

УДК 621.387.32

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИИ НЕУПРАВЛЯЕМОГО РАЗРЯДНИКА-ОБОСТРИТЕЛЯ НА НАПРЯЖЕНИЕ ДО 500 КВ

Д. С. Маханько, старший научный сотрудник АО «Плазма», Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0002-7609-9970, e-mail: mahdim@rambler.ru

Рассматривается задача определения факторов, влияющих на электрическую прочность неуправляемых разрядников-обострителей. Целью работы является исследование влияния соотношений геометрических размеров и форм высоковольтного керамического изолятора, вывода электрода и корпуса разрядника-обострителя высокого давления на его электрическую прочность в диапазоне динамического напряжения пробоя от 100 до 500 кВ. Разработана базовая конструкция разрядника-обострителя. Выработаны практические рекомендации по конструированию неуправляемых газонаполненных отпаянных разрядников-обострителей в металлокерамическом исполнении, обеспечивающие минимальные геометрические размеры при напряжениях до 500 кВ, субнаносекундные времена срабатывания и ресурс не менее 3×10^6 включений в заданном эксплуатационном режиме. Освоен промышленный выпуск серии разрядников-обострителей типа РО – 48, – 43, – 49, – 72 на рабочие напряжения от 100 до 500 кВ для использования в импульсной рентгеновской технике.

Ключевые слова: разрядник-обостритель, электрическая прочность, керамический изолятор, пробой по поверхности изолятора, конструкция разрядника-обострителя, длительность переднего фронта высоковольтного импульса, генератор высоковольтных импульсов.

DOI: 10.21667/1995-4565-2021-78-188-197

Введение

Неуправляемые искровые разрядники-обострители являются одним из основных элементов любого высоковольтного импульсного генератора, предназначенного для формирования высоковольтных импульсов напряжения с амплитудами в сотни киловольт и длительностью переднего фронта в единицы и десятые доли наносекунды [1-3]. Области применения разрядников-обострителей в составе высоковольтных импульсных генераторов являются портативные рентгеновские аппараты, ускорительная техника, источники накачки газоразрядных лазеров сверхатмосферного давления, электронно-оптические преобразователи и фоторегистраторы пико- и фемтосекундных радиационных процессов [4]. Основными требованиями, предъявляемыми к разрядникам-обострителям, являются минимальные геометрические размеры, нано- и субнаносекундные времена срабатывания и высокая (до 500 кВ) электрическая прочность керамического изолятора и промежутка между высоковольтным выводом и корпусом разрядника.

Настоящая работа посвящена определению взаимосвязей между конструктивными элементами разрядника-обострителя и электрической прочностью керамического изолятора к пробоям по его поверхности, а также пробоем промежутка между высоковольтным выводом и корпусом разрядника, с целью создания базовой конструкции и, на её основе, серии малогабаритных отпаянных разрядников-обострителей на напряжения от 100 до 500 кВ.

Наносекундный источник рентгеновского излучения

На рисунке 1 представлена электрическая схема наносекундного источника рентгеновского излучения.

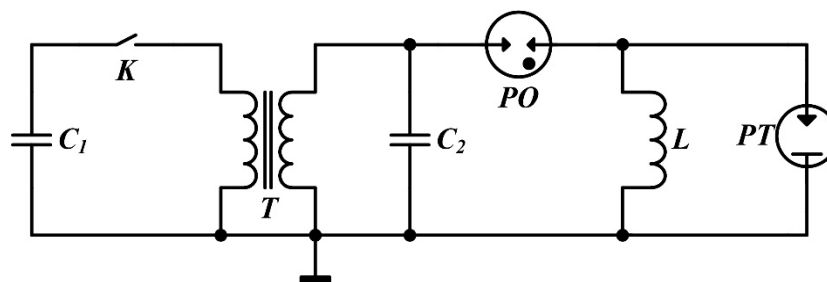


Рисунок 1 – Электрическая схема наносекундного источника рентгеновского излучения
Figure 1 – Electrical scheme of a nanosecond X-ray source

При замыкании ключа K предварительно заряженный накопительный конденсатор C_1 разряжается через первичную обмотку трансформатора T . При этом во вторичной его обмотке возникает импульс высокого напряжения в виде затухающей синусоиды. Время нарастания напряжения первой полуволны затухающей синусоиды составляет порядка 10^{-6} с и определяется параметрами контура вторичной цепи трансформатора (индуктивностью вторичной обмотки трансформатора и емкостью C_2 , являющейся суммарной емкостью вторичного контура, включающей в себя конструктивную емкость излучателя, межэлектродную емкость разрядника и межвитковую емкость трансформатора). При зарядке емкости C_2 до напряжения пробоя разрядника-обострителя PO происходит его пробой и к электродной системе трубки PT прикладывается высоковольтный импульс напряжения с крутым фронтом в пределах 1 нс, определяемым временем коммутации разрядника-обострителя. Таким образом, назначение разрядника-обострителя заключается в преобразовании высоковольтного импульса напряжения микросекундной длительности в импульс наносекундной или субнаносекундной длительности. От режима его работы зависят выходные параметры излучателя и его ресурс [5].

