

На правах рукописи

САФОНОВА ТАТЬЯНА НИКОЛАЕВНА

**КРИТЕРИЙ И МЕТОД КОНТРОЛЯ КАТОДНОГО МЕХАНИЗМА
ИНИЦИИРОВАНИЯ ВАКУУМНОГО ПРОБОЯ
В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ**

Специальность 05.27.02 – Вакуумная и плазменная электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Орел - 2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Орловский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Емельянов Александр Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Буц Виктор Петрович

кандидат технических наук, доцент
Соколовский Эдуард Иванович

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Пензенский государственный университет»

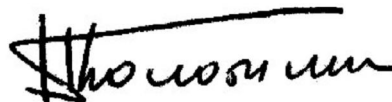
Защита состоится « 22 » июня 2010 г. в зале ученого совета (аудитория 235) в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.211.03 при ГОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: г. Рязань, ул. Гагарина, д.59/1

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 390005, Рязань, ул. Гагарина, д.59/1

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ГОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Автореферат разослан « ____ » _____ 2010 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор



Б.И. Колотилин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Наиболее важной прикладной задачей в области создания и использования электровакуумных приборов (ЭВП) является повышение электрической прочности. Повышение прочности возможно в результате контролируемого воздействия на рабочие поверхности электродов ЭВП. Эффективный контроль предполагает знание механизма, инициирующего вакуумный пробой, и наличие критерия, отражающего условия возникновения пробоя. Одним из основных механизмов вакуумного пробоя является катодный, когда инициирование пробоя связано с процессами на катоде вакуумного промежутка.

Открытие и исследование взрывной эмиссии электронов (академик Г.А. Месяц, профессора Г.Н. Фурсей, Д.И. Проскуровский, Е.А. Литвинов и др.) позволили установить, что наилучшее состояние поверхности катода, вплоть до его полировки, достигается в результате обработки импульсами тока начальной стадии взрывной эмиссии. Исследования инициирования импульсного пробоя показали, что воздействие на электроды вакуумного промежутка высоковольтных импульсов длительностью равной времени запаздывания пробоя $t_u = t_z$ соответствует оптимальному режиму обработки электродов, улучшающему состояние катодной поверхности и повышающему электрическую прочность вакуумной изоляции.

Существующие критерии катодного механизма основаны на измерении абсолютных значений плотности автоэлектронного тока j , микронапряженности электрического поля E , длительности высоковольтного импульса t_u и других величин, достижение которыми критического значения инициирует вакуумный пробой. Использование абсолютных значений физических величин, включающих систематическую ошибку измерений, приводит к погрешности вычисления критериев и снижает точность оценки механизма инициирования. При оценке механизма инициирования пробоя переход от абсолютных значений физических величин к относительным исключает влияние систематической погрешности и позволяет разработать новые критерии, обладающие повышенной точностью.

Таким образом, тема диссертационной работы, связанная с исследованием электрической прочности вакуумной изоляции и разработкой новых критериев и методов контроля катодного механизма инициирования пробоя в вакууме, обладающих повышенной точностью, представляется актуальной.

Целью диссертационной работы является исследование электрической прочности при оптимальных режимах импульсного воздействия на электроды вакуумного промежутка, разработка критерия и метода контроля катодного механизма инициирования вакуумного пробоя в импульсном режиме, исключающих систематическую погрешность измерений.

Основные задачи исследования

1. Анализ оптимальных режимов импульсного кондиционирования электродов и существующих критериев и методов контроля катодного инициирования электрического пробоя в вакууме.

2. Разработка критерия катодного механизма инициирования вакуумного пробоя в импульсном режиме, использующего относительные изменения характеристик состояния катодной поверхности и электрической прочности и исключающего систематическую погрешность измерений.

3. Разработка метода контроля катодного механизма инициирования вакуумного пробоя, реализующего предлагаемый критерий.

4. Экспериментальная проверка эффективности предложенного критерия и метода контроля катодного механизма инициирования вакуумного пробоя.

Методы исследования

При выполнении работы применялись аналитические методы, методы корреляционного и регрессионного анализа, математической статистики и математического моделирования.

Экспериментальные исследования проводились на отпаянных макетах высоковольтных вакуумных конденсаторов с использованием генератора высоковольтных наносекундных импульсов и широкополосной регистрирующей аппаратуры. Обработка экспериментальных данных проводилась при помощи прикладных программных пакетов *Microsoft Excel*, *Maple*.

Научная новизна

1. Разработан новый подход к оценке эффективности оптимальных режимов обработки электродов вакуумного промежутка, использующий относительное изменение коэффициента усиления поля на микронеоднородностях катодной поверхности β с изменением длительности воздействующих импульсов t_u .

2. Разработан новый критерий катодного механизма инициирования вакуумного пробоя в импульсном режиме для электродов с развитой рабочей поверхностью, использующий относительные изменения состояния поверхности катода и электрической прочности в результате оптимальных режимов импульсного воздействия и исключающий систематическую погрешность измерений.

3. Предложен метод оценки катодного механизма инициирования вакуумного пробоя по относительным изменениям коэффициента усиления напряженности электрического поля катодными микронеоднородностями и электрической прочности, определяемым в результате оптимальных режимов импульсного кондиционирования электродов.

Достоверность и обоснованность основных положений и результатов

достигнута за счет анализа и обобщения известных и авторских экспериментальных данных по импульсной электрической прочности вакуумной изоляции; экспериментального подтверждения полученных в работе критерия и метода контроля и их соответствия известным теоретическим положениям;

применения современных методов исследований и статистической обработки результатов экспериментов.

