

На правах рукописи



Иванов Иван Олегович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИИ МЕТАЛЛОПЛЕНОЧНЫХ
КОНДЕНСАТОРОВ ПРИ ФОРСИРОВАННЫХ НАГРУЗКАХ**

Специальность 05.09.02. – Электротехнические материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном
учреждении высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель:

Емельянов Олег Анатольевич

кандидат технических наук, доцент,
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого»

Официальные оппоненты:

Скворцов Аркадий Алексеевич

доктор физико-математических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский политехнический университет»,
заведующий кафедрой

Еникеев Рустам Шамильевич

кандидат технических наук,
АО «Научно-исследовательский институт
электрофизической аппаратуры» им. Д.В. Ефремова,
Санкт-Петербург, начальник лаборатории

Ведущая организация:

АО Научно-исследовательский институт
«ГИРИКОНД», Санкт-Петербург

Защита состоится «28» ноября 2017 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета
Д 212.229.16 при ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Главный
учебный корпус, ауд. 284.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-
Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте
<https://www.spbstu.ru/science/defences.html>.

Автореферат разослан «_____» октября 2017 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.229.16,

кандидат технических наук, доцент



Журавлева Наталия Михайловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Технические условия на серийно выпускаемые электрические конденсаторы определяют допустимые параметры режимов работы, при которых гарантируется надежная работа изделий в течении всего срока длительной эксплуатации. Основными параметрами, определяющими работоспособность конденсатора, являются: величина рабочего напряжения, действующее значение тока через конденсатор или амплитуда импульсного тока, частота приложенного напряжения или частота следования импульсов и максимальная рабочая температура.

Кроме номинальных режимов работы (режимов длительной эксплуатации), когда срок службы конденсаторов составляет единицы – десятки тысяч часов (импульсов), существуют форсированные режимы работы. В указанных режимах требуемый срок службы может составлять единицы – десятки минут (сотни – тысячи импульсов), при этом за счет форсирования предельно допустимых нагрузок можно существенно увеличить энергоэффективность используемых конденсаторов.

Среди возможных форсированных эксплуатационных характеристик: частота приложенного напряжения, температура, уровень приложенного напряжения и величина рабочего тока, две последние представляют наибольший практический интерес. В первом случае рабочее напряжение конденсатора значительно выше его номинального значения, при этом рабочие токи не превышают или незначительно превышают допустимые значения. Во втором случае режим работы характеризуется большими разрядными токами, которые могут существенно превышать предельно допустимые значения, при этом напряжение не превышает установленного номинального значения, соответствующего режиму длительной эксплуатации.

Наиболее подходящим типом конденсаторов для работы в форсированных режимах для первого случая являются металлопленочные конденсаторы. Данный тип конденсаторов обладает способностью к самовосстановлению (СВ), то есть восстановлению своей работоспособности при пробое диэлектрика. В случае локального пробоя диэлектрика в местах с пониженной электрической прочностью возникает значительная величина плотности тока пробоя. В зоне пробоя диэлектрика выделяется энергия, достаточная для частичного уничтожения некоторой области тонкого металлизированного электрода (толщиной 10 – 20 нм) вблизи канала пробоя за счет локального электрического взрыва электрода с последующим развитием радиального микродугового разряда. Совокупное время возникновения, развития и погасания разряда конечно и составляет, как правило, единицы – десятки микросекунд. Образующая таким образом зона демультипликации изолирует место пробоя от остальной части электрода и конденсатор восстанавливает свою работоспособность.

Рассматривая второй случай форсирования нагрузок, следует отметить, что в последнее время одной из областей применения металлопленочных конденсаторов становятся высокоэнергетические импульсные устройства, которые используются в плазменных и лазерных установках, ускорителях частиц, импульсных устройствах военной

техники, где данный тип конденсаторов в ряде случаев пришел на смену традиционным фольговым конденсаторам. Режимы работы в данной области характеризуются высокой амплитудой импульсов тока (единицы – десятки килоампер) и малой длительностью (сотни микросекунд и меньше), при этом срок службы конденсаторов не превышает нескольких тысяч импульсов, а в некоторых случаях ресурс составляет менее тысячи импульсов. Особенности работы импульсных конденсаторов, а также устройств на основе емкостных накопителей энергии рассмотрены в работах Г.С. Кучинского, Г.А. Шнеерсона, Б.Е. Фридмана, Б.М.Ковальчука, С.И. Кривошеева, Р.Ш. Еникеева, Б.Л. Алиевского, С.И. Шкуратова, А.В. Пономарева, В.А. Коликова, А.В. Будина и других. Следует отметить публикации и зарубежных ученых: W.J. Sarjeant, J. Zirnheld, F.W. MacDougall, J.B. Ennis, G. Picci, M. Rabuffi, F. Lin, H. Li и других.

На сегодняшний день существующие технические условия не позволяют оценить работоспособность металлопленочных конденсаторов в форсированных режимах. Механизмы деградации данных конденсаторов и особенности их отказа в режимах с повышенной электрической и токовой нагрузкой являются относительно слабоизученными. Тем не менее, спрос на энергоемкие конденсаторы непрерывно возрастает, что связано с широкой областью их применения. Информация о предельно возможных нагрузках, которые способны выдержать металлопленочные конденсаторы, позволит эффективно использовать их в форсированных режимах, а также покажет наиболее эффективные пути улучшения конструкции конденсаторов данного типа. В силу обсуждаемой специфики малых сроков службы в литературе по существу отсутствуют данные для прогнозирования работоспособности МПК в форсированных режимах, поэтому проведение соответствующих экспериментальных и теоретических исследований представляется актуальным, а ожидаемые результаты – отличающимися научной новизной.

Степень разработанности темы исследования

Процессы самовосстановления в металлопленочных конденсаторах активно изучаются на протяжении последних десятилетий. В настоящее время разработано несколько моделей процесса самовосстановления, каждая из которых основана на своём подходе к определению энергетических характеристик процесса. Наиболее значимые исследования процесса самовосстановления изложены в работах Б.П. Беленького, Н.В. Северюхиной, Ю.С. Чатиняна, Э.В. Кургиняна, Н. Heywang, J. Kammermaier, J.-H. Tortai, T. Christen, M. Carlen, C.W. Reed, S.W. Cichanowski и других. Разработанные модели процесса самовосстановления, в основном, сопоставлялись с экспериментальными данными, полученными на модельных образцах металлопленочных конденсаторов. Тем не менее, использование модельных образцов при исследовании столь сложного процесса не позволяет воспроизвести всех особенностей реальной конструкции конденсатора. Поэтому расчеты, выполнение на основе теоретических моделей, часто не согласовываются с данными экспериментов.