В 1965 году был разработан первый в СССР промышленный импульсный рентгеновский дефектоскоп. Возникла необходимость в разработке и промышленном выпуске отпаянных металлокерамических разрядников-обострителей в широком диапазоне динамического напряжения пробоя от 100 до 500 кВ. В НИИГРП «Плазма» г. Рязань начиная с 1972 года проводились и проводятся научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по разработке и созданию разрядников-обострителей в широком диапазоне динамического напряжения пробоя. По результатам исследований была определена базовая конструкция газонаполненного отпаянного металлокерамического разрядника-обострителя высокого давления с наносекундным и субнаносекундным временем коммутации, большим ресурсом работы (3×10^6 пробоев) и высокой электрической прочностью при минимальных габаритах [6].

Базовая конструкция разрядника-обострителя

На рисунке 2 показана базовая конструкция газонаполненного разрядника.

Газонаполненный разрядник-обостритель содержит металлический корпус 1 в виде цилиндрического стакана с отбортовкой 2 , керамический изолятор 3 в виде полого усеченного конуса, коммутирующие электроды 4 (анод) и 5 (катод), один из которых анод 4 закреплен на внутренней поверхности дна корпуса 1 , а другой катод 5 – на торцевой поверхности меньшего основания изолятора 3 , соединенного другим основанием с отбортовкой 2 корпуса 1 , вывод 6 электрода 5 , часть которого, расположенная внутри изолятора, выполнена в виде усеченного конуса и штенгеля 7 для наполнения разрядника газом.

В качестве рабочей среды в разрядниках-обострителях используется смесь элегаза SF_6 и азота N_2 или чистый водород. В связи с тем, что применение смеси не обеспечивает необходимого ресурса разрядника и обладает худшими коммутационными характеристиками, при проведении дальнейших измерений применялся только водород особой чистоты при давлениях до 120 атмосфер.

Разрядник работает следующим образом: при приложении высоковольтного импульсного напряжения с достаточной амплитудой к промежутку между электродами 4 и 5 происходит его пробой и импульс напряжения, обусловленный протеканием тока в разрядном контуре, формируется на нагрузке. При этом крутизна нарастания импульса напряжения на нагрузке определяется временем коммутации разрядника и индуктивностью разрядного контура. Во время воздействия импульсного напряжения на разрядник-обостритель между его электродами 4 (анод) и 5 (катод) распределение потенциала электрического поля вдоль образующей конической поверхности изолятора 3 и между выводом 6 электрода 5 и корпусом 1 зависит от взаимного расположения изолятора 3, корпуса 1 и вывода 6 электрода 5, а также от их конфигурации.

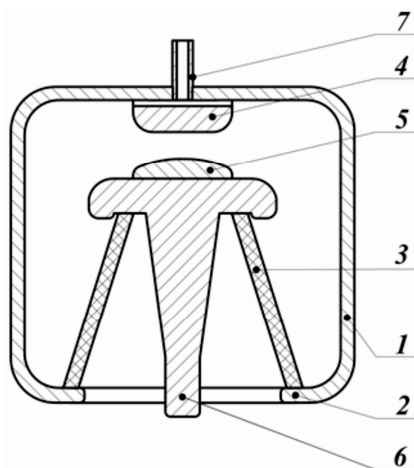


Рисунок 2 – Базовая конструкция разрядника-обострителя (1 – корпус, 2 – отбортовка корпуса, 3 – изолятор, 4 – анод, 5 – катод, 6 – вывод, 7 – штенгель)

Figure 2 – Basic design of spark gap-sharpener (1 – casing, 2 – flanging of casing, 3 – insulator, 4 – anode, 5 – cathode, 6 – electrode connector, 7 – exhaust tube)

Электрическая прочность базовой конструкции разрядника определяется поверхностной электрической прочностью изолятора 3 и электрической прочностью промежутка между выводом 6 электрода 5 и отбортовкой 2 металлического корпуса 1.

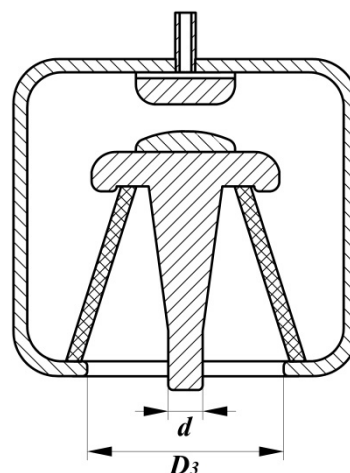
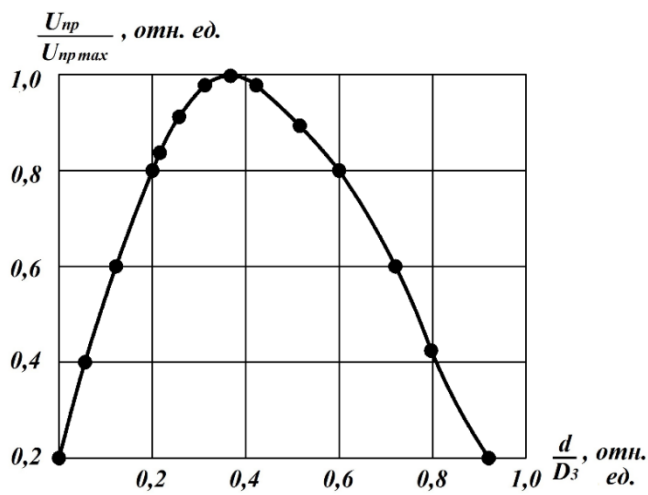


