

УДК 621.3.027.3

ББК 31.2

В.В. АШМАРИН, Д.Г. ОСИПОВ, И.В. РЕЗЮКОВ

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ И ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЛЬСОВОГО ЧЕТЫРЕХКАНАЛЬНОГО РАЗРЯДНИКА С ИСКАЖЕНИЕМ ПОЛЯ

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

В статье рассмотрены особенности конструктивного исполнения рельсового четырехканального разрядника с искажением поля и результаты исследования его временных характеристик. Необходимость проведения данной работы, связанной с разработкой таких разрядников ввиду отсутствия их аналогов, обусловлена широким применением емкостных накопителей энергии в качестве источников 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 и в широком диапазоне изменения как масс частиц, так и скоростей взаимодействия амплитудные значения токов через малоиндуктивную нагрузку ускорителя масс изменяются от десятков до сотен килоампер при временах процесса ускорения от единиц до сотен микросекунд. С учетом этого емкостные накопители энергии выполняются в многомодульном исполнении. Каждый модуль коммутируется на нагрузку своим коммутатором. Для расширения диапазона срабатывания накопителя, обеспечения требуемой эрозионной стойкости электродов коммутатора, стабильности формирования разряда при параллельной работе коммутаторов разработана конструкция рельсового четырехканального разрядника с искажением поля, проведены экспериментальные и теоретические исследования влияния соотношения геометрических размеров межэлектродного промежутка на уменьшение запаздывания электрического пробоя разрядника.

В результате исследований показано, что время запаздывания $t_{\text{зап}}$ зависит от формы и диаметра главных электродов, материала электродов, расстояний между главными и управляющим электродами, порогового напряжения, а также степени неоднородности поля в межэлектродном промежутке.

Полученные аналитические выражения позволяют определить пороговые напряжения и время запаздывания с учетом статистического времени запаздывания и времени формирования искрового разряда.

Установлено, что на время запаздывания существенно влияют коэффициент неоднородности поля и конфигурация управляющего электрода.

Отмечено, что при рабочем напряжении на разряднике, превышающем пороговое напряжение, время запаздывания коммутатора находится в наносекундной области. Определено пороговое напряжение $U_{\text{пор}}$, при достижении которого наблюдается процесс прямой трансформации стримера в искровой разряд, обладающий высокой проводимостью, с последующим пробоем межэлектродного промежутка разрядника.

Для обеспечения синхронной работы модулей емкостного накопителя энергии временные характеристики рельсового четырехканального разрядника должны находиться в наносекундной области. С целью получения требуемых малых значений времени запаздывания была рассмотрена конструкция рель-

сового четырехканального разрядника с искажением поля (рис. 1). Рельсы 1 и 2 длиной 14 см имели форму гребенки (шириной – 8 см) с зубцами (шириной 2 см и высотой 4 см), представляющей индуктивный делитель тока с расстоянием между соседними каналами 4 см. Индуктивный делитель тока, согласно литературе, способствует росту устойчивости образования параллельных искровых каналов в разряднике [1]. На зубцах гребенки установлены главные электроды 3 и 4. В межэлектродном промежутке расположены управляющие электроды 5, имеющие форму заостренной пластины толщиной 0,1 см, находящиеся под потенциалом, который задается омическим делителем напряжения 6 и 7. Внутренняя изоляция 8 выполнена из фторопласта. Наружный диаметр главных электродов – 2 см, промежуток между ними – 1,08 см. Управляющий электрод имеет высоту 1 см и отстоит от горизонтальной центральной линии на расстоянии 0,5 см. Рабочие поверхности главных электродов и управляющие электроды изготовлены из эрозионностойкого сплава ВНМ (вольфрам–никель–медь). Дискретное расположение главных электродов обеспечивает равномерное распределение искровых каналов по длине рельсов, что способствует получению наименьшей индуктивности разрядника [2, 3]. Электродная система разрядника размещается в прямоугольном корпусе 9 (31×28×4,5 см³), изготовленном из текстолита. Разрядник закрывается текстолитовой крышкой 10, при этом образуется внутренняя камера 11 (21×18×4 см³) объемом 108 см³ на 1 см длины рельсов.

