

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «НИИЭФА ИМ. Д.В. ЕФРЕМОВА»
(АО «НИИЭФА»)

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

16.05.2025

№ 222-4/1905

Санкт-Петербург

Утверждаю

Генеральный директор АО «НИИЭФА»



С.В. Герцог



Отзыв ведущей организации АО «НИИЭФА»

на диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.1 «Вакуумная и плазменная электроника» Д.С. Маханько «Разработка разрядников-обострителей с улучшенными техническими параметрами»

Разрядники-обострители являются важным элементом современной высоковольтной наносекундной импульсной техники; они используются при генерации мощных электромагнитных импульсов, в импульсных рентгеновских аппаратах, в системах накачки газовых лазеров. Совершенствование конструкции разрядников-обострителей, направленное на увеличение надежности разрядников, повышение стабильности, уменьшение времени и разброса времени их срабатывания, является **актуальной научной и технической задачей**, решению которой посвящена диссертационная работа Дмитрия Сергеевича Маханько.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы.

Во введении формулируются цели и задачи исследования, обосновывается их актуальность и научная новизна, показывается практическая значимость полученных в работе результатов.

В первой главе приведен обзор литературы по теме исследования. Представлен сравнительный анализ основных типов коммутирующих сред в разрядниках-обострителях (твердое тело, жидкость, газ), показано преимущество газовой среды при высоком давлении. Рассмотрены известные из литературы сведения о формировании электрического разряда в газе при высоком давлении. Приведены параметры промышленно выпускаемых искровых разрядников, рассмотрены их особенности и основные области их применения. Обоснована необходимость исследований, направленных на совершенствование существующих образцов и создание новых разрядников-обострителей на напряжение до 400 кВ с субнаносекундным временем срабатывания.

Вторая глава посвящена разработке конструкции разрядников-обострителей на напряжение до 400 кВ. За основу взята конструкция существующих

разрядников–обострителей и произведена оптимизация размеров металлических и изоляционных деталей для увеличения электрической прочности разрядника. При исследовании распределения электрического поля в разрядниках использовалось численное моделирование в программной среде Comsol Multiphysics. Результаты исследований реализованы в конструкции разрядника–обострителя РО-49, работающего при напряжении до 250 кВ.

В третьей главе исследуется механическая прочность элементов конструкции разрядников–обострителей. Выполнены расчеты аналитическими методами и методом конечных элементов (МКЭ) прочности основных элементов конструкции, нагруженной внутренним давлением сжатого газа. Экспериментальная проверка прочности оболочек разрядников производилась посредством гидравлических испытаний. Расчеты и эксперименты показали, что разрядник РО-49 выдержит давление газа до 200 атмосфер.

В четвертой главе описывается технология изготовления газонаполненных отпаянных разрядников–обострителей в металлокерамическом исполнении. Рассматриваются методы сборки и пайки узлов, а также способы наполнения газом и тренировки разрядников. Разработанные технологии позволили получить при серийном производстве 95% выхода годных изделий.

В пятой главе определяются коммутационные характеристики разрядников–обострителей. Показано выполнение условий статического пробоя межэлектродного промежутка и рассмотрены два механизма формирования искрового разряда: «Таундсеновский» и «стримерный». Определены расчетные зависимости напряжения пробоя от давления и расстояния между электродами, а также зависимости времени развития разряда в водороде и азоте, по «Таундсеновскому» и «стримерному» механизмам. Выполненные расчеты показали, что времена развития искровых разрядов обратно пропорциональны давлению газа, и что значения времен, рассчитанные по различным моделям, существенно отличаются друг от друга. Выполненные на оборудовании института электрофизики УрО РАН (г. Екатеринбург) эксперименты по определению времени коммутации разрядников РО-48 показали с высокой степенью повторяемости время коммутации 0,25 нс при напряжении пробоя 150 ± 2 кВ.

В заключении изложены результаты диссертационной работы.

По тексту диссертации имеются следующие **замечания**:

1. Расчет прочности конструктивных элементов разрядников (глава 3) выполнен для статического действия давления сжатого газа. Но искровой разряд в среде сжатого газа сопровождается возникновением ударных волн, которые также могут создавать дополнительные динамические нагрузки на конструктивные элементы разрядника. Считаю, что в диссертационной работе следовало дать количественную оценку дополнительной нагрузки от ударных волн и степени ее влияния на работоспособность коммутатора.

2. Время коммутации разрядника–обострителя зависит от величины коммутируемого тока. Однако в пятой главе, отсутствуют результаты измерений или хотя бы оценок импульсов тока в опытах, осциллограммы которых приведены на рисунках 5.12, 5.13 и 5.14 и в которых время срабатывания разрядников

составляло 0,25 нс. Это не позволяет сравнить результаты расчетов и экспериментов.

4. На с. 84, рисунке 3.5 приведен график. Автором сделан вывод о том, что при соотношении $\frac{R}{h} = 9,2$ изолятор способен выдержать более 350 атм. Представляется, что было опущена описка и следует читать «не более». С другой стороны, при величине 350 атм напряжения в керамике достигают предела прочности материала 3200 атм (или кг/см²). По аналогии со стальной частью корпуса следует рассматривать допускаемую величину напряжений для керамики, соответственно меньшую чем 3200 кг/см².