Практическая значимость работы заключается в том, что:

1. Обоснована целесообразность применения оптимальных режимов импульсного кондиционирования для получения предельной электрической прочности вакуумной изоляции, достижимой при катодном инициировании пробоя.

2. Разработан способ оценки катодного механизма инициирования вакуумного пробоя в импульсном режиме, реализующий предложенный метод обработки электродов вакуумного промежутка для импульсов разной длительности (патент РФ № 2249879).

3. Достигнуто 2-х кратное повышение точности при оценке катодного механизма инициирования пробоя в вакууме по сравнению с известными методами.

Реализация и внедрение результатов исследования

Разработанный критерий оценки катодного механизма вакуумного пробоя в импульсном режиме используется при исследовании и разработке вакуумных конденсаторов во ФГУП «НИИ Электронно-механические приборы» г. Пенза. Результаты работы внедрены в учебный процесс Орловского государственного технического университета.

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

1. Эффективность кондиционирования электродов в вакууме значительно (на два порядка) повышается при переходе от длительного воздействия высокого напряжения к воздействию импульсами, длительность которых равна времени запаздывания пробоя в диапазоне $0,1 - 1 \text{ нс}$.

2. Использование предложенных в работе критериальных параметров, рассчитываемых по соотношениям $K_U = U_2/U_1$ и $K_\beta = \beta_1/\beta_2$, где U_1 и U_2 - пробивные напряжения при двух значениях длительности импульсов, β_1 и β_2 - коэффициенты усиления электрического поля при соответствующих значениях длительностей импульсов, K_U и K_β - коэффициенты относительного изменения напряжения пробоя и усиления поля, существенно (в два раза) повышает достоверность результатов контроля электрической прочности вакуумных промежутков.

3. Предложенное и экспериментально обоснованное критериальное уравнение $\frac{K_\beta}{K_U^{0,9}} \Big|_{t_u=t_3} = 1$, где $K_\beta = \beta_1/\beta_2$ - коэффициент относительного

изменения состояния катодной поверхности, $K_U = U_2/U_1$ - коэффициент относительного изменения импульсной электрической прочности, при соблюдении условия оптимальности (равенства длительности импульса времени запаздывания пробоя $t_u = t_3$), представляет собой новую форму критерия катодного инициирования, применимую в импульсном режиме и для электродов произвольной геометрии.

4. Разработанный метод оценки реализации катодного механизма инициирования импульсного пробоя в вакууме, заключающийся в определении коэффициентов эффективности обработки катодной поверхности $K_\beta = \beta_1/\beta_2$ и повышения импульсной электрической прочности $K_U = U_2/U_1$ для последовательно подаваемых на вакуумный промежуток импульсов одинаковой или разной длительности, и последующей проверке предложенного критериального уравнения, позволяет надежно выявлять катодный механизм инициирования вакуумного пробоя и обоснованно разрабатывать технологические мероприятия, направленные на повышение электрической прочности приборов.

Апробация работы. Изложенные в диссертации результаты работы доложены и обсуждены на

- XXIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Yalta, Crimea, Sept. 27, 2004 – Oct. 1, 2004 (XXI Международном симпозиуме по разрядам и электрической изоляции в вакууме, Ялта, Крым, 27 сентября – 1 октября 2004г.);

- Третьей международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», г.Томск, 12-14 октября 2005г.;

- VIII международной научно-практической конференции «Теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики», г.Новочеркасск: Южно-Российский государственный технический университет (НПИ), 28 сентября 2007г.;

- X международной научно-практической конференции «Теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики», г.Новочеркасск: Южно-Российский государственный технический университет (НПИ), 23 сентября 2009г.

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 9 печатных работ, две из них в изданиях, рекомендованных ВАК, получен 1 патент на изобретение.

Структура и объем работы

Диссертационная работа изложена на 144 страницах машинописного текста, содержит 41 рисунок и 6 таблиц. Состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 93 наименования, и приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определена ее цель, кратко изложены основные научные результаты, а также раскрыто научное и практическое значение работы.

В первой главе «Условия инициирования электрического пробоя в вакууме» рассмотрены физические процессы, определяющие возникновение и развитие электрического пробоя в вакууме, механизмы возникновения пробоя, а также влияние свойств поверхности и конфигурации электродов на его инициирование. Проведен анализ существующих методов, используемых при оценке катодного механизма инициирования пробоя в вакууме и режимов импульсного кондиционирования электродов. В результате анализа

существующих критериев и методов оценки и контроля катодного механизма инициирования пробоя и режимов электроимпульсного воздействия на электроды вакуумного промежутка сформулированы основные задачи исследования.

Во второй главе «Оптимальные режимы импульсного кондиционирования электродов в вакууме» рассмотрены оптимальные режимы высоковольтного кондиционирования, заключающиеся в воздействии на поверхность катода электрических импульсов длительностью, равной времени запаздывания пробоя $t_u = t_3$, и проведен анализ эффективности такого воздействия. Рассмотрено влияние длительности $t_u = t_3$ воздействующего импульса на состояние катодной поверхности и электрическую прочность вакуумной изоляции.

Эффективность воздействия оценена по изменению коэффициента усиления поля β на микронеоднородностях катодной поверхности. Зависимость коэффициента усиления β от длительности кондиционирующих импульсов $t_u \approx t_3$, построенная на основе анализа и обобщения известных экспериментальных результатов по времени запаздывания для медных электродов приведена на рисунке 1.

