

УДК 621.3.027.3

ББК 31.2

В.В. АШМАРИН, Д.Г. ОСИПОВ

РАЗРЯДНИКИ С ИСКАЖЕНИЕМ ПОЛЯ С УЛУЧШЕННЫМИ ВРЕМЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ И ПОВЫШЕННОЙ НАДЕЖНОСТЬЮ

Ключевые слова: рельсовый разрядник с искажением поля, управляющий электрод, поджигающий электрод, время запаздывания разряда, неоднородность поля, пороговые напряжения.

В статье рассмотрены особенности конструктивного исполнения рельсовых четырехканальных разрядников с искажением поля с улучшенными временными характеристиками, представлены результаты исследований их временных характеристик. Необходимость проведения данных исследований связана с широким применением таких разрядников в емкостных накопителях энергии, служащих источниками питания электродинамических ускорителей масс. На современном этапе развития науки и техники применение таких ускорителей является наиболее перспективным для создания экспериментальных стендов по моделированию в лабораторных условиях процессов высокоскоростного взаимодействия элементов конструкций летательных аппаратов с частицами различной массы и различного происхождения. По условиям работы экспериментальных стендов в широком диапазоне изменения как масс частиц, так и скоростей взаимодействия амплитудные значения токов через малоиндуктивную нагрузку ускорителя масс могут изменяться от килоампер до нескольких мегампер при временах процессов ускорения от единиц до сотен микросекунд. С учетом этого емкостные накопители энергии выполняются многомодульного исполнения. Каждый модуль емкостного накопителя энергии коммутируется на нагрузку своим коммутатором. Для расширения диапазона срабатывания разрядника накопителя, получения временных характеристик разрядника с малыми временами запаздывания, исключения вероятности самопроизвольного срабатывания разрядника, стабильности формирования разряда при параллельной работе коммутаторов разработаны конструкции рельсовых четырехканальных разрядников с искажением поля с улучшенными характеристиками, проведены их экспериментальные и теоретические исследования.

В результате исследований выявлено, что наименьшая величина времени запаздывания и, соответственно, разброс времени запаздывания получены для разрядника с искажением поля с двумя управляющими электродами.

Полученные аналитические выражения и эмпирическое выражение, рассчитанное для разрядника с искажением поля с двумя управляющими электродами, позволяют определить величины пороговых напряжений и времена запаздывания с учетом статистического времени запаздывания и времени формирования разряда.

Определена величина порогового напряжения, при достижении которой наблюдается процесс прямой трансформации стримера в искровой разряд, обладающий высокой проводимостью с последующим пробоем межэлектродного промежутка.

Приведены зависимости статического напряжения от давления во внутренней камере разрядников с искажением поля с улучшенными временными характеристиками. Показано, что при определенном расстоянии между главными электродами при давлении 0,3–0,5 МПа разрядники работают с запасом электрической прочности, когда статическое пробивное напряжение в 1,5–2 раза превышает рабочее напряжение, приложенное к электродам газового промежутка разрядника. Это исключает вероятность самопроизвольного срабатывания разрядников емкостного накопителя энергии.

Одним из важных вопросов при проектировании разрядников с искажением поля является возможность получения малых времен запаздывания срабатывания $t_{\text{зап}}$. С целью улучшения временных характеристик были исследованы разрядники с искажением поля, конструкции которых представлены на рис. 1 и 2, где безразмерный параметр $\eta_1 = \frac{d_1}{d}$ – это отношение промежутка d_1 между управляющим электродом и электродом высокого напряжения, т.е. промежутка между электродами 4-5 к промежутку d между главными электродами 3-4; $\eta_2 = \frac{d_2}{d}$ – это отношение промежутка d_2 между управляющим электродом и электродом, подключенным к нагрузке, т.е. промежутка между электродами 3-5 к промежутку d между главными электродами 3-4, K_n – коэффициент неоднородности поля между главными электродами разрядника, он измеряется в относительных единицах [2].

Особенностью представленных конструкций является то, что один из основных электродов каждого разрядного промежутка выполнен с отверстием, в котором устанавливается поджигающий электрод 13, причем резистор делителя напряжения, подключенный ко второму основному электроду разрядного промежутка, шунтирован дополнительно последовательно соединенными конденсаторами 14 и первичной обмоткой импульсного трансформатора 15, вторичная обмотка которого подключена между поджигающим и одним из основных электродов.