Общепринятым критерием параметрического отказа металлопленочных конденсаторов при деградации под действием самовосстановления принято считать снижение емкости на 5 – 10 %. Вместе с тем, процесс самовосстановления характеризуется

увеличением диэлектрических потерь, однако, этому обстоятельству уделяется значительно меньше внимания.

При работе металлопленочных конденсаторов в импульсном режиме, где характерны высокие плотности тока, существенной деградации подвержены контактные узлы (области контактирования металлизированного электрода с выводами конденсатора) за счет электротеплового механизма разрушения. Данный механизм связан с джоулевым нагревом локальных участков контактных узлов под действием протекающего тока, что приводит к отгоранию части электродов и в конечном счете к обрыву цепи. На этот факт указывают авторы Б.П. Беленький, Н.В. Северюхина, М. Makdessi, A. Sari, P. Venet, S.A. Boggs и S. Qin. Некоторые исследования деградации контактных узлов представлены в работах G. Picci, M. Rabuffi, F. Lin, H. Li и J. Sivakumar. Однако, в имеющихся работах отсутствует всесторонняя информация о механизмах деградации, а также о предельных токовых нагрузках, допустимых в металлопленочных конденсаторах.

Кроме электротеплового механизма разрушения металлизированных электродов возможен процесс их деградации за счет электромиграции атомов металла под действием тока высокой плотности. Данный процесс хорошо известен в микроэлектронике, где является одной из причин отказа проводящих элементов интегральных микросхем, характерные толщины которых составляют доли микрометров, а времена разрушения исчисляются тысячами-десятками тысяч часов. Физические аспекты электромиграции, а также особенности разрушения элементов микроэлектроники изложены в работах К.А. Валиева, Р.В. Гольдштейна, М.Е. Сарычева, В.М. Сухарева, А.А. Скворцова, К.N. Tu, J.R. Lloyd, H. Ceric, J.R. Black, I.A Blech и других. Однако, электромиграционный механизм деградации ранее никогда не рассматривался применительно к металлопленочным конденсаторам, в которых толщина электродов составляет единицы – десятки нанометров.

На основании изложенных рассуждений была определена **цель работы**:

Исследовать основные механизмы деградации металлопленочных конденсаторов в форсированных режимах работы.

В рамках исследовательской работы были поставлены следующие **задачи**:

1. Разработать необходимые методики и аппаратуру для исследования работоспособности металлопленочных конденсаторов и механизмов их деградации;
2. Экспериментально исследовать механизмы деградации металлопленочных конденсаторов вследствие развития процессов самовосстановления;
3. Экспериментально исследовать процессы деградации контактных узлов под действием тока высокой плотности;
4. Выявить роль электромиграционного механизма деградации в электродах металлопленочных конденсаторов.

Научная новизна

1. В зависимости от уровня рабочего напряжения относительно номинального значения U_n выявлены три возможных типа развития процессов самовосстановления конденсаторов:

- I тип – единичные акты СВ (до $3 - 4 U_n$);

- II тип – СВ с повторными актами ($4 - 6 U_H$);
- III тип – многократные акты СВ (более $6 U_H$).

2. Установлено, что величина энергии, затрачиваемой на процесс самовосстановления, характеризуется степенной зависимостью от напряжения пробоя с показателем 2.2 – 2.6 и не зависит от материала диэлектрика (ПТЭФ, ПП). Вместе с тем, длительность самовосстановления практически не зависит от его энергии и лежит в пределах 5 – 25 мкс в зависимости от конкретного типа конденсатора.

3. Экспериментально и теоретически доказан электромиграционный механизм деградации электродных систем металлопленочных конденсаторов на масштабах субмикросекундных времён. Введено понятие «быстрой» электромиграции и определены условия ее возникновения. Установлено, что в зависимости от типа металлизированного электрода, данный процесс имеет пороговую плотность тока $\sim 10^{11} - 10^{12} \text{ А/м}^2$, ниже которой его развитие затруднено. Определена средняя скорость переноса атомов в процессе «быстрой» электромиграции, которая составляет 0.8 – 1 м/с.

4. Обнаружен полярный эффект разрушения контактных узлов металлопленочных конденсаторов. Данный феномен подтвержден как на модельных образцах контактных узлов, так и на реальных серийно выпускаемых конденсаторах. Установлено, что скорость разрушения контактного узла отрицательной полярности выше, чем положительной. Показано, что полярный эффект разрушения контактных узлов связан с электромиграционным механизмом деградации.

5. Установлено, что в форсированных режимах при высокой токовой нагрузке деградация контактных узлов металлопленочных конденсаторов приводит к появлению частотной дисперсии емкости и тангенса угла диэлектрических потерь в диапазоне частот 1 кГц – 1 МГц. Дисперсия указанных параметров связана с неравномерностью пространственного распределения потенциала в конденсаторной системе электродов и характеризуется значительным снижением эффективной емкости при частотах выше 1 кГц (в 10 и более раз), при этом для частотной зависимости $\text{tg } \delta$ характерно наличие одного или двух максимумов.

Теоретическая и практическая значимость

1. Разработан испытательный стенд для исследования работоспособности металлопленочных конденсаторов в форсированных режимах. Стенд позволяет исследовать особенности работы конденсаторов в режимах с повышенной напряженностью электрического поля, а также в режимах с повышенной токовой нагрузкой. Кроме этого разработанный стенд дает возможность экспериментального исследования закономерностей деградации модельных образцов контактных узлов и сегментированных электродов металлопленочных конденсаторов, а также исследовать электромиграционный механизм деградации конденсаторных электродов.

2. Предложена методика тренировки металлопленочных конденсаторов повышенным напряжением (до $4 U_H$), которая способна обеспечивать их надежную работу в кратковременных форсированных режимах. При этом удельная энергия конденсаторов возрастает от номинальных значений $0.01 - 0.02 \text{ Дж/см}^3$ до уровня $0.16 - 0.32 \text{ Дж/см}^3$.

3. Предложено использовать величину суммарной энергии прошедших процессов самовосстановления, как критерий деградации металлопленочных конденсаторов. Определена критическая величина суммарной энергии самовосстановления, которая соответствует отказу исследуемых конденсаторов и в зависимости от их типа составляет 2 – 7 Дж. При этом параметрический отказ связан с резким возрастанием тангенса угла диэлектрических потерь, существенным снижением эквивалентного параллельного сопротивления и незначительным снижением емкости испытываемого конденсатора.

4. Предложена модель расчета импульсного сопротивления конденсатора в процессе самовосстановления. Полученная модель согласуется с экспериментальными данными и дает возможность оценить основные параметры процесса самовосстановления: импульс тока самовосстановления, количество выделяемой энергии и длительность процесса.