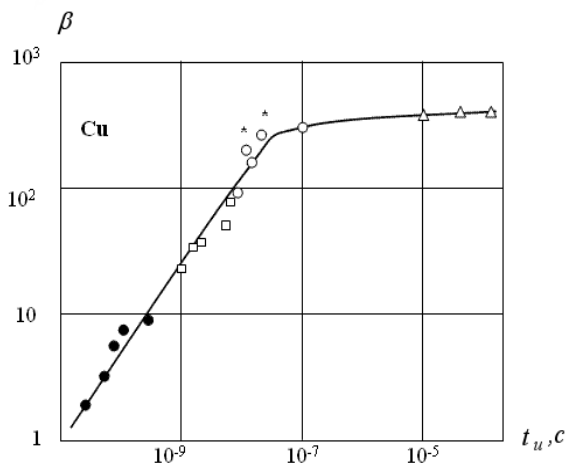


Рисунок 1 – Коэффициент усиления поля как функция длительности кондиционирующих импульсов $t_u \approx t_3$ для медных электродов (экспериментальные результаты)

Из кривой $\beta = f(t_u)$ следует, что с уменьшением длительности при $t_u < 10^{-7} c$ происходит существенное снижение коэффициента усиления поля β (более чем на два порядка), означающее повышение эффективности воздействия на поверхность катода и улучшение ее качества. При длительностях $t_u > 10^{-7} c$ коэффициент усиления поля практически не меняется с изменением длительности импульсов. Эффективность импульсной обработки в этом случае не отличается от эффективности кондиционирования на постоянном токе.

Полагая коэффициент усиления поля β_0 , полученный в микросекундном диапазоне длительностей, соответствующим кондиционированию в стационарном режиме, где β_u - коэффициент усиления, полученный в результате импульсной обработки, введен коэффициент относительной эффективности импульсной обработки катода вакуумного промежутка

$$K_\beta = \frac{\beta_0}{\beta_u}. \quad (1)$$

По кривым $\beta = f(t_u)$, на основании соотношения (1), построены зависимости $K_\beta(t_u)$, характеризующие относительное изменение эффективности обработки поверхности катода для разных материалов в результате кондиционирования импульсами $t_u \approx t_3$. Кривая $K_\beta(t_u)$, объединяющая результаты для Cu, Al, Mo, Ni, Fe , вместе с точками, полученными в результате обработки экспериментальных данных по времени запаздывания, приведена на рисунке 2.

Из кривой $K_\beta(t_u)$ следует, что эффективность оптимальных режимов кондиционирования растет по мере уменьшения длительности импульса. Изменение длительности на четыре порядка от 10^{-6} с до $t_u \leq 10^{-10}$ с приводит к изменению коэффициента эффективности K_β более чем на два порядка величины. Для выполнения условия $t_u = t_3$ при уменьшении длительности импульсов необходимо соответствующее повышение их амплитуды.

По известным экспериментальным данным и результатам авторских экспериментов по времени запаздывания вакуумного пробоя построен график зависимости $\beta(E_0)$ (рисунок 3), отвечающий условиям оптимальности импульсного кондиционирования для разных материалов, полученным в межэлектродных промежутках $3 \text{ мм} \leq d \leq 20 \text{ см}$, в существенно большем диапазоне напряженностей $1,5 \cdot 10^7 \leq E_0 \leq 1,3 \cdot 10^{10} \text{ В/м}$, чем было до наших исследований.

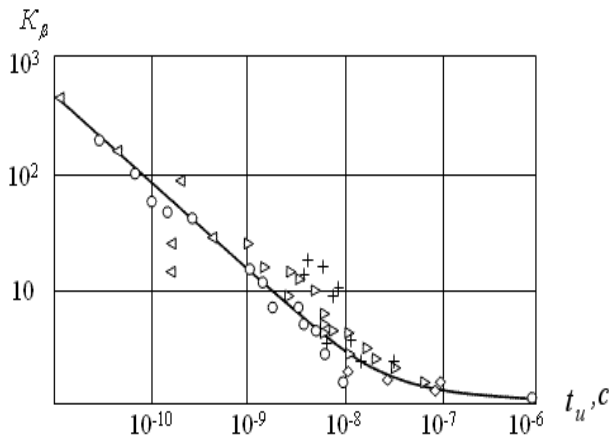


Рисунок 2 – Эффективность импульсных режимов кондиционирования как функция длительности импульсов $t_u \approx t_3$
 $\circ - Cu; \triangleleft - Ni; \triangleright - Al; + - Mo; \diamond - Fe$

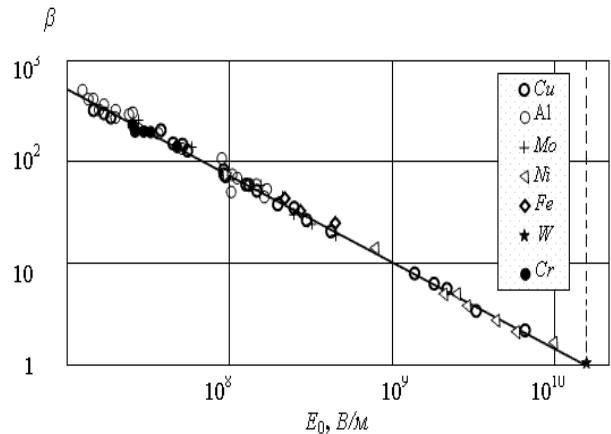


Рисунок 3 – Коэффициент усиления поля после кондиционирования импульсами $t_u \approx t_3$ электродов из разных материалов как функция макронапряженности электрического поля, инициирующей пробой

