

На правах рукописи



Емельянов Олег Анатольевич

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ДЕГРАДАЦИИ  
МЕТАЛЛОПЛЕНОЧНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ В УСЛОВИЯХ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПЕРЕГРУЗОК**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Специальность: 01.04.13 Электрофизика, электрофизические установки

Санкт Петербург – 2018

Работа выполнена на кафедре «Техника высоких напряжений, электроизоляционная и кабельная техника» Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Министерство образования и науки Российской Федерации.

Официальные оппоненты:

**Фридман Борис Эммануилович**

д.т.н., старший научный сотрудник

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры»

им. Д.В. Ефремова, г. Санкт-Петербург,  
главный научный сотрудник

**Орешкин Владимир Иванович**

д.ф.-м.н., старший научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск, ведущий научный сотрудник

**Скворцов Аркадий Алексеевич**

д.ф.-м.н., доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования «Московский политехнический университет»,

заведующий кафедрой

Ведущая организация:

Акционерное общество Научно-исследовательский институт «ГИРИКОНД», г. Санкт-Петербург

Защита состоится 24 апреля 2018 года 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 \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.229.16,  
канд.техн.наук



Журавлева Н.М.

## ВВЕДЕНИЕ

### 1 Актуальность и степень разработанности темы исследования

Современные тенденции конструирования электрофизической аппаратуры предъявляют растущие требования к удельным характеристикам электрических конденсаторов, являющихся важным элементом устройств преобразовательной техники. Технические условия (ТУ) на серийно выпускаемые конденсаторы определяют допустимые параметры нагрузок, при которых гарантируется работа изделий при длительной эксплуатации, когда срок службы конденсаторов  $\tau_{\text{сл}}$  составляет единицы – десятки тысяч часов (импульсов). Основными параметрами, определяющими работоспособность конденсаторов, являются величины напряженности электрического поля  $E$  (напряжения) в диэлектрике, частоты приложенного напряжения  $f$ , максимальной рабочей температуры  $T_{\text{max}}$ , а также – значение тока через конденсатор  $I_p$ . Превышение указанных факторов соответствует области перегрузочных режимов эксплуатации, что схематически представлено на рисунке 1, где показана качественная зависимость предельно допустимого значения напряженности электрического поля в диэлектрике конденсатора от частоты при определенной температуре окружающей среды и неизменном сроке службы.

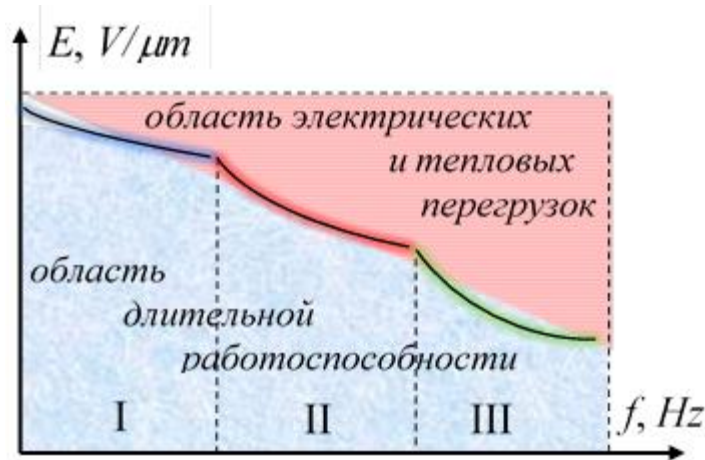


Рисунок 1 – Качественная зависимость допустимого значения напряженности электрического поля конденсатора

Обычные режимы работы электрических конденсаторов, а также устройств на основе емкостных накопителей энергии рассмотрены в работах В.Т.Ренне, Г.С. Кучинского, Г.А. Шнеерсона, Б.Э. Фридмана, Б.М.Ковальчука, С.И. Кривошеева, Б.Л. Алиевского, С.И. Шкуратова, А.В. Пономарева, А.В. Будина, В.В. Ермуратского, W.J. Sarjeant, F.W. MacDougall, J.B. Ennis, G. Picci, M. Rabuffi, F. Lin, H. Li и др. В случае применения металлопленочных конденсаторов (МПК) на основе органических диэлектриков, условия их работоспособности и деградации можно определить следующими областями.

**В области низких частот (область I)** предельно допустимое рабочее напряжение определяется, исходя из соображений запаса по кратковременной электрической прочности  $E_{кр}$  конденсаторного диэлектрика. Особенности конструкции МПК обеспечивают его работоспособность вследствие так называемого эффекта самовосстановления (СВ), в англоязычной литературе известного как self-healing (SH). В случае локального пробоя диэлектрика возникает значительная величина плотности тока и в зоне пробоя выделяется энергия, достаточная для частичного уничтожения некоторой области тонкого металлизированного электрода (толщиной 10–20 нм) вблизи канала пробоя за счет электрического взрыва металлизированного электрода с последующим развитием микродугового разряда в диапазоне единиц-десятков мкс. Образованная зона деметаллизации площадью в единицы-десятки квадратных миллиметров изолирует место пробоя от остальной части электрода и конденсатор восстанавливает свою работоспособность. Таким образом, МПК могут успешно функционировать даже на пределе своей электрической прочности, однако такое значение перегрузок не может быть бесконечным. Наиболее значимые исследования процесса самовосстановления изложены в работах Б.П. Беленького, В.А.Канина, Г.Р.Демиденко, Э.В. Кургиняна, Н. Heuwang, J. Kammermaier, J.-H. Tortai, T. Christen, M. Carlen, C.W. Reed, S.W. Cichanowski и др. Тем не менее, представления о физике процесса СВ остаются неясными. Некоторые авторы полагают, что разрушение металла связано с воздействием на него плазмы пробоя полимерной пленки, другие считают, что разрушение электродов обусловлено ударной волной, возникающей в импульсном дуговом разряде. Поскольку величина плотности тока в окрестности зоны пробоя может достигать уровня  $10^{12} - 10^{13} \text{ А/м}^2$  в течении десятков нс, вполне вероятно развитие электрического взрыва части металлизированного электрода (ЭВП), но энергетические характеристики процесса могут отличаться от известных термодинамических оценок. Закономерностям ЭВП посвящены исследования С.В.Лебедева, В.А.Бурцева, Б.П.Перегуда, В.И.Орешкина, Н.Б. Волкова, Г.В. Иваненкова, Р.Б.Бакшт, С.Н. Колгатина, W.G. Chace, H.K. Moor, W. J. Sarjeant, J. Zirnheld и др., однако результатов, применимых к рассматриваемым конструктивным особенностям конденсаторов в литературе найти не удалось.

**В области II** основным критерием служит ограничение максимального значения температуры конденсатора, зависящей от мощности тепловыделения  $P_A$ , которая определяется в первую очередь потерями энергии электромагнитного поля в диэлектрике. Для конденсаторов с сильной температурной зависимостью фактора потерь  $\varepsilon''(T)$  допустимое значение  $E$ , кроме того, ограничивается созданием запаса относительно критической мощности тепловыделения для предотвращения развития тепловой неустойчивости (ТНУ), заканчивающейся, как правило, тепловым пробоем. Известен ряд решений для теплового состояния конденсаторов, полученных в работах В.А.Фока, С.Н.Койкова, Ю.М.Волокобинского, Е.В.Харитонова и др. Значительно

меньше работ посвящено анализу тепловой динамики, связанной с решением нестационарного нелинейного уравнения теплопроводности. Таким образом, для оценки работоспособности необходимо развитие методов расчета, учитывающих существенную нестационарность развития ТНУ в условия интенсивных электротепловых перегрузок. Процесс развития теплового пробоя (ТП) в конденсаторах развивается не мгновенно и составляет по порядку величины от десятков секунд для малогабаритных до единиц–десятков часов в случае крупногабаритных (силовых) конденсаторов. Вполне логично предположить, что в определенном амплитудно-частотном диапазоне перегрузок за  $\tau_{сл}$  конденсатора можно принять время достижения  $\tau_{max}$  температуры диэлектрика, при которой может произойти тепловой пробой или при которой основные электрические параметры конденсатора: емкость  $C$ , тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  выходят за границы требований режима эксплуатации.

При дальнейшем увеличении частоты воздействующего напряжения (**область III**) существенным становится токовая устойчивость металлических частей конструкции конденсатора (в первую очередь — контактных узлов и электродов). В этом случае процесс термического разрушения носит локальный характер, а критерий выбора режима эксплуатации определяется ограничением действующего значения тока. Однако и в этом случае перегрузок деградация электродной системы не может произойти мгновенно, так, что конденсатор сохраняет свою работоспособность определенное время. Кроме электротеплового механизма разрушения металлизированных электродов возможен процесс их деградации за счет электромиграции (ЭМ) атомов металла под действием высокой плотности тока. 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, K.N. Tu, J.R. Lloyd, H. Ceric, J.R. Black, I.A. Blech и других. В то же время, электромиграционный механизм деградации применительно к электродам нанометровых толщин МПК ранее никогда не рассматривался.

Вместе с тем, определенные разновидности аппаратуры эксплуатируются в течение срока службы значительно меньшего  $\tau_{сл}$  конденсаторов, определяемых ТУ. Наряду с традиционной областью использования МПК, в последние годы за рубежом достигнут значительный успех в конструировании новых типов конденсаторов, которые предназначены для использования в микросекундном и миллисекундном диапазонах устройств импульсной энергетики, где требуемые сроки службы могут исчисляться десятками-сотнями импульсов. Для указанных случаев, исходя из практических соображений, можно допустить определенные режимы перегрузки конденсаторов за счет сокращения их нормативных сроков службы. Эти соображения, по-видимому, имеют

общий характер и часто используются в технике. Широко известны обратные экспоненциальные и степенные зависимости срока службы материалов и конструкций от уровня механических, тепловых и электрических нагрузок. Оптимальный выбор конденсаторов для работы в условиях электрических и тепловых перегрузок с учетом малых сроков службы позволяет существенно повысить технико-экономические и снизить массогабаритные характеристики конденсаторов и аппаратуры в целом. Однако, для прогнозирования работоспособности конденсаторов в рассмотренной новой области, соответствующей электрическим и тепловым перегрузкам, необходимо детально знать механизмы развития деградиционных процессов, определяющих срок службы изделия. В силу обсуждаемой специфики малых сроков службы в литературе по существу отсутствуют данные о работоспособности МПК в рассматриваемых перегрузочных режимах, поэтому проведение соответствующих экспериментальных и теоретических исследований представляется актуальным, а ожидаемые результаты – отличающимися научной новизной.

## **2 Цель и задачи диссертационного исследования**

**Целью** научной работы является экспериментальное и теоретическое изучение влияния электрофизических процессов деградации на работоспособность металлопленочных конденсаторов в условиях электрических и тепловых перегрузок.

Для достижения сформулированной цели были поставлены следующие **задачи**:

1 Разработать необходимые аппаратуру, методики и провести экспериментальные исследования работоспособности металлопленочных конденсаторов и механизмов их деградации, соответствующим трем характерным областям перегрузок: по величине рабочего напряжения, а также по значениям электротепловых и токовых перегрузок в широком диапазоне воздействующих факторов;

2 Провести численные эксперименты и разработать соответствующие методики моделирования электротепловой деградации электродов МПК в процессе развития СВ и в режимах высокой токовой нагрузки для их последующего использования при конструировании новых типов конденсаторов;

3 Провести анализ нестационарного теплового состояния конденсатора с учетом температурной нелинейности тепловыделения, обусловленного диэлектрическими потерями и разработать методику расчета тепловой динамики МПК в условиях электротепловых перегрузок;

4 Развить стационарную теорию теплового пробоя (неустойчивости) для диэлектрика, обладающего как релаксационными диэлектрическими потерями с немонотонной зависимостью фактора потерь от температуры, так и джоулевыми потерями на проводимость;

5 Разработать теоретический подход к оценке энергетической эффективности конденсаторных диэлектриков, учитывающий частотную дисперсию основных характеристик диэлектрика и произвольный временной характер воздействующего электрического поля.