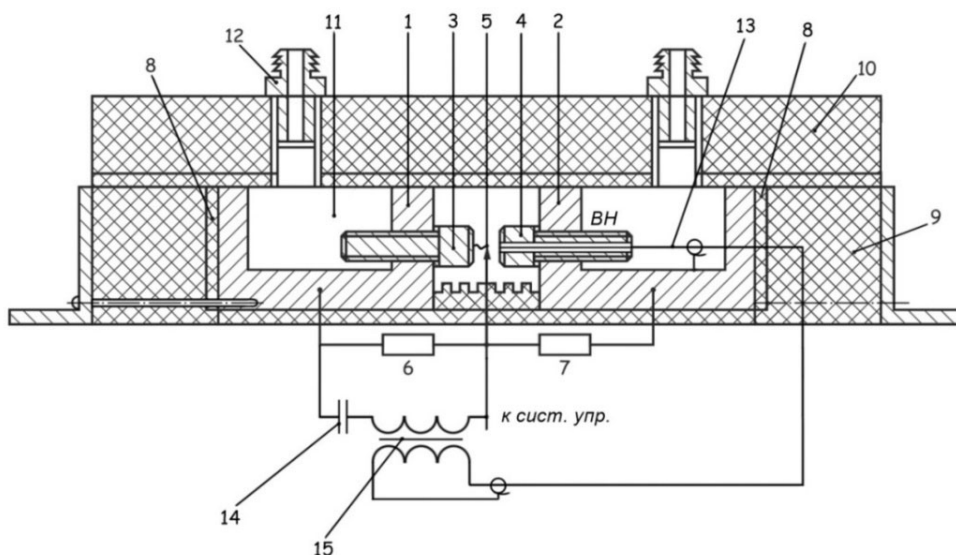


Рис. 1. Конструкция разрядника с искажением поля с поджигающим электродом, установленным в электроде высокого напряжения (ВН) (показан один канал разрядника с искажением поля) при $\eta_1 = 0,7$, $\eta_2 = 0,3$ и $K_n = 1,3$

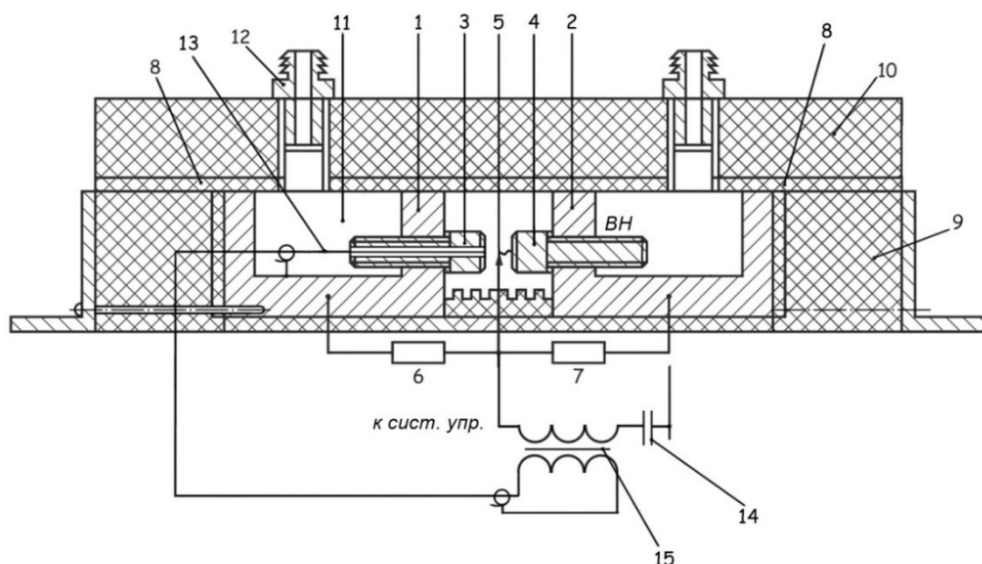


Рис. 2. Конструкция разрядника с искажением поля с поджигающим электродом, установленным в электроде, подключенном к нагрузке (показан один канал разрядника с искажением поля) при $\eta_1 = 0,7$, $\eta_2 = 0,3$ и $K_n = 1,3$

Наличие конденсаторов и импульсных трансформаторов при управляемом запуске разрядника приводит к подаче импульсов высокого напряжения на поджигающие электроды. При этом за счет дополнительной ультрафиолетовой подсветки промежутков достигаются малые времена запаздывания (рис. 3), свидетельствующие о возможности реализации как многоканального режима пробоя, так и параллельной работы нескольких разрядников.

Рассмотрим отдельно два реальных случая:

– случай, когда в электроде высокого напряжения 4 устанавливается поджигающий электрод 13;

– случай, когда дополнительный поджигающий электрод 13 размещается в электроде 3.

Первый случай (рис. 1) используется в области допороговых напряжений ($U_{\text{раб}} < U_{\text{пор}}$), второй (рис. 2) – при рабочих напряжениях на накопительном конденсаторе, превосходящих пороговое напряжение ($U_{\text{раб}} > U_{\text{пор}}$).

