Давыдов С. Г., Долгов А. Н., Каторов А. С., Ревазов В. О., Якубов Р. Х. // ПТЭ. 2019. № 6. С. 56.
4. Давыдов С. Г., Долгов А. Н., Каторов А. С., Ревазов В. О., Якубов Р. Х. // ЖТФ. 2020. Т. 90. Вып. 6. С. 919.
5. Давыдов С. Г., Долгов А. Н., Каторов А. С., Ревазов В. О., Якубов Р. Х. // Прикладная физика. 2021. № 1. С. 39.
6. Давыдов С. Г., Долгов А. Н., Корнеев А. В., Пшеничный А. А., Якубов Р. Х. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 1. С. 3.
7. Давыдов С. Г., Долгов А. Н., Корнеев А. В., Якубов Р. Х. // Электричество. 2019. № 8. С. 17.

PACS: 52.80.–s, 52.80. Vp

Minimization of the delay time and its spread 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: 10.51368/1996-0948-2021-4-19-24

REFERENCES

1. G. A. Mesyats, *Pulsed Power and Electronics* (Nauka, Moscow, 2004) [in Russian].
2. G. A. Mesyats, *Ectons in Vacuum Discharges: Break-down, Spark, and Arc* (Nauka, Moscow, 2000) [in Russian].
3. G. Davydov, A. N. Dolgov, A. S. Katorov, V. O. Revazov, and R. K. Yakubov, *Instrum. Exp. Tech.*, No. 6, 56 (2019).
4. S. G. Davydov, A. N. Dolgov, A. S. Katorov, V. O. Revazov, and R. K. Yakubov, *Tech. Phys.* **90** (6), 919 (2020).
5. S. G. Davydov, A. N. Dolgov, A. S. Katorov, V. O. Revazov, and R. K. Yakubov, *Applied Physics*, No. 1, 39 (2021) [in Russian].
6. S. G. Davydov, A. N. Dolgov, A. V. Korneev, A. A. Pshenichnyi, and R. K. Yakubov, *Usp. Prikl. Fiz.* **7** (1), 3 (2019).
7. S. G. Davydov, A. N. Dolgov, A. V. Korneev, and R. K. Yakubov, *Elektrichestvo*, No. 8, 17 (2019).