Рисунок 3 – Зависимость напряжения пробоя между выводом электрода и отбортовкой корпуса разрядника-обострителя от отношения диаметра вывода электрода к диаметру отбортовки корпуса (U_{np} – напряжение пробоя, $U_{np \max}$ – максимальное напряжение пробоя, d – диаметр вывода, D_3 – диаметр отбортовки корпуса)

Figure 3 – The dependence of breakdown voltage between electrode connector and the flanging of spark gap-sharpener casing on ratio of electrode connector diameter from the diameter of casing flanging (U_{np} – breakdown voltage, $U_{np \max}$ – maximum breakdown voltage, d – diameter of electrode connector, D_3 – diameter of flanging of the casing)

На рисунке 3 показана зависимость напряжения пробоя между выводом электрода и отбортовкой корпуса от отношения диаметра вывода электрода к диаметру отбортовки корпуса d/D_3 . Максимальное напряжение пробоя $U_{np\ max}$ составляло 500 кВ и определялось по показанию осциллографа. При $d/D_3 = 0,38$ кривая зависимости имеет максимум, а при $U_{np}/U_{np\ max} \geq 0,9$ отношение d/D_3 лежит в пределах $0,25 \leq d/D_3 \leq 0,5$. В этом случае промежуток между выводом электрода и отбортовкой корпуса имеет достаточно большую электрическую прочность.

При $d/D_3 < 0,25$ ($D_3 = \text{const}$) на характер изменения напряжения пробоя в большей степени влияет кривизна поверхности вывода электрода. Известно, что напряженность электрического поля вблизи цилиндрического стержня обратно пропорциональна квадрату радиуса стержня, т.е. напряженность электрического поля с уменьшением диаметра вывода увеличивается, что влечет за собой снижение напряжения пробоя промежутка.

При $d/D_3 > 0,5$ ($D_3 = \text{const}$) на характер изменения напряжения пробоя в большей степени влияет уменьшение зазора между выводом электрода и отбортовкой корпуса, чем ослабление напряженности электрического поля вблизи вывода электрода за счет увеличения его диаметра.

Из приведенного выше следует, что для увеличения электрической прочности разрядника необходимо соблюдать следующее соотношение: $0,25 \leq d/D \leq 0,5$.

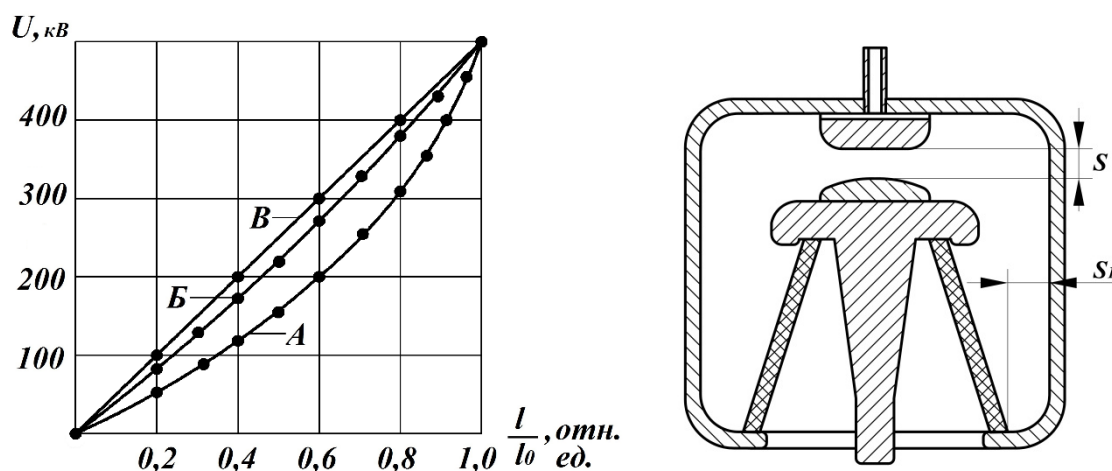


Рисунок 4 – Зависимости влияния взаимного расположения изолятора относительно корпуса разрядника на распределение потенциала электрического поля вдоль образующей изолятора (l – длина образующей изолятора в точке измерения; l_0 – полная длина образующей изолятора; S – междуэлектродное расстояние; S_l – расстояние между внутренней поверхностью корпуса и большим основанием изолятора; А – кривая распределения потенциала электрического поля вдоль образующей изолятора при $S_l = 0$; Б – кривая распределения при $S_l = S$; В – кривая распределения при $S_l = 2S$)

Figure 4 – Dependencies of the influence of insulator location relative to spark gap casing from the distribution of electric field potential along insulator generatrix

(l – length of insulator generatrix at the measurement point; l_0 – total length of isolator generatrix; S – interelectrode distance; S_l – distance between the inner surface of the casing and the large base of the insulator; А – curve of the electric field potential distribution along the insulator generatrix at $S_l = 0$; Б – curve of the distribution at $S_l = S$; В – curve of the distribution at $S_l = 2S$)

Как видно из рисунка 4, на распределение потенциала электрического поля вдоль образующей изолятора влияет расположение изолятора относительно корпуса разрядника-обострителя. При расположении корпуса в непосредственной близости от изолятора (расстояние между внутренней цилиндрической поверхностью корпуса и большим основанием изолятора $S_l = 0$) имеет место заметное искажение распределения потенциала электрического поля (ослабление напряженности электрического поля) в нижней части изолятора ближе к металлическому корпусу (рисунок 4, кривая А). При удалении изолятора от внутренней ци-