Экспериментальные точки с малым разбросом укладываются на одну кривую, которая аппроксимируется выражением

$$\beta = 1,28 \cdot 10^9 E_0^{-0,9}. \quad (2)$$

Качество катодной поверхности в результате оптимальных режимов обработки определяется только макронапряженностью поля, инициирующего пробой, и повышается с ростом мощности кондиционирующих импульсов по мере приближения напряженности к критическому значению $1,32 \cdot 10^{10} \text{ В/м}$. Реализация оптимальных режимов кондиционирования дает возможность получения заданной электрической прочности путем выбора длительности импульсов, изменяя при этом коэффициент усиления поля более чем на два порядка величины. При условии катодного инициирования такая обработка катода дает основания для значительного повышения электрической прочности вакуумной изоляции и достижения ею предельных значений, что существенно повышает надежность вакуумной изоляции.

В третьей главе «Разработка критерия и метода контроля катодного механизма инициирования вакуумного пробоя в импульсном режиме» получена искомая функциональная зависимость времени запаздывания пробоя от величины напряженности поля $t_3(E)$. Введен новый критерий катодного инициирования, основывающийся на определении относительных изменений качества поверхности катода и импульсной электрической прочности под воздействием оптимальных режимов кондиционирования, а также разработан метод контроля катодного механизма, существенно уменьшающий систематическую погрешность измерений.

При численном решении задачи джоулева разогрева микроэмиттера автоэлектронным током получена зависимость времени запаздывания от напряженности поля $t_3(E_{кр})$. Из представления на одном графике (рисунок 4)

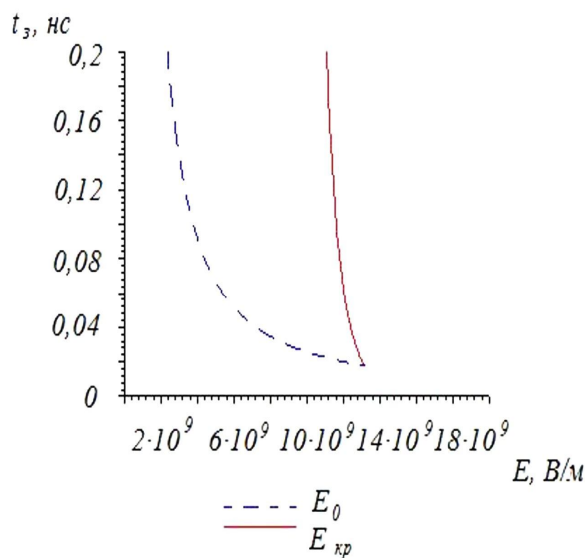


Рисунок 4 – Зависимости времени запаздывания пробоя от напряженности электрического поля на катоде для медных электродов

зависимостей времени запаздывания пробоя от макронапряженности $t_3(E_0)$ и микронапряженности $t_3(E_{кр})$ электрического поля следует, что с ростом напряженности кривые $t_3(E_0)$ и $t_3(E_{кр})$ сближаются и сходятся при некоторой критической напряженности

$$E_0 = E_{кр} = 1,32 \cdot 10^{10} \text{ В/м}, \quad (3)$$

кондиционирование при которой дает идеальную поверхность с коэффициентом усиления $\beta = 1$. С учетом (3), выражение (2) представляется в виде

$$\beta = \left(\frac{E_{кр}}{E_0} \right)^{0,9} \bigg|_{t_u = t_3}. \quad (4)$$

Учитывая, что кондиционирование электродов импульсами разной длительности t_1 и t_2 приводит к различным состояниям поверхности катода β_1 и β_2 , и разным значениям импульсного напряжения пробоя U_1 и U_2 , и электрической прочности E_{01} и E_{02} , предложен новый критерий катодного инициирования

$$\left. \frac{K_\beta}{K_U^{0,9}} \right|_{t_u=t_3} = 1, \quad (5)$$

где $K_\beta = \beta_1/\beta_2$ - коэффициент относительного изменения качества поверхности, $K_U = U_2/U_1$ - коэффициент относительного изменения пробивного напряжения. Использование данных коэффициентов позволяет исключить систематическую погрешность измерений.

Критериальное уравнение (5) связывает относительные изменения качества поверхности катода и импульсной электрической прочности в результате оптимальных режимов кондиционирования.

Критерий (5) может быть применен и для импульсов одной длительности. Первый пробой с напряжением U_1 формирует поверхность с коэффициентом β_1 , который в свою очередь влияет на напряжение следующего пробоя U_2 . При этом формируется поверхность с коэффициентом усиления поля β_2 . Используя коэффициенты эффективности обработки катодной поверхности $K_\beta = \beta_1/\beta_2$ и изменения электрической прочности $K_U = U_2/U_1$ при переходе от одного импульса к другому проверяется выполнение критерия (5).

Метод оценки катодного механизма состоит в определении относительных изменений состояния поверхности катода K_β и импульсной электрической прочности K_U в результате оптимальных режимов импульсного кондиционирования для импульсов одинаковой или разной длительности и проверке критерия (5).