5. Предложена и обоснована методика эксплуатации импульсных металлопленочных конденсаторов с учетом неравномерного разрушения контактных узлов вследствие электромиграционного механизма деградации. Данная методика предусматривает смену полярности электродов при достижении 50 % ресурса конденсатора и может привести к увеличению срока службы изделия на 10 – 30%.

6. Получены аналитические выражения для расчета распределения потенциала и тока в конденсаторных структурах при несимметричном подключении электродов. Данные выражения позволяют оценить частотную зависимость импеданса конденсатора, связанную с неравномерным распределением потенциала. На основании аналитических и численных расчетов обоснована методика диагностики состояния контактных узлов металлопленочных конденсаторов при помощи измерения частотной зависимости их эффективной емкости и тангенса угла диэлектрических потерь.

7. Разработана модель электротеплового разрушения сегментированных электродов металлопленочных конденсаторов в программном пакете COMSOL Multiphysics. Полученная модель может использоваться для определения эффективности сегментированных электродов в процессе самовосстановления, а также их надежности в режимах высокой токовой нагрузки.

Методология и методы исследования

Для исследования работы металлопленочных конденсаторов в форсированных режимах и изучения механизмов деградации был разработан универсальный испытательный стенд. Исследования проводились на модельных образцах, выполненных из PET и PP конденсаторных пленок с алюминиевой или цинковой металлизацией, а также на серийно выпускаемых конденсаторах различной емкости и номинального напряжения.

Для проведения экспериментальных исследований были разработаны методики изучения процессов самовосстановления, токовой устойчивости металлопленочных конденсаторов, скорости деградации контактных узлов, электротеплового разрушения сегментированных электродов и электромиграционного механизма деградации. Численное моделирование электрофизических процессов в конденсаторных структурах осуществлялось в программном пакете COMSOL Multiphysics.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика тренировки металлопленочных конденсаторов повышенным напряжением (до $4 U_n$) обеспечивает их надежную работу в форсированных режимах на протяжении нескольких сотен минут.

2. Модель расчета импульсного сопротивления конденсатора в процессе самовосстановления, которая дает возможность оценить основные параметры кинетики развития процесса.

3. Методика эксплуатации импульсных металлопленочных конденсаторов, предусматривающая смену полярности электродов при достижении 50 % ресурса конденсатора, может привести к увеличению срока службы изделия на 10 – 30%.

4. Аналитические выражения для расчета потенциала и тока в конденсаторных структурах при несимметричном подключении электродов позволяют оценить частотную зависимость импеданса конденсатора. При этом эквивалентная схема замещения конденсатора учитывает степень деградации контактных узлов и хорошо согласуется с данными экспериментов.

5. Разработанная в программном пакете COMSOL Multiphysics модель электротеплового разрушения сегментированных электродов металлопленочных конденсаторов позволяет прогнозировать эффективность их работы.

Реализация результатов работы

Результаты диссертационной работы были использованы в АО «НИИ «ГИРИКОНД», а также в учебном процессе кафедры «Техника высоких напряжений, электроизоляционная и кабельная техника» ФГАОУ ВО «СПбПУ» для студентов, обучающихся по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» (акты использования прилагаются).

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современной аппаратуры, большим объемом экспериментальных данных и их статистической обработкой, а также использованием современных программных пакетов для выполнения математических расчетов и численного моделирования электрофизических процессов.

Личный вклад автора определяется участием в постановке задач исследования, разработке и создании экспериментальных установок, а также методик измерения, проведении экспериментальных и теоретических исследований, обработке и анализе полученных данных. Основные результаты работы получены автором лично. В процессе работы автор пользовался консультациями к.т.н. Бондаренко П.Н. и к.т.н. Белько В.О.

Апробация результатов исследования

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- XL, XLII – XLV научно-практических конференциях с международным участием «Неделя науки СПбГПУ» (Санкт-Петербург, 2011, 2013 – 2016 гг.);
- 2016 IEEE International Conference on Dielectrics (Montpellier, 2016 г.);
- 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (St. Petersburg, 2017).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 16 печатных работ, в том числе 8 в изданиях, рекомендованных ВАК, из них – 6 индексируемых в базах Scopus и Web of Science.

Структура и объем диссертационной работы

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 157 наименований, и трех приложений. Диссертация изложена на 155 страницах, содержит 77 рисунков и 9 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлены актуальность темы исследования и степень ее разработанности, определены цель и задачи исследования, указаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, а также отмечены степень достоверности и апробация полученных результатов.

В первой главе приведена информация о форсированных режимах работы электрических конденсаторов. Далее рассмотрена конструкция металлопленочных конденсаторов (МПК), технология производства и используемые диэлектрические материалы. Также приведены сведения о современных исследованиях, направленных на увеличение энергетических характеристик конденсаторов данного типа. Далее представлена информация об основных механизмах деградации МПК, изложены базовые представления о процессе СВ и приведены основные закономерности развития процесса. Затем рассмотрены особенности деградации МПК и разрушения контактных узлов под действием высокой токовой нагрузки. В завершении главы рассмотрены основные физические представления о процессе электромиграции, как о возможном механизме деградации электродных систем.

Во второй главе представлено описание экспериментальных методик для исследования различных механизмов деградации МПК в форсированных режимах, а также приведено описание методик численного моделирования электрофизических процессов, связанных с деградацией МПК, в программном пакете COMSOL Multiphysics.

Объектами исследований являлись модельные образцы электродной системы МПК, изготовленные из металлизированных полимерных пленок, а также серийно выпускаемые МПК общего применения К73 (ПЭТФ) и К78 (ПП) различной емкости и номинального напряжения, широко используемые в радиоэлектронной аппаратуре.

Исследование процессов СВ заключалось в регистрации изменения напряжения на исследуемом конденсаторе с помощью двух цифровых осциллографов с различной временной разверткой. Из полученных осциллограмм рассчитывались величина энергии и импульс тока СВ. Анализ зон демеетализации осуществлялся с помощью оптического микроскопа с цифровой камерой и последующей обработки полученных изображений.

Исследование токовой устойчивости МПК и закономерностей деградации контактных узлов осуществлялось как на модельных образцах, так и на реальных МПК. Использование модельных образцов контактных узлов дало возможность определить влияния полярности

импульсов тока на скорость деградации. Экспериментальные исследования токовой устойчивости серийных МПК позволили определить возможные токовые перегрузки в реальных конденсаторных конструкциях. При этом измерялись электрические параметры исследуемых конденсаторов с помощью измерителя импеданса Hioki IM3570 в частотном диапазоне 10 Гц – 1 МГц.

Для изучения электротеплового разрушения сегментированных электродов МПК использовался специально изготовленный генератор прямоугольных импульсов с малым временем нарастания (~ 250 нс). Исследование осуществлялось на образцах полимерной пленки с Al или Zn сегментированной металлизацией.