### 3 Научная новизна работы

1 Экспериментально обнаружен пространственно-неоднородный характер электрического взрыва нанометровых металлизированных электродов, связанный с образованием поперечных каналов деметаллизации – страт по отношению к вектору плотности тока. Неоднородность разрушения определяется развитием электротепловой неустойчивости, при этом пространственный период страт уменьшается с ростом вводимой энергии;

2 В условиях значительных плотностей тока  $\sim 10^{12-13}$  А/м<sup>2</sup> в конденсаторных электродах наблюдается локальное развитие каналов деметаллизации (трещин). Начало разрушения определяется процессом электрического взрыва вершины трещины и не связано с действием термомеханических напряжений и магнитного давления (электротепловое разрушение);

3 Экспериментально обнаружен и теоретически обоснован электромиграционный механизм разрушения металлизированных электродов, обусловленный действием сдвигающей силы «электронного ветра» на атомы металла. Для распространения электромиграционного разрушения в субмикросекундном диапазоне действия импульсов тока должно соблюдаться условие средней плотности тока в электроде  $\sim 10^{11-12}$  А/м<sup>2</sup> (быстрая электромиграция);

4 Предложена и обоснована новая теоретическая модель динамического теплового пробоя многослойного конденсаторного диэлектрика. При значительных уровнях энергии и длительности процесса самовосстановления возможен катастрофический отказ конденсатора. При этом происходит глубокое распространение фронта тепла и термоактивационной проводимости в полимерную пленку, что вызывает значительное усиление напряженности электрического поля в ее холодной части вплоть до пробивного значения;

5 Разработан энергетический критерий эффективности конденсаторных диэлектриков, который учитывает, как произвольный временной характер электрического поля (несинусоидальность, периодичность и/или однократность процессов заряда-разряда), так и частотную дисперсию основных характеристик диэлектрических сред.

### 4 Теоретическая значимость работы

1 На основе анализа нелинейной модельной задачи теплопроводности получены некоторые точные решения для теплового состояния диэлектрика с дебаевской релаксацией. Эффективные значения фактора потерь  $\varepsilon''$  и диэлектрической проницаемости  $\varepsilon'$  такого конденсатора отличается от

локальных параметров диэлектрической среды, что обусловлено их пространственным распределением по объему конденсатора.

2 Для диэлектрика с немонотонной зависимостью фактора потерь от температуры в приближении Кирквуда получены точные решения соответствующей нелинейной задачи теплопроводности. Существование множественности стационарных тепловых состояний конденсатора строго обосновывает известное явление ограниченной тепловой неустойчивости (ОТНУ). Зависимость температуры центра от параметра нагрузки и температуры поверхности образует топологическую особенность типа «сборка», которая характерна для широкого класса нелинейных динамических систем;

3 Развита стационарная теория теплового пробоя (неустойчивости) для диэлектрика, обладающего как релаксационными, так и джоулевыми потерями на проводимость;

4 Предложен теоретический метода осреднения нелинейной краевой задачи теплопроводности, позволяющий проводить анализ тепловой динамики максимальной температуры диэлектрика. Эффективность использование метода подтверждена соответствующими результатами численных расчетов и экспериментов;

5 На основе положений электродинамики сплошных сред и физики диэлектриков предложен теоретический подход к оценке эффективности конденсаторных диэлектриков, учитывающий частотную дисперсию основных характеристик диэлектрических сред и произвольный временной характер воздействующего электрического поля на конденсаторный диэлектрик.

## **5 Практическая значимость работы**

1 Разработаны экспериментальные установки, соответствующие методики и получен комплекс экспериментальных данных, соответствующий трем характерным областям перегрузок: по величине напряженности электрического поля, а также по значениям электротепловых и токовых перегрузок. Объектами проведенных исследований являлись серийно выпускаемые конденсаторы низкого напряжения К73-11, К73-17 и К78-2 различных типономиналов.

2 В зависимости от напряжения пробоя диэлектрика выявлены три возможных типа самовосстановления МПК: одиночные, повторные и многократные акты СВ. Получены основные характеристики процессов деградации: напряжения, тока и энергии процессов самовосстановления, площадей деметализации электродов и эволюции электрофизических параметров конденсаторов в условиях перегрузок. Установлено, что при многократных актах СВ отказ МПК происходит по причине снижения сопротивления изоляции диэлектрика вследствие накопления проводящих углеродных включений в зонах развития СВ. Приблизительно 80 – 85 % - ов запасенной энергии конденсатора расходуется на единичный процесс СВ, а интенсивная



деградация параметров конденсатора начинается в диапазоне суммарной энергии СВ  $W_{\Sigma} = 2 - 7$  Дж по прошествии 100 – 250 актов СВ.

3 Разработана методика численного моделирования электротеплового разрушения сегментированных электродов МПК, которая может быть использована при конструировании новых типов конденсаторов, а также применяться для оценки надежности и эффективности сегментированных электродов в процессе СВ, а также в режимах высокой токовой нагрузки.

4 Экспериментально определен предельно допустимый уровень перенапряжения до  $4 U_n$ , при котором еще не происходит значительного снижения емкости и увеличения диэлектрических потерь, при этом «мягкая» тренировка конденсаторов обеспечивает возможность сохранения их работоспособности в течение срока эксплуатации не менее 6 часов. Удельная энергия используемых конденсаторов может быть многократно увеличена от номинальных значений  $0.01 - 0.02$  Дж/см<sup>3</sup> до  $0.15 - 0.3$  Дж/см<sup>3</sup>, что значительно увеличивает энергоэффективность изделия.

5 При значительных электротепловых перегрузках работоспособность конденсаторов ограничена длительностью развития их теплового пробоя, определявшего сроки службы в диапазоне 50–350 с под воздействием переменного напряжения  $U = 120-930$  В с частотой  $f = 0,2-5$  кГц. Экспериментально показано, что основное время развития пробоя соответствует температурному диапазону максимума релаксационных потерь ПЭТФ и составляет 85–90 % от общего времени пробоя. Экспериментально достигнутые высокие значения удельной реактивной мощности составили 500–650 кВАр/дм<sup>3</sup>, что превышает обычные эксплуатационные значения в 300–500 раз. Предложена методика расчета максимальной температуры конденсаторов и их срока службы.

6 Для области существенных токовых перегрузок работоспособность конденсаторов ограничена процессами развития деградации контактных узлов, определявших сроки службы в диапазоне 30–3000 импульсов тока, амплитудой 30–300 А и длительностью 5–100 мкс. Срок службы исследуемых МПК описывается экспоненциально спадающим законом зависимости количества импульсов до отказа от параметра нагрузки  $K = 5 - 80$ , определяемого отношением амплитуды испытательного импульса к предельно допустимой, соответствующей обычным условиям эксплуатации по ТУ. Скорость деградации контактного узла при отрицательной полярности металлизированного электрода на 20 – 60 % ниже, чем для положительной и не зависит от материала металлизации, что может быть объяснено электромиграционным механизмом разрушения проводников.

7 Установлено, что разрушение контактных узлов в процессе испытания конденсаторов приводит к появлению немонотонной частотной дисперсии их емкости и тангенса угла диэлектрических потерь в диапазоне 1 кГц – 1 МГц. Предложено объяснение наблюдаемых частотных зависимостей, поведение которых связано не только с увеличением сопротивления контактного узла, но и с неравномерностью распределения потенциала в металлизированном электроде

конденсатора. Анализ динамики изменения электрофизических параметров конденсаторов в диапазоне частот  $10^4$ –  $10^6$  Гц может служить методом контроля степени деградации контактных узлов конденсаторов.

Результаты диссертационной работы были использованы на ряде промышленных предприятий, 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 об использовании прилагаются).

## **6 Методология и методы исследования**

Для проведения экспериментальных исследований были разработаны соответствующие установки и методики исследования электрофизических процессов самовосстановления, токовой устойчивости металлопленочных конденсаторов, скорости деградации контактных узлов, электротеплового разрушения сегментированных электродов и электромиграционного механизма деградации. Использовалась современная приборная база, позволяющая регистрировать электрофизические и оптические характеристики в наносекундном масштабе времени. При проведении теоретических исследований использовались методы математической физики и основные положения электродинамики сплошных сред, физики диэлектриков и теории теплопроводности. Численное моделирование электрофизических процессов в конденсаторных структурах осуществлялось в программном пакете COMSOL Multiphysics.

## **7 Положения, выносимые на защиту**

- 1 Известные экспериментальные и теоретические данные о механизмах и параметрах деградации МПК не позволяют прогнозировать их работоспособность в условиях электрических и тепловых перегрузок, в связи с чем тема диссертации, посвящённая исследованию электрофизических процессов деградации МПК в указанных условиях, является актуальной;
- 2 В области 5 -7 кратных перегрузок по величине номинального напряжения  $U_n$  интенсивная деградация конденсаторов происходит, в первую очередь, по причине снижения сопротивления изоляции диэлектрика вследствие накопления углеродных включений в зонах многократных актов СВ при суммарной энергии прошедших актов  $W_\Sigma = 2 - 7$  Дж. Удельная энергия используемых конденсаторов может быть многократно увеличена от номинальных значений  $0.01 - 0.02$  Дж/см<sup>3</sup> до  $0.15 - 0.3$  Дж/см<sup>3</sup> за счет «мягкой» тренировки конденсаторов при  $4 U_n$ ;
- 3 В области значительных электротепловых перегрузок при значениях удельной реактивной мощности  $500-650$  кВАр/дм<sup>3</sup>, превышающих обычные эксплуатационные значения в  $300-500$  раз,

работоспособность конденсаторов ограничена длительностью развития их теплового пробоя, определявшего сроки службы в диапазоне 50–350 с под воздействием напряжения  $U = 120–930$  В, частотой  $f = 0,2–5$  кГц, при этом основное время развития пробоя соответствует прохождению диапазона температурного максимума релаксационных потерь для ПЭТФ конденсаторов;

4 В области токовых перегрузок работоспособность конденсаторов ограничена процессами деградации контактных узлов, определявших их сроки службы в диапазоне 30–3000 импульсов тока, амплитудой 30–300 А и длительностью 5–100 мкс. Срок службы МПК описывается экспоненциально спадающим законом зависимости количества импульсов до отказа от параметра нагрузки  $K = 5 – 80$ , определяемого отношением амплитуды испытательного импульса к предельно допустимой, соответствующей условиям эксплуатации по ТУ;

5 В условиях значительных плотностей тока  $\sim 10^{12-13}$  А/м<sup>2</sup> локальное развитие каналов деметаллизации в электродах МПК определяется процессом электрического взрыва вершины трещины и не связано с действием термомеханических напряжений и магнитного давления;

6 Экспериментально обнаруженный пространственно-неоднородный характер электрического взрыва нанометровых металлизированных электродов, связанный с образованием поперечных страт по отношению к вектору плотности тока, определяется развитием электротепловой неустойчивости;

7 Разработанные методики моделирования и расчета электротепловой деградации электродов и тепловой динамики МПК в условиях электрических и тепловых перегрузок адекватно описывают экспериментальные данные и могут быть применены при расчете режимов и конструировании новых типов конденсаторов;

8 Предложенная теоретическая модель динамического теплового пробоя многослойного конденсаторного диэлектрика объясняет катастрофический отказ конденсатора при значительных уровнях энергии и длительности процесса самовосстановления;

9 Разработанный теоретический подход к оценке энергоэффективности конденсаторных диэлектриков, обладающих частотной дисперсией основных параметров, позволяет проводить их сравнительный анализ в условиях произвольного характера воздействующего электрического поля.

## **8 Степень достоверности полученных результатов**

обеспечивается использованием современной аппаратуры, большим объемом экспериментальных данных и их статистической обработкой, использованием современных программных пакетов моделирования электрофизических процессов, а также сравнением результатов исследований с результатами, полученными другими авторами как в России, так и за рубежом. Теоретические результаты получены с использованием известных методов математической физики и теории дифференциальных уравнений.

