

Технологические аспекты производства разрядников-обострителей на напряжение до 500 кВ

*Д.С. Маханько**

АО «Научно-исследовательский институт газоразрядных приборов «ПЛАЗМА», Рязань, Россия

**mahdim@rambler.ru*

Аннотация. 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 $3 \cdot 10^6$ включений в заданном эксплуатационном режиме. Установлено, что при изготовлении разрядников-обострителей высокого давления в металлокерамическом исполнении, с оптимальными, с точки зрения обеспечения необходимой электрической прочности, геометрическими размерами, они могут наполняться рабочими газами до давления 120 технических атмосфер. Освоен промышленный выпуск серии разрядников-обострителей типа РО-48, РО-43, РО-49, РО-72 на рабочие напряжения от 100 до 500 кВ для использования в импульсной рентгеновской технике.

Ключевые слова: разрядник-обостритель, электрическая прочность, механическая прочность, напряжение пробоя, технология изготовления.

1. 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. 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. Основными требованиями, предъявляемыми к разрядникам-обострителям, являются минимальные геометрические размеры, нано- и субнаносекундные времена срабатывания, высокая (до 500 кВ) электрическая прочность керамического изолятора и промежутка между высоковольтным выводом и корпусом разрядника. Для обеспечения высоких показателей коммутационных характеристик в разрядниках-обострителях в качестве рабочей среды используется водород при давлениях до 120 атмосфер. Большие значения давлений предъявляют очень жесткие требования к механической прочности, как отдельных узлов, так и конструкции разрядника в целом. Также необходим корректный подбор используемых электровакуумных материалов, которые обеспечивают высокую механическую прочность и вакуумную плотность спаев «металл-металл» и «металл-керамика». Кроме этого, конструкция разрядника-обострителя, работающего в наносекундном диапазоне времени, должна учитывать возможность согласования с линиями, формирующими высоковольтные импульсы наносекундной длительности.

Настоящая работа посвящена технологии изготовления серийных малогабаритных отпаянных газонаполненных разрядников – обострителей в металлокерамическом исполнении на напряжения от 100 до 500 кВ.

2. Базовая конструкция разрядника-обострителя

По результатам исследований была определена базовая конструкция (Рис.1) газонаполненного отпаянного металлокерамического разрядника-обострителя высокого давления с наносекундным и субнаносекундным временем коммутации, большим ресурсом работы ($3 \cdot 10^6$ пробоев) и высокой электрической прочностью при минимальных габаритах [1].

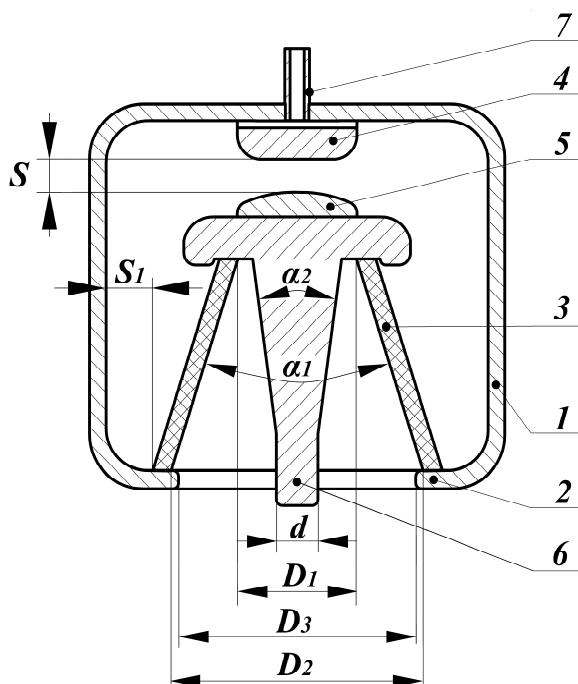


Рис.1. Базовая конструкция разрядника-обострителя.

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.

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.

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.

При соблюдении следующих соотношений в разряднике-обострителе:

$$0.4 \leq D_1/D_2 \leq 0.8,$$

$$10^\circ \leq \alpha_1 \leq 30^\circ,$$

$$10^\circ \leq \alpha_2 \leq 45^\circ,$$

$$0.25 \leq d/D_3 \leq 0.5,$$

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.

В работе [2] подробно описывается 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.