Конструкция разрядника состоит из следующих элементов: 1 и 2 – рельсы разрядника, 3 и 4 – главные электроды разрядника, 5 – управляющие электроды, 6 и 7 – резисторы делителя напряжения, 8 – внутренняя изоляция из фторопласта, 9 – прямоугольный корпус разрядника из текстолита, 10 – съемная крышка разрядника из текстолита, 11 – внутренняя камера разрядника, 12 – штуцеры, 13 – поджигающие электроды, 14 – конденсаторы, 15 – импульсные трансформаторы.

На рис. 3 приведены временные характеристики разрядников с дополнительными цепями.

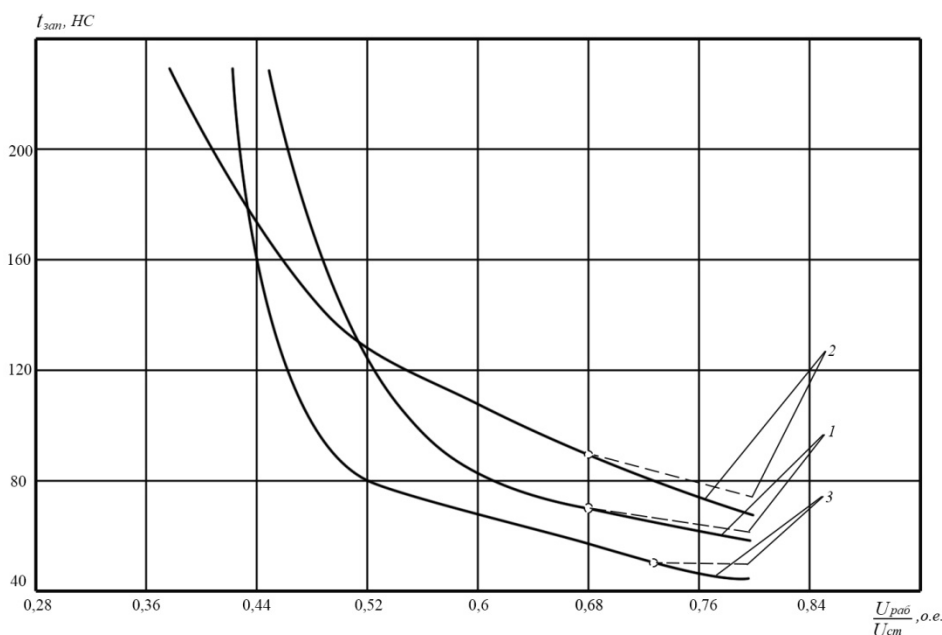


Рис. 3. Временные характеристики разрядников с дополнительными цепями:
 1 – для $\eta_1 = 0,7$, $\eta_2 = 0,3$ и $K_n = 1,3$, разрядник без поджигающего электрода;
 2 – для $\eta_1 = 0,7$, $\eta_2 = 0,3$ и $K_n = 1,3$, поджигающий электрод установлен в электроде высокого напряжения (рис. 1);
 3 – для $\eta_1 = 0,7$, $\eta_2 = 0,3$ и $K_n = 1,3$, поджигающий электрод установлен в электроде, подключенном к нагрузке (рис. 2).
 Сплошная линия – эксперимент, штриховая – расчет

В области допороговых напряжений временная характеристика разрядника переводится в наносекундный диапазон при малых рабочих напряжениях на накопительном конденсаторе (кривая 2). Для указанных условий определялась зависимость порогового напряжения $U_{\text{пор}}$ от расстояния d между главными электродами. Проведенные исследования позволили сделать вывод о том, что при введении поджигающего электрода 13 в электрод высокого напряжения справедлива формула (3), которая имеет следующий вид:

$$U_{\text{пор}} = (-1,142 \cdot 10^{-4} + 1,127 \cdot 10^{-4} K_n + 1,11 \cdot 10^{-4} K_n^2) pd + (7 \cdot 10^{-2} + 0,176 K_n - 0,155 K_n^2) \sqrt{pd},$$

где $U_{\text{пор}}$ – пороговое напряжение, кВ; p – давление в разрядной камере, Па; d – промежуток между главными электродами, см; K_n – коэффициент неоднородности поля [3].

При этом расчетное $U_{\text{пор}} = 17,2$ кВ. Предварительные эксперименты показали, что при $U_{\text{раб}} = U_{\text{пор}} = 17,2$ кВ время запаздывания $t_{\text{зап}} = 88$ нс. После этого определялась первая точка кривой 2 и рассчитывался коэффициент $k = 1,28 \cdot 10^{-3} \frac{\text{с} \cdot \text{В}}{\text{см}^2}$.

Дальнейший ход кривой рассчитывался по формуле (5), $t_{\text{зап}} = t_{\text{ф}} = k \frac{d^2}{U_{\text{пор}}}$, он показан штриховой линией [3]. Здесь k – эмпирический коэффициент, $\frac{\text{с} \cdot \text{В}}{\text{см}^2}$.