## 9 Публикации и апробация работы

В ходе работы над диссертацией автором опубликовано 83 печатных работы, в том числе в журналах, рекомендуемых ВАК – 46, из них – 36 индексируемых в базах Scopus и Web of Science. Ссылки на наиболее значимые, по мнению автора, статьи приводятся в списке литературы.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на семинарах и научно-практических конференциях с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (Санкт-Петербург, 2007-2016 гг.), V Всесоюзном научно-техническом совещании "Повышение качества и улучшение технико-экономических показателей силовых конденсаторов" (Серпухов, 1983.); международных конференциях «Физика диэлектриков» (Томск, 1988, Санкт-Петербург, 2008-2011); III Всесоюзной НТК "Совершенствование экспериментальных методов исследования физических процессов" (Ленинград, 1989); IV международной конференции ICEMC-2001 (Москва, 2001); международных конференциях «Электрическая изоляция ( Санкт-Петербург, 2002-2010); IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (New Mexico, 2003), International Symposiums on Electrical Insulation (Toronto, 2006), IEEE International Conference on Electrical Insulation (Bratislava, 2006), 39th IEEE International Conference on Plasma Science (Edinburgh, 2012), IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (Shenzhen, 2013), 18th International Conference on Dielectric and Insulating Systems in Electrical Engineering «DISEE 2010» (Bratislava, 2010), 2016 IEEE International Conference on Dielectrics (Montpellier, 2016); 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (St. Petersburg, 2017).

## 10 Личный вклад автора в получение результатов

Диссертация является развитием кандидатской диссертации автора. Личный вклад автора заключался в постановке основных задач исследований, разработке и создании ряда экспериментальных установок, проведении экспериментальных и теоретических исследований, обработке и анализе полученных результатов. Основные теоретические результаты получены автором лично. Ряд результатов получен совместно с учениками, где автор являлся официальным научным руководителем 3 успешно защищенных кандидатских диссертаций В.О.Белько, М.В.Шеметом и И.О.Ивановым, ряда дипломов, бакалаврских и магистерских работ. Автор выражает также благодарность всем сотрудникам кафедры ТВН ЭКТ СПбПУ, в особенности П.Н. Бондаренко, Н.М.Журавлевой, С.И.Кривошееву и Г.А.Шнеерсону за ценные и полезные замечания.

## 11 Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, включающего 232 наименования. Диссертация изложена на 251 странице, содержит 113 рисунков и 12 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, отражены научная новизна и практическая значимость результатов исследований, сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлены результаты исследований основных электрофизических механизмов деградации электродов МПК в условиях электрических перегрузок. Процессы самовосстановления имеют следующие стадии – пробой диэлектрика, электрический взрыв металла, зажигание, распространение и погасание дугового разряда, что приводит к формированию зон деметаллизации (ДМ). В подтверждение сказанного можно рассмотреть некоторые экспериментальные результаты динамики процесса радиального разрушения металлизации. Эксперименты проводились на образцах промышленных ПП и ПЭТФ конденсаторных пленок с Al и Zn металлизацией. Экспериментальная ячейка представляет собой систему игла - цилиндрический кольцевой электрод, замыкающуюся через слой металлизации. При подаче импульса испытательного напряжения на кончике стальной иглы (радиус закругления ~ 40-50 мкм) возникает высокое значение плотности тока, которое характерно для канала пробоя конденсаторного диэлектрика. Дальнейшее развитие разрушения металлизации происходит вследствие зажигания, радиального развития и погасания дугового разряда. Генератор импульсов позволял получать импульсы напряжения амплитудой 20-300 В, длительностью 0,5-500 мкс и амплитудой тока до 200 А. Регулирование длительности воздействующего напряжения позволяет остановить процесс развития разряда в требуемые моменты времени, до его окончательного погасания. Фотографии полученных зон ДМ, соответствующие дискретному увеличению длительности импульса воздействующего напряжения, для ПЭТФ пленки с Al металлизацией ( $R_s=3 \text{ Ом}$ ,  $U=120 \text{ В}$ ) приведена на рисунке 2.

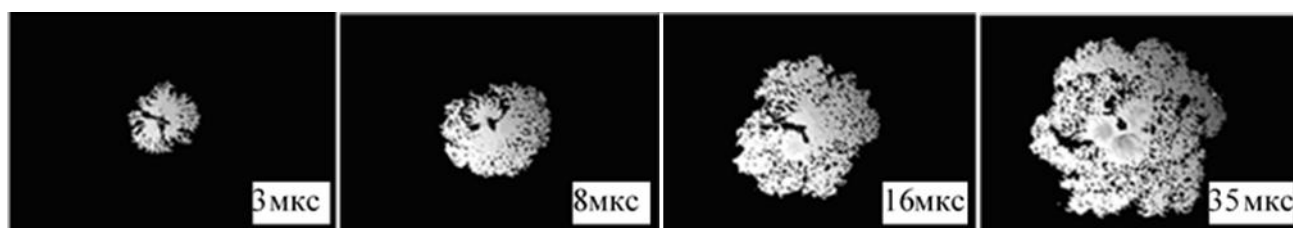


Рисунок 2 – Динамика развития зон ДМ для разных длительностей импульса напряжения. Ширина кадра 5.2 мм

Полученные результаты связаны с развитием свободно горящих микродуг, которые могут существовать во внешних, «рыхлых» слоях конденсаторной секции. Однако, в результате влияния механического и электростатического давлений, возникающих между слоями диэлектрика, их совокупное значение может достигать величин нескольких атмосфер. Внешнее давление

существенно влияет на процесс разрушения: при избыточном давлении всего в 0,04 атм. зона ДМ уменьшается в 3,5 раза, а при давлении 2,5 атм. – в 10 раз. Нами также исследовалась средняя скорость развития зон демултизации, так для Zn электродов она составила 50-70 м/с, а для Al – 50-100 м/с, причем эти величины не зависели от уровней прикладываемого давления. После пробоя диэлектрика за время единиц-десятков нс, развивается электрический взрыв (ЭВП) металлизированного электрода, вызванный его джоулевым нагревом в зоне пробоя при плотностях тока в электроде  $\sim 10^{12-13}$  А/м<sup>2</sup>. Поскольку электропроводность металлизации в несколько раз ниже, чем общепринятые значения для металлов, затруднительно использовать законы ЭВП, установленные для относительно массивных образцов (зависимость длительности взрыва от вложенной энергии, величина интеграла действия и т. д.). В работе исследовался ЭВП металлизированных ПП и ПЭТФ пленок толщиной 10 мкм, материал электродов Zn или Al толщиной 5-20 нм. Размеры образцов составляли (5-10) x 50 мм, поверхностное сопротивление электродов находилось в диапазоне 3-20 Ом. На рисунке 3 приведена упрощенная схема экспериментальной установки, которая включает ВВ генератор на основе источника Ultravolt 10HVA24-P1, накопительных малоиндуктивных конденсаторов в диапазоне емкостей

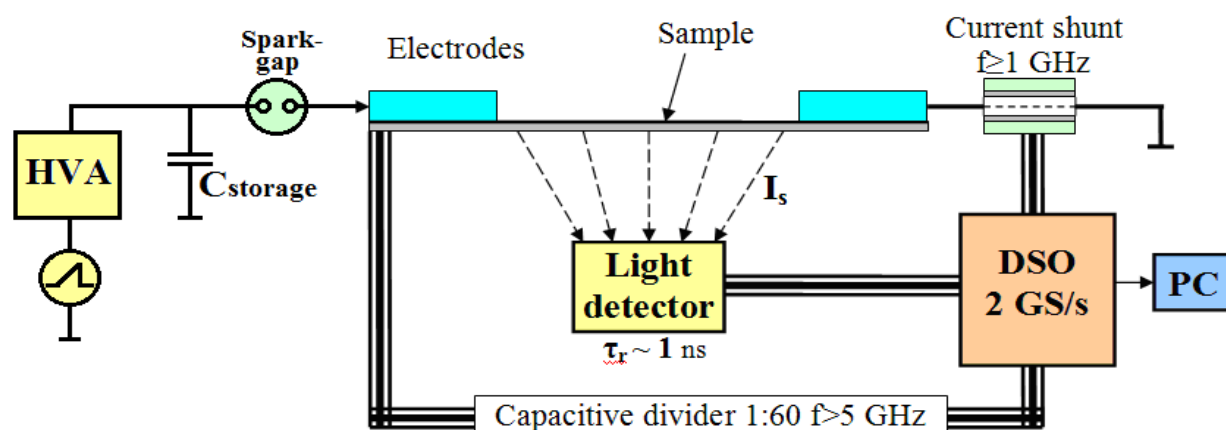


Рисунок 3 – Упрощенная схема экспериментальной установки

$C_{st} = 1-23$  нФ, сменных искровых разрядников с разрядным напряжением в диапазоне от 1.4 – 10 кВ. Характеристики разрядного контура  $L_k = 200$  нГн,  $R_k = 1,5$  Ом определялись в режиме короткого замыкания. Максимальная величина тока разряда находилась на уровне 1 кА (что соответствовало плотности тока в образцах  $\sim 3 \cdot 10^{12}$  А/м<sup>2</sup>). Измерения тока и напряжения на образце проводилась с помощью двухканального осциллографа LeCroy (частота выборки 2 GS/s). Для регистрации света, испускаемого образцом при взрыве был использован высокоскоростной электронно-оптический преобразователь на основе PIN фотодиода Hamamatsu S5972 со спектральным диапазоном чувствительности  $\lambda = 320-1000$  нм и временем отклика  $\sim 1$  нс.

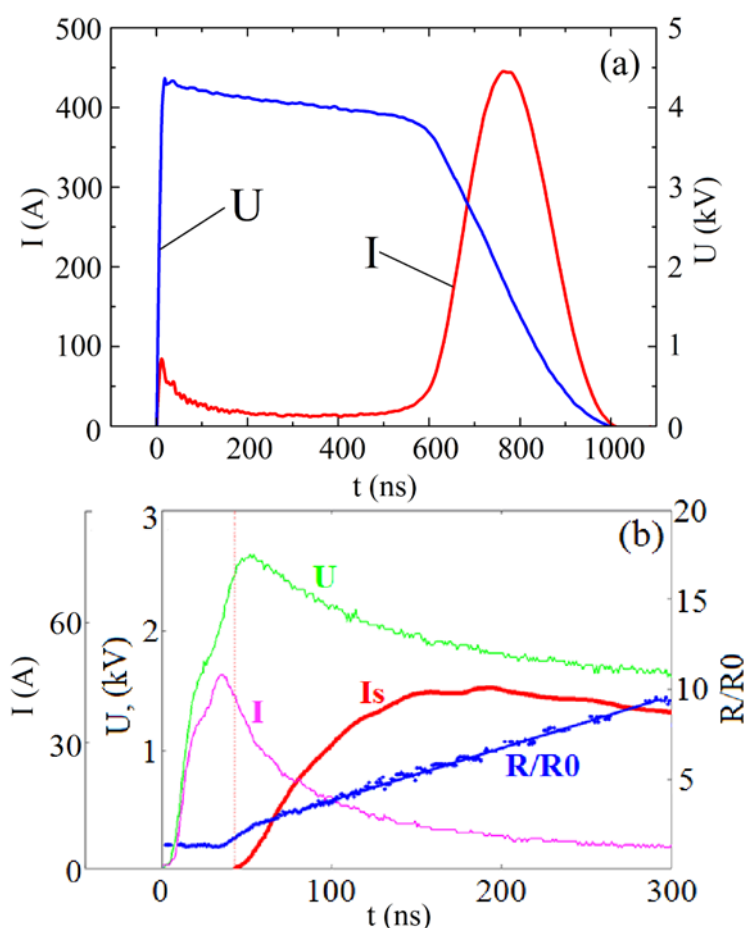


Рисунок 4 – а–Типичные осциллограммы тока и напряжения на образце при  $U = 4,5\text{кВ}$ , соответствующие 3 стадиям: начального взрыва ( $I_{\text{MAX}} \approx 80\text{А}$ ), токовой паузы ( $\tau_{\text{DWELL}} \approx 500\text{нс}$ ) и дугового разряда ( $I_{\text{MAX}} \approx 450\text{А}$ ); б –Поведение тока, напряжения, интенсивности излучения и приведенного сопротивления для  $U = 2,7\text{кВ}$

На рисунке 4 приведены экспериментальные осциллограммы тока и напряжения, а также интенсивности света, излучаемого Zn образцом при взрыве. Процесс взрыва проходит через 3 стадии. Первичный импульс тока проходит через образец, далее наступает пауза тока (при этом его значение крайне мало либо равно нулю), после чего по парам металла загорается дуговой разряд и обеспечивает полную разрядку конденсатора. В зависимости от уровня подводимой энергии вторая и/или последняя стадии могут отсутствовать. Интенсивность светового потока зарегистрированного света от образца резко возрастает сразу после максимума тока. Первый импульс (который собственно и соответствует электрическому взрыву) исследовался в условиях исключения развития дугового перекрытия за счет

ограничения уровня запасенной энергии, которого хватало только для обеспечения развития ЭВП металлического электрода. В этих условиях происходит стратификация поверхности образца в направлении поперечном линиям тока (рисунок 5).