3. Серийно-выпускаемые разрядники-обострители и некоторые аспекты технологии их производства

На основе базовой конструкции разрядника-обострителя разработана серия приборов (РО-48, РО-43, РО-49, РО-50, РО-72 и др.) [3] 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.

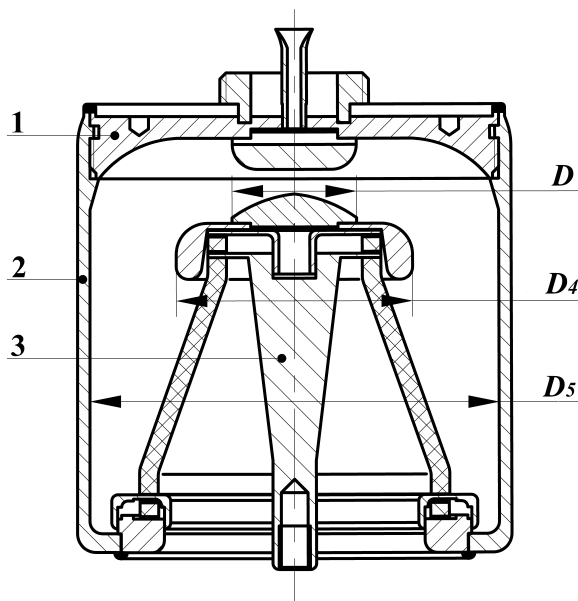


Рис.2. Конструкция разрядника-обострителя РО-49.

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 счет малого межэлектродного расстояния (2.5–4 мм) и высокого давления наполняющего газа (водород ОСЧ до 120 технических атмосфер).

На Рис.2 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, т.к. 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 жесткости и надежности 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. 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 [4]:

$$D = (3 \div 5) S,$$

$$(D_5 - D_4) / 2S \geq 3,$$

$$D_4 = (0.25 \div 0.6) D_5.$$

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.

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

В работе [5] рассматривается вопрос механической прочности разрядников-обострителей. В результате решения дифференциальных уравнений, описывающих механическую прочность оболочки металлокерамического разрядника-обострителя РО-49 были получены следующие результаты:

- цилиндрический корпус диаметром 70 мм и высотой 73 мм из нержавеющей стали марки 12X18Н10Т с толщиной стенки в 2 мм соединённый с анодной ножкой резьбовым соединениями аргонодуговой сваркой в верхней части и с катодным узлом посредством АДС в нижней части, позволяют выдерживать напряжения, создаваемые давлением 120 кгс/см²;

- конусный керамический изолятор из алюмооксидной керамики ВК94-1 (22ХС) с толщиной стенки в 3 мм при использовании компенсированных спаев обеспечивает возможность работы разрядника-обострителя с рабочим давлением до 120 кгс/см².

Экспериментальная проверка механической прочности разрядника-обострителя показала, что конструкция разрядника РО-49 в состоянии выдерживать давление до 200 кгс/см².

При изготовлении разрядника-обострителя вначале производят сборку анодного узла (Рис.3).

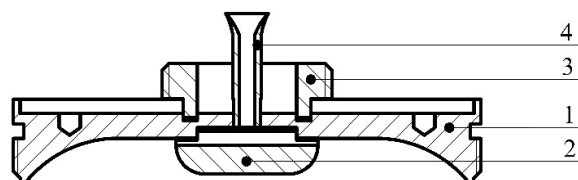


Рис.3. Конструкция анодного узла разрядника-обострителя РО-49.

Анодный узел состоит из крышки (1), изготовленной из никелевого сплава-ковар 29НК, анода (2), выполненного из сплава ВНЖ-7-3, и резьбового вывода М24×1 (3), выполненного также из сплава 29 НК. Анодный узел паяется в два этапа: сначала крышку, анод и резьбовой вывод собирают с использованием медного припоя и паяют в водородной печи при температуре 1100 °С. Следующим этапом в анодный узел впаивается серебряным припоем ПСр 72 медный штенгель (4), который служит для наполнения разрядника рабочими газами.

На Рис.4 представлена конструкция металлокерамического катодного узла.