Исследование электромиграционного механизма деградации основывалось на изучении динамики роста электромиграционных трещин в образцах металлизированных электродов МПК с помощью оптического микроскопа. На основании экспериментальных данных производились расчеты плотности тока и температуры вблизи вершины трещины, что давало возможность провести оценку кинетических потоков атомов.

В третьей главе представлены результаты исследования процессов СВ в МПК. Установлено, что в зависимости от напряжения пробоя диэлектрика возможны три возможных типа СВ: единичные акты СВ, СВ с повторными актами и многократные акты СВ. Экспериментально показана возможность сохранения работоспособности конденсаторов данного типа при напряжениях до $4 U_H$ в течение кратковременного срока эксплуатации (~ 300 минут).

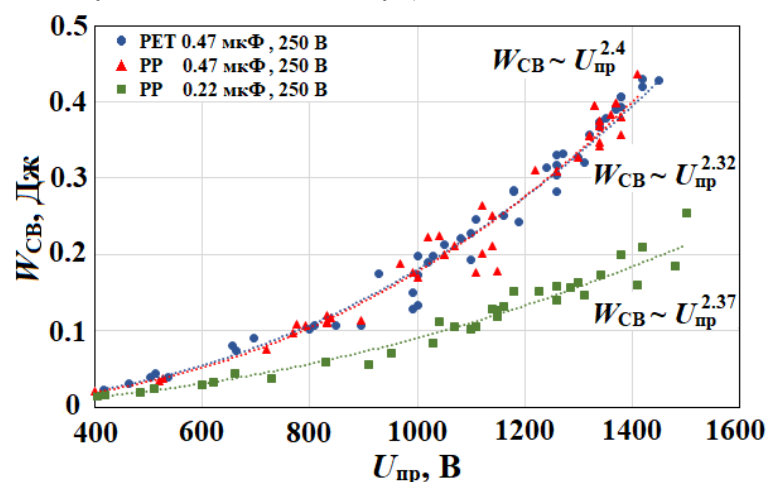


Рис. 1. Зависимости энергии СВ от напряжения пробоя

СВ объясняется тем, что они были разработаны на основе экспериментальных исследований, полученных на модельных образцах МПК, часто в свободном состоянии (на воздухе). В таком случае модельный эксперимент не позволяет должным образом имитировать процесс СВ в реальном конденсаторе.

Получены зависимости площади зоны деметаллизации от энергии СВ. Данные зависимости имеют линейный характер, что согласуется с литературными данными. Установлено, что в диапазоне энергий 0.03 – 0.4 Дж площадь зоны ДМ $S_{DM} = 2 - 14 \text{ мм}^2$ при этом диаметр канала пробоя составляет 0.2 – 0.7 мм.

В ходе исследований определены основные закономерности развития СВ в реальных серийно выпускаемых МПК и сопоставлены с принятыми теоретическими моделями процесса СВ. Установлено, что зависимость энергии СВ от пробивного напряжения имеет степенной характер с показателем степени $n = 2.2 - 2.4$ (рис. 1), что отличается от литературных данных, где показатель степени n лежит в интервале 4 – 6. Расхождение результатов с принятыми моделями

Экспериментально показано, что длительность процесса СВ не зависит от энергии СВ в широком диапазоне энергий и определяется исключительно конструкцией конденсатора. Для исследуемых типов МПК длительность процесса СВ составляла 5 – 25 мкс.

Установлено, что при многократных актах СВ отказ МПК происходит по причине снижения эквивалентного сопротивления диэлектрика вследствие накопления проводящих углеродных включений в зонах СВ. При этом конденсатор больше не способен длительное время удерживать заряд. Отказ исследуемых конденсаторов происходил при суммарной энергии СВ $W_{\Sigma} = 2 - 7$ Дж, что соответствовало 100 – 250 актам СВ.

На основании экспериментальных данных предложена модель импульсного сопротивления конденсатора в процессе СВ (рис. 2):

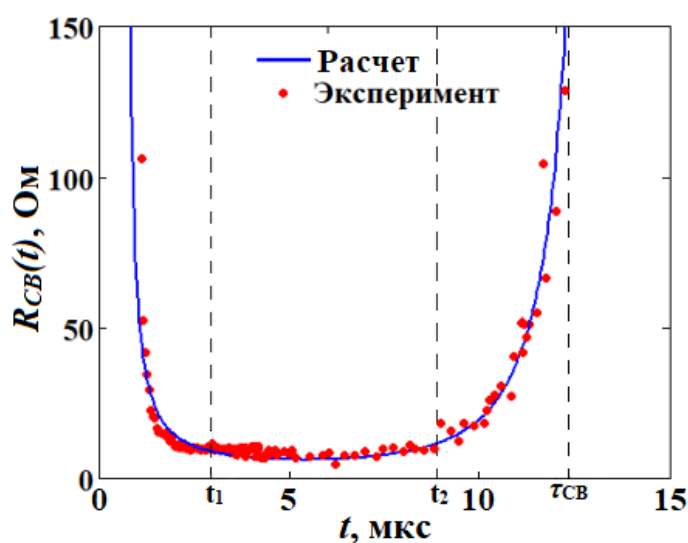


Рис. 2. Динамика импульсного сопротивления зоны СВ

конденсаторов величина $R_0 \approx 8 - 12$ Ом и параметр модели $\alpha \approx 4$. Полученная модель согласуется с экспериментальными данными и дает возможность оценить основные параметры процесса СВ: импульс тока СВ, количество выделяемой энергии и длительность процесса.

Экспериментально определен предельно допустимый уровень напряжения при работе в форсированных режимах. Установлено, что тренировка данных конденсаторов до уровня $\sim 4 U_n$ может быть эффективна для обеспечения работы при повышенной напряженности электрического поля $\sim 80 - 240$ кВ/мм. При этом изменения электрических параметров относительно исходных значений будут незначительны. Вместе с тем повышение рабочего напряжения в 4 раза приводит к увеличению удельной энергии конденсатора в 16 раз до уровня $0.16 - 0.32$ Дж/см³, что значительно увеличивает энергоэффективность изделия в целом.