На рис. 3 (кривые 2) представлены достаточно хорошо совпадающие расчетные и экспериментальные временные характеристики при $U_{\text{раб}} \geq U_{\text{пор}}$ (расхождение не превышает 25%). Следовательно, приведенный способ может применяться для расчета временных характеристик разрядника.

Второй случай – область рабочих напряжений, превосходящих пороговое напряжение. Для этого случая получена временная характеристика разрядника с требуемыми малыми временами запаздывания (кривая 3, рис. 3). При рабочем напряжении $U_{\text{раб}} = 20$ кВ время запаздывания разряда $t_{\text{зап}} = 40$ нс, а разброс времени запаздывания разряда $\Delta t_{\text{зап}} = \pm 5$ нс. Следует отметить, что найденное опытным путем значение порогового напряжения $U_{\text{пор}} = 18$ кВ (больше, чем в первом случае), а время запаздывания $t_{\text{зап}} = 46$ нс при данном значении напряжения. Расчет временной характеристики разрядника проводился с использованием выражения (5) [3] и коэффициента $k = 0,71 \cdot 10^{-3} \frac{\text{с} \cdot \text{В}}{\text{см}^2}$.

Как видно из кривых 3, достигнуто хорошее совпадение экспериментальных и расчетных временных характеристик разрядника.

Таким образом, для любой конфигурации электродной системы разрядника можно экспериментально определить время запаздывания разряда при рабочем напряжении, равном пороговому. Пороговое напряжение находится с помощью метода незавершенных разрядов. Для наиболее удачных конструкций можно провести расчет этой величины с применением выражений 2–4, которые приведены в [3]. Полученные значения $t_{\text{зап}}$ и $U_{\text{пор}}$ определяют первую точку расчетной кривой и коэффициент k . Далее, зная k и полагая, что он остается неизменным, можно легко рассчитать с помощью формулы (5) соответствующую величину $t_{\text{зап}}$ и построить временную характеристику исследуемого разрядника.

Рассмотрим временные характеристики разрядника с искажением поля, в межэлектродном промежутке которого установлены два управляющих электрода [1]. Разрядник содержит главные электроды, один из которых выполнен в виде дискретных элементов 1, закрепленных на зубцах токопроводящей гребенки 2, а второй – в виде ряда дискретных элементов 3, закрепленных на зубцах токопроводящей гребенки 4 (рис. 4).

Гребенки (рельсы) 2 и 4 соединены с шинами 5 и 6. Клинообразные управляющие электроды изготовлены в виде рядов дискретных элементов 7 и 8, электрически соединенных между собой. Резисторы 9, 10, 11 служат для распределения напряжения по искровым промежуткам между элементами 3–8, 8–7, 7–1. Использование двух управляющих электродов обеспечивает высокую межэлектродную емкость, образованную элементами 1, 7, 8, 3. Увеличение межэлектродной емкости, образованной с помощью элементов 7 и 8 управляющих промежуточных электродов, происходит за счет уменьшения расстояния между указанными электродами. Относительно емкости управляющих электродов на землю межэлектродная емкость при этом возрастает в 3–5 раз.