цилиндрической поверхности корпуса происходит выравнивание потенциала электрического поля вдоль образующей конической поверхности изолятора и при расстоянии, равном межэлектродному расстоянию, оно близко к равномерному (рисунок 4, кривая Б). При дальнейшем увеличении расстояния между внутренней цилиндрической поверхностью корпуса и большим основанием изолятора до расстояния, равного удвоенному расстоянию между электродами, распределение потенциала электрического поля становится линейным (рисунок 4, кривая В). Дальнейшее увеличение расстояния между внутренней цилиндрической поверхностью корпуса и большим основанием изолятора приводит к неоправданному увеличению габаритов разрядника, поэтому при снятии распределения потенциала электрического поля вдоль образующей изолятора ограничиваются расстоянием, равным удвоенному расстоянию между электродами.

Таким образом, для увеличения электрической прочности разрядника необходимо удалить внутреннюю цилиндрическую поверхность корпуса от большого основания изолятора на расстояние не менее расстояния между электродами.

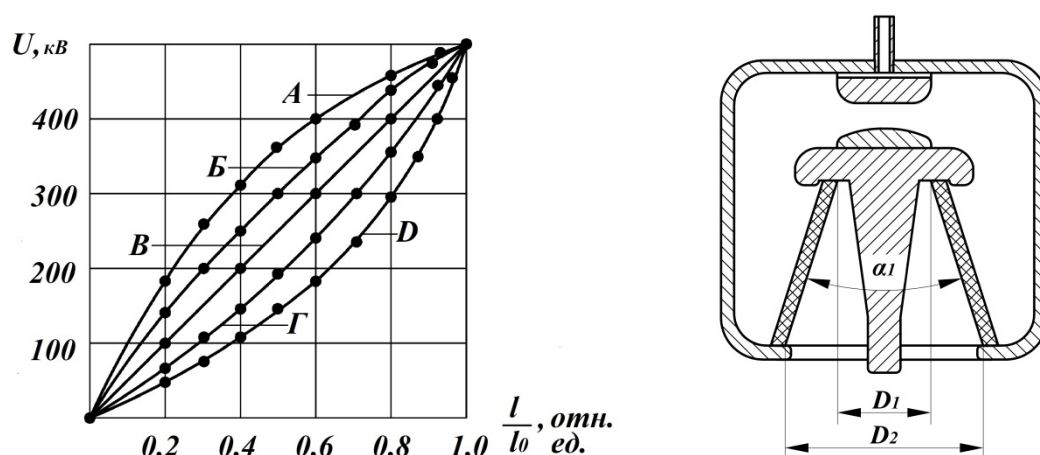


Рисунок 5 – Зависимости влияния конфигурации изолятора на распределение потенциала электрического поля вдоль образующей изолятора
 (l – длина образующей изолятора в точке измерения; l_0 – полная длина образующей изолятора; D_1 – диаметр меньшего основания изолятора; D_2 – диаметр большего основания изолятора; α_1 – угол раскрытия изолятора; А – кривая распределения потенциала электрического поля вдоль образующей изолятора при $D_1/D_2 = 0,9$, $\alpha_1 = 5^\circ$; Б – кривая распределения при $D_1/D_2 = 0,8$, $\alpha_1 = 10^\circ$; В – кривая распределения при $D_1/D_2 = 0,6$, $\alpha_1 = 20^\circ$; Г – кривая распределения при $D_1/D_2 = 0,4$, $\alpha_1 = 30^\circ$; Д – кривая распределения при $D_1/D_2 = 0,2$, $\alpha_1 = 40^\circ$)

Figure 5 – Dependencies of the influence of insulator configuration on the distribution of the electric field potential along the insulator generatrix

(l – length of the insulator generatrix at the measurement point; l_0 – total length of the insulator generatrix; D_1 – diameter of the smaller insulator base; D_2 – diameter of the larger insulator base; α_1 – insulator opening angle; А – curve of the electric field potential distribution along the insulator generatrix at $D_1/D_2 = 0,9$, $\alpha_1 = 5^\circ$; Б – curve of the distribution at $D_1/D_2 = 0,8$, $\alpha_1 = 10^\circ$; В – curve of the distribution at $D_1/D_2 = 0,6$, $\alpha_1 = 20^\circ$; Г – curve of the distribution at $D_1/D_2 = 0,4$, $\alpha_1 = 30^\circ$; Д – curve of the distribution at $D_1/D_2 = 0,2$, $\alpha_1 = 45^\circ$)

На рисунке 5 показано, что на распределение потенциала электрического поля вдоль образующей изолятора также влияет конфигурация изолятора (величина отношения D_1/D_2 и угол α_1).

При $D_1/D_2 = 0,9$, $\alpha_1 = 5^\circ$ (рис. 5, кривая А) имеет место значительное искажение распределения потенциала электрического поля (ослабление напряженности электрического поля) в верхней части изолятора ближе к месту соединения вывода электрода, с меньшим ос-

нованием изолятора, что объясняется близким расположением конической поверхности вывода электрода относительно поверхности изолятора.