В четвертой главе изложены результаты исследования электромиграционного механизма деградации электродов МПК. на основе изучения динамики роста электромиграционных трещин. Пример роста трещины и смена направления движения при смене полярности импульсов тока показан на рис. 3.

$$R_{CB}(t) = \frac{R_0 \cdot t_1}{t \cdot \left[1 - \left(\frac{t}{\tau_{CB}} \right)^2 \right]^\alpha}, \quad (1)$$

где τ_{CB} – длительность процесса СВ, t_1 – время формирования устойчивого канала дуги (для исследуемых конденсаторов не превышало 1.5 мкс); R_0 – минимальное значение импульсного сопротивления зоны СВ, которое определяется эквивалентным сопротивлением металлизированных электродов току, подтекающему к месту пробоя, и составляет $\sim 1.3 - 1.5 R_{\square}$; α – параметр модели. Для исследуемых

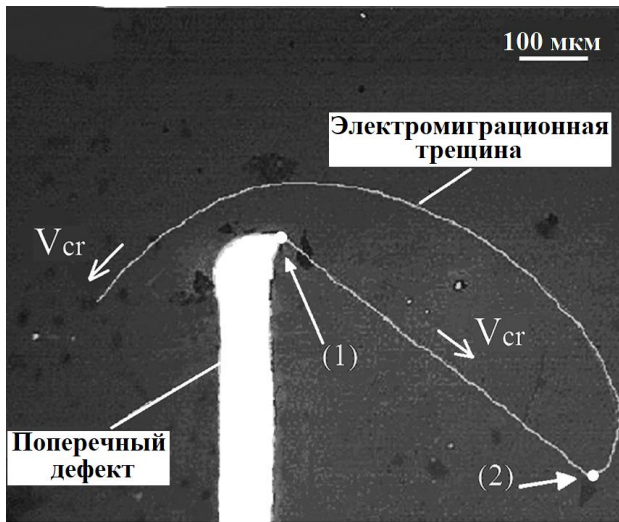


Рис. 3. Смена полярности электромиграционной трещины.

- (1) – точка начала роста трещины,
- (2) – точка смены полярности импульсов

понятие процесса «быстрой» электромиграции. Образование характерных для электромиграционного процесса дефектов в виде наростов (5) и пустот (6) схематически показано на рис. 4, где также обозначены направления электромиграционной силы F_{EM} и механической силы упругости кристаллической решетки F_{σ} . На основании экспериментальных и расчетных данных установлены критерии для возникновения процесса «быстрой» электромиграции: плотность тока $j \sim 10^{12}$ А/м² и температура близкая к температуре плавления.

Расчет плотности тока и температуры вблизи электромиграционных трещин позволил провести количественную оценку кинетических потоков атомов, вызванных различными действующими силами. Установлено, что из четырех возможных кинетических потоков атомов преобладающими являются потоки под действием электромиграционной силы и поток под действием механических напряжений кристаллической решетки. Потоки под действием градиента концентрации и градиента температуры являются незначительными и их можно не учитывать в расчетах. Скорость переноса атомов за счет электромиграционной силы определяется выражением

$$v_{EM} = \frac{DeZ^* j \rho}{kT} \quad (2)$$

и в зависимости от параметров импульса тока составляет 0.8 – 1 м/с. В данном выражении D – коэффициент диффузии, eZ^* – эффективный заряд, j – плотность тока, ρ – удельное сопротивление, k – постоянная Больцмана, T – температура.

В пятой главе приведены результаты исследования электротеплового разрушения электродных систем МПК. Данная глава включает в себя исследование разрушения модельных образцов контактных узлов, определение токовой устойчивости серийных МПК и изучение электротеплового разрушения сегментированных электродов МПК.

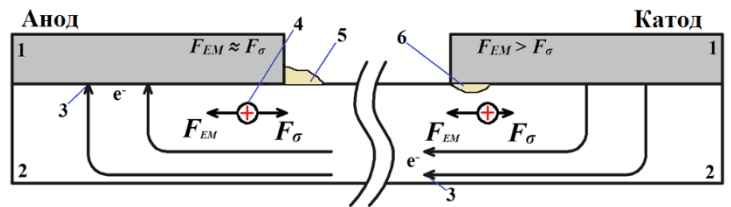
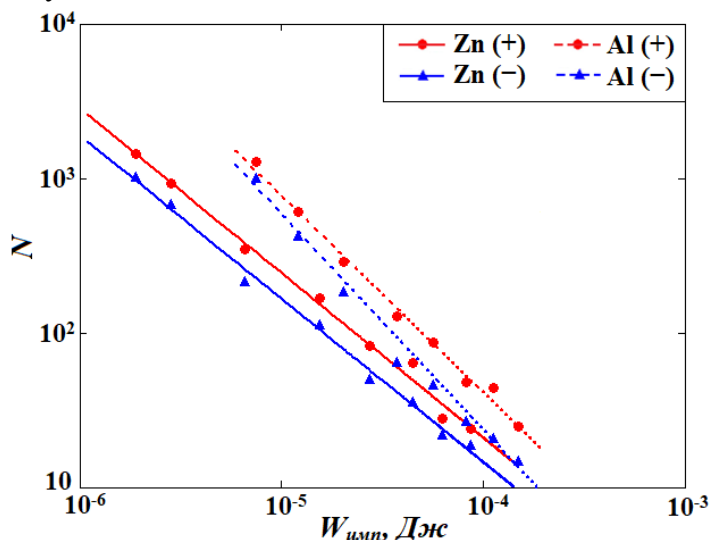


Рис. 4. К пояснению электромиграционного механизма деградации

В результате экспериментальных исследований была показана возможность электромиграционного механизма деградации в электродных системах МПК, а также возможность его развития в субмикросекундном временном масштабе. Так как скорость развития электромиграционного процесса в проводимых экспериментах значительно быстрее, чем в элементах микроэлектроники, было введено

В ходе исследований обнаружен полярный эффект деградации контактных узлов МПК. Данный эффект проявлялся как на модельных образцах, так и в реальных серийно выпускаемых МПК. На рис. 5. представлены зависимости количества импульсов до отказа модельных образцов контактных узлов с различной металлизацией (Zn и Al) от энергии импульсов и их полярности. Было установлено, что деградация контактных узлов лучше всего описывается степенным законом количества импульсов до отказа N от энергии импульса:



$$N = N_0 \cdot W_{имп}^{-m}, \quad (3)$$

где $W_{имп}$ – энергия воздействующего импульса тока, N_0 и m – параметры закона старения.

На основании анализа возможных механизмов деградации контактных узлов МПК было установлено, что полярный эффект деградации связан с процессом электромиграции – переноса атомов металла под действием высокой плотности тока. За счет влияния данного процесса увеличивается количество локальных дефектов вблизи катода, что приводит к более интенсивному процессу

Рис. 5. Зависимости количества импульсов до отказа от энергии импульсов и их полярности деметаллизации и, как следствие, более быстрому разрушению (рис. 4).

Исследования токовой устойчивости МПК показали, что в импульсных режимах конденсаторы данного типа могут использоваться со значительным превышением допустимой токовой нагрузки. Работоспособность исследуемых конденсаторов сохранялась при превышении максимально допустимой амплитуды импульса тока в 40 – 60 раз, при этом их срок службы составлял единицы – десятки минут (единицы – десятки тысяч импульсов). Типичные статистические распределения срока службы для одного из типов исследуемых конденсаторов при различной величине токовой перегрузки K представлены на рис. 6.