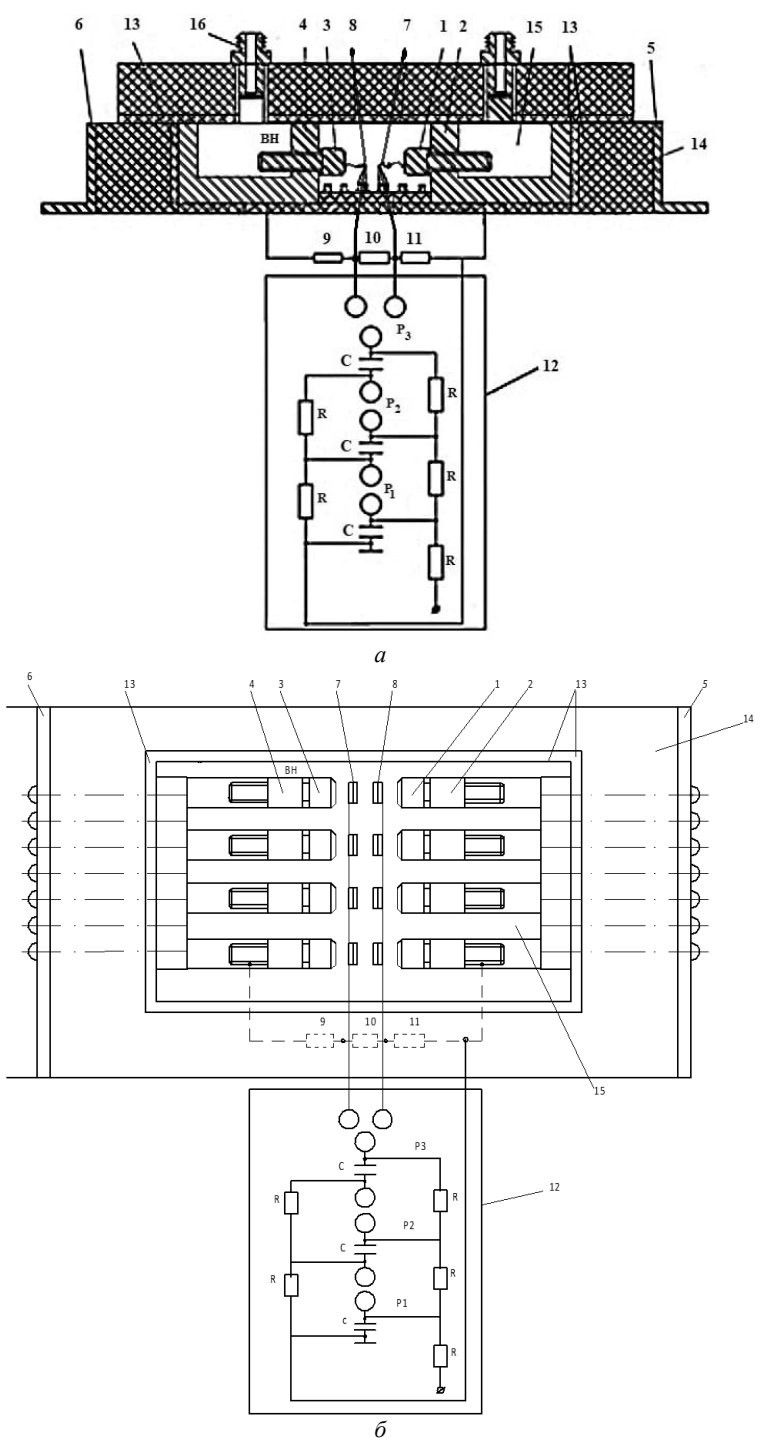


Рис. 4. Конструкция четырехканального разрядника с двумя управляющими электродами:
а – вид сбоку; б – вид сверху (крышка снята)

Импульс напряжения, управляющий включением разрядника, подается от одноименного полюса генератора 12 одновременно на управляющие электроды. Высокие межэлектродные емкости обеспечивают подпитку и быстрое развитие искровых каналов в промежутках 1–7 и 3–8. При этом промежуточные электроды приобретают потенциалы главных электродов, а потенциал элементов 7 будет выше потенциала элементов 8 вследствие падения напряжения, возникающего на нагрузке от поджигающего импульса.

Следовательно, почти одновременно с пробоем промежутков 1–7 и 3–8 пробивается промежуток 7–8. Промежутки между главными электродами 1 и 3 соединяются параллельными токовыми каналами.

Межэлектродные емкости, образованные управляющими электродами 7 и 8, заряжаемые поджигающим импульсом напряжения, обеспечивают быстрое развитие искрового канала между главными электродами с малой индуктивностью и активным сопротивлением, что способствует стабильному многоканальному срабатыванию во всем диапазоне рабочих напряжений.

Внутренняя изоляция 13 изготовлена из фторопласта. Емкостный накопитель энергии подключается к токосборной шине 6, а нагрузка подсоединяется к токосборной шине 5. Электродная система разрядника помещается в текстолитовый корпус 14. Внутренняя камера 15 продувается воздухом после каждого включения через штуцеры 16.

Таким образом, использование предлагаемого разрядника позволяет обеспечить одновременное формирование параллельных каналов разрядника с максимально возможным рабочим диапазоном срабатывания и значительно увеличить стабильность формирования многоканального разряда.

Расчет временных характеристик разрядника с двумя управляющими электродами проводился следующим образом. Пороговое напряжение рассчитывалось по следующей формуле:

$$U_{\text{пор}} = \left(-4,17 \cdot 10^{-4} - 4,5 \cdot 10^{-4} K_n + 1,48 \cdot 10^{-4} K_n^2 \right) pd + \left(0,102 \cdot 10^{-2} - 8,1 \cdot 10^{-2} K_n + 8,4 \cdot 10^{-3} K_n^2 \right) \sqrt{pd}.$$

Затем опытным путем определялось время запаздывания $t_{\text{зап}}$, соответствующее пороговому напряжению, находилась первая точка временной характеристики, рассчитывался коэффициент k . Исходя из допущения постоянства коэффициента k для заданной конструкции разрядника по формуле (5) литературы [3] рассчитывалась зависимость $t_{\text{зап}} = f(U_{\text{раб}})$.