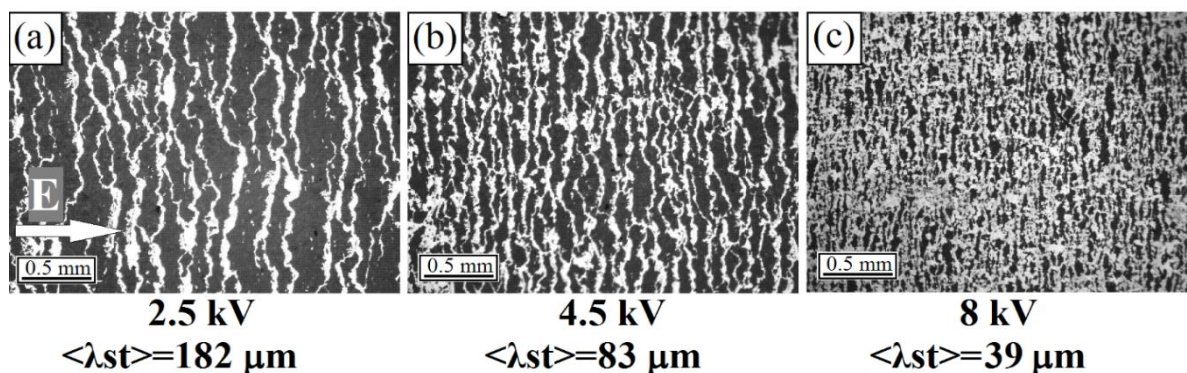
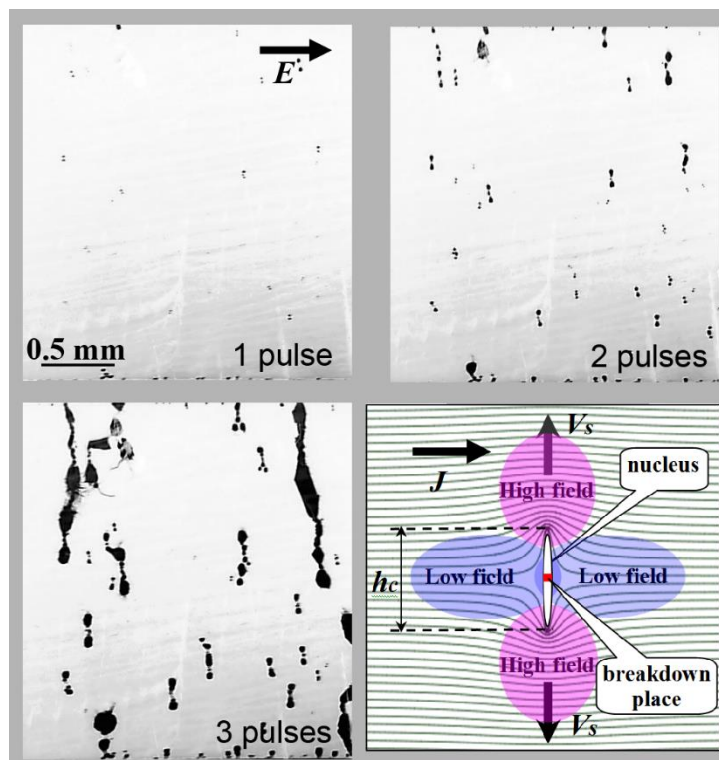


Рисунок 5 - Характерный масштаб стратообразования поверхности Zn электродов. Разрушенная область – светлый цвет, оставшаяся металлизация – темный. (a)  $U=2.5\text{кВ}$ ,  $i=0.9 \cdot 10^{12}\text{ А/м}^2$ . (b)  $U=4.5\text{кВ}$ ,  $i=1.7 \cdot 10^{12}\text{ А/м}^2$ . (c)  $U=8\text{кВ}$ ,  $i=3 \cdot 10^{12}\text{ А/м}^2$ .

Как видно из рисунка, пространственная частота страт увеличивается с ростом вводимой энергии (здесь и далее под термином единичной страты подразумевается совокупность двух соседних полос с металлом и без). С целью получения пространственно-усредненных параметров периода  $\langle \lambda_{st} \rangle$  и числа страт  $N_{st}$  проводилась цифровая обработка микрофотографий разрушенных образцов. Рост разрядного напряжения в диапазоне 2.5–8 кВ приводил к уменьшению  $\langle \lambda_{st} \rangle$  с  $\sim 180$



до 40 мкм и соответственно росту  $\sim N_{st}$  от 100 до 400. Дальнейшие эксперименты показали, что стратификация образца определяется развитием перегретой неустойчивости на дефектах металлического покрытия либо поверхности подложки. Вводимая в металл энергия стягивается в малые локальные зоны и вызывает их интенсивный нагрев. Остальной объем металла остается относительно холодным. На рисунке б показана серия фотографий поверхности образца при разрядке на него конденсатора малой емкости ( $C=1500$  пФ,  $U=2.5$ кВ) тремя последовательными импульсами. На вставке приведена соответствующая поясняющая диаграмма зарождения локальных зон разрушения, которые

Рисунок – 6 Зарождение страт в результате поперечного развития дефектов при последовательном воздействии трех импульсов тока (плотность тока  $j \sim 0.9 \cdot 10^{12}$  А/м<sup>2</sup>, время импульса  $\tau=30$  нс) и диаграмма, поясняющая процесс (цвет фотографий инвертирован для

развиваются в образце поперек приложенного поля. Из обсуждаемых результатов также следует, что развивающиеся дефекты объединяются в единую трещину, эффективно увеличивая скорость прорастания. На промежутке между границами трещины возникает пробой по парам металла и/или по поверхности диэлектрика. Далее развивается шунтирующие промежутки множественные микродуговые разряды (этому моменту соответствует нарастание интенсивности свечения разряда  $I_S$  в соответствии с рисунком 4, б). Среднее падение напряжения, приходящееся на одну страту, находилось в диапазоне 15,7 – 18,2 В, характерном для дугового разряда. Действительно, это значение немногим больше катодного падения потенциала 11-12В в металлических дугах с цинковым катодом. Остальная часть напряжения приходится на анодное падение потенциала, а также на напряжения столба дуги и невыгоревшей металлизации. Катодный берег страт является более изрезанным по форме, чем анодный.



Существуют несколько причин развития страт, связанных с образованием разного вида неустойчивостей: Эйлера, магнитогидродинамической (МГД) или электротепловой (перегревной). МГД неустойчивость возникает в жидком проводнике при его нагреве током в результате конкуренции магнитного давления и поверхностного натяжения. Расчеты показали, что в нашем случае расплавление всего металла не происходит. Для всех исследованных режимов уровень энергии был меньше 0.05 кДж/г, что меньше уровня, соответствующего плавлению Zn ~0.2 кДж/г, следовательно, развитие МГД неустойчивости в таких условиях маловероятно. Второй тип неустойчивость Эйлера, которая связана с термомеханическими напряжениями при расширении образца. Этот процесс развивается за «звуковое» время:  $\tau_s \sim L / v_s \sim 5$  мкс где  $L \sim 20$  мм – длина образца, а  $v_s \sim 3700$  м/с – скорость звука в Zn. Поскольку в наших экспериментах разрушение происходит за несколько десятков наносекунд, неустойчивость Эйлера не может послужить причиной стратификации образцов. По всей видимости, поперечный рост страт по отношению к протеканию тока может быть объяснен развитием электротепловой неустойчивости. Рассматривая связанную систему уравнений Максвелла и теплопроводности в проводящей среде для малых пространственно-временных возмущений температуры и плотности тока  $\delta T(\mathbf{r}, t)$ ,  $\delta \mathbf{j}(\mathbf{r}, t) \sim \exp[i(\Gamma t + \mathbf{k}\mathbf{r})]$  относительно пространственно-однородных решений  $T_0(t)$  и  $\mathbf{j}_0(t)$ , где  $\Gamma$  и  $\mathbf{k} = \mathbf{e}_i k_x + \mathbf{e}_j k_y$  – инкремент возмущения и волновой вектор, можно получить следующее дисперсионное отношение, связывающее инкремент и волновой вектор:

$$i\Gamma = \frac{1}{\gamma C_p} \left[ j_0^2 \frac{\partial \rho}{\partial T} \left( 1 - \frac{2k_y^2}{k_y^2 + k_x^2} \right) - \lambda (k_y^2 + k_x^2) \right], \quad (1)$$

где  $\gamma, C_p, \rho, \lambda$  – плотность, удельные теплоемкость и сопротивление, коэффициент теплопроводности металла. Максимальное значение инкремента соответствует развитию поперечных страт ( $k_y = 0$ ), при этом возмущения с длиной волны (периодом) больше, чем

$$\lambda_{ST} > 2\pi \cdot \left[ \frac{j_0^2}{\lambda} \frac{\partial \rho}{\partial T} \right]^{-0.5} \quad (2)$$

являются неустойчивыми, поскольку возмущения их амплитуды экспоненциально нарастают, в то время, как коротковолновые моды остаются стабильными за счет процесса теплопроводности. В частности, из (2) следует, что длина волны нестабильных возмущений обратно пропорциональна величине плотности тока и, соответственно, уровню приложенного напряжения:  $j = U / (\rho L)$ . Это обстоятельство подтверждается экспериментальными данными.