Установлено, что деградация контактных узлов МПК приводит к появлению частотной дисперсии емкости и значительному увеличению диэлектрических потерь. Частотная дисперсия проявляется в виде снижения эффективной емкости при частоте выше 1 кГц, а при частоте 1 МГц ее значение становится в 10 и более раз меньше статического значения, при этом эффективная емкость может быть определена как

$$C_{эфф} = \frac{1}{i\omega Z(\omega)}, \quad (4)$$

где ω – циклическая частота, $Z(\omega)$ – импеданс конденсатора, i – мнимая единица. Частотные спектры эффективной емкости для одного из исследуемых конденсаторов представлены на рис. 7. На основе аналитических и численных расчетов установлено, что данное явление связано с неравномерным распределением потенциала в конденсаторной системе

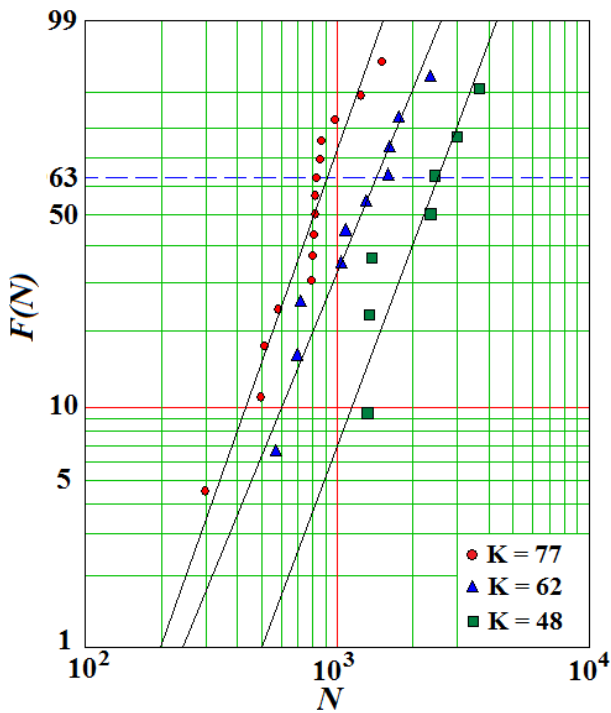


Рис. 6. Распределения Вейбулла срока службы от числа импульсов N при различной токовой перегрузке K

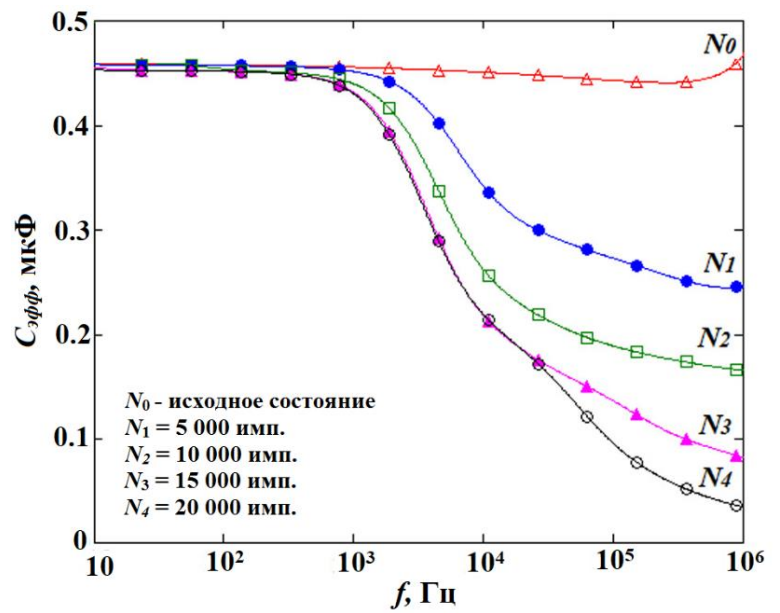


Рис. 7. Частотные спектры эффективной емкости исследуемого конденсатора

распределения потенциала в конденсаторной структуре при двухстороннем подключении электродов, которые наиболее точно описывают работу МПК в режимах с повышенной частотой рабочего напряжения.

На основании экспериментальных данных о закономерностях деградации контактных узлов МПК предложена методика эксплуатации, предусматривающая смену полярности электродов конденсатора после выработки 50% ресурса. По предварительным расчетам данная методика может увеличить срок эксплуатации импульсных МПК на 10% и более.

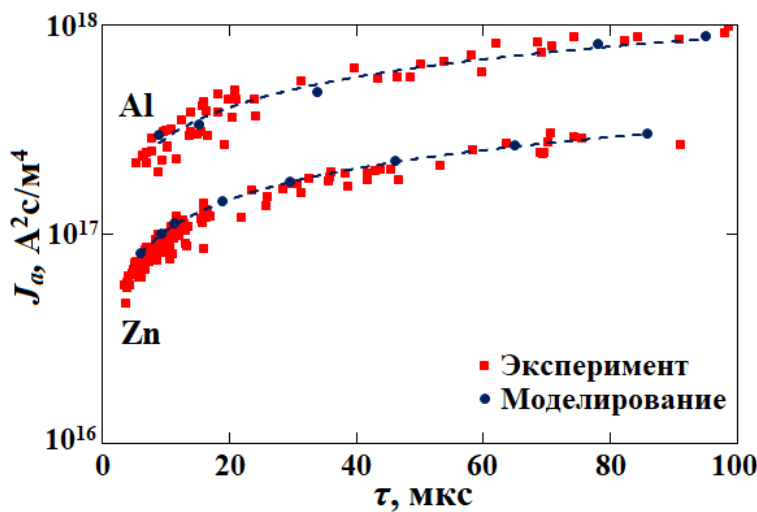


Рис. 8. Расчетные и экспериментальные зависимости интеграла действия от длительности разрушения.