На рис. 5 приведены расчетные временные характеристики разрядника с искажением поля для следующих значений безразмерных параметров $\eta_1 = 0,5$, $\eta_2 = 0,3$, $\eta_3 = 0,2$, коэффициентов неоднородности $K_n = 2,1$ и $K_n = 1,7$ (штриховые линии 2, 3). На этом же рисунке приведены временные характеристики разрядника с искажением поля (сплошные линии 2, 3), полученные в результате экспериментов. Безразмерный параметр $\eta_1 = \frac{d_1}{d}$ – это отношение промежутка d_1

между управляющим электродом и электродом высокого напряжения, т.е. промежутка между электродами 3–8 к промежутку d между главными электродами

1–3; $\eta_2 = \frac{d_2}{d}$ – это отношение промежутка d_2 между управляющим электродом и электродом, подключенным к нагрузке, т.е. промежутка между электродами 1–7 к промежутку d между главными электродами 1–3; $\eta_3 = \frac{d_3}{d}$ – это отношение промежутка d_3 между управляющими электродами, т.е. промежутка между электродами 7–8 к промежутку d между главными электродами 1–3.

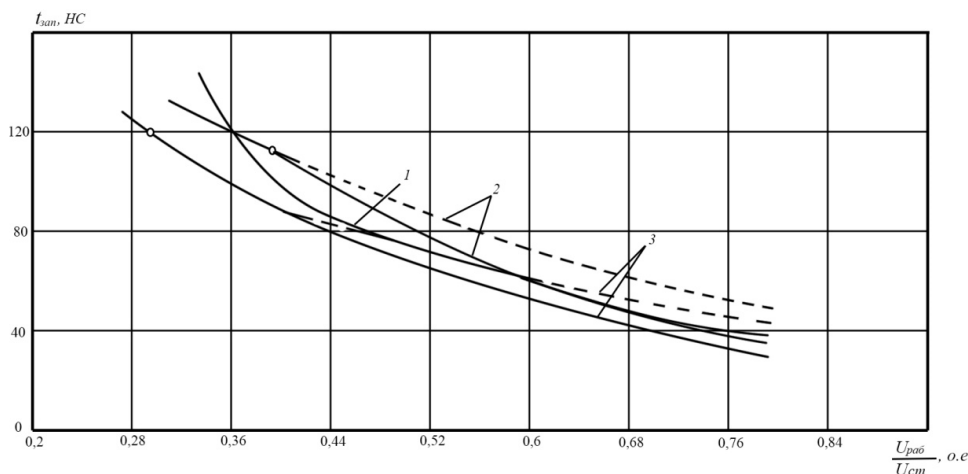


Рис. 5. Временные характеристики разрядников с двумя управляющими электродами:
 1 – для $\eta_1 = 0,4$, $\eta_2 = 0,4$, $\eta_3 = 0,2$ и $K_H = 1,7$; 2 – для $\eta_1 = 0,5$, $\eta_2 = 0,3$, $\eta_3 = 0,2$ и $K_H = 2,1$;
 3 – для $\eta_1 = 0,5$, $\eta_2 = 0,3$, $\eta_3 = 0,2$ и $K_H = 1,7$.

Сплошная линия – эксперимент, штриховая – расчет

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных указывает на их удовлетворительное совпадение при $U_{\text{раб}} \geq U_{\text{пор}}$. Расхождение расчета с экспериментом не превышает 25%. Время запаздывания разрядника $t_{\text{зап}} = 37,5$ нс, разброс $\Delta t_{\text{зап}} = \pm 4$ нс, а зона многоканального срабатывания $\Delta U = 80\%$. Отсюда следует, что для разрядника с искажением поля с двумя управляющими электродами при $\eta_1 = 0,5$, $\eta_2 = 0,3$, $\eta_3 = 0,2$ и $K_H = 1,7$ получена самая малая величина $t_{\text{зап}}$ (кривые 1,3).

Во многих случаях необходимо исключить вероятность самопроизвольного срабатывания емкостного накопителя энергии [3, 4, 5–7]. Это обеспечивается заполнением внутренней камеры разрядника 15 сухим воздухом при давлении $p = 0,3\text{--}0,5$ Мпа (рис. 4). При этом в зоне рабочих напряжений разрядника с искажением поля обеспечивается запас электрической прочности $K_{\text{зап}} = \frac{U_{\text{ст}}}{U_{\text{раб}}} = (1,5 - 2)$.

На рис. 6 приведены зависимости статического напряжения $U_{\text{ст}}$ от давления p воздуха в рабочей камере разрядника.