Было установлено, что в условиях средних плотностей тока  $\sim 10^{11-13}$  А/м<sup>2</sup> в конденсаторных электродах наблюдается локальное развитие одиночных каналов деметаллизации (трещин) поперек приложенного поля, что определяется процессом электрического взрыва вершины трещины и не связано с действием термомеханических напряжений и магнитного давления (электротепловое разрушение). При исследовании процесса электротеплового разрушения в металлизированных пленках было обнаружено, что при снижении плотности тока  $j$  образовывались узкие трещины, которые распространялись по направлению тока (рисунок 7), что можно обосновать электромиграционным механизмом (ЭМ) разрушения, обусловленным действием сдвигающей силы «электронного ветра» на атомы металла. На ЭМ поток атомов  $J_{EM}$  оказывают противоположное действие потоки, вызванные градиентом концентрации атомов  $J_D$ ,

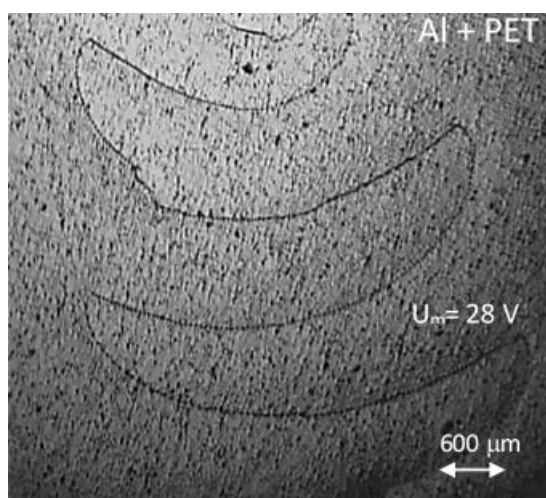


Рисунок 7 – Осцилляция трещины в Al металлизации при смене направления тока. Плотность тока  $\sim 1.5 \cdot 10^{10}$  А/м<sup>2</sup>, длительность импульса  $\sim 10$  мкс

термодиффузией  $J_{TM}$  (диффузия Core) и упругостью кристаллической решетки  $J_{\sigma}$ . Результирующий поток и направление движения атомов проводника тогда будет определяться суперпозицией перечисленных потоков. Расчеты показали, что в процессе роста трещин основным кинетическим потоком является электромиграционный поток, величина которого уменьшается по мере снижения плотности тока вблизи вершины трещины. В момент, когда ЭМ сила становится соизмеримой с силой упругости кристаллической решетки, трещина прекращает рост. Скорость переноса атомов за счет электромиграционной силы определяется выражением

$$v_{EM} = \frac{DeZ^* j \rho}{kT}, \quad (3)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии,  $eZ^*$  – эффективный заряд,  $\rho$  – удельное сопротивление металла,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура. В зависимости от параметров импульса тока скорость роста трещин составляет  $v_{EM} = 0.8-1$  м/с, что хорошо согласуется с экспериментальными данными. Для распространения электромиграционного разрушения в микросекундном диапазоне действия импульсов тока должно соблюдаться условие средней плотности тока в электроде  $\sim 10^{10-11}$  А/м<sup>2</sup>, а в субмикросекундных временах эта величина составляет  $\sim 10^{11-12}$  А/м<sup>2</sup> (быстрая электромиграция).

**Вторая глава** посвящена исследованию работы конденсаторов при перегрузках по напряжению. Разработана экспериментальная установка и соответствующие методики для исследования процессов самовосстановления и механизмов деградации МПК при форсировании

рабочего напряжения. Используемое оборудование позволяет испытывать МПК в диапазоне напряжений до 5 кВ, энергий СВ 0.001 – 10 Дж, длительностей процесса от 0.1 – 100 мкс при токах 0.5 – 200 А. Объектами проведенных исследований являлись серийно выпускаемые конденсаторы К73-11, К73-17 и К78-2 различной емкости и номинального напряжения. Получены зависимости площади зон ДМ от энергии СВ. Установлено, что в диапазоне энергий 0.03 – 0.4 Дж площадь зоны ДМ  $S_{\text{ДМ}} = 2 - 14 \text{ мм}^2$ , при этом диаметр канала пробоя составляет 0.1 – 0.7 мм. В зависимости от напряжения пробоя диэлектрика выявлены три возможных типа самовосстановления МПК: одиночные, повторные и многократные акты СВ. Получены основные характеристики процессов деградации: напряжения, тока и энергии процессов самовосстановления, площадей деметализации электродов и эволюции электрофизических параметров конденсаторов в условиях перегрузок. Установлено, что при многократных актах СВ отказ МПК происходит по причине снижения сопротивления изоляции диэлектрика вследствие накопления проводящих углеродных включений в зонах развития СВ. Приблизительно 80 – 85 % - ов запасенной энергии конденсатора расходуется на единственный процесс СВ, а интенсивная деградация параметров конденсатора начинается в диапазоне суммарной энергии СВ  $W_{\Sigma} = 2 - 7 \text{ Дж}$  по прошествии нескольких сотен актов СВ.

На основании экспериментальных данных предложена модель активного сопротивления конденсатора в процессе СВ. Полученная модель согласуется с экспериментальными данными и дает возможность оценить основные параметры процесса СВ: импульс тока СВ, количество выделяемой энергии и длительность процесса. В результате решения дифференциального уравнения, описывающего разряд конденсатора на изменяющееся во времени сопротивление  $R_{\text{СВ}}(t)$ , получены аналитические выражения для напряжения на конденсаторе и  $W_{\text{СВ}}$ :

$$U_{\text{СВ}}(t) = U_{\text{нр}} \exp \left[ \frac{\tau_{\text{СВ}}^2}{2(\alpha + 1)t_1 R_0 C} \left( \left( \frac{\tau_{\text{СВ}}^2 - t^2}{\tau_{\text{СВ}}^2} \right)^{\alpha + 1} - 1 \right) \right];$$

$$W_{\text{СВ}} = \frac{C U_{\text{нр}}^2}{2} \left( 1 - \exp \left[ - \frac{\tau_{\text{СВ}}^2}{(\alpha + 1)t_1 R_0 C} \right] \right); R_{\text{СВ}}(t) = \frac{R_0 \cdot t_1}{t \cdot \left[ 1 - \left( \frac{t}{\tau_{\text{СВ}}} \right)^2 \right]^{\alpha}}. \quad (4)$$

где  $\tau_{\text{СВ}}$  – длительность процесса СВ,  $t_1$  – время формирования устойчивого канала дуги (для исследуемых конденсаторов не превышало 1.5 мкс);  $R_0$  – минимальное значение импульсного активного сопротивления зоны СВ (это значение определяется эквивалентным сопротивлением металлизированных электродов току, подтекающему к месту пробоя, и составляет  $\sim 1.3 - 1.5 R_{\square}$ );  $\alpha$  – параметр модели. Для исследуемых конденсаторов величина  $R_0 \approx 3 - 9 \text{ Ом}$  и параметр  $\alpha \approx 4$ .

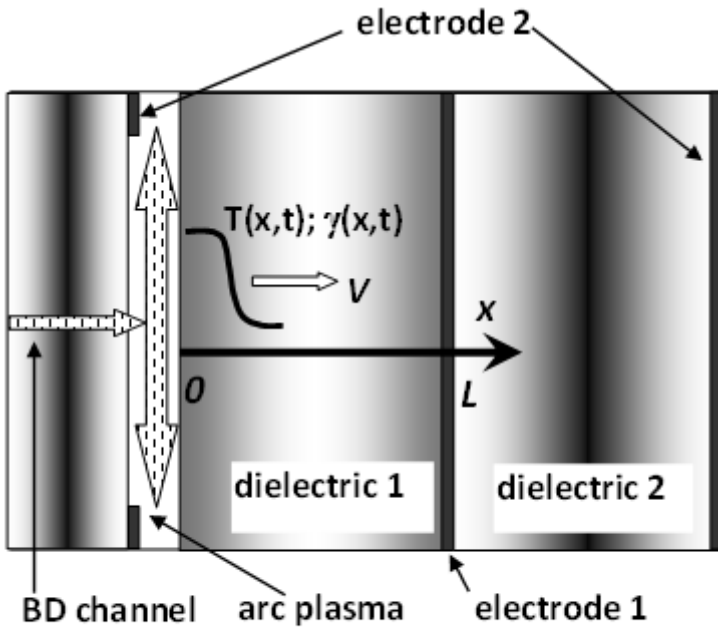


Рисунок 8 Распространение теплового фронта и волны проводимости в диэлектрике

Одним из наиболее важных параметров процесса СВ является энергия самовосстановления  $W_{СВ}$ , рассеиваемая в виде тепла в конденсаторе. Однако, высокий уровень  $W_{СВ}$ , больший необходимого для испарения металла в зоне ДМ, может привести к катастрофическому отказу конденсатора. Движущаяся температурная волна (рисунок 8), во-первых, вызывает рост проводимости полимера  $\gamma(x,t)$ , что приводит к перераспределению и усилению электрического поля в холодной зоне пленочного диэлектрика вплоть до пробивных значений. Во-вторых, пробой

возможен за счет температурного снижения электрической прочности полимерных диэлектриков. Предложена и обоснована соответствующая теоретическая модель динамического теплового пробоя многослойного конденсаторного диэлектрика:

$$j(t) = \gamma(x,t)E(x,t) + \epsilon_0 \epsilon \frac{\partial E(x,t)}{\partial t}, \quad U = \int_0^L E(x,t) dx = const, \quad \gamma(x,t) = \gamma_0 \exp\left(-\frac{W}{kT(x,t)}\right),$$

$$E(x,0) = \frac{U}{L} = const, \quad \rho C_p \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2}, \quad T(0,t) = T_f, \quad T(\infty,t) = T_0, \quad (5)$$

На основе полученного решения системы уравнений на рисунке 9 построена поверхность и сечения зависимости  $E(x,t)$  для рассмотренных условий.

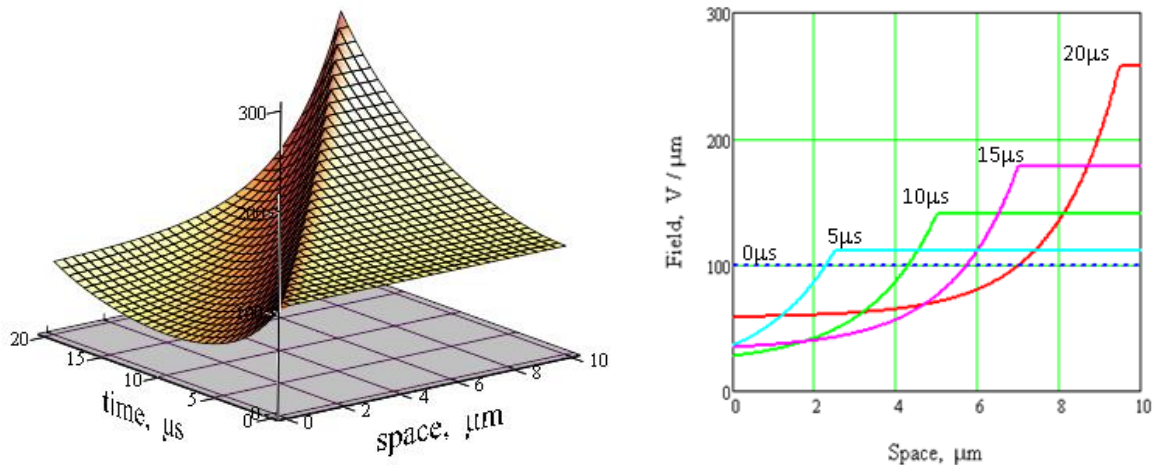


Рисунок 9 - Пространственно-временная эволюция электрического поля.