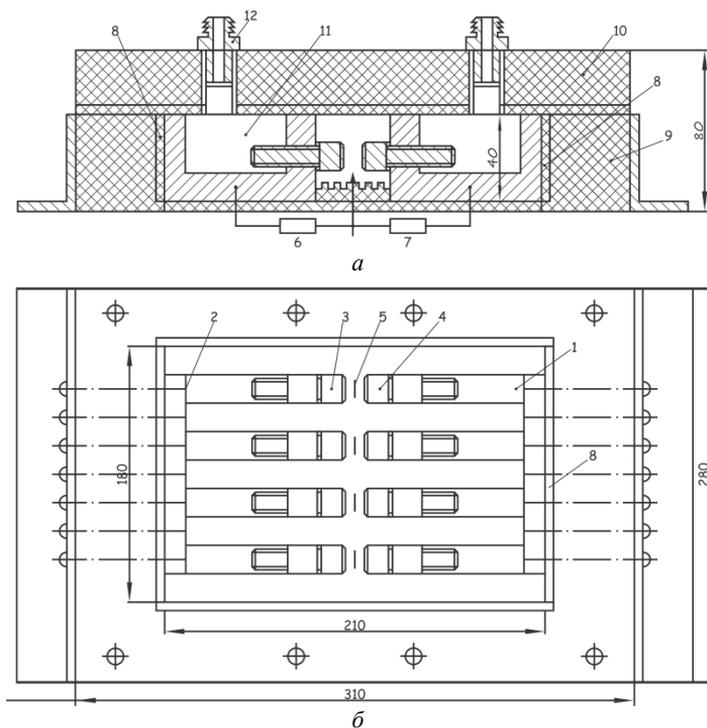


Рис. 1. Конструкция четырехканального разрядника с искажением поля:
а – вид сбоку, б – вид сверху (крышка снята)

В крышке установлены штуцеры 12, через которые осуществляются заполнение и продув камеры 11 газом после каждого включения разрядника. В качестве газовой среды использован сухой воздух при давлении (0,1–0,5) МПа.

Временные характеристики разрядника определялись при разряде накопительного конденсатора C_1 с рабочим напряжением $U_{\text{раб}} = (1–25)$ кВ, запасаемой энергией 1,6 кДж на индуктивную нагрузку $L_{\text{н}} = 70$ нГн.

Принципиальная схема включения разрядника показана на рис. 2.