электродов и сильно зависит от сопротивления металлизации и емкости, а также частоты приложенного напряжения. Также получено аналитические выражения для расчета

Разработана модель электротеплового разрушения сегментированных электродов МПК в программном пакете COMSOL Multiphysics. В расчетной модели решалась следующая система уравнений:

$$\begin{aligned} \nabla J &= 0 \\ J &= \gamma E \end{aligned} \quad (4)$$

$$E = -\nabla \varphi$$

$$\rho_m C_m \cdot \frac{\partial T_m}{\partial t} = \lambda_m \cdot \nabla^2 T_m + \frac{J^2}{\gamma}$$

$$\rho_p C_p \cdot \frac{\partial T_p}{\partial t} = \lambda_p \cdot \nabla^2 T_p.$$

Первые три уравнения данной системы определяют распределение электрического поля в проводящей среде. Последние два уравнения – это уравнения теплопроводности для металлизации и полимерной пленки. В данных уравнениях J – плотность тока, E – напряженность электрического поля, φ – потенциал, γ – удельная проводимость металлизации, ρ_m и ρ_p – плотность, λ_m и λ_p – удельная теплопроводность, C_m и C_p – удельная теплоемкость, T_m и T_p – температура в металле и полимере соответственно. Данная модель позволяет получить значение интеграла действия тока (рис. 8), как характеристики энергии, затраченной на разрушение сегмента

$$J_a = \int_0^{\tau} j^2(t) dt, \quad (5)$$

где $j(t)$ – средняя плотность тока в мостике, τ – длительность процесса разрушения. Также расчетная модель позволяет рассчитать зависимость тока в измерительной цепи и получить картину деметаллизации разрушенного сегмента (рис. 9). Результаты численного моделирования, хорошо согласуется с результатами экспериментов, а сама модель может быть использована для оценки надежности и эффективности сегментированных электродов в процессе СВ, а также в режимах высокой токовой нагрузки.

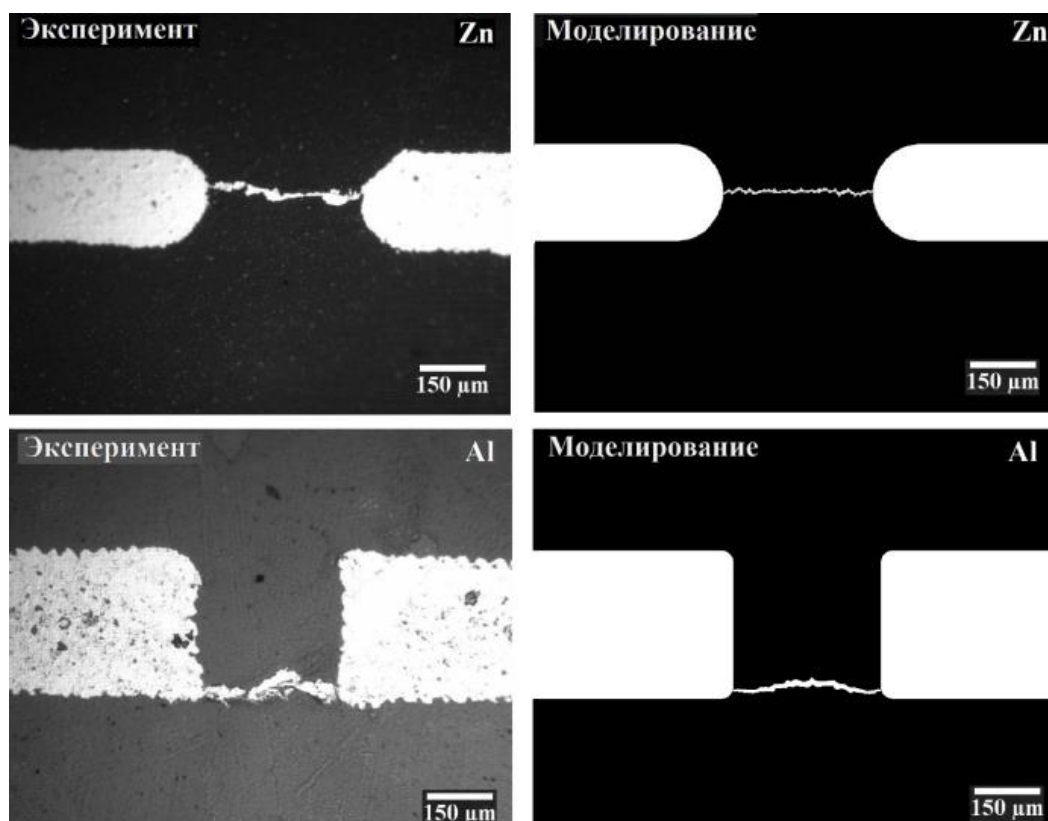


Рис. 9. Сравнительные изображения разрушенных мостиков, полученные экспериментальным и расчетным путем

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан экспериментальный стенд, позволяющий определять характеристики процесса самовосстановления (СВ) в диапазоне напряжений до 2.5 кВ, энергий СВ 0.001 – 0.5 Дж, длительностей процесса от 0.1 – 100 мкс при токах СВ 0.5 – 100 А, а также исследовать токовую устойчивость металлопленочных конденсаторов МПК при разрядных токах до 1200 А и напряжении до 600 В. С использованием разработанного стенда получены закономерности развития процессов СВ в серийно выпускаемых МПК. Подтверждены степенной характер зависимости энергии СВ от напряжения пробоя диэлектрика и линейная зависимость площади зоны деметаллизации от энергии СВ. Выявлены отличия от принятых теоретических и экспериментальных работ, посвященных разработке моделей процесса СВ. Так в полученных экспериментальных данных зависимость энергии СВ от пробивного напряжения имеет показатель степени $n = 2.2 - 2.6$, в то время как в принятых моделях самовосстановления $n = 4 - 6$. Такое отличие связано с тем, что разработанные модели СВ проверялись на модельных образцах МПК, которые не могут в полной мере воспроизвести условия протекания процесса СВ. Кроме этого установлено, что длительность процесса СВ не зависит от энергии и определяется исключительно конструкцией конденсатора.

2. На основании экспериментальных данных предложена модель импульсного сопротивления конденсатора в процессе СВ. Предложенная модель позволяет оценить основные параметры процесса СВ: импульс тока СВ, количество выделяемой энергии и длительность процесса.

3. Экспериментально определен предельно допустимый уровень рабочего напряжения при работе в форсированных режимах. Установлено, что тренировка конденсаторов до напряжения $\sim 4 U_n$ не приводит к существенному снижению емкости и значительному увеличению диэлектрических потерь, а работоспособность сохраняется на протяжении десятков – сотен минут.

4. Установлено, что отказ МПК вследствие многократных актов СВ происходит по причине снижения эквивалентного параллельного сопротивления, которое обусловлено накоплением проводящих углеродных включений в зонах СВ. Отказ исследуемых конденсаторов происходил при суммарной энергии СВ 2 – 7 Дж, что соответствовало развитию 100 – 250 актов СВ.

5. Выявлена роль электромиграционного механизма деградации электродных систем МПК. На основании экспериментальных данных произведена оценка кинетических потоков атомов и установлено, что преобладающими силами в процессе переноса атомов являются электромиграционная сила (сила «электронного ветра») и механическая сила упругости кристаллической решетки. При этом скорость движения атомов составляет $\sim 0.8 - 1$ м/с. Установлено, что данный механизм деградации способен развиваться в субмикросекундных временных интервалах. Введено понятие «быстрой электромиграции» и определены критерии для возникновения данного процесса: плотность тока $j \sim 10^{12}$ А/м² и температура близкая к температуре плавления.