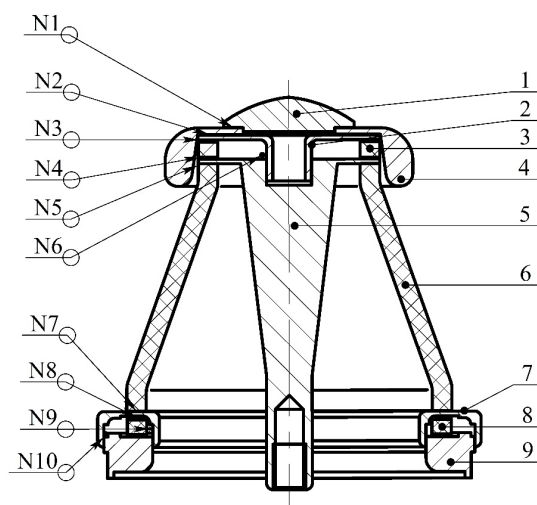


Рис.4. Конструкция катодного узла разрядника-обострителя РО-49.

Катодный узел состоит из катода 1, выполненного из сплава ВНЖ-7-3, переходной манжеты 2 (29 НК), компенсатора 3 (алюмооксидная керамика марки ВК94-1) с двухсторонней металлизацией, экрана 4 (29НК), вывода 5 (29НК), керамического изолятора 6 (ВК94-1) в виде полого усеченного конуса, манжеты 7 (29НК), компенсаторного кольца 8 (ВК94-1) с односторонней металлизацией и переходного кольца 9 (29НК).

Сборку металлокерамического катодного узла проводят в соответствии с конструкцией разрядника с использованием специальной оправки со стягивающими молибденовыми стойками, необходимыми для выравнивания в процессе пайки неплоскостности поверхностей деталей узла, образующих торцевые спаи (N1–N5, N7 и N8), и обеспечения высокого качества и герметичности соединения. Для формирования охватывающих спаев N6 переходной манжеты 2 и вывода 5, а также спаев N9 и N10 манжеты 7 и переходного кольца

9 внутри замкнутого объема переходного узла, образованного манжетой 7, компенсирующим кольцом 8 и переходным кольцом 9 размещают проволоочный припой ПСр-72. Для спаев N1–N5, N7 и N8 в месте их образования размещают припой ПСр-72 из тонкой фольги в виде колец. Затем выполняют пайку металлокерамического узла.

В работе [6] подробно рассматривается вопрос технологии изготовления разрядников-обострителей.

Разрядники-обострители обладают наилучшими коммутационными характеристиками с водородным наполнением, поэтому в качестве рабочей среды в этом классе разрядников выбран водород.

4. Выводы

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 $10^\circ \leq \alpha_1 \leq 30^\circ$, а также выборе угла α_2 конической поверхности вывода электрода в пределах $10^\circ \leq \alpha_2 \leq 45^\circ$.

Нежелательные пробой 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.

Опытные данные показали, что конструкция разрядника-обострителя, рассчитанная на работу при давлении до 120 атмосфер, реально выдерживает давление до 200 атмосфер.

Освоен промышленный выпуск малогабаритных отпаянных разрядников-обострителей типа РО-48, РО-43, РО-49, РО-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 Дж на частотах повторения до 50 Гц.

Описанный в данной работе способ изготовления газонаполненного металлокерамического разрядника-обострителя позволил обеспечить высокую надежность и герметичность прибора. При серийном производстве разрядников-обострителей процент выхода годных изделий достигает уровня в 95%.

5. Литература

- [1] Авилов Э.А., Белкин Н.В., Меркулов Б.П., *Газонаполненный разрядник*. (Авторское свидетельство СССР №1431588, кл. N01J 17/00, опубл. бюл. №32, 1991).
- [2] Маханько Д.С., *Вестник РГРТУ*, **78**, 2021; doi: 10.21667/1995-4565-2021-78-188-197
- [3] Разрядники-обострители АО «Плазма» [онлайн]; <https://www.plasmalabs.ru/category/index/id/31>
- [4] Богданов В.А., Меркулов Б.П., Самородов В.Г., *Газонаполненный разрядник*. (Патент на изобретение РФ №2320048, кл. H01J 17/04, опубл. бюл. №8, 2008).
- [5] Маханько Д.С., *Вестник РГРТУ*, **78**, 2021; doi: 10.21667/1995-4565-2021-78-181-187
- [6] Маханько Д.С., *Научно-технические технологии*, **23**(1), 2022; doi: 10.18127/j19998465-202201-01