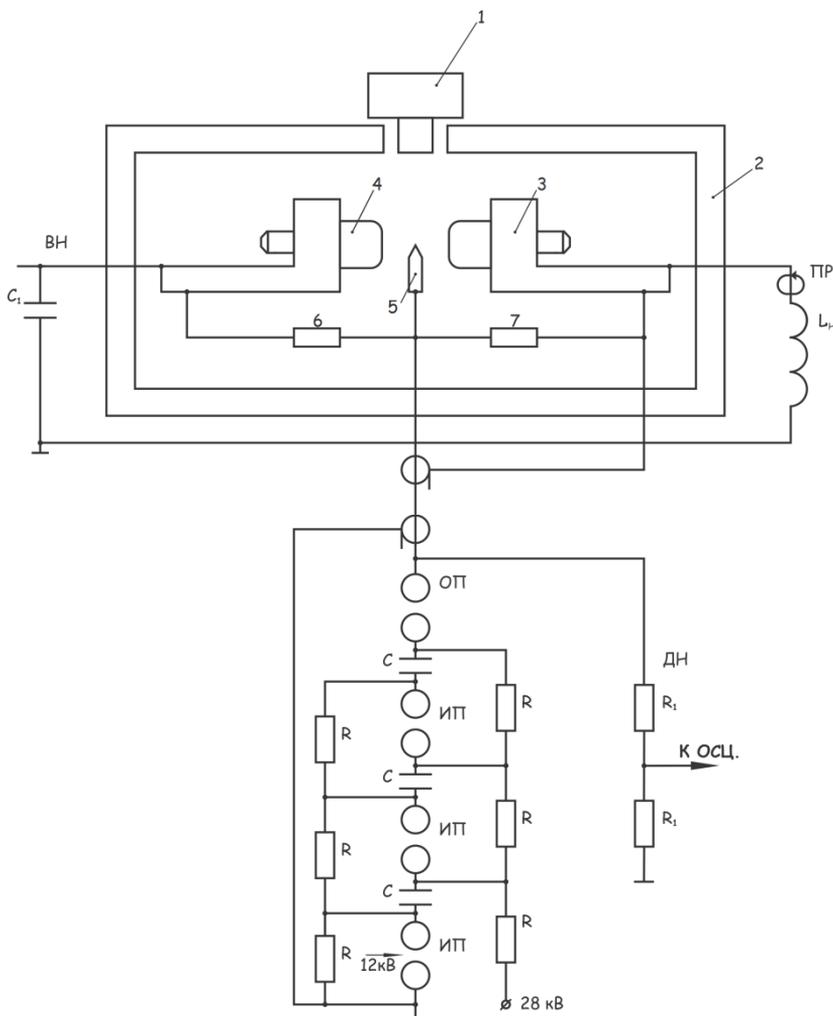


Рис. 2. Схема для определения порогового напряжения в разряднике P :

- 1 – фотокамера; 2 – открытая ионизационная камера; 3 – главный электрод, подключенный к нагрузке; 4 – высоковольтный главный электрод; 5 – управляющий электрод;
- 6, 7 – омический делитель напряжения; C_1 – емкостный накопитель энергии;
- ВН – высокое напряжение; ПР – пояс Роговского; $L_{\text{н}}$ – индуктивность нагрузки;
- ДН – омический делитель напряжения; R_1, R_2 – сопротивления ДН;
- ОП – обостряющий промежуток ГИН; ИП – искровые промежутки ГИН;
- C – емкость ступени ГИН; R – сопротивление ступени ГИН

Запуск разрядника осуществлялся от малоиндуктивного трехступенчатого генератора импульсных напряжений (ГИН), собранного с помощью конденсаторов К15-10 (40 кВ, 10000 пФ), импульсом напряжения амплитудой до 90 кВ с длительностью фронта 80 нс.

Осциллограмма напряжения на выходе ГИН приводится на рис. 3.

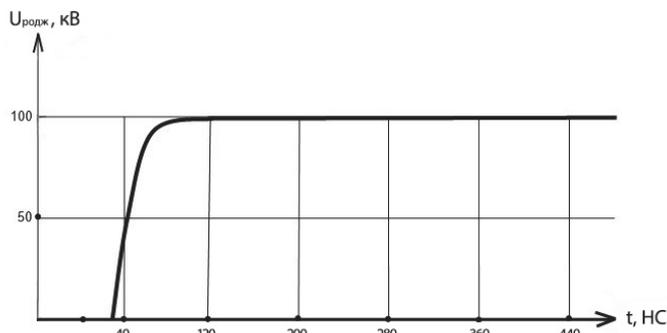


Рис. 3. Осциллограмма напряжения на выходе генератора

Величина напряжения управляющего импульса измерялась резистивным делителем напряжения с коэффициентом деления $K_d = 500$. В качестве элементов делителя использовались резисторы, обладающие высокой степенью термостойкости. Ток разрядной цепи контролировался при помощи пояса Роговского (ПР). Индуктивность разрядной цепи рассчитывалась по периоду разрядного тока. Экспериментально определялось влияние на временную характеристику разрядника соотношения размеров искровых промежутков разрядника между главными и управляющим электродами. Время запаздывания разряда $t_{\text{зап}}$ находилось как интервал времени между приходом на исследуемый разрядник P управляющего импульса напряжения и началом заметного роста тока в нагрузке. Используемые при экспериментах комбинации полярности напряжения обозначались двумя знаками, разделенными косой чертой. Первый из этих знаков указывает полярность напряжения на накопительном конденсаторе, а второй – полярность управляющего импульса напряжения. Опытным путем были получены зависимости времени запаздывания срабатывания $t_{\text{зап}}$ от величины зарядного напряжения на накопительном конденсаторе $U_{\text{раб}}$.

Полученные экспериментальные результаты сравнивались со значениями $t_{\text{зап}}$, которые рассчитывались по нижеследующей формуле [4], при рабочем напряжении $U_{\text{раб}}$, равном или превышающем пороговое напряжение $U_{\text{пор}}$:

$$t_{\text{зап}} = t_{\phi} = k \frac{d^2}{U_{\text{пор}}}, \quad (1)$$

где k – эмпирический коэффициент, $\frac{c \cdot B}{\text{см}^2}$; d – длина искрового межэлектродного промежутка между главными электродами разрядника, см;

$$U_{\text{пор}} = (3,16 \cdot 10^{-4} - 4,64 \cdot 10^{-4} K_{\text{н}} + 2,8 \cdot 10^{-4} K_{\text{н}}^2)pd + (-3,6 \cdot 10^{-2} + 0,196K_{\text{н}} - 0,14K_{\text{н}}^2)\sqrt{pd} - \quad (2)$$