Предложен способ оценки катодного механизма инициирования пробоя в вакууме (патент РФ № 2249879). Состояние поверхности катода оценивают по величине коэффициента β , определяемого по крутизне вольтамперных характеристик в координатах Фаулера - Нордгейма $\lg(I/E_0^2) = f(1/E_0)$ в режиме постоянного тока. Электрическую прочность определяют по напряжению пробоя в импульсном режиме.

Способ включает: построение токовой характеристики и определение коэффициента усиления β ; воздействие на промежуток высоковольтного импульса и измерение напряжения пробоя при минимальном перенапряжении, когда $t_u = t_3$; повторение упомянутых операций до достижения установившихся значений коэффициента β и напряжения пробоя. После обработки катода импульсами одной длительности $t_u = t_1$ процедуру повторяют на импульсах другой длительности $t_u = t_2$ и проверяют выполнение критерия (5).

В четвертой главе «Экспериментальная проверка разработанного метода контроля катодного механизма инициирования пробоя в импульсном режиме» приведено описание оборудования и результатов экспериментальной проверки предложенных критерия и метода контроля катодного механизма инициирования пробоя в импульсном режиме.

Проверка предложенных критерия и метода оценки катодного инициирования осуществлялась на коаксиальных медных электродах вакуумного конденсатора (рисунок 5) площадью $S = 2500 \text{ мм}^2$ при величине межэлектродного зазора $d = 0,2 \text{ мм}$ и остаточном давлении $P \approx 10^{-5} \text{ Па}$.

В эксперименте были использованы высоковольтные импульсы длительностью $t_{u1} = 200 \text{ нс}$ и $t_{u2} = 50 \text{ нс}$ при минимальном перенапряжении. Перед каждым импульсным воздействием в режиме постоянного тока снималась вольтамперная характеристика, по крутизне которой в координатах Фаулера – Нордгейма определялся коэффициент усиления поля β .

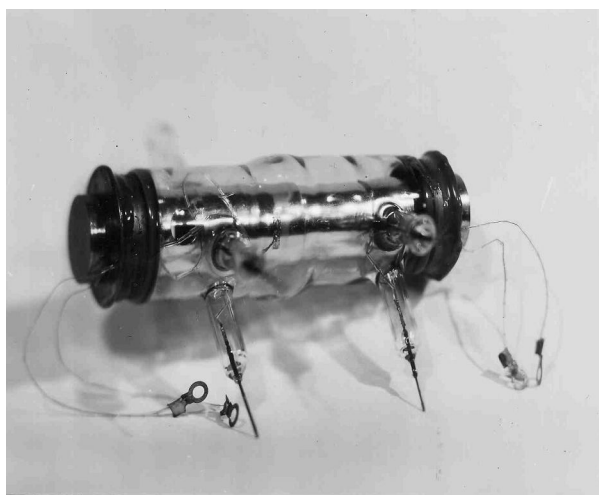


Рисунок 5 – Макет вакуумного конденсатора

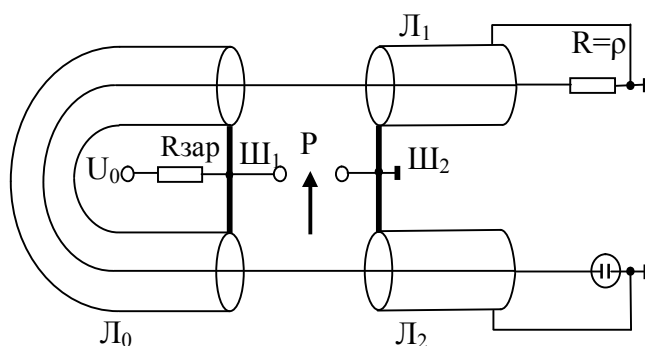


Рисунок 6 – Принципиальная схема генератора наносекундных импульсов:
 U_0 – источник высокого напряжения;
 $R_{зар}$ – зарядный резистор; P – разрядник; $Ш$ – безиндуктивная шина

После измерений на постоянном токе и оценки параметра β на промежутки подавались импульсы, амплитуду которых последовательно повышали с шагом 1кВ до возникновения при минимальном перенапряжении первого пробоя. Схема генератора наносекундных импульсов представлена на рисунке 6. Перед началом измерений на каждой длительности осуществлялось кондиционирование импульсами $t_u = t_3$ до достижения установившихся значений коэффициента усиления и напряжения пробоя. Обработка катода при минимальном перенапряжении соответствует оптимальным режимам импульсного кондиционирования.

На рисунке 7 приведены графики изменения коэффициента усиления поля, и определяемого им напряжения первого импульсного пробоя в

установившемся режиме с числом импульсов длительностью $t_{u1} = 200нс$ и $t_{u2} = 50нс$.