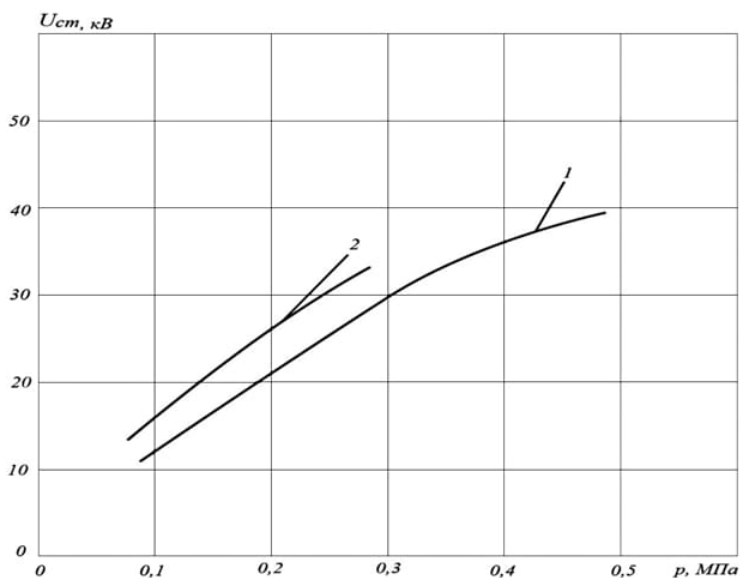


Рис. 6. Зависимости статического напряжения $U_{ст}$ от давления воздуха p :
 1 – разрядник с одним управляющим электродом, $K_n = 1,3$;
 2 – разрядник с двумя управляющими электродами, $K_n = 1,7$

При этом расстояние между главными электродами с одним управляющим электродом $d = 0,69$ см, а для разрядника с двумя управляющими электродами – $d = 0,9$ см. При давлении воздуха в камере разрядника с искажением поля $p = 0,3$ МПа разрядные промежутки выдерживают напряжение $U_{ст} = 30$ кВ в обеих конструкциях (рис. 6). Значение статического напряжения $U_{ст}$ при данном давлении получены в серии из 20–30 включений с интервалом в 1 мин. Продувка разрядника между включениями не проводилась. Слабая нелинейность зависимости статического напряжения обусловлена, вероятно, некоторой неоднородностью поля в промежутке между главными электродами и наличием токов утечки в изоляционных деталях камеры разрядника.

Выводы. При рабочем напряжении $U_{раб}$ на разряднике, большем порогового $U_{пор}$, время запаздывания $\Delta t_{зап}$ срабатывания разрядника с искажением поля полностью находятся в наносекундной области.

Показано, что полученные аналитические выражения, представленные в [3], и новое аналитическое выражение (4), рассчитанное для разрядника с искажением поля с двумя управляющими электродами, позволяют определить величины пороговых напряжений $U_{пор}$ и времена запаздывания $\Delta t_{зап}$ с учетом статистического времени запаздывания и времени формирования разряда.

Применение дополнительных поджигающих электродов, а также введение двух управляющих электродов в разрядный промежуток разрядника позволяет уменьшить время запаздывания $\Delta t_{зап}$ разрядника и обеспечить стабильное формирование многоканального разрядника.

С целью повышения надежности работы разрядников, которая определяется допустимой вероятностью самопроизвольного срабатывания $\psi = 10^{-3}-10^{-4}$, необходимо обеспечить запас электрической прочности межэлектродных промежутков, равный $K_{\text{зап}} = (1,5-2)$.

Литература

1. А.с. № 1264798. Многоканальный искровой разрядник / В.В. Ашмарин, А.А. Блохинцев, С.А. Калихман. № 3771177/24-07; заявл. 13.07.1984; опублик. 15.06.1986.
2. А.с. № 983852. Многоканальный искровой разрядник / В.В. Ашмарин, А.А. Блохинцев, С.А. Калихман. № 3299158/24-07; заявл. 05.06.1981; опублик. 23.12.1982. Бюл. № 47. 2 с.
3. Ашмарин В.В. Коммутаторы емкостного накопителя энергии для электродинамического ускорителя массы: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1994. 19 с.
4. Finist G., Wetter M., Meyer T. New spark-gap technology with efficient line-follow current suppression for the protection of powerful LV distribution systems. *Int. Conf. on Lightning Protection (ICLP)*. Estorial, 2016, pp. 1–7. DOI: 10.1109/ICLP.2016.779513.
5. Grabowski C., Derman J.H., Domonkos M. Operation of rail-gap switches in a high-current, low-inductance crowbar switch. *IEEE Pulsed Power Conference (PPC)*, Austin, TX, 2015, pp. 1–6. DOI: 10.1109/PPC.2015.7296980.
6. Lee Li, Cai Li, Yu Feng, Nan Jing, Zhou Zheng-Yang, Lin Fu-Chang. Analysis of electrical contact temperature rise in spark gap switches with graphite electrodes. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2011, vol. 18, iss. 4, pp. 1144–1148.
7. Reddy C.S., Sharma A., Mittal K.C. Experimental Investigations Into Pulse-Charged Spark Gap Recovery Times and Influencing Factors. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2016, vol. 44, no. 3, pp. 331–337. DOI: 10.1109/TPS.2015.2509162.

АШМАРИН ВАСИЛИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности и инженерной экологии, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (ashmarin1953@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3455-0580>).

ОСИПОВ ДЕНИС ГЕННАДЬЕВИЧ – кандидат экономических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности и инженерной экологии, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (denps@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0835-827X>).