пороговое напряжение для соотношения размеров искровых промежутков $\eta_1 = 0,6$, $\eta_2 = 0,4$ кВ (в промежутке разрядника один управляющий электрод);

$$U_{\text{пор}} = (-1,142 \cdot 10^{-4} + 1,127 \cdot 10^{-4} K_{\text{н}} + 1,11 \cdot 10^{-4} K_{\text{н}}^2)pd + (7 \cdot 10^{-2} + 0,176K_{\text{н}} - 0,155K_{\text{н}}^2)\sqrt{pd} - \quad (3)$$

пороговое напряжение для соотношения размеров искровых промежутков $\eta_1 = 0,7$, $\eta_2 = 0,3$ кВ (в промежутке разрядника расположен один управляющий электрод); p – давление в разрядной камере, Па; $K_{\text{н}}$ – коэффициент неоднородности поля.

Используя формулы (2) и (3), можно определить величину порогового напряжения, при достижении которой временные характеристики РИП целиком находятся в наносекундной области.

Предварительные эксперименты для данной электродной системы показали, что наименьшие значения времени запаздывания $t_{\text{зап}}$ были получены при комбинации полярностей $-/+$ в случае атмосферного давления в камере разрядника [5]. Значение $t_{\text{зап}}$, как показано выше, зависит от формы и диаметра главных электродов, материала электродов, расстояния между главными электродами, расстояния между соседними каналами их взаимного расположения, значения порогового напряжения и от коэффициента неоднородности поля $K_{\text{н}}$. Поэтому правомерность предложенного способа расчета временных характеристик проверялась на разрядниках с различной степенью неоднородности поля между главными электродами. Первый разрядник, описанный выше, имел $K_{\text{н}} = 1,5$, статическое напряжение $U_{\text{ст}} = 25$ кВ, второй отличался от первого тем, что $K_{\text{н}} = 1,3$. В этих условиях измерялось время запаздывания $t_{\text{зап}}$ в зависимости от величины рабочего напряжения $U_{\text{раб}}$ для разных соотношений промежутков в случае управляемого запуска (рис. 4).

Временные характеристики разрядника с одним управляющим электродом приведены на рис. 4, где, соответственно, $\eta_1 = \frac{d_1}{d}$, $\eta_2 = \frac{d_2}{d}$ (d_1 – расстояние между управляющим электродом и электродом высокого напряжения, d_2 – расстояние между управляющим электродом и электродом, подсоединенным к нагрузке).

Величина $t_{\text{зан}}$ находилась как среднее из 30–40 измерений. Как следует из рис. 4, наименьшие времена запаздывания получены для соотношения искровых промежутков $\eta_1 = 0,7$, $\eta_2 = 0,3$ и коэффициента неоднородности поля $K_{\text{н}} = 1,3$ (кривая 3). В данном случае обеспечивается время запаздывания $t_{\text{зан}} = 56$ нс с разбросом времени запаздывания $\Delta t_{\text{зан}} = \pm 6$ нс. Следовательно, смещение управляющего электрода относительно вертикальной центральной линии способствует улучшению временной характеристики разрядника. Кроме того, требуемые малые времена запаздывания достигаются при коэффициентах неоднородности поля $K_{\text{н}}$, близких к единице. Известно, что в рез-

ко неоднородном поле время формирования разряда заметно выше, чем в однородном поле [4]. Поэтому при проектировании электродных систем разрядников как с искажением поля, так и обычных коммутаторов стремятся обеспечить высокую степень однородности электрического поля по длине межэлектродного промежутка разрядника.