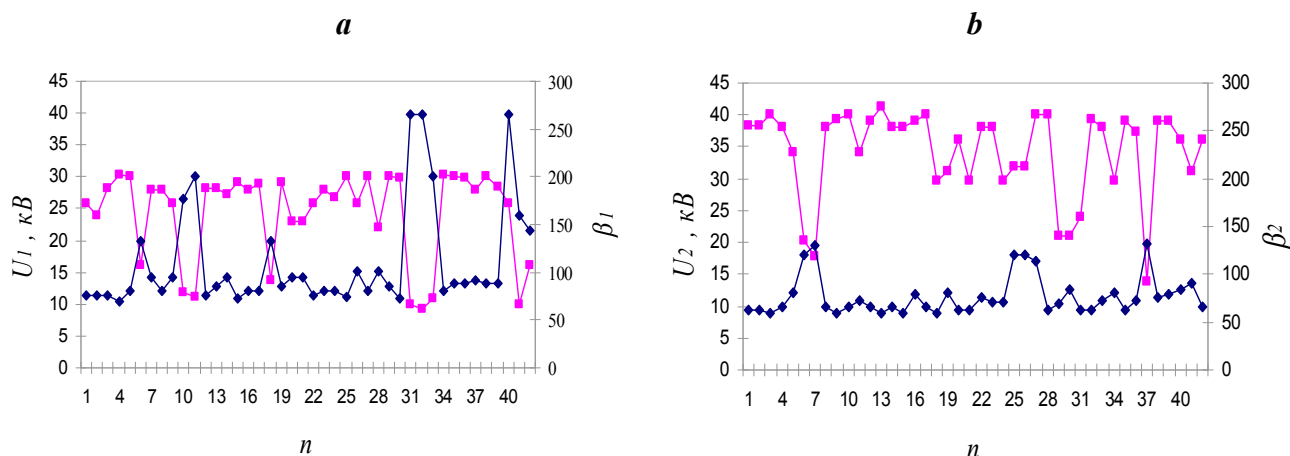


Рисунок 7 – Изменение напряжения первого пробоя и коэффициента усиления поля с числом импульсов длительностью $t_u = t_3$ в установившемся режиме:

a - $t_{u1} = 200нс$; *b* - $t_{u2} = 50нс$; ■ - U ; ♦ - β .

Из сопоставления кривых $\beta(n)$ и $U(n)$ при $t_u = const$ следует, что изменение коэффициента β , определяющего состояние поверхности, коррелирует с изменением пробивного напряжения. Корреляция изменений U и β подтверждает ответственность катодных процессов за инициирование импульсного пробоя.

В результате обработки катода импульсами $t_{u1} = 200нс$ сформирована поверхность с коэффициентом усиления поля $72 \leq \beta_1 \leq 266$ при среднем значении $\bar{\beta}_1 = 110$. Такому состоянию поверхности соответствует импульсное напряжение пробоя $9 \leq U_1 \leq 30кВ$ при среднем значении $\bar{U}_1 = 24кВ$. Воздействие импульсов $t_{u2} = 50нс$ улучшило состояние поверхности, снизив коэффициент усиления поля $59 \leq \beta_2 \leq 131$ при среднем значении $\bar{\beta}_2 = 77$ и увеличив пробивное напряжение $14 \leq U_2 \leq 41кВ$ при среднем значении $\bar{U}_2 = 34кВ$. Импульсная электрическая прочность при этом увеличилась с $\bar{E}_{01} = 1,2 \cdot 10^8 В/м$ до $\bar{E}_{02} = 1,7 \cdot 10^8 В/м$.

Уменьшение длительности кондиционирующих импульсов в четыре раза привело к $\sim 40\%$ повышению качества поверхности катода и электрической прочности и $\sim 40\%$ сокращением относительной погрешности этих величин.

Критические значения микронапряженности, полученные с расчетной кривой $t_3(E_{кр})$ для меди (рисунок 8), составили $E_{1кр} = 7,45 \cdot 10^9 В/м$; $E_{2кр} = 8,00 \cdot 10^9 В/м$.

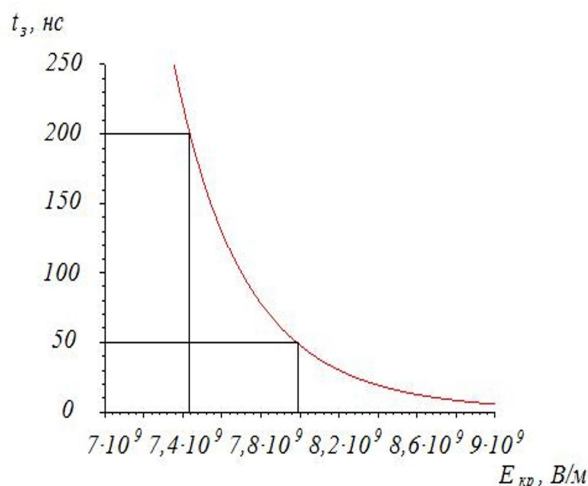


Рисунок 8 – Зависимость времени запаздывания пробоя от критической напряженности электрического поля на катоде для медных электродов

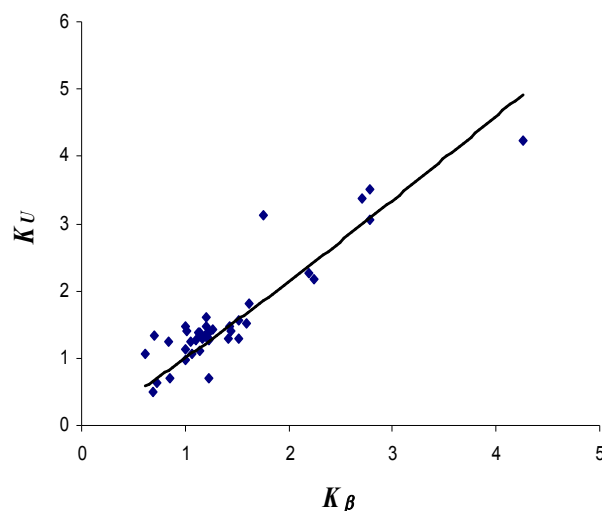


Рисунок 9 - Изменение пробивного напряжения с изменением состояния катодной поверхности в результате воздействия импульсного напряжения

Оценка катодного механизма инициирования пробоя по абсолютной величине пробивной микронапряженности поля $\beta E_0 = E_{кр}$ показала, что средняя микронапряженность на $\sim 60\%$ превышает ее расчетное значение.