5. На с. 85 в качестве допускаемой величины для напряжений среза τ в сварном шве принимается допускаемая величина для нормальных напряжений $[\sigma]$. Обычно допускаемую величину для τ ограничивают величиной $0,5 \div 0,6 [\sigma]$. Подобный комментарий относится к допускаемым напряжениям в формуле (3.18) для предложенного автором резьбового соединения.

6. В разделе 3.3.2 приведены результаты нелинейного расчета состояния разрядника. Следовало бы описать/уточнить какие модели упругопластического поведения материала были использованы и решалась ли задача с учетом больших деформаций. Появление напряжений в сварном шве порядка 700 МПа говорит об их наличии.

7. В разделе 3.3.3 приведены результаты нелинейного расчета состояния разрядника с учетом резьбового соединения. Следовало бы описать/уточнить расположение контактных интерфейсов в модели. Из текста неясно, был этот расчет упругим или же выполнен в упруго-пластической постановке.

8. Допущено ряд неточностей изложения в тексте диссертационной работы:

8.1. На стр. 19, (1.3) не объяснено, как определяется площадь сечения искрового канала S и величина тока I .

8.2. На стр. 38, 9-я строка снизу опечатка «... (для большинства газов оно равно $10^{-7} - 10^{-8}$ с) ...».

8.3. Стр. 62. Не объяснено происхождение соотношений (2.2), обеспечивающих стабильность срабатывания разрядника.

8.4. Стр. 68, рис. 2.8. Отсутствует указание размерности напряженности электрического поля.

8.5. Стр. 70, рис. 2.9. Не указано, относительно какой точки отсчитывается потенциал. Вероятно, от электрода, закрепленного на изоляторе.

8.6. Стр. 122, подпись к рис. 4.6. Термин «прочность» не имеет численного выражения. Правильнее было бы написать под рис. 4.6 «Зависимость временного сопротивления торцевых металлических спаев от температуры пайки».

8.7. Стр. 147, (5.16). Опечатка, коэффициент у первого слагаемого в левой части равенства «2».

8.8. Стр. 154, 155, 156, рис. 5.12, 5.13, 5.14. Отсутствует вертикальная шкала напряжений.

Несмотря на изложенные замечания диссертационная работа Д.С. Маханько выполнена на достаточно высоком научном и техническом уровне. Научные положения, выносимые на защиту, весомы, обоснованы и обладают новизной.

Научная новизна диссертационной работы. Определены условия устойчивого формирования искрового разряда в условиях статического пробоя в рабочей среде водорода при давлении до 140 атм.

Положительной особенностью диссертационной работы является наличие в ней 4-ой главы, в которой изложены технологические особенности изготовления, наполнения газом и тренировки разрядников-обострителей. Изложенные там сведения способствуют сохранению и распространению сложных технологий изготовления газоразрядных коммутаторов.

Научная и практическая значимость. Результаты диссертационной работы Д.С. Маханько имеют высокую степень значимости для высоковольтной наносекундной импульсной техники, для создания и совершенствования современных надежных импульсных рентгеновских аппаратов и других импульсных устройств.

Основные результаты и достижения автора в достаточной степени отражены в статьях, опубликованных в рецензируемых научных журналах, и в докладах на международных конференциях.

Внедрение. Результаты диссертации Д.С. Маханько реализованы в конструкциях и технологиях изготовления разрядников-обострителей, выпускаемых серийно АО «Научно-исследовательский институт газоразрядных приборов «Плазма» (г. Рязань), а также используются другими организациями, о чем свидетельствуют приложенные к диссертации акты внедрения.

Рекомендуем использовать результаты диссертации и изложенные в ней описания созданных автором устройств при разработке новых разрядников-обострителей для генераторов высоковольтных сильноточных импульсов в АО «Научно-исследовательский институт газоразрядных приборов «Плазма» (г. Рязань) и в других организациях страны, занимающихся созданием высоковольтных импульсных установок наносекундного диапазона.

Диссертационная работа соответствует требованиям пп. 9 – 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением правительства РФ № 842 от 24.09.2013 и № 415 в редакции от 18.03.2023 в части, касающейся кандидатских диссертаций.

Дмитрий Сергеевич Маханько достоин присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.1 «Вакуумная и плазменная электроника».

Отзыв на диссертацию Д.С. Маханько рассмотрен и утвержден на заседании секции НТС НТЦ «СИНТЕЗ» АО «НИИЭФА», протокол № 2025-05/086 от 16.05.2025.

Председатель секции НТС НТЦ «СИНТЕЗ»,

Заместитель научного руководителя

АО «НИИЭФА», д.ф.-м.н.



Роман Федорович Курунов

Главный научный сотрудник, д.т.н.



Борис Эммануилович Фридман

Фридман Борис Эммануилович,

Сл. тел. (812) 464-52-45,

e-mail: fridman@sintez.niiefa.spb.su

Сведения о ведущей организации:

Акционерное общество «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова» (АО «НИИЭФА»)

Адрес: Санкт-Петербург, Металлострой, дорога на Металлострой, дом 3.

Тел. (812) 464-89-63, факс: (812) 464-79-70

e-mail: mail@niiefa.spb.su

С отзывом согласен. 02.06.2025г. Д.С.М.