

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.375.02,

созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» Министерства науки и высшего образования

Российской Федерации,

по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук

Аттестационное дело № _____

Решение диссертационного совета от 24.06.2025 № 5

О присуждении Маханько Дмитрию Сергеевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Разработка разрядников-обострителей с улучшенными техническими параметрами» по специальности **2.2.1. Вакуумная и плазменная электроника**, принята к защите **15.04.2025 г.** (протокол заседания №4) диссертационным советом **24.2.375.02**, созданным на базе ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» Министерства науки и высшего образования РФ, 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1 приказом Минобрнауки России №105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель Маханько Дмитрий Сергеевич 10 февраля 1988 года рождения, в 2010 году **окончил** государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Рязанский государственный радиотехнический университет» по специальности «Физическая электроника» с присвоением квалификации «инженер». В 2021 году на период подготовки диссертации Маханько Д.С. был прикреплен к ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» для подготовки диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности **2.2.1. Вакуумная и плазменная электроника** без освоения программ подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре. В настоящее время **работает** в должности старшего научного сотрудника в научно-производственном комплексе «Спарк» Акционерного

общества «Научно-исследовательский институт газоразрядных приборов «Плазма», г. Рязань, ведомственная принадлежность – холдинг «Росэлектроника», государственная корпорация «Ростех».

Диссертация выполнена в Акционерном обществе «Научно-исследовательский институт газоразрядных приборов «Плазма», г. Рязань, ведомственная принадлежность – холдинг «Росэлектроника», государственная корпорация «Ростех».

Научный руководитель - доктор физико-математических наук **Козлов Борис Алексеевич**, ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина», кафедра «Промышленная электроника», профессор.

Официальные оппоненты:

Ремнёв Геннадий Ефимович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск, научно-производственная лаборатория «Импульсно-пучковых, электроразрядных и плазменных технологий», заведующий;

Воробьёв Максим Сергеевич, доктор технических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН), г. Томск, лаборатория «Плазменной эмиссионной электроники», ведущий научный сотрудник.

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Акционерное общество «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», г. С.-Петербург, в своём положительном отзыве, подписанном Куруновым Романом Федоровичем, доктором физико-математических наук, председателем секции НТС НТЦ «СИНТЕЗ», заместителем научного руководителя АО «НИИЭФА», Фридманом Борисом Эммануиловичем, доктором технических наук, главным научным сотрудником и утверждённым Герцогом Сергеем Викторовичем, генеральным директором, **указала, что** диссертационная работа Д.С. Маханько представляет собой законченную научно-квалификационную работу, содержащую решение актуальной научно-технической задачи, связанной с совершенствованием конструкции разрядников-обострителей, направленной на

увеличение надежности разрядников, повышением стабильности, уменьшением времени и разброса времени их срабатывания. Тема диссертации соответствует специальности 2.2.1. Вакуумная и плазменная электроника. Диссертационная работа соответствует требованиям п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Маханько Дмитрий Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.1. Вакуумная и плазменная электроника.

Соискатель имеет 46 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 16 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликованы 3 работы, из них 3 статьи в журналах из перечня ВАК, в том числе 1 статья в журнале по специальности 2.2.1. Вакуумная и плазменная электроника, 2 работы включены в реферативные базы данных Scopus, получены 5 патентов на изобретение и 1 патент на полезную модель.

Наиболее значимые работы:

1. Formation of the voltage pulses up to 400 kilovolts with front pulse less than 10 nanoseconds / B. A. Kozlov, D. S. Makhanko // Journal of Physics: Conference Series: 15, Ekaterinburg, 05–10 сентября 2021 года. – Ekaterinburg, 2021. – P. 012126. – DOI 10.1088/1742-6596/2064/1/012126.

Маханько Д.С. представил макет установки для экспериментального исследования коммутационных характеристик разрядников-обострителей типа РО-43, РО-48, РО-49.

2. Pulse-periodical CO₂ laser operating at pressures up to 12 atmospheres / B. A. Kozlov, D. S. Makhanko, A. Y. Payurov // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Tomsk, 12–17 сентября 2021 года. Vol. 12086. – Washington: SPIE, 2021. – P. 1208607. – DOI 10.1117/12.2613557.

Маханько Д.С. предложил использовать разрядник-обостритель РО-48 в схеме генератора импульсной накачки ТЕ-СО₂ лазера.

3. Козлов Б.А., Маханько, Д.С. Времена срабатывания искровых разрядников-обострителей при давлениях до 140 атмосфер // – Рязань: Вестник РГРТУ, 2023, – Вып. 84, – С. 234-245. DOI: 10.21667/1995-4565-2023-84-234-245.