Использование коэффициентов относительного изменения качества поверхности $K_\beta = \beta_1/\beta_2$ и пробивного напряжения $K_U = U_2/U_1$ позволяет существенно снизить погрешность измерения до значения, соответствующего относительному разбросу величин, определяемому условиями эксперимента. Зависимость $K_U = f(K_\beta)$, характеризующая изменение пробивного напряжения с изменением состояния катодной поверхности в результате воздействия импульсного напряжения, приведена на рисунке 9.

Экспериментальные точки удовлетворяют степенной зависимости $K_U = K_\beta^{1,1}$, подтверждая катодный механизм инициирования. Получено линейное уравнение регрессии $K_U = 0,89K_\beta^{1,1} + 0,26$ с достоверностью аппроксимации 85% . Среднее значение, рассчитанное по критерию (5), составило $K_\beta/K_U^{0,9} = 0,99$.

Стандартное отклонение результатов измерения при этом уменьшилось до $\sim 30\%$ по сравнению с погрешностью, рассчитанной по абсолютным величинам и составлявшей $\sim 60\%$.

Погрешность оценки катодного механизма инициирования по критерию (5) с использованием средних значений коэффициентов $\bar{K}_U = 1,60$ и $\bar{K}_\beta = 1,52$ составила менее 1% , указывая на исключение систематической погрешности измерений. Экспериментальные точки удовлетворяют степенной зависимости $K_U = K_\beta^{1,1}$, со средним относительным отклонением от нее порядка 11% , что

подтверждает выполнение катодного механизма инициирования вакуумного пробоя.

С использованием предложенной методики оценки катодного инициирования к последовательно подаваемым импульсам одинаковой длительности $t_u = 200 \text{ нс}$ получены графики изменения величин $K_U = U_2/U_1$ и $K_\beta = \beta_1/\beta_2$, выполненные в логарифмическом масштабе, которые показывают степень их корреляции между собой (рисунок 10).

Уравнение регрессии, рассчитанное по методу наименьших квадратов при помощи математического пакета *Excel*, имеет вид $K_U = 1,005 K_\beta^{1,05}$ и представлено на рисунке 11. Средние значения величин относительного изменения качества поверхности и повышения электрической прочности составили $\bar{K}_\beta = 1,06$, $\bar{K}_U = 1,08$, $K_\beta/K_U^{0,9} = 0,98$. Проверка критерия по средним значениям дала погрешность $\sim 2\%$.

При исследовании степенной зависимости $K_U = K_\beta^{1,1}$ получено линейное уравнение регрессии, которое имеет вид $K_U = 0,94 K_\beta^{1,1} + 0,08$, с достоверностью аппроксимации 88%. Экспериментальные точки удовлетворяют степенной зависимости $K_U = K_\beta^{1,1}$, со средним относительным отклонением от нее около 12%, подтверждая выполнение критерия катодного механизма.

В целом точность оценки импульсного кондиционирования по предложенному критерию превысила точность оценки по известным критериям в два раза.

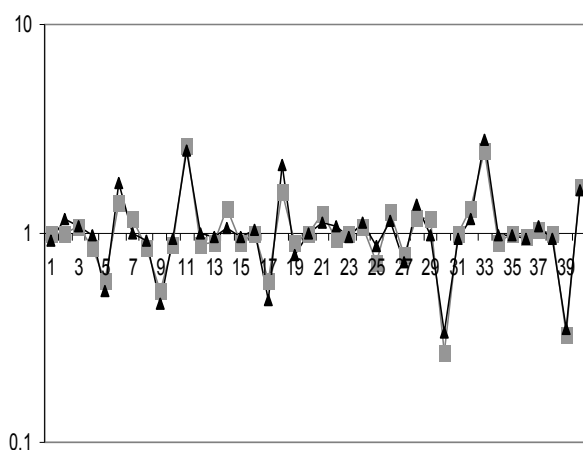


Рисунок 10 – Графики изменения величин K_β и K_U для импульсов $t_u = 200 \text{ нс}$, выполненные в логарифмическом масштабе: ■ - K_β , ▲ - K_U

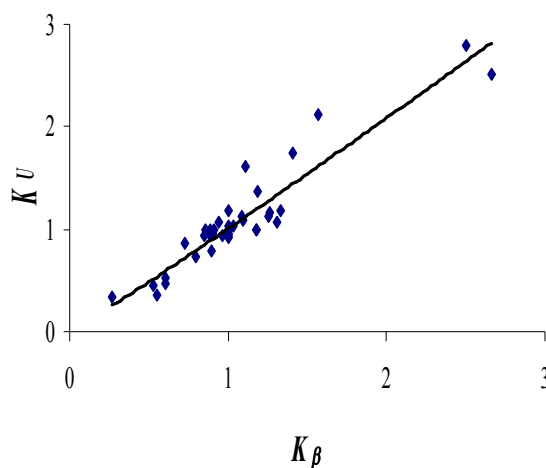


Рисунок 11 - Коэффициент повышения электрической прочности как функция коэффициента эффективности обработки катодной поверхности при оптимальных режимах кондиционирования импульсами $t_u = 200 \text{ нс}$

В заключении сформулированы основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Исследована эффективность оптимальных режимов обработки поверхности катода вакуумного промежутка импульсами длительностью равной времени запаздывания пробоя $t_u = t_3$. Предложен новый подход к оценке эффективности оптимальных режимов обработки электродов в вакууме, использующий относительные изменения коэффициента усиления поля на катодных микронеоднородностях β с изменением длительности импульсов.