При уменьшении отношения D_1/D_2 и соответственно при увеличении угла α_1 , т.е. при удалении конической поверхности изолятора относительно конической поверхности вывода электрода происходит выравнивание распределения потенциала электрического поля вдоль образующей изолятора и при $D_1/D_2 = 0,8$ и $\alpha_1 = 10^\circ$ (рисунок 5, кривая Б) оно близко к равномерному.

При $D_1/D_2 = 0,6$, $\alpha_1 = 20^\circ$ (рисунок 5, кривая В) распределение потенциала электрического поля практически линейно.

При дальнейшем уменьшении отношения D_1/D_2 и соответственно увеличении угла α_1 происходит уменьшение напряженности электрического поля в верхней части изолятора, что влечет за собой неравномерное распределение потенциала электрического поля вдоль образующей изолятора, при этом, когда $D_1/D_2 = 0,4$, $\alpha_1 = 30^\circ$ (рисунок 5, кривая Г), распределение потенциала еще остается близко к равномерному, а при дальнейшем уменьшении D_1/D_2 и соответственно увеличении угла α_1 (рисунок 5, кривая Д) неравномерность распределения потенциала заметно увеличивается.

Из рассмотрения кривых, приведенных на рисунке 5, следует, что для увеличения электрической прочности разрядника необходимо соблюдать соотношения $0,4 \leq D_1/D_2 \leq 0,8$ и $10^\circ \leq \alpha_1 \leq 30^\circ$.

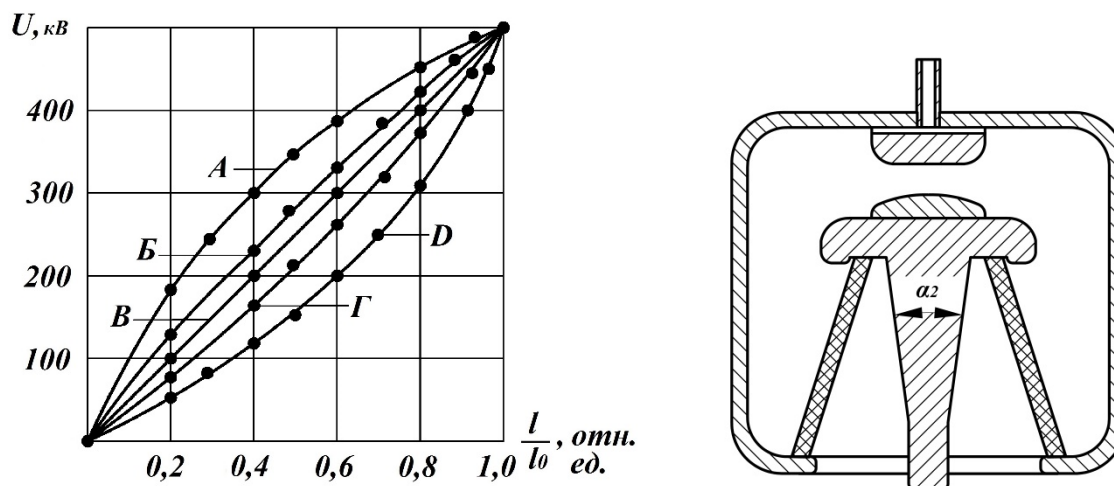


Рисунок 6 – Зависимости влияния величины угла α_2 конической поверхности вывода электрода на распределения потенциала электрического поля вдоль образующей изолятора
(l – длина образующей изолятора в точке измерения; l_0 – полная длина образующей изолятора; α_2 – угол конической поверхности вывода электрода; А – кривая распределения потенциала электрического поля вдоль образующей изолятора при $\alpha_2 = 5^\circ$;

Б – кривая распределения при $\alpha_2 = 10^\circ$; В – кривая распределения при $\alpha_2 = 25^\circ$;

Г – кривая распределения при $\alpha_2 = 45^\circ$; Д – кривая распределения при $\alpha_2 = 40^\circ$)

Figure 6 – Dependencies of the influence of angle α_2 of the conical surface of the electrode connector on the distribution of the electric field potential along the insulator generatrix
(l – length of the insulator generatrix at the measurement point; l_0 – total length of the isolator generatrix; α_2 – angle of the conical surface of the electrode connector; А – curve of the electric field potential distribution along the insulator generatrix at $\alpha_2 = 5^\circ$; Б – curve of the distribution at $\alpha_2 = 10^\circ$;
В – curve of the distribution at $\alpha_2 = 25^\circ$; Г – curve of the distribution at $\alpha_2 = 45^\circ$;
Д – curve of the distribution at $\alpha_2 = 50^\circ$)

Кривые, приведённые на рисунке 6, показывают, что на распределение потенциала электрического поля вдоль образующей изолятора влияет величина угла α_2 конической поверхности вывода электрода.

При $\alpha_2 = 5^\circ$ имеет место значительное искажение распределения потенциала (ослабление напряженности электрического поля) в верхней части изолятора ближе к месту соединения вывода электрода с меньшим основанием изолятора. Это объясняется близким расположением конической поверхности вывода электрода относительно поверхности изолятора (рисунок 6, кривая А). При увеличении угла α_2 конической поверхности вывода электрода происходит выравнивание распределения потенциала вдоль образующей поверхности изолятора и при $\alpha_2 = 10^\circ$ оно близко к равномерному (рисунок 6, кривая Б). При увеличении угла α_2 до значения, равного 25° , распределение потенциала электрического поля становится линейным (рис. 6, кривая В).