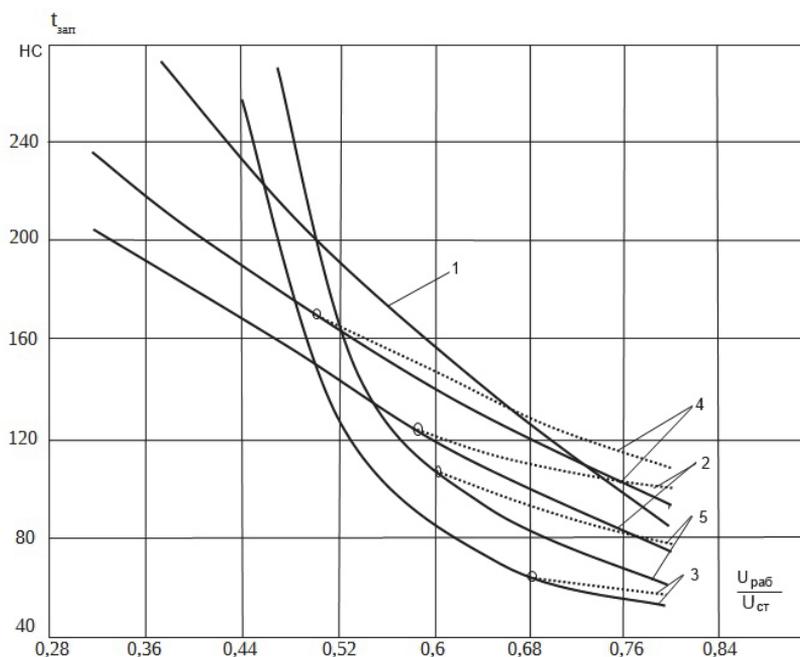


Рис. 4. Временные характеристики разрядников с одним управляющим электродом:
 1 – для $\eta_1 = 0,5$, $\eta_2 = 0,5$ и $K_H = 1,3$; 2 – для $\eta_1 = 0,6$, $\eta_2 = 0,4$ и $K_H = 1,3$;
 3 – для $\eta_1 = 0,7$, $\eta_2 = 0,3$ и $K_H = 1,3$; 4 – для $\eta_1 = 0,6$, $\eta_2 = 0,4$ и $K_H = 1,5$;
 5 – для $\eta_1 = 0,7$, $\eta_2 = 0,3$ и $K_H = 1,5$. Сплошная линия – эксперимент, штриховая – расчет

Расчет временной характеристики (штриховые линии на рис. 4) проводился следующим образом. При помощи метода незавершенных разрядов находилась величина порогового напряжения $U_{пор}$. Затем определялось время запаздывания срабатывания $t_{зап}$ при $U_{раб} = U_{пор}$. Подставляя величины $U_{пор}$ и $t_{зап}$ в выражение (1), можно рассчитать коэффициенты K для всех соотношений между геометрическими размерами обоих разрядников:

$$K = 1,43 \cdot 10^{-3} \frac{c \cdot B}{cm^2} \text{ – для } \eta_1 = 0,6, \eta_2 = 0,4,$$

$$K = 1,06 \cdot 10^{-3} \frac{c \cdot B}{cm^2} \text{ – для } \eta_1 = 0,7, \eta_2 = 0,3, \text{ для первого и}$$

$$K = 1,62 \cdot 10^{-3} \frac{c \cdot B}{cm^2} \text{ – для } \eta_1 = 0,6, \eta_2 = 0,4,$$

$$K = 1,03 \cdot 10^{-3} \frac{c \cdot B}{cm^2} \text{ – для } \eta_1 = 0,7, \eta_2 = 0,3 \text{ для второго.}$$

После чего по известным величинам K с помощью формулы (1) можно рассчитать зависимости $t_{\text{зап}} = f(U_{\text{пор}})$ при рабочем напряжении, превышающем пороговое напряжение.

Далее рассмотрен порядок расчета временной характеристики разрядника с коэффициентом неоднородности $K_n = 1,3$ и для соотношения $\eta_1 = 0,7$, $\eta_2 = 0,3$. С помощью формулы (3) вычислено пороговое напряжение $U_{\text{пор}} = 17,2$ кВ. Экспериментально находилось время запаздывания $t_{\text{зап}} = 68$ нс.

Известные величины $U_{\text{пор}}$ и $t_{\text{зап}}$ позволили построить первую точку временной характеристики (обозначена кружком на рис. 4). С помощью эксперимента и формулы (1) рассчитан коэффициент

$$K = 1,03 \cdot 10^{-3} \frac{\text{с} \cdot \text{В}}{\text{см}^2}$$

и сделаны некоторые обобщающие выводы, которые во многих случаях дают возможность теоретически оценивать $t_{\text{зап}}$ для различных конструкций разрядников. Принимая коэффициент K постоянным для разрядника с $\eta_1 = 0,7$, $\eta_2 = 0,3$ и используя формулу (1), можно рассчитать зависимость $t_{\text{зап}} = f(U_{\text{пор}})$ при $U_{\text{раб}} \geq U_{\text{пор}}$ (штриховая линия).