2. Показано, что с уменьшением длительности кондиционирующих импульсов в диапазоне $10^{-11} \text{ с} \leq t_u \leq 10^{-7} \text{ с}$ коэффициент усиления поля на катодных микронеоднородностях, характеризующий качество поверхности катода, уменьшается более чем на два порядка величины до минимально возможного значения $\beta = 1$, соответствующего идеально гладкой поверхности. Для выполнения условия оптимальности при уменьшении длительности импульсов необходимо увеличивать амплитуду импульсов. Качество катодной поверхности в результате обработки импульсами $t_u = t_3$ определяется только макронапряженностью поля, при этом коэффициент усиления поля удовлетворяет выражению $\beta = 1,28 \cdot 10^9 E_0^{-0,9}$.

3. Разработан новый критерий катодного механизма инициирования вакуумного пробоя в импульсном режиме для электродов с развитой рабочей поверхностью $K_\beta / K_U^{0,9} = 1$, основанный на сравнении относительных изменений состояния катодной поверхности $K_\beta = \beta_1 / \beta_2$ и импульсной электрической прочности $K_U = U_2 / U_1$ в результате воздействия импульсов $t_u = t_3$ и исключая систематическую погрешность измерений.

4. Предложен метод оценки катодного механизма инициирования пробоя в вакууме, включающий определение относительных изменений состояния поверхности катода K_β и импульсной электрической прочности K_U в результате оптимальных режимов импульсного кондиционирования для импульсов одинаковой или разной длительности и проверку выполнения разработанного критерия.

5. Метод реализован в виде способа оценки катодного механизма инициирования пробоя в вакууме (патент РФ 2249879 Н01J21/00).

6. Осуществлена экспериментальная проверка разработанного метода оценки катодного механизма вакуумного пробоя на макетах вакуумных конденсаторов. Показано, что метод обладает повышенной точностью. Проверка критерия $K_\beta / K_U^{0,9} = 1$ по средним значениям критериальных параметров $\bar{K}_U$ и $\bar{K}_\beta$ для различных длительностей кондиционирующего импульса дала погрешность $\sim 1\%$, для одной длительности – $\sim 2\%$. Достигнуто 2-х кратное повышение точности оценки катодного механизма инициирования по сравнению с известными способами.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Емельянов, А.А. О катодном инициировании вакуумного пробоя в импульсном режиме / А.А. Емельянов, Е.А. Емельянова, **Т.Н. Сафонова** // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 30. – Вып. 20 - С.55-61 (Emelyanov, A.A. Cathode - Initiated Vacuum Breakdown in a Pulse Regime / A.A. Emelyanov, E.A. Emelyanova, **T.N. Safonova** // Technical Physics Letters. – 2004 - Vol. 30. - No. 10. – P.868 - 870) (рекомендован ВАК)
2. Emelyanov, A.A. Optimal Conditions Efficiency for Pulse Increasing the Breakdown Strength of Vacuum Insulation / A.A. Emelyanov, E.A. Emelyanova, **T.N. Safonova**, I.O. Serikov // Proc. XXIth ISDEIV – Yalta. Crimea, 2004. – Vol. 1. – P.9 – 11.
3. Emelyanov, A.A. Vacuum Breakdown Cathode Initiation Estimation in DC Regime / A.A. Emelyanov, E.A. Emelyanova, **T.N. Safonova**, I.O. Serikov // Proc. XXIth ISDEIV – Yalta. Crimea, 2004. – Vol. 1. – P.12 – 13.
4. Emelyanov, A.A. Vacuum Breakdown Cathode Initiation Estimation in Pulse Regime / A.A. Emelyanov, E.A. Emelyanova, **T.N. Safonova**, I.O. Serikov // Proc. XXIth ISDEIV – Yalta. Crimea, 2004. – Vol. 1. – P.14 – 16.
5. Патент РФ 2249879 H01J21/00 Способ оценки катодного механизма инициирования пробоя в вакууме / А.А. Емельянов, Е.А. Емельянова, **Т.Н. Сафонова**, заявитель и патентообладатель ОрелГТУ. – Оpubл. 10.04.2005. – Бюл. № 10.
6. Емельянов, А.А. Импульсная электрическая прочность сантиметровых вакуумных промежутков / А.А. Емельянов, Е.А. Емельянова, **Т.Н. Сафонова** // Материалы третьей международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск, 2005. – Ч.1 - С.195 – 197.
7. Emelyanov, A.A. Estimation of cathode-initiated breakdown in vacuum / A.A. Emelyanov, E.A. Emelyanova, **T.N. Safonova**, I.O. Serikov // IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation. – 2006. - Vol. 1. - N. 1. - P. 26 – 33. (рекомендован ВАК)
8. **Сафонова, Т.Н.** Критерии и методы контроля катодного механизма инициирования пробоя в импульсном режиме / Т.Н. Сафонова // Материалы VIII международной научно-практической конференции «Теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики». – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2007. – С.88 – 91.
9. **Сафонова, Т.Н.** Экспериментальная проверка метода контроля катодного механизма инициирования вакуумного пробоя в импульсном режиме / Т.Н. Сафонова // Материалы X международной научно-практической конференции «Теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики». – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2009. – С.4 – 8.