Маханько Д.С. на основании наиболее разработанных теоретических моделей развития искрового разряда для давлений рабочих газов $1 \div 10$ атмосфер получил количественную информацию о временах коммутации разрядников-обострителей в ранее неизучавшемся диапазоне давлений рабочих газов от 20 до 140 атмосфер в условиях статического пробоя. Принимал непосредственное участие в экспериментальном измерении времён коммутации разрядников-обострителей типа РО-48

4. Патент РФ на изобретение № 2550350, Российская Федерация, МПК H01J 17/02. Способ изготовления газонаполненного разрядника / Меркулов Б.П., Маханько Д.С., Черепенникова Н.И., Новикова Т.Г. (РФ), - заявка №2013136721/07; заявлено 06.08.2013; опубликовано 10.05.2015, Бюл. №13.

Маханько Д.С. разработал режим пайки катодного металлокерамического узла газонаполненного разрядника при повышенной температуре $T = 820 \div 860$ °С, способствующему лучшему смачиванию спаиваемых поверхностей припоем ПСр72, более быстрому его растеканию и заполнению охватывающего шва манжеты с переходным кольцом, а также обеспечивающему капиллярное заполнение торцевого шва, обеспечивающий высокий выход вакуумоплотных изделий на уровне 95%.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург. Отзыв подписал кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории электронных ускорителей Шунайлов Сергей Афанасьевич.

2. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», г. Томск. Отзыв подписал доктор технических наук, профессор кафедры физики Климов Александр Сергеевич.

3. Федеральное государственное унитарное предприятие РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров. Отзыв подписал доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник научно-производственного центра физики Горохов Василий Васильевич.

4. Отзыв кандидата физико-математических наук Пономарёва Дмитрия Ивановича.

5. Акционерное общество «Рязанский Радиозавод», г. Рязань. Отзыв подписал кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий инженер-технолог Ястребков Андрей Борисович.

6. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединённый институт высоких температур РАН, г. Москва. Отзыв подписал доктор технических наук, главный научный сотрудник Парфёнов Юрий Вячеславович.

7. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва. Отзыв подписал кандидат физико-математических наук, высококвалифицированный старший научный сотрудник Митрофанов Александр Викторович

В отзывах указаны следующие замечания:

Основная цель разработок по отпаянным разрядникам видится в увеличении ресурса их работы при сохранении стабильных характеристик. Конструктору высоковольтной техники, при использовании таких приборов, особенно интересно знать, как меняются характеристики разрядника, а, следовательно, и выходные параметры самого высоковольтного генератора в процессе эксплуатации (тренировка - стабилизация параметров - уход характеристик) даже после указанного заводом изготовителем цифры ресурса прибора (3×10^6 импульсов). Из текста диссертации явно не следует, что именно в первую очередь определяет и ограничивает эту важнейшую характеристику. В работе не хватает графика зависимостей амплитуды срабатывания разрядника и среднеквадратичного разброса напряжения пробоя от количества срабатываний вплоть до $4...6 \times 10^6$. Другими словами, что увеличивает разброс напряжения пробоя разрядника в большей степени: износ электродов или изменение проводимости поверхности изолятора из-за напыления продуктов эрозии? Как меняется напряжение пробоя: разрядник становится более «мягким» или «жестким»?

Ресурс отпаянных приборов определяется эрозией электродов разрядника. Проводились ли какие-либо исследования по выбору и оптимизации материалов электродов?

Формулировка первого положения выполнена очень обобщенно для широкого ряда приборов и напоминает описание патента. Соискателем было проведено численное моделирование различных вариантов конструкций разрядников с соответствующими распределениями электрических полей и потенциалов. Возможно, нужно было указать в положении конкретные величины электрических полей в зазоре и на поверхности изолятора при различных значениях пробивного напряжения (для каждого ряда), гарантирующие указанные автором характеристики? Кроме того, ресурс разрядника находится в прямой зависимости от энергии коммутируемого импульса. Полагаю, что цифры по ресурсу разрядников на 100 кВ и 400 кВ должны различаться.

На величину разброса напряжения пробоя (как и на времена коммутации) влияет и скорость роста напряжения на зазоре разрядника. При работе РО-48 в составе генератора РАДАН-Эксперт (время зарядки формирующей линии генератора ~ 1 мкс) сам соискатель отмечает снижение разброса напряжения пробоя до 2 %. Существуют ли зависимости разброса напряжения пробоя от скорости роста напряжения на зазоре для разрядников на более высокие напряжения (или более высокие давления газа)?

В работе получены геометрические соотношения, позволяющие добиться максимальной электрической прочности при минимальных габаритах разрядника, однако указанный диапазон параметров довольно широкий и конструкция разрядника, которая может обеспечивать максимальную электрическую прочность становится довольно неопределенной. Существует ли теоретический предел миниатюризации габаритов и выход на большие значения напряжений – до 500 кВ, например.