Дальнейшее увеличение угла α_2 вызывает увеличение напряженности поля в верхней части изолятора, что влечет за собой неравномерное распределение потенциала электрического поля вдоль образующей изолятора. При этом, когда $\alpha_2 = 45^\circ$ (рисунок 6, кривая Г), распределение потенциала еще остается близко к равномерному, а при дальнейшем увеличении угла α_2 до 50° (рисунок 6, кривая Д) неравномерность распределения потенциала заметно увеличивается из-за увеличения напряженности поля в верхней части изолятора.

Из приведенного выше следует, что для увеличения электрической прочности разрядника необходимо выбирать угол α_2 конической поверхности вывода электрода в пределах $10^\circ \leq \alpha_2 \leq 45^\circ$.

Таким образом, при соблюдении следующих соотношений в разряднике-обострителе:

$$\begin{aligned} 0,4 \leq D_1/D_2 \leq 0,8 \\ 10^\circ \leq \alpha_1 \leq 30^\circ \\ 10^\circ \leq \alpha_2 \leq 45^\circ \\ 0,25 \leq d/D_3 \leq 0,5, \end{aligned} \quad (1)$$

где D_1 – внутренний диаметр меньшего основания изолятора, мм; D_2 – внутренний диаметр большего основания изолятора, мм; α_1, α_2 – углы конической поверхности изолятора и вывода электрода соответственно; d – диаметр цилиндрической части вывода электрода, мм; D_3 – диаметр отверстия отбортовки корпуса, мм и выполнении расстояния между внутренней цилиндрической поверхностью корпуса и большим основанием изолятора не менее межэлектродного позволяет значительно повысить и получить максимально возможную электрическую прочность, что повышает надежность работы разрядника в аппаратуре [6, 7].

Серийно-выпускаемые разрядники-обострители на основе базовой конструкции

На основе базовой конструкции разрядника-обострителя разработана серия приборов (РО-48, РО-43, РО-49, РО-50, РО-72 и др.) [8] в диапазоне напряжений пробоя от 100 до 500 кВ с улучшенными техническими характеристиками и значительно большим ресурсом работы в заданном эксплуатационном режиме по сравнению с ранее выпускаемыми разрядниками Р-43, Р-48 и Р-49.

Таблица 1 – Характеристики серийно-выпускаемых разрядников-обострителей АО «Плазма»
Table 1 – Characteristics of mass-produced spark gap-sharpeners of JSC «Plasma»

Тип разрядника	Динамическое напряжение пробоя, кВ	Относительный среднеквадрат. разброс напряжения пробоя, %, не более	Коммутируемая энергия, Дж	Габариты, Ø x Н, мм	Минимальная наработка, имп, не менее
РО-48	100 – 140	3	0,5	40x69	3×10^6
РО-43	140 – 190		2	50x85	
РО-49	180 – 250		6	70x95	
РО-72	250 – 500		20	85x115	

Разрядники-обострители, разработанные на основе приведённой базовой конструкции, отличаются: малые габариты и вес, высокая стабильность срабатывания, высокое динамическое напряжение пробоя, малое время коммутации (менее 0,5 нс) и большой срок службы.

Время коммутации во всех разрядниках-обострителях составляет менее 0,5 нс за счёт малого межэлектродного расстояния (2,5 – 4 мм) и высокого давления наполняющего газа (водород ОСЧ до 120 технических атмосфер).

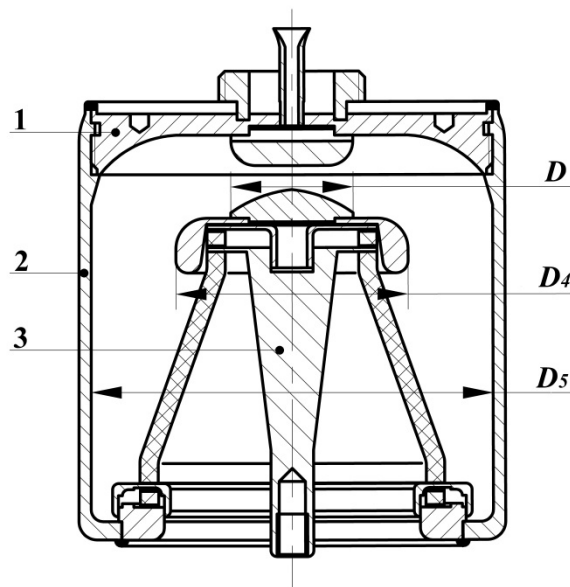


Рисунок 7 – Конструкция разрядника-обострителя РО-49
(1 – анодный узел, 2 – корпус, 3 – катодный узел, D – диаметр электродов, D_4 – диаметр экрана, D_5 – диаметр внутренней поверхности корпуса)

Figure 7 – Spark gap-sharpener RO-49 design:
(1 – anode unit, 2 – casing, 3 – cathode unite, D – electrodes diameter, D_4 – shield diameter, D_5 – diameter of inner surface of the casing)

На рисунке 7 приведена конструкция разрядника-обострителя РО-49. Прибор состоит из анодного узла 1, цилиндрического корпуса 2 и катодного узла 3 и имеет высокую механическую прочность, определяемую прочностью самого корпуса, так как торцевые спаи металла с керамикой компенсированы и испытывают после наполнения рабочим газом только сжимающие усилия. Корпус и узлы соединены аргонодуговой сваркой и дополнительно, для усиления жёсткости и надёжности конструкции разрядника, анодный узел 1 соединен с корпусом 2 резьбовым соединением. Такая конструкция разрядника способна выдерживать внутреннее давление рабочего газа более 100 атмосфер, что позволяет получить время коммутации менее 0,5 нс.