**Третья глава** посвящена анализу электротеплового состояния, проведенного с учетом диссипации энергии электромагнитного поля (ЭМП) в диэлектрике конденсатора, а также процессов теплопроводности в его объеме и теплоотдачи с поверхности. Математическая постановка задачи электротеплового состояния включала в себя следующую связанную систему уравнений:

$$\begin{aligned}
 \operatorname{div} \dot{D} &= \dot{\rho}; \quad \dot{D} = \dot{\varepsilon}(\omega, T) \cdot \dot{E}; \quad q_v(\omega, T) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ \dot{j}_{II}^* E \right\}; \\
 \operatorname{div} \dot{j}_{III} &= -\frac{\partial \dot{\rho}}{\partial t}; \quad \dot{E} = -\operatorname{grad} \dot{U}; \quad \dot{j}_{II} = \gamma \dot{E} + \frac{\partial \dot{D}}{\partial t}; \\
 \operatorname{div} \lambda \operatorname{grad} T + q_v(\omega, T) &= \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}; \quad \left. \begin{aligned} T|_{\Omega} &= T_0 && \text{(I род)} \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Omega} &= \alpha (T|_{\Omega} - T_{\infty}) && \text{(III род)} \end{aligned} \right\}; \\
 \alpha &= f(Nu); \quad Nu = Nu(Gr, Pr, Re),
 \end{aligned} \tag{6}$$

определяющуюся уравнениями электродинамики; уравнением теплопроводности с соответствующими граничными условиями I (III) рода на поверхности конденсатора  $\Omega$ , где  $\rho$ ,  $C_p$  и  $\lambda$  – плотность, теплоемкость и коэффициент теплопроводности активного объема конденсатора; критериальной зависимостью коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  и частотно-температурной зависимостью комплексного значения диэлектрической проницаемости  $\dot{\varepsilon}(\omega, T)$ . Для однородных полей в несовершенной диэлектрической среде с электропроводностью  $\gamma$ :  $q_v(\omega, T) = \gamma E^2 + \omega \varepsilon_0 \varepsilon'' E^2$ . На основе анализа нелинейной модельной задачи теплопроводности получены некоторые точные решения теплового состояния для диэлектрика с дебаевской релаксацией. Эффективные значения фактора потерь  $\varepsilon''$  и диэлектрической проницаемости  $\varepsilon'$  такого конденсатора отличается от локальных параметров диэлектрической среды, что обусловлено их пространственным распределением по объему конденсатора. Для диэлектрика с немонотонной зависимостью фактора потерь от температуры в приближении Кирквуда:

$$\varepsilon''(T) = \frac{2\varepsilon''_{\max}}{(\omega\tau_p)^{\beta_p} + (\omega\tau)^{-\beta_p}} = \varepsilon''_{\max} \cdot \operatorname{sch} \left[ \beta_p \ln(\omega\tau_p) \right], \tag{7}$$

где  $\beta_p$  и  $\tau_p = \tau_0 \exp(W/kT)$  соответственно параметр распределения и само время релаксации,  $W$  — энергия активации процесса в окрестности максимума  $\varepsilon''(T)$ , получены точные решения соответствующей нелинейной задачи теплопроводности диэлектрика толщиной  $2h$  в однородном переменном электрическом поле. С учетом безразмерных параметров задачи:

$$\beta = \frac{\omega \varepsilon_0 \varepsilon''_{\max} \cdot (E \cdot h)^2}{\lambda} \cdot \frac{\beta_p W}{k T_c^2}; \quad \vartheta = \frac{T - T_c}{k T_c^2} \beta_p W, \quad (8)$$

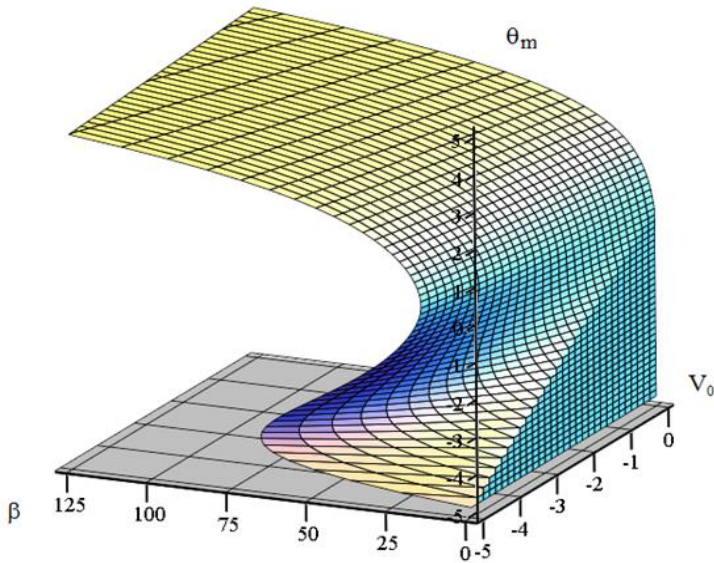


Рисунок 10 – Зависимость безразмерной температуры  $\vartheta_m$  в центре конденсатора от безразмерных параметров нагрузки  $\beta$  и температуры поверхности  $V_0$ .

где  $\omega$  – частота приложенного поля  $E$ ,  $T_0$  и  $T_c$  – температуры окружающей среды и максимума фактора потерь  $\varepsilon''$ ,  $k$  – постоянная Больцмана, точное аналитическое решение для максимальной температуры  $\vartheta_m = \vartheta_m(\beta, V_0)$  является многозначной функцией параметров нагрузки  $\beta$  и безразмерной температуры поверхности  $V_0$  (рисунок 10). Существование множественности стационарных тепловых состояний строго обосновывает известное явление ограниченной тепловой

неустойчивости (ОТНУ). Зависимость температуры центра от параметра нагрузки и температуры поверхности образует топологическую особенность типа “сборка”, характерную для широкого класса нелинейных динамических систем. Учитывая полученные решения для температурного

поля в условиях релаксационных потерь и используя известные решения в области высоких температур для джоулевых потерь (Фок В.А., Койков С.Н., Харитонов Е.В. и др.) рассмотрен общий случай теплового состояния конденсатора. На рис. 11 представлена зависимость значения максимальной температуры центра  $\vartheta_m$  от параметра нагрузки  $s(\vartheta_m)$ , где  $[s(\vartheta_m)]^2 = 2\beta(\vartheta_m)$ . Здесь же показаны области, соответствующие тепловому состоянию, обусловленному в основном либо релаксационными потерями (I), либо

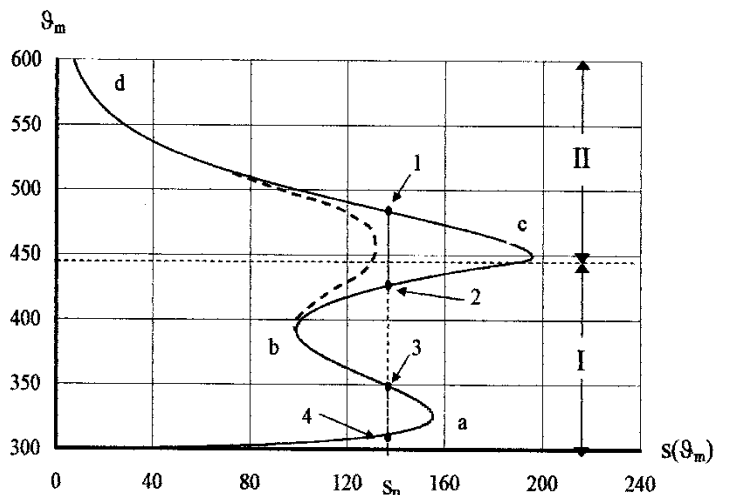


Рисунок 11 – Зависимость максимальной температуры  $\vartheta_m$  от параметра нагрузки  $s = \sqrt{2} \cdot \beta$ . Стрелками указаны возможные стационарные состояния.

потерями на проводимость (II). Падающие участки (ветви) кривой  $\vartheta_m = f(s)$  соответствуют

тепловым неустойчивым состояниям системы, верхняя ветвь характеризует тепловой пробоя (ветвь  $c-d$ ), а нижняя обуславливает ограниченную тепловую неустойчивость (ОТНУ) (ветвь  $a-b$ ). В зависимости от взаимного расположения I и II областей максимальная температура  $\vartheta_m = f(s)$  может качественно изменить свой вид. Например, при правостороннем сдвиге максимума  $\varepsilon''(\vartheta_m)$  это обстоятельство на рисунке 11 отражено штриховой кривой. Здесь же показаны возможные стационарные состояния, максимальное число которых для данной нагрузки равно 4. Устойчивость промежуточных состояний 1 и 3 можно обеспечить за счет стабилизации внешней цепи, при этом мы получим режимы с отрицательной дифференциальной проводимостью. Оценку динамики перехода между этими состояниями и развитие теплового пробоя можно провести на основе временного поведения температуры наиболее нагретой точки  $\vartheta_m(t)$ , обычно – в центре конденсатора. Зная зависимость  $\vartheta_m(t)$  и задаваясь предельно возможной температурой диэлектрика  $\vartheta_{кр}$  (температура теплового пробоя), можно определить  $\tau_{сл}$  в процессе развития тепловой неустойчивости, возникающей не только при увеличении нагрузки, но и вследствие кратковременных локальных процессов тепловыделения в объеме конденсатора (тепловых дефектов конструкции, явлений самовосстановления и т. п.), которые можно охарактеризовать неоднородным пространственным распределением температуры в начальный момент времени  $\vartheta_0(x)$ . Для оценки динамики температурного состояния предложен метод осреднения уравнения теплопроводности, связывающий значения средней температуры  $\bar{U}$  и максимальной  $U_m$  через параметрическую зависимость  $\beta(U_m)$ , найденную из решения соответствующей стационарной задачи. Безразмерной модельной задаче в области активного объема конденсатора:

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \beta \cdot q(\vartheta) = \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau}; \quad \vartheta(x, \tau)|_{\tau=0} = \vartheta_0(x); \quad \alpha \cdot \vartheta + \frac{\partial \vartheta}{\partial n} \Big|_{\pm 1} = 0 \quad (9)$$

ставится в соответствие линейная задача Штурма-Лиувилля для 1-ой собственной функции  $v_0$  и

числа  $\lambda_0$ :  $\frac{\partial^2 v_0(x)}{\partial x^2} + \lambda_0 v_0(x) = 0$ ,  $\alpha v_0(x) + \frac{\partial v_0(x)}{\partial n} \Big|_{\pm 1} = 0$  и вводится операция осреднения:

$$\bar{U}(t) = \int_{-1}^{+1} \vartheta(x, \tau) \cdot v_0(x) dx \quad (10)$$

Тогда для средней температуры имеем следующее нелинейное дифференциальное уравнение 1-го порядка:  $\frac{d\bar{U}}{d\tau} = \beta \cdot \overline{q(u)} - \lambda_0 \bar{U}$ . Оценка  $\overline{q(u)}$  в виде

$$\overline{q(u)} \approx q(\bar{U}) \quad (11)$$

справедлива только для постоянного или линейного источника, но никак не для быстрых источников экспоненциального температурного роста. Для дальнейших оценок рассмотрена соответствующая стационарная задача, где аналитическое решение для параметра нагрузки дает стационарную оценку для осредненного источника и температурной динамики:

$$\beta(U_m) = \frac{1}{2} \left[ \int_{V_0}^{U_m} \left[ \int_{\vartheta}^{U_m} q(y) dy \right]^{-0.5} d\vartheta \right]^2 ; \quad \overline{q(U_m)} = \frac{\lambda_0 U_m}{\beta(U_m)} ; \quad \tau = \int_{U_0}^{U_m(\tau)} \frac{\beta(U_m) \cdot dU_m}{(\beta - \beta(U_m)) \lambda_0 U_m}. \quad (12)$$

В главе 3 приводятся удовлетворительные результаты сопоставления данных расчета по предлагаемому методу с результатами численных расчетов и точных аналитических решений для экспоненциальной и линейной зависимостей тепловыделения от температуры.

**Четвертая глава** посвящена вопросам тепловой устойчивости и работоспособности конденсаторов в условиях развития теплового пробоя, соответствующих области II. В качестве объектов испытаний использовались серийно выпускаемые конденсаторы марки К73 цилиндрической формы на основе ПЭТФ диэлектрика. Был создан испытательный стенд в состав которого вошла специально разработанная аппаратура многоканальной регистрации температуры, автоматического подъема, стабилизации и отключения испытательного напряжения. Реализован ряд методических подходов, направленных на сокращение времени эксперимента, снижение погрешностей измерения динамики температуры и автоматизацию измерений. Максимальная мощность водоохлаждаемого генератора стенда составляла ~ 3,9 кВт в диапазоне испытательных напряжений  $U=130 \div 950$  В и частот  $f=200 \div 5000$  Гц. В ходе экспериментального изучения развития тепловой неустойчивости и теплового пробоя в конденсаторах осуществлялась непрерывная регистрация времени испытаний, электрофизических и тепловых параметров нагрузки: напряжения, тока, частоты, температуры корпуса, в ряде экспериментов – температуры центра испытываемых конденсаторов вплоть до наступления теплового пробоя, который и определял величину срока службы в диапазоне 50 ÷ 350 с. На основе теоретических результатов разработана методика расчета нестационарного теплового состояния конденсаторов, находящихся при больших электротепловых нагрузках. Расчет учитывает теплофизические, электрофизические и конструктивные параметры конденсаторов, условия их охлаждения и температурную зависимость эффективного фактора потерь. Результаты расчета сроков службы соответствуют среднестатистическим экспериментальным данным с погрешностью, не превышающей 15 %. Пример такого соответствия представлен на рисунке 12.