Указано, что разрядники имеют ресурс $3 \cdot 10^6$ срабатываний, но не обсуждается эрозия электродов (особенно при токах в килоамперы). Как износ материалов электродов влияет на разброс напряжения пробоя?

Из автореферата не понятно, для какого фронта нарастания напряжения приведены данные по разбросу напряжения пробоа.

На представленных экспериментальных зависимостях отсутствуют погрешности измерений.

Непонятны причины большого разброса расчетных значений времён коммутации.

Экспериментальные измерения времени коммутации были проведены только на разрядниках типа РО-48.

В тексте автореферата на стр. 9 не обозначено числовое значение критерия $U_{пр}/U_{пр\ max}$ электрической прочности разрядника, определяющее выбор соотношения $0.25 \leq d/D_3 \leq 0.5$.

На стр. 13 используются разные единицы измерения давления, что затрудняет восприятие текста.

На стр. 16 не приведен физический смысл размерного параметра a .

На рисунке 15 приведены разноцветные осциллограммы, но нет пояснения, чем они отличаются по параметрам.

В автореферате встречаются формулы с размерными коэффициентами, в которых единицы измерений бывают разными. В таких случаях все буквенные символы желательно сопровождать указанием размерностей всех используемых величин, кроме безразмерных (см. формулы 4 – 6).

Все отзывы положительные и содержат вывод о том, что диссертация соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а соискатель заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.1. Вакуумная и плазменная электроника.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их достижениями в данной области науки, наличием публикаций по тематике диссертации, что позволяет им компетентно определить теоретическую и практическую значимость.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработаны конструкция и промышленная технология серийного выпуска малогабаритных отпаянных разрядников-обострителей (РО-48, РО-43, РО-49, РО-72) на рабочие напряжения $100 \div 400$ кВ с относительным среднеквадратичным разбросом напряжения пробоя не более 3% и ресурсом не менее $3 \cdot 10^6$ срабатываний;

предложены:

способ увеличения механической прочности конструкции разрядника-обострителя и повышения предельного рабочего давления до 160 атмосфер за счёт использования дополнительного резьбового соединения анодного узла с корпусом разрядника;

способ режима пайки металлокерамических соединений, содержащих в конструкции, охватывающие и торцевые паяные швы, припоем ПСр72 с дополнительным превышением температуры пайки на $20-80^\circ\text{C}$ относительно температуры плавления припоя 780°C и временем выдержки пайки в пределах 6-8 минут, позволяющий получать высококачественные герметичные соединения с высоким процентом выхода годных изделий;

способ тренировки разрядников-обострителей в среде электроотрицательных газов (элегаз SF_6 и его смеси с инертным газом и/или азотом), повышающий электропрочность высоковольтного керамического изолятора и препятствующий образованию скользящих пробоев по поверхности керамики, что увеличивает срок гарантийной наработки разрядника с относительным среднеквадратичным разбросом напряжения пробоя не более 3% свыше $3 \cdot 10^6$ срабатываний;

теоретические зависимости времен коммутации в разрядниках-обострителях с водородным и азотным наполнениями при давлении наполняющих газов до 140 атмосфер в условиях статического пробоя;

доказано, что применение в разрядниках-обострителях в качестве рабочей среды водорода ОСЧ при давлениях от 50 до 140 атмосфер обеспечивает срабатывание с относительным среднеквадратичным разбросом напряжения пробоя не более 3% и субнаносекундные времена коммутации в течение $3 \cdot 10^6$ импульсов;

введены соотношения, позволяющие обеспечить необходимую электрическую прочность при минимизации габаритных размеров разрядника, и соотношения, обеспечивающие стабильность срабатывания разрядника-обострителя

строго между электродами, исключаящие возможность пробоя промежутка между экраном катода и внутренней стенкой корпуса разрядника.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказано, что предложенные соискателем подходы к разработке конструкции разрядников-обострителей позволяют обеспечить необходимую электрическую прочность конструкции разрядника-обострителя при напряжениях пробоя до 400 кВ; использование дополнительного резьбового соединения анодного узла в разряднике-обострителе с его корпусом увеличивает механическую прочность, по сравнению с использованием только сварного соединения данных узлов, и позволяет повысить предельное рабочее давление до 160 атмосфер; использование в разрядниках-обострителях серии РО-43, РО-48, РО-49 и РО-72 в качестве коммутирующей среды водорода ОСЧ при давлениях от 50 до 120 атмосфер обеспечивает субнаносекундные времена коммутации при напряжениях пробоя от 100 до 400 киловольт с коммутируемой энергией до 20 Дж на частотах повторения импульсов до 50 Гц;

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использованы элементы конструкции газонаполненного разрядника-обострителя, связанные между собой определёнными геометрическими и угловыми соотношениями;

изложены методы исследований, результаты экспериментов и технологические подходы, обеспечивающие необходимую электрическую и механическую прочность конструкции разрядника-обострителя при напряжениях пробоя до 400 кВ;

изучено влияние газовых сред (водорода и азота) на времена развития разряда в режиме статического пробоя при давлениях от 20 до 140 атмосфер.