Для эффективной работы импульсной рентгеновской трубки со взрывной эмиссией в рентгеновском аппарате необходимо иметь как можно меньшее время коммутации разрядника-обострителя (менее 1 нс) и его стабильную работу, что обеспечивается правильным выбором геометрических форм и оптимальных соотношений размеров деталей разрядника, а также правильным выбором межэлектродного расстояния и давления наполняемого газа [3]. Для обеспечения высокой электрической прочности и стабильности срабатывания разрядника – обострителя, помимо выполнения соотношений (1), необходимо, чтобы диаметр электродов D , экрана D_4 , внутренней поверхности металлического корпуса D_5 и межэлектродного расстояния S были связаны соотношением:

$$\begin{aligned} D &= (3 \div 5) S \\ (D_5 - D_4) / 2 S &\geq 3 \\ D_4 &= (0,25 \div 0,6) D_5 \end{aligned}$$

Если конструктивные элементы разрядника-обострителя соответствуют этим соотношениям, то пробой в разряднике происходит между электродами и, тем самым, блокируются нежелательные процессы и пробой по поверхности изолятора и в радиальном направлении между экраном и внутренней поверхностью корпуса [9].

Также увеличение электрической прочности разрядника-обострителя происходит за счёт предварительной тренировки прибора в среде электроотрицательного газа (SF_6) и определённых способов выбора давления и тренировки в среде рабочего газа (водород ОСЧ) [10 – 12].

Высокая электрическая прочность разрядников-обострителей с оптимальным выбором геометрических форм и размеров деталей позволяет значительно увеличить ресурс и повысить срок службы аппаратуры, в которой он используется.

Заключение

Установлено, что наибольшая электрическая прочность между выводом электрода и отбортовкой корпуса разрядника-обострителя достигается при соотношении диаметра вывода электрода к диаметру отбортовки корпуса в пределах $0,25 \leq d/D_3 \leq 0,5$.

Наибольшая электрическая прочность керамического высоковольтного изолятора достигается при соблюдении расстояния внутренней цилиндрической поверхности корпуса от большего основания изолятора не менее расстояния между электродами, при соотношении внутреннего диаметра меньшего основания изолятора к внутреннему диаметру большего основания изолятора в пределах $0,4 \leq D_1/D_2 \leq 0,8$ и выборе угла конической поверхности изолятора в пределах $10 \leq \alpha_1 \leq 30^\circ$, а также выборе угла α_2 конической поверхности вывода электрода в пределах $10^\circ \leq \alpha_2 \leq 45^\circ$.

Нежелательные пробои по поверхности изолятора и в радиальном направлении между экраном и внутренней поверхностью корпуса блокируются, если диаметр электродов D соответствует величине, равной от 3 до 5 междуэлектродных расстояний, размер диаметра экрана соответствует $0,25 \div 0,6$ от диаметра внутренней поверхности металлического корпуса и отношение разности диаметров внутренней поверхности корпуса и экрана к удвоенному междуэлектродному расстоянию не меньше 3.

Освоен промышленный выпуск малогабаритных отпаянных разрядников-обострителей типа РО – 48, – 43, – 49, – 72 с наносекундными временами срабатывания и работающих при напряжениях от 100 до 500 кВ при давлениях рабочих газов до 120 атмосфер при коммутируемой энергии до 20 джоулей на частотах повторения до 50 герц.

Библиографический список

1. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. 704 с.
2. Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Советское радио, 1974. 256 с.
3. Ковальчук Б. М., Кремнев В. В., Поталицын Ю. Ф. Сильноточные наносекундные коммутаторы. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1979. 175 с.
4. Сорокин Д. А., Белоплотов Д. В., Гришков А. А. и др. Высоковольтный наносекундный разряд в неоднородном электрическом поле и его свойства. Томск: STT, 2020. 288 с.
5. Морговский Л. Я., Пеликс Е. А. Импульсная рентгенография. Аппараты серии «Арина». СПб: Синус п, 1999. 75 с.
6. Меркулов Б. П., Мельничук Г. В., Маханько Д. С., Меркулов Д. Б. Базовая конструкция газонаполненного металлокерамического разрядника высокого давления для импульсных источников рентгеновского излучения // Оборонный комплекс научно-техническому прогрессу России. 2013. №1. С. 44-51.
7. Авилов Э. А., Белкин Н. В., Меркулов Б. П. Газонаполненный разрядник // Авторское свидетельство СССР №1431588, кл. H01J 17/00. Рязань, 1991. 6 с.
8. <https://www.plasmalabs.ru/category/index/id/31>
9. Богданов В. А., Меркулов Б. П., Самородов В. Г. Газонаполненный разрядник // Патент на изобретение RU2320048C1, кл. H01J 17/04. Рязань, 2008. 7 с.
10. Меркулов Б. П., Маханько Д. С., Фокин В. М., Самородов В. Г. Способ изготовления разрядника с водородным наполнением // Патент на изобретение RU2560096, кл. H01J 17/02. Рязань, 2014. 8 с.
11. Меркулов Б. П., Маханько Д. С., Наседкин В. Б. и др. Способ изготовления разрядника с водородным наполнением // Патент на изобретение RU2658320, кл. H01J 17/02, H01J 9/44, H01T 1/00. Рязань, 2017. 15 с.
12. Меркулов Б. П., Маханько Д. С., Черепенникова Н. И. Способ изготовления разрядника с водородным наполнением // Патент на изобретение RU2697264, кл. H01J 17/20, H01J 9/38. Рязань, 2018. 14 с.