В пятой главе обсуждаются результаты исследований токовой устойчивости конденсаторов.

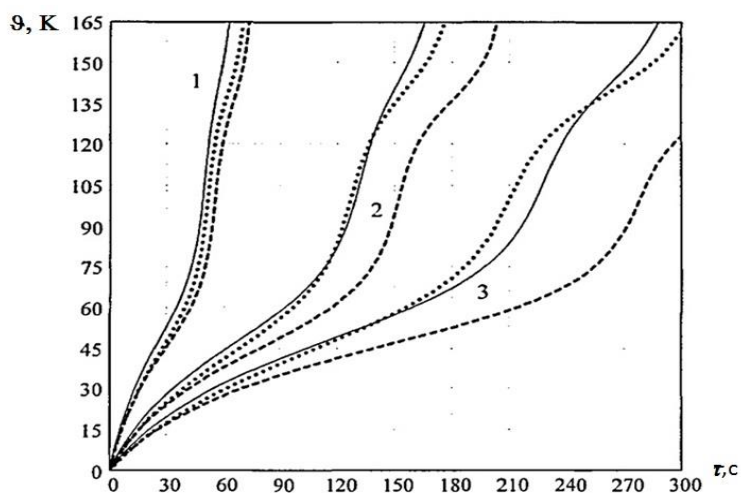


Рисунок 12 - Сопоставление экспериментальных (точки) и расчетных данных динамики перегрева для конденсатора K73-11-6,8-160 В по формуле (11) (штриховая линия) и по предлагаемой методике (12) (сплошная линия) при различных уровнях: 1-  $U = 420$  В, 2- $U = 270$  В, 3- $U = 215$  В,  $f = 1000$  Гц

Получен комплекс экспериментальных данных по исследованию работоспособности металлопленочных конденсаторов и их моделей при форсированных токовых нагрузках. Работоспособность конденсаторов в диапазоне исследованных емкостей 0,22–1,0 мкф ограничена процессами развития деградации контактных узлов, определявшей сроки службы в диапазоне 30–3000 импульсов тока, амплитудой 30–300 А и длительностью 5–100 мкс. Установлено, что срок службы исследуемых МПК в режимах высокой токовой нагрузки описывается

экспоненциальным законом зависимости количества импульсов до отказа от параметра нагрузки  $K = 5 - 80$ , определяемого отношением амплитуды испытательного импульса к предельно допустимой, соответствующей обычным условиям эксплуатации по ТУ:

$$N(K) = N_0 \cdot e^{-\alpha K}, \quad (13)$$

где  $N_0$  и  $\alpha$  – эмпирические коэффициенты закона старения. Установлено, что разрушение контактных узлов в процессе испытания конденсаторов приводит к появлению немонотонной частотной дисперсии их емкости и тангенса угла диэлектрических потерь в диапазоне 1 кГц – 1 МГц. Рассмотрена модель распределения потенциала в конденсаторной структуре с учетом ее реальных параметров - длины  $L$ , погонного сопротивления  $R$  и емкости  $C$  и условий подключения электродов. Модуль импеданса определяется выражением

$$Z_B(\omega) = \frac{E_m}{|I_1(0, \omega)|} = RL \frac{\sqrt{1 + 2h(\omega) \cdot \cos(\varphi(\omega)) + h^2(\omega)}}{2h(\omega)}, \quad (14)$$

где  $\tau = RC$  и используются следующие вспомогательные параметры:

$$h(\omega) = L \sqrt{\frac{\omega\tau \cdot (\operatorname{ch}(\sqrt{\omega\tau}L) - \cos(\sqrt{\omega\tau}L))}{2 \cdot (\operatorname{ch}(\sqrt{\omega\tau}L) + \cos(\sqrt{\omega\tau}L))}}, \quad \cos\varphi(\omega) = \frac{\operatorname{sh}(\sqrt{\omega\tau}L) - \sin(\sqrt{\omega\tau}L)}{\sqrt{\operatorname{ch}(2\sqrt{\omega\tau}L) - \cos(2\sqrt{\omega\tau}L)}}. \quad (15)$$

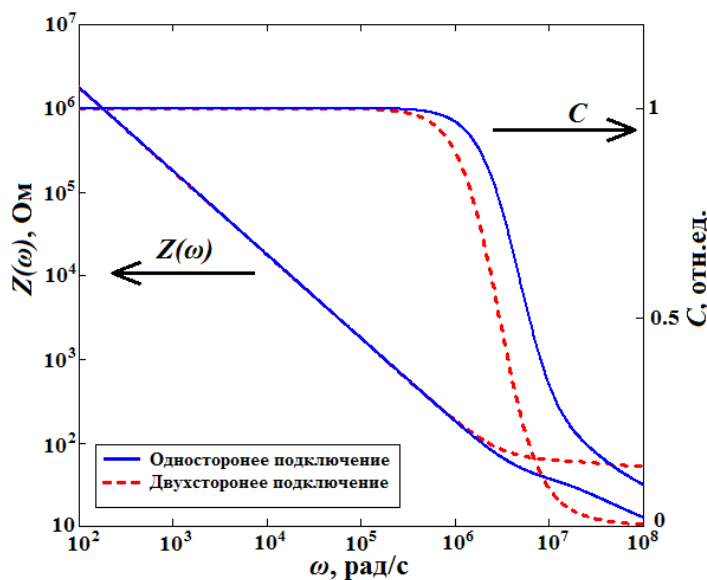


Рисунок 13 – Частотная дисперсия импеданса и нормированной емкости рассматриваемых конденсаторных структур

предложено объяснение наблюдаемых частотных зависимостей, поведение которых связано не только с увеличением сопротивления контактного узла, но и с неравномерностью распределения потенциала в металлизированном электроде.

В шестой главе рассматривается энергетическая эффективность конденсаторных диэлектриков, для которых можно пренебречь влиянием магнитной составляющей поля и величиной джоулева тепловыделения, которое в обычных диэлектриках крайне мала. Рассмотрим процесс разряда конденсатора (с объемом диэлектрика  $V$  и внешней поверхностью  $\Omega$ ) на некоторую нагрузку. Представим обсуждаемые энергетические составляющие на соответствующей диаграмме (рисунок 14), где рассматривается баланс между плотностями исходно запасенной энергией электрического поля  $w_e(0)$ , ее текущим остатком  $w_e$ , энергией потерь в диэлектрике  $w_Q$  которая выделяется, в основном, в виде тепла в процессе деполяризации и энергией, направляемой в нагрузку  $w_{eff}$ . Очевидно, в общем случае закон сохранения суммарной энергии в системе можно выразить простым соотношением  $w_e(0) = w_{eff} + w_Q + w_e$ . Для полного изменения плотности энергии имеем 2 составляющих:

На основе решений представленной одномерной модели МПК можно сделать вывод, что дисперсия емкости рассматриваемых конденсаторных конструкций действительно возникает в области мегагерцовых частот, однако этот факт не может объяснить немонокотное частотное поведение экспериментальных данных. Даже если учитывать конечные контактные сопротивления электродов, то дисперсионные зависимости будут сдвигаться влево по частоте, но оставаться монотонно спадающими. На основании аналитических и численных расчетов

$$\frac{\partial w_E}{\partial t} + \frac{\partial w_Q}{\partial t} = E \frac{\partial D}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_\infty E^2}{2} + E \frac{\partial P}{\partial t}. \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{S} + \frac{\partial w_E}{\partial t} + \frac{\partial w_Q}{\partial t} &= 0 \\ W_e - W(0) &= \iiint_V \frac{\partial w_E}{\partial t} dt dV \\ W_{eff} &= \iiint_V \operatorname{div} \vec{S} d\Omega \\ W_Q &= \iiint_V \frac{\partial w_Q}{\partial t} dt dV \\ \text{ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ} \\ \text{ЭНЕРГИИ} \\ W(0) - W_e &= W_{eff} + W_Q \end{aligned}$$

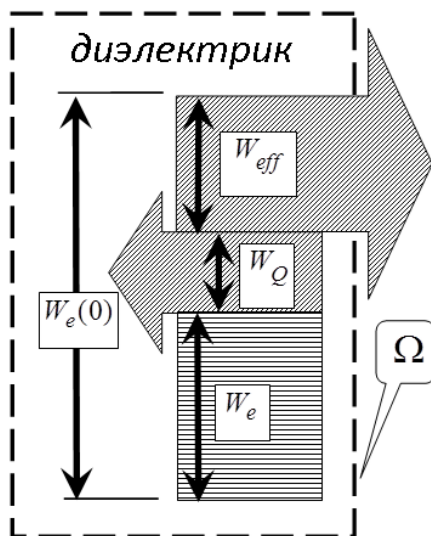


Рисунок 14 – Энергетические потоки при разряде конденсаторного диэлектрика

Основной вклад в потери этом случае будут вносить медленные (релаксационные) виды поляризации. Быстрые типы поляризации (электронная, атомная) практически обуславливают ее мгновенное установление, соответствующее диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_\infty$ . В член  $E \frac{\partial P}{\partial t}$  аддитивно входят составляющие от изменения электрического поля и вклада диэлектрических потерь. Трудность

заключается в том, что, исходя из общих соображений, для произвольных полей и закономерностей установления поляризации указанный член на  $\frac{\partial w_E}{\partial t}$  и  $\frac{\partial w_Q}{\partial t}$  принципиально не разделить. В случае представления диэлектрической среды эквивалентной схемой замещения постоянными  $R$ - $C$  элементами разделение не представляет принципиальных сложностей, однако такой подход в целом ряде случаев плохо соответствует или вообще не соответствует действительности. Вместе с тем, с учетом запаздывания поляризации относительно электрического поля, нужно использовать следующее интегральное соотношение:

$$P(t) = \varepsilon_0(\varepsilon_\infty - 1)E(t) + \varepsilon_0 \int_{-\infty}^t \alpha(t-u)E(u)du, \quad (17)$$

В этом соотношении  $\alpha(t)$  является функцией спадания диэлектрика. В работе показано, что с учетом специфики вида этой функции (17) можно привести к дифференциальному уравнению, вид которого позволяет разделить член  $E \frac{\partial P}{\partial t}$  на  $\frac{\partial w_E}{\partial t}$  и  $\frac{\partial w_Q}{\partial t}$ . Для модели релаксационной поляризации Дебая:

$$\alpha(t) = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (18)$$

энергетические составляющие можно разделить следующим образом:

$$\begin{aligned}\frac{\partial w_E}{\partial t} &= \frac{1}{\varepsilon_0(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)} P_r(t) \frac{\partial P_r(t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_\infty E^2(t)}{2}, \\ \frac{\partial w_{eff}}{\partial t} &= E \frac{\partial P_r(t)}{\partial t}, \\ \frac{\partial w_Q}{\partial t} &= \frac{\tau}{\varepsilon_0(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)} \left[ \frac{\partial P_r(t)}{\partial t} \right]^2.\end{aligned}\quad (19)$$

Следует отметить, что приведенные соотношения справедливы для полей  $E$ , имеющих произвольный временной характер. В частности, расчет по этим формулам средней за период удельной мощности потерь (тепла) для синусоидального поля имеет хорошо известный вид:

$$\bar{Q} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{\partial w_Q}{\partial t} dt = \frac{\omega \tau (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \varepsilon_0 E_0^2}{1 + \omega^2 \tau^2} = \omega \varepsilon_0 \varepsilon'' \frac{E_0^2}{2}.\quad (20)$$