проведена модернизация электродной системы, высоковольтного керамического изолятора, вывода электрода и корпуса разрядника-обострителя.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены конструкции неуправляемых малогабаритных отпаянных искровых разрядников-обострителей в металлокерамическом исполнении на напряжения от 100 до 400 кВ с субнаносекундными временами

коммутации, токами до нескольких килоампер и коммутируемой энергией до 20 Дж на частотах повторения импульсов до 50 Гц, с относительным среднеквадратичным отклонением величины напряжения пробоя не более 3%;

определены условия, обеспечивающие гарантированный ресурс работы разрядников-обострителей не менее $3 \cdot 10^6$ срабатываний в заданном эксплуатационном режиме;

созданы промышленные образцы неуправляемых малогабаритных отпаянных газонаполненных разрядников-обострителей серии РО-43, РО-48, РО-49 и РО-72 в металлокерамическом исполнении с диаметром корпуса от 40 до 85 мм для напряжений пробоя от 100 до 400 кВ, обладающие повышенной механической прочностью на разрыв и субнаносекундными временами срабатывания.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ – воспроизводимые результаты исследования электрической прочности конструкции разрядника-обострителя, механической прочности конструкции разрядника, напряжений срабатывания и времён коммутации, полученных на сертифицированном и поверенном в установленном порядке специальном оборудовании с использованием апробированных экспериментальных методик;

теория построена на законах сопротивления материалов, электростатики и физики газового разряда;

идея базируется на исследовании функционирования неуправляемых малогабаритных газонаполненных отпаянных искровых разрядников-обострителей в металлокерамическом исполнении в режиме статического срабатывания;

использован сравнительный анализ полученных результатов с известными расчетными и экспериментальными данными по исследованию газонаполненных разрядников-обострителей, приведенными в публикациях;

установлено соответствие результатов, полученных соискателем, и результатов, представленных в независимых литературных источниках;

использовано высокотехнологичное измерительное и испытательное оборудование, позволяющее получать, накапливать, систематизировать и обрабатывать полученные результаты при проведении экспериментов и испытаний.

Личный вклад соискателя состоит в:

- формулировке цели и задач по проведению экспериментальных и технологических исследований;
- разработке конструкций неуправляемых малогабаритных отпаянных искровых разрядников-обострителей РО-43, РО-48, РО-49 и РО-72 в металлокерамическом исполнении на напряжения от 100 до 400 кВ с субнаносекундными временами коммутации, токами до нескольких килоампер и коммутируемой энергией до 20 Дж на частотах повторения импульсов до 50 Гц, с относительным среднеквадратичным отклонением величины напряжения пробоя не более 3%;
- разработке способов пайки газонаполненного разрядника (Патент РФ №2550350), тренировки (Патенты РФ №2560096, 2643343, 2658320) и изготовления (Патенты РФ №2697264 и №119164);
- проведении экспериментальных исследований механической и электрической прочности металлокерамической конструкции разрядника-обострителя, обсуждении полученных результатов.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

1. В диссертационной работе следовало дать количественную оценку дополнительной динамической нагрузки от ударных волн, вызванных импульсным разрядом, и степени ее влияния на работоспособность коммутатора.
2. Приводит ли многоэлектронное инициирование к формированию параллельных искровых каналов или ветвистой структуре разряда при использовании высокого давления в разряднике?
3. Электрический пробой носит вероятностный характер, а на приведенных графиках не представлен статистический разброс.

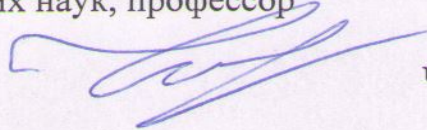
Соискатель Маханько Дмитрий Сергеевич ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию, с частью замечаний согласился.

На заседании 24.06.2025 г. диссертационный совет принял решение присудить Маханько Д.С. ученую степень кандидата технических наук по специальности 2.2.1. Вакуумная и плазменная электроника за решение научной задачи улучшения технических параметров малогабаритных отпаянных газонаполненных разрядников-обострителей на напряжения пробоя до 400 киловольт с относительным среднеквадратичным разбросом напряжения пробоя не более 3%, субнаносекундными временами коммутации и ресурсом не менее $3 \cdot 10^6$ срабатываний, имеющей значение для развития высоковольтной электроники.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 22 человек, входящих в состав совета, проголосовали:

за - 17, против - НЕТ, недействительных бюллетеней - 1.

Председатель диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, профессор



Чиркин Михаил Викторович

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, доцент



Литвинов Владимир Георгиевич

24.06.2025 г.