Аналогичным образом можно найти коэффициенты K и рассчитать временные характеристики для достаточно широкого диапазона изменения K_n . Как видно, расчетные и экспериментальные кривые временных характеристик разрядника расположены довольно близко друг к другу. Единственным ограничением при использовании этих кривых для других конструкций разрядников служат условия достижения порогового напряжения. Как показали эксперименты, время запаздывания срабатывания представляет тогда время формирования разряда и не включает в себя какую-либо статистическую задержку. Ни длина межэлектродного промежутка разрядника, ни расстояние между главными электродами (1 см), ни расстояние между соседними искровыми каналами (4 см) не должны меняться слишком значительно по сравнению с приведенными. Допустимым можно считать отклонение той и другой величин в 1,5-2 раза в обе стороны, что вполне достаточно для многих вариантов конструкций. В других случаях требуется эксперимент по определению величины K_n .

Таким образом, достигнуто хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений $t_{\text{зап}}$ при напряжении $U_{\text{раб}} \geq U_{\text{пор}}$ (расхождение не больше 25%). Предложенный способ не требует значительного объема вычислений и позволяет на стадии проектирования добиться точности расчетов 25% и прогнозировать синхронную работу РИП.

Выводы:

- коэффициент неоднородности поля K_n в разрядном промежутке оказывает существенное влияние на временные характеристики разрядника;
- конфигурация главных электродов РИП должна обеспечить наименьшую степень неоднородности поля K_n ;
- управляющий электрод в виде тонкой пластины должен иметь острую кромку и на нем в исходном состоянии не должно быть повышенной напряженности электрического поля. С этой целью электрод должен находиться под напряжением, соответствующим эквипотенциали, вдоль которой он расположен;

– форма и расположение электродов должны обеспечить взаимную подсветку промежутков. Коронирующая острая кромка управляющего электрода – источник создания в промежутке свободных электронов – позволяет свести к нулю статистическое время запаздывания $t_{ст}$;

– при рабочем напряжении $U_{раб}$ на разряднике, большем порогового напряжения $U_{пор}$, времена запаздывания срабатывания $t_{зап}$ коммутатора целиком находятся в наносекундной области;

– определена величина порогового напряжения $U_{пор}$, при достижении которой наблюдается процесс прямой трансформации стримера в искровой канал. Образование канала завершает пробой промежутка и ведет к замыканию внешней цепи через этот канал разрядника;

– приводятся формулы (2) и (3), по которым рассчитывается пороговое напряжение $U_{пор}$, для различных конфигураций электродной системы разрядника;

– расчет временной характеристики РИП $t_{зап} = f(U_{раб})$ при $U_{раб} \geq U_{пор}$ (штриховая линия) можно провести, используя выражение (1).

Литература

1. Ашмарин В.В., Калихман С.А. Динамика системы параллельных импульсных дуг с индуктивным делителем тока // Электротехника. 1981. № 9. С. 17–18.
2. Ашмарин В.В., Блохинцев А.А. Ресурсные испытания и эрозионные характеристики разрядника с искажением поля // Вестник Чувашского университета. 2020. № 1. С. 47–56.
3. Ашмарин В.В., Блохинцев А.А. Разработка и исследование шунтирующего разрядника для мощных емкостных накопителей энергии, работающих на малоиндуктивные электродинамические устройства // Вестник Чувашского университета. 2018. № 1. С. 14–23.
4. Ашмарин В.В. Коммутаторы емкостного накопителя энергии для электродинамического ускорителя массы: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1994. 19 с.
5. Ашмарин В.В., Калихман С.А. Временные характеристики разрядников с искажением поля // Электротехника. 1991. № 7. С. 24–27.

АШМАРИН ВАСИЛИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности и инженерной экологии, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (ashmarin1953@yandex.ru).

ОСИПОВ ДЕНИС ГЕННАДЬЕВИЧ – кандидат экономических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности и инженерной экологии, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (denps@mail.ru).

РЕЗЮКОВ ИГОРЬ ВАСИЛЬЕВИЧ – старший преподаватель кафедры безопасности жизнедеятельности и инженерной экологии, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (rezigvas@mail.ru).