Vasily V. ASHMARIN, Denis G. OSIPOV

FIELD DISTORTION ARRESTERS WITH IMPROVED TIME LIMITS FEATURES AND INCREASED RELIABILITY

Key words: rail spark gap with field distortion, control electrode, igniting electrode, discharge delay time, field inhomogeneity, threshold voltages.

The article considers the features of the design of four-channel rail arresters with field distortion with improved time characteristics and presents the results of studies of their time characteristics. The need for these studies is associated with the widespread use of such dischargers in capacitive energy storage devices that serve as power sources for electrodynamic mass accelerators. At the present stage of the development of science and technology, the use of such accelerators is the most promising for creating experimental stands for modeling in laboratory conditions the processes of high-speed interaction of structural elements of aircraft with particles of different masses and different origins. According to the operating conditions of the experimental stands, in a wide range of changes in both particle masses and interaction velocities, the amplitude values of currents through the low-inductive load of the mass accelerator can vary from kiloamperes to several megamperes at acceleration times from units to hundreds of microseconds. With this in mind, capacitive energy storage devices are performed in a multi-module design. Each module of a capacitive energy storage device is switched to the load by its own switch. To expand the range of

operation of the spark gap of the storage device, to obtain the time characteristics of the spark gap with small delay times, to exclude the probability of spontaneous operation of the spark gap, and to provide the stability of the discharge formation during parallel operation of the switches, the designs of four-channel rail spark gaps with field distortion with improved characteristics were developed, their experimental and theoretical studies were carried out.

The results of the conducted studies show that the smallest value of the delay time and, accordingly, the spread of the delay time are obtained for a spark gap with field distortion with two control electrodes.

It is shown that the obtained analytical expressions presented in the article and the empirical expression calculated for a spark gap with a field distortion with two control electrodes make it possible to determine the values of threshold voltages and delay times, taking into account the statistical delay time and the time of discharge formation.

The value of the threshold voltage is determined, at which the process of direct transformation of the streamer into a spark discharge with high conductivity followed by a breakdown of the interelectrode gap is observed.

The dependences of the static voltage on the pressure in the inner chamber of the spark gap with field distortion with improved time characteristics are given. It is shown that at a certain distance between the main electrodes at a pressure of 0,3-0,5 MPa, the arresters operate with a margin of electrical strength when the static breakdown voltage is 1,5-2 times higher than the operating voltage applied to the electrodes of the gas gap of the arrester. This eliminates the possibility of spontaneous triggering of the dischargers of the capacitive energy storage.

References

1. Ashmarin V.V., Blokhintsev A.A., Kalikhman S.A. *Mnogokanal'nyi iskrovoi razryadnik* [Multi-channel spark arrester]. Patent USSR, no. 3771177/24-07, 1986.
2. Ashmarin V.V., Blokhintsev A.A., Kalikhman S.A. *Mnogokanal'nyi iskrovoi razryadnik* [Multi-channel spark arrester]. Patent USSR, no. 3299158/24-07, 1982.
3. Ashmarin V.V. *Kommutatory emkostnogo nakopitelya energii dlya elektrodinamicheskogo uskoritelya massy: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Capacitive energy storage commutators for electrodynamic mass gas pedal: Abstract of Cand. Diss.]. Moscow, 1994, 19 p.
4. Finist G., Wetter M., Meyer T. New spark-gap technology with efficient line-follow current suppression for the protection of powerful LV distribution systems. *Int. Conf. on Lightning Protection (ICLP)*. Estorial, 2016, pp. 1–7. DOI: 10.1109/ICLP.2016.779513.
5. Grabowski C., Derman J.H., Domonkos M. Operation of rail-gap switches in a high-current, low-inductance crowbar switch. *IEEE Pulsed Power Conference (PPC)*, Austin, TX, 2015, pp. 1–6. DOI: 10.1109/PPC.2015.7296980.
6. Lee Li, Cai Li, Yu Feng, Nan Jing, Zhou Zheng-Yang, Lin Fu-Chang. Analysis of electrical contact temperature rise in spark gap switches with graphite electrodes. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2011, vol. 18, iss. 4, pp. 1144–1148.
7. Reddy C.S., Sharma A., Mittal K.C. Experimental Investigations Into Pulse-Charged Spark Gap Recovery Times and Influencing Factors. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2016, vol. 44, no. 3, pp. 331–337. DOI: 10.1109/TPS.2015.2509162.

VASILIIY V. ASHMARIN – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Life Safety and Environmental Engineering, Chuvash State University, Cheboksary, Russia (ashmarin1953@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3455-0580>).

DENIS G. OSIPOV – Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Department of Life Safety and Environmental Engineering, Chuvash State University, Cheboksary, Russia (denps@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0835-827X>).

Формат цитирования: Ашмарин В.В., Осипов Д.Г. Разрядники с искажением поля с улучшенными временными характеристиками и повышенной надежностью // Вестник Чувашского университета. – 2022. – № 1. – С. 23–33. DOI: 10.47026/1810-1909-2022-1-23-33.