UDC 621.387.32

ELECTRICAL STRENGTH OF UNCONTROLLED SPARK GAP-SHARPENER DESIGN FOR VOLTAGE UP TO 500 KV

D. S. Makhanko, senior researcher, JSC Plasma, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0002-7609-9970, e-mail: mahdim@rambler.ru

The problem of determining the factors affecting electrical strength of uncontrolled spark gap-sharpener is investigated. The aim of this work is to study the influence of geometric dimensions and shapes of a high-voltage ceramic insulator, high-voltage connector of electrode and the casing of a high-pressure spark gap-sharpener on its electrical strength in the range of dynamic breakdown voltage from 100 to 500 kV. The basic design of spark gap-sharpener has been developed. Practical recommendations are given for engineering of uncontrolled gas-filled soldered spark gap-sharpener in metal-ceramic design, providing minimum geometric dimensions at voltages up to 500 kV, subnanosecond response times and a resource of at least 3×10^6 actuations in a given operating mode. The industrial production of a series of spark gap-sharpener of RO –48, –43, –49, –72 type has been mastered for operating voltages from 100 to 500 kV for use in pulsed X-ray technology.

Key words: spark gap-sharpener, electrical strength, ceramic insulator, breakdown on insulator surface, spark gap-sharpener design, duration of high-voltage pulse leading edge, high-voltage pulse generator

DOI: 10.21667/1995-4565-2021-78-188-197

References

1. **Mesjac G. A.** *Impul'snaja jenergetika i jelektronika*. (Pulse energy and electronics). Moscow: Nauka, 2004. 704 p. (in Russian).
2. **Mesjac G. A.** *Generirovanie moshhnyh nanosekundnyh impul'sov*. (Generating powerful nanosecond pulses). Moscow: Sovetskoe radio, 1974, 256 p. (in Russian).
3. **Koval'chuk B. M., Kremnev V. V., Potalicyn Ju. F.** *Sil'notochnye nanosekundnye kommutatory*. (High-current nanosecond switches). Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie, 1979. 175 p. (in Russian).
4. **Sorokin D. A., Beloplotov D. V., Grishkov A. A. et al.** *Vysokovol'tnyj nanosekundnyj razrjad v neodnorodnom jelektricheskom pole i ego svojstva*. (High-voltage nanosecond discharge in inhomogeneous field and its properties). Tomsk: STT, 2020, 288 p. (in Russian).
5. **Morgovskij L. Ja., Peliks E. A.** *Impul'snaja rentgenografija. Apparaty serii «Arina»*. (Pulsed radiography. Devices of the Arina series.), S.-Peterburg: Sinus p, 1999. 75 p. (in Russian).
6. **Merkulov B. P., Mel'nichuk G. V., Mahan'ko D. S., Merkulov D. B.** *Bazovaja konstrukcija gazonapolnennogo metallokeramicheskogo razrjadnika vysokogo davlenija dlja impul'snyh istochnikov rentgenovskogo izlucheniya. Oboronnyj kompleks – nauchno-tehnicheskomu progressu Rossii*. 2013, no. 1, pp. 44-51. (in Russian).
7. **Avilov Je. A., Belkin N. V., Merkulov B. P.** *Gazonapolnennyj razrjadnik* (Gas-filled spark gap). Avtorskoe svidetel'stvo SSSR no. 1431588, kl. N01J 17/00. Rjazan', 1991. 6 p. (in Russian).
8. <https://www.plasmalabs.ru/category/index/id/31>
9. **Bogdanov V. A., Merkulov B. P., Samorodov V. G.** *Gazonapolnennyj razrjadnik* (Gas-filled spark gap). Patent na izobretenie RU2320048C1, kl. N01J 17/04. Rjazan', 2008. 7 p. (in Russian).
10. **Merkulov B. P., Mahan'ko D. S., Fokin V. M., Samorodov V. G.** *Sposob izgotovlenija razrjadnika s vodorodnym napolneniem* (Method of manufacturing a spark gap with hydrogen filling). Patent na izobretenie RU2560096, kl. N01J 17/02. Rjazan', 2014. 8 p. (in Russian).
11. **Merkulov B. P., Mahan'ko D. S., Nasedkin V. B. et al.** *Sposob izgotovlenija razrjadnika s vodorodnym napolneniem* (Method of manufacturing a spark gap with hydrogen filling). Patent na izobretenie RU2658320, kl. N01J 17/02, H01J 9/44, H01T 1/00. Rjazan', 2017. 15 p. (in Russian).
12. **Merkulov B. P., Mahan'ko D. S., Cherepennikova N. I.** *Sposob izgotovlenija razrjadnika s vodorodnym napolneniem* (Method of manufacturing a spark gap with hydrogen filling). Patent na izobretenie RU2697264, kl. H01J 17/20, H01J 9/38. Rjazan', 2018. 14 p. (in Russian).