Vasily V. ASHMARIN, Denis G. OSIPOV, Igor V. REZYUKOV

DESIGN FEATURES AND THE TIME CHARACTERISTICS OF THE RAIL FOUR-CHANNEL SPARK GAP WITH FIELD DISTORTION

Key words: rail gap with the distortion field, the control electrode of the inductive divider current, the delay time of discharge, the heterogeneity of the field threshold voltage.

The article discusses the design features of a four-channel rail arrester with field distortion and the results of the study of its time characteristics. The need for this work related to the development of such dischargers due to the lack of their analogues is due to the widespread use of capacitive energy storage devices as power sources for electrodynamic mass accelerators. At the present stage of 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 aircraft structural elements with particles of different masses and different origins. According to the operating conditions of the experimental stands and 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 vary from hundreds of kilo amperes to several million amperes at acceleration times from units to hundreds of microseconds. With this in mind, capacitive energy storage devices are made in a multi-module design. Each module is switched to the load by its own switch. To extend the range of operation of the drive, provide the required erosion resistance of the electrodes of the switch, the stability of the discharge formation at parallel operation of switches developed construction of a rail four-channel spark gap with the distortion field, experimental and theoretical study of the effect of the ratio of the geometric dimensions of the inter electrode gap for obtaining small values for the delay time of the discharge.

As a result of the research, it is shown that the value of the delay time t_{zap} depends on the shape and diameter of the main electrodes, the material of the electrodes, the distance between the main and the control electrode, the threshold voltage, as well as the degree of inhomogeneity of the field in the inter electrode gap.

The obtained analytical expressions allow us to determine the values of threshold stresses and delay times, taking into account the statistical delay time and the time of discharge formation.

It is established that the value of the delay time is significantly affected by the field inhomogeneity coefficient and the configuration of the control electrode.

It is noted that when the operating voltage on the arrester exceeds the threshold voltage, the delay time of the switch lies in the nanosecond region.

The value of the threshold voltage U_{por} , at which the process of direct transformation of the streamer into a spark discharge with high conductivity, followed by a breakdown of the inter electrode gap, is determined.

References

1. Ashmarin V.V., Kalikhman S.A. *Dinamika sistemy parallel'nykh impul'snykh dug s induktivnym delitelem toka* [Dynamics of a system of parallel pulse arcs with an inductive current divider]. *Elektrotehnika*, 1981, no. 9, pp. 17–18.
2. Ashmarin V. V., Blokhintsev A. A. *Resursnye ispytaniya i erozionnye harakteristiki razryadnika s iskazheniem polya* [Resource tests and erosive characteristics of a spark gap with field distortion]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2020, no. 1, pp. 47–56.
3. Ashmarin V.V., Blokhintsev A.A. *Razrabotka i issledovanie shuntiruyushchego razryadnika dlya moshchnykh emkostnykh nakopitelei energii, rabotayushchikh na maloinduktivnye elektrodinamicheskie ustroystva* [Development and research of a shunt arrester for high-power capacitive energy storage devices operating on low-inductive electrodynamic devices]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2018, no. 1, pp. 14–23.
4. Ashmarin V.V. *Kommutatory emkostnogo nakopitelya energii dlya elektrodinamicheskogo uskoritelya massy: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Capacitive energy storage switches for an electrodynamic mass accelerator. Abstract of Cand. Diss.]. Moscow, 1994. 19 p.
5. Ashmarin V.V., Kalikhman S.A. *Vremennye harakteristiki razryadnikov s iskazheniem polya* [Time characteristics of dischargers with field distortion]. *Electrical Engineering*, 1991, no. 7, pp. 24–27.

VASILIIY V. ASHMARIN – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Life Safety and Environmental Engineering, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (ashmarin1953@yandex.ru).

DENIS G. OSIPOV – Candidate of Economics Sciences, Department of Life Safety and Environmental Engineering, Chuvash State University, Cheboksary, Russia (denps@mail.ru).

IGOR V. REZYUKOV – Senior Lecturer, Department of Life Safety and Environmental Engineering, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (rezigvas@mail.ru).

Формат цитирования: Ашмарин В.В., Осипов Д.Г., Резюков И.В. Особенности конструктивного исполнения и временные характеристики рельсового четырехканального разрядника с искажением поля // Вестник Чувашского университета. – 2021. – № 1. – С. 27–35. DOI: 10.47026/1810-1909-2021-1-27-35.