6. Обнаружен полярный механизм деградации контактных узлов МПК. Установлено, что скорость деградации контактного узла отрицательной полярности выше, чем

положительной, время жизни различается на 20 – 60 %. Данный феномен наблюдался как на модельных образцах контактных узлов, так и на реальных МПК. На основании анализа возможных механизмов деградации, было установлено, что полярный эффект разрушения контактных узлов вызван электромиграционным механизмом деградации. На основании экспериментальных и расчетных данных предложена методика эксплуатации импульсных МПК, предусматривающая смету полярности при выработке 50 % ресурса, которая может увеличить срок службы на 10% и более.

7. При исследовании токовой устойчивости МПК установлено, что деградация контактных узлов приводит к появлению частотной дисперсии емкости и значительному увеличению диэлектрических потерь. Частотная дисперсия характеризуется значительным снижением эффективной емкости конденсатора при частотах выше 1 кГц (в 10 и более раз), при этом частотная зависимость $tg \delta$ характеризуется наличием одного или двух максимумов в диапазоне 1 кГц – 1 МГц. Аналитические и численные расчеты показали, что частотная дисперсия связана с неравномерным распределением потенциала в конденсаторной структуре вследствие частичного нарушения контактирования с металлизированным электродом.

8. На основании экспериментальных и расчетных данных предложена эквивалентная схема замещения МПК, учитывающая деградацию контактных узлов. Предложенная схема замещения учитывает сопротивления контактных узлов, приэлектродные сопротивления металлизации и приэлектродную емкость. Анализ схемы замещения показал, что наиболее подходящим методом контроля работоспособности импульсных МПК является измерение эффективной емкости в диапазоне частот 10^4 – 10^6 Гц.

9. Экспериментально исследованы закономерности электротеплового разрушения сегментированных электродов МПК. На основании проведенных исследований разработана модель разрушения электродов в программном пакете COMSOL Multiphysics. Численная модель позволяет определить значение интеграла действия и оценить энергию, затрачиваемую на разрушение сегмента. Разработанная расчетная модель хорошо согласуется с результатами экспериментов и может быть использована при конструировании новых типов МПК с сегментированными электродами.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Emelyanov, O.A. Fast electromigration crack in nanoscale aluminum film / Emelyanov O.A., Ivanov I.O. // *Journal of Applied Physics*. – 2014. – Vol. 116, №6. – P. 1-4. (рекомендовано ВАК, индексируется в Scopus и Web of Science)
2. Белько, В.О. Исследование закономерностей деградации контактных узлов металлопленочных конденсаторов / Белько В.О., Гливенко Д.Ю., Емельянов О.А., Иванов И.О. // *Научно технические ведомости СПбГПУ*. – 2016. – №4. – С. 69-76. (рекомендовано ВАК)
3. Belko, V.O. The Experimental Investigation and Numerical Simulation of Self-Healing in Metallized Film Capacitors / Belko V.O., Emelyanov O.A., Ivanov I.O. // *IEEE International Conference on Dielectrics*. – 2016. – Vol. 2. – P. 613-616. (рекомендовано ВАК, индексируется в Scopus и Web of Science)

4. Белько, В.О. Влияние форсированных токовых нагрузок на параметры электрических конденсаторов / Белько В.О., Гливенко Д.Ю., Емельянов О.А., Иванов И.О. // Научно технические ведомости СПбГПУ. – 2017. – №2. – С. 81-90. *(рекомендовано ВАК)*
5. Belko, V.O. Metallized Film Capacitors Degradation under High Electrodynamic Load / Belko V.O., Emelyanov O.A., Ivanov I.O., Glivenko D.Y. // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. – 2017. – P. 1120-1122. *(рекомендовано ВАК, индексируется в Scopus и Web of Science)*
6. Belko, V.O. Segmented Electrodes Electrodynamic Destruction in Metallized Film Capacitors / Belko V.O., Emelyanov O.A., Ivanov I.O. // IEEE Conference of Russian Young Re-searchers in Electrical and Electronic Engineering. – 2017. – P. 1117-1119. *(рекомендовано ВАК, индексируется в Scopus и Web of Science)*
7. Belko, V. Current pulse polarity effect on metalized film capacitors failure / Belko V.O., Glivenko D., Emelyanov O., Ivanov I., Plotnikov A. // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2017. – Vol. 45, №6. – P. 1020-1025. *(рекомендовано ВАК, индексируется в Scopus и Web of Science)*
8. Белько, В.О. Процессы самовосстановления пленочных конденсаторов в форсированных режимах / Белько В.О., Емельянов О.А., Иванов И.О. // Проблемы региональной энергетики. – 2017. – Т. 34, №2. – С. 13-22. *(рекомендовано ВАК, индексируется в Web of Science)*
9. Иванов, И.О. Исследование процесса быстрого электромиграционного разрушения металлизированных электродов металлопленочных конденсаторов / Иванов И.О., Белько В.О. // XL Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Ч. 2. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2011. – С.65-67.
10. Иванов, И.О. Исследование разрушения металлизированных электродов металлопленочных конденсаторов вследствие процесса быстрой электромиграции / Иванов И.О., Белько В.О. // XL Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Лучшие доклады. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2012. – С.144-146.
11. Иванов, И.О. Субмикросекундное электромиграционное разрушение металлизированных пленок / Иванов И.О., Емельянов О.А. // XLII Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем СПбГПУ. Ч. 1. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2014. – С.21-24.
12. Иванов, И.О. Тепловой расчет быстрого электромиграционного разрушения в металлизированных пленках / Иванов И.О., Емельянов О.А. // XLIII Неделя науки СПбПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем СПбПУ. Ч. 1. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2015. – С.37-40.
13. Иванов, И.О. Эффект полярного разрушения электродов металлопленочных конденсаторов / Иванов И.О., Емельянов О.А. // XLIV Неделя науки СПбПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем. Ч. 2. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2015. – С.28-31.
14. Иванов, И.О. Численное моделирование электротеплового разрушения сегментированных электродов металлопленочных конденсаторов / Иванов И.О., Белько В.О., Емельянов О.А. // XLV Неделя науки СПбПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем. Ч. 2. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2016. – С.18-21.
15. Иванов, И.О. Исследование электродинамического разрушения сегментированных электродов металлопленочных конденсаторов / Иванов И.О., Белько В.О., Емельянов О.А. // XLV Неделя науки СПбПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Лучшие доклады. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2016. – С.36-39.
16. Гливенко, Д.Ю. Полярный эффект разрушения контактных узлов металлопленочных конденсаторов / Гливенко Д.Ю., Иванов И.О. // XLV Неделя науки СПбПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем. Ч. 2. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2016. – С.14-16.