Для примера экспоненциально-спадающего поля  $E = E_0 \cdot \exp(-\frac{t}{\tau_E})$  после соответствующего интегрирования (19) по  $t$  на промежутке от 0 до  $\infty$ , с учетом полной релаксации  $P_r(\infty) = 0$  выражения для энергий получаются следующие:

$$\begin{aligned}w_e &= \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_\infty E_0^2}{2} + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \varepsilon_0 \alpha^2 E_0^2}{(1 - \alpha)^2} \frac{E_0^2}{2}, \\ w_Q &= \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \varepsilon_0 \alpha E_0^2}{(1 - \alpha)^2} \frac{E_0^2}{2}\end{aligned}\quad (21)$$

а эффективная энергия, поступающая в нагрузку:

$$w_{eff} = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \varepsilon_0 \alpha E_0^2}{(\alpha - 1)} \frac{E_0^2}{2} + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_\infty E_0^2}{2}.\quad (22)$$

Здесь введен безразмерный параметр отношения характерных времен изменения поля и релаксационного процесса  $\alpha = \frac{\tau_E}{\tau}$ . Полученные оценки позволяют теперь сравнить эффективность используемых диэлектриков с учетом их релаксационных свойств и характерных времен приложенного поля (времен заряда или разряда) по величине коэффициента полезного действия:

$$\eta = \frac{w_{eff}}{w_e} = 1 - \frac{w_Q}{w_e}.\quad (23)$$

Так, для экспоненциально спадающего поля получаем:

$$\eta = 1 - \frac{1}{\alpha + \frac{\varepsilon_{\infty}(1-\alpha)^2}{(\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty})\alpha}}, \quad (24)$$

Большинство современных диэлектриков и систем электрической изоляции редко следуют модели Дебая. Для этих материалов характерно существование сплошного или дискретного спектра времен релаксации диэлектрической проницаемости. Рассмотрим диэлектрик, для которого процесс поляризации характеризуется функцией распределения времен релаксации  $y(\tau) = d(\varepsilon_s(\tau) - \varepsilon_{\infty})/d\tau$ , при этом суммарный вклад всех процессов поляризации определяется полным инкрементом  $\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}$ , где статическая поляризация представляет собой суммарную величину всех статических проницаемостей от каждого вида релаксационного процесса. С учетом сказанного, аналогично (17), можно получить следующее интегральное соотношение для совокупного значения всех видов полной поляризации при разряде:

$$P_r(t) = P_s + \varepsilon_0 \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \int_0^t \frac{y(\tau) \exp\left(\frac{u}{\tau}\right) E(u)}{\tau} d\tau du, \quad (25)$$

с учетом соотношения для  $P_s = \varepsilon_0 E_0 \int_0^{\infty} y(\tau) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) d\tau$ . Тогда для экспоненциально спадающего поля оценку эффективности диэлектрика (23) следует проводить с учетом соотношений:

$$\begin{aligned} w_e &= \frac{\varepsilon_0(\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty})E_0^2}{2} + \frac{\varepsilon_0\varepsilon_{\infty}E_0^2}{2}, \\ w_Q &= \frac{\varepsilon_0 E_0^2}{2} \int_0^{\infty} \frac{\tau \cdot y(\tau)}{\tau_E + \tau} d\tau, \\ w_{eff} &= \frac{\varepsilon_0 E_0^2}{2} \int_0^{\infty} \frac{\tau_E \cdot y(\tau)}{\tau_E + \tau} d\tau + \frac{\varepsilon_0\varepsilon_{\infty}E_0^2}{2}. \end{aligned} \quad (26)$$

Полученные соотношения имеют общий характер и для дальнейшего анализа характеристик необходимо знать конкретный вид функции распределения  $y(\tau)$ . В физике диэлектриков показано, что функцию распределения можно определить, зная частотный спектр диэлектрической проницаемости или фактора потерь рассматриваемого диэлектрика. Приведем вид такой связи для фактора потерь:

$$\varepsilon''(\omega) = \int_0^{\infty} \frac{\omega\tau \cdot y(\tau)}{1 + \omega^2\tau^2} d\tau. \quad (27)$$

Поиск функции распределения из полученного выражения связан с решением соответствующего интегрального уравнения Фредгольма 2 рода. Для этого, например, достаточно

использовать аппарат преобразование Фурье. Пример такого расчета для ПЭТФ конденсаторного диэлектрика и его энергетической эффективности приведен в настоящей диссертации. В результате изложенного следует отметить, что энергетическая эффективность конденсаторного диэлектрика может быть найдена по значению предлагаемого коэффициента полезного действия. Этот параметр учитывает, как произвольный временной характер поля (несинусоидальность периодических или однократных процессов заряда-разряда), так и дисперсию основных диэлектрических характеристик.

**В заключении** отмечается, что в последние годы за рубежом достигнут значительный успех в конструировании новых типов конденсаторов, которые предназначены для использования в микросекундном и миллисекундном диапазонах импульсных устройств, где требуемые сроки службы могут исчисляться десятками-сотнями часов (импульсов). Для указанных случаев можно допустить определенные режимы перегрузки конденсаторов за счет сокращения длительных нормативных сроков службы. Известные экспериментальные и теоретические данные о механизмах и параметрах деградации металлопленочных конденсаторов (МПК) не позволяют прогнозировать их работоспособность в указанных условиях, в связи с чем настоящая диссертация посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию обсуждаемой проблемы. Были разработаны экспериментальные установки, соответствующие методики и получен комплекс экспериментальных и расчетных данных, соответствующий трем характерным областям перегрузок: по величине напряженности электрического поля, а также по значениям электротепловых и токовых перегрузок. Объектами проведенных исследований являлись отечественные конденсаторы К73-11, К73-17 и К78-2 различных типономиналов. В работе обнаружены новые эффекты: пространственно-неоднородный характер электрического взрыва нанометровых металлизированных электродов и электромиграционный механизм их разрушения, обусловленный действием сдвигающей силы «электронного ветра» на атомы металла. Развита стационарная теория теплового пробоя (неустойчивости) для диэлектрика, обладающего как релаксационными, так и джоулевыми потерями на проводимость. Предложена теоретическая модель динамического теплового пробоя многослойного конденсаторного диэлектрика, которая объясняет катастрофический отказ конденсатора при значительных уровнях энергии процесса самовосстановления. Разработан теоретический подход к оценке эффективности конденсаторных диэлектриков, учитывающий частотную дисперсию их основных характеристик и произвольный временной характер воздействующего электрического поля. Полученные результаты могут служить основой выбора и использования конденсаторов в задачах оптимизации разработок и применений емкостных накопителей энергии, в том числе – в условиях ограниченных сроков службы используемых конденсаторов.

**Список наиболее значимых работ, опубликованных по теме диссертации**

- 1 Бондаренко, П.Н. Определение воздушных зазоров в намотанных полимерных конденсаторах / П.Н. Бондаренко, О.А. Емельянов, А.И. Метельков // «Электронная техника». - Сер. 3.– 1989.- В.3.- С. 45-49.
- 2 Бондаренко, П.Н., Распространение волнового фронта электротеплового разогрева в диэлектриках / П.Н. Бондаренко, О.А. Емельянов, С.Н. Койков // Письма в ЖТФ. -1989.- Т.15. -Вып.16.-С. 45-48.
- 3 Емельянов, О.А. Электротепловая неустойчивость полярного полимерного диэлектрика за областью температуры стеклования // Письма в ЖТФ. - 2001.-Т. 27. -Вып.16. - С. 32-39.
- 4 Емельянов, О.А. Особенности релаксационной поляризации полярного диэлектрика в области больших электротепловых нагрузок //Письма в ЖТФ. -2001.-Т.28. -Вып.22. - С. 32-38.
- 5 Емельянов, О.А. Динамика электротепловой неустойчивости полярного диэлектрика в области температурного максимума релаксационных потерь // Письма в ЖТФ. -2001.-Т. 28. -Вып.9. - С. 76-81.
- 6 Емельянов, О.А. Особенности работоспособности металлопленочных конденсаторов в форсированных режимах // Электротехника. -2002.-№ 4.- С. 6-10.
- 7 Emelyanov, O.A. Thermal Autowave in thin polar dielectric film: analytic estimate for shape and velocity //2003 IEEE conference on electrical insulation and dielectric phenomena (CEIDP). - USA, NewMexico, Rep.sect. 5C-12. - P.24-25.
- 8 Емельянов, О.А. Анализ процесса переноса энергии в диэлектрике с учетом релаксационной поляризации // Письма в ЖТФ. -2004.-Т.30. -Вып.19.С. 40-46.
- 9 Емельянов, О.А. Оценка энергетической эффективности диэлектрика с учетом распределения времен релаксации//ЖТФ. -2005.-Т.75. -Вып.5. - С. 131-133.
- 10 Бондаренко, П.Н. Экспериментальное изучение токового разрушения металлизированных полимерных пленок / П.Н. Бондаренко, О.А. Емельянов // Письма в ЖТФ – 2005. – Т. 31, №14. – С. 67-72.
- 11 Emelyanov, O.A. Efficiency of Film Capacitors in Forced Electrothermal Modes//ISEI-2006 International Symposium on Electrical Insulation, Toronto, June 2006.
- 12 Емельянов, О.А. Энергетические соотношения для оценки диэлектриков конденсаторов // Электричество. -2007. -№1-С.65-69.
- 13 Белько, В.О. Динамические характеристики процесса самовосстановления в металлопленочных конденсаторах / В.О. Белько, П.Н. Бондаренко, О.А. Емельянов // Электротехника. -2007.- №3.- С.33-38.
- 14 Емельянов, О.А. Локальное разрушение тонких металлических пленок при электродинамических нагрузках // ЖТФ. - 2008.- Вып.7.-С.48-56.
- 15 Белько, В.О. Исследование наносекундного электрического взрыва тонких алюминиевых пленок / В.О. Белько, О.А. Емельянов // Письма в Журнал технической физики. – 2009. – Т.35, №18.- С.58-64.
- 16 Белько, В.О. Работоспособность сегментированных электродов современных металлопленочных конденсаторов / В.О. Белько, О.А. Емельянов // Научно-технические ведомости СПбГПУ – 2010. – №3(106): Наука и образование. - С.32-40.

- 17 Емельянов, О.А. Электродинамический тепловой пробой конденсаторного диэлектрика // ЖТФ. – 2011. – том 81. – №11. – С.146–149.
- 18 Emelyanov, O. Experimental Study of Nanosecond Surface Microarc Discharge / O. Emelyanov, V. Belko, M. Shemet // 39th IEEE International Conference on Plasma Science – Edinburgh, July 2012, 1P-95.
- 19 Emelyanov, O. Experimental Characteristics of Fast Aluminum Thin Films Explosion / O. Emelyanov, Belko, I. Ivanov // 39th IEEE International Conference on Plasma Science – Edinburgh, July 2012, 1P-96.
- 20 Emelyanov, O.A. Pattern Formation in Electrical Exploding of Thin Metal Films / O.A.Emelyanov, V. O. Belko // IEEE Trans. Plasma Sci. v.41.–issue 4.–2013. – P.961-966.
- 21 Belko, V. A study of nanosecond arc surface flashover in metallized polymer films / V. Belko, O. Emelyanov, M. Shemet // 2013 IEEE Electrical Insulation and Dielectric Phenomena: annual rep. of int. conf. – Shenzhen, October 2013. – Vol. 1. – P. 476-477.
- 22 Емельянов, О.А. Об одном подходе к оценке энергетических характеристик конденсаторных диэлектриков // Известия РАН. Энергетика. – №3. – 2014. -с. 46-53.
- 23 Emelyanov, O.A. Fast electromigration crack in nanoscale aluminum film / O.A. Emelyanov, I.O. Ivanov // Journal of Applied Physics. – 2014. – Vol. 116, №6. – P. 1-4.
- 24 Belko, V.O. Self-healing in segmented metallized film capacitors: Experimental and theoretical investigations for engineering design/ Belko V.O., Emelyanov O.A.// Journal of Applied Physics 119, 024509 (2016)
- 25 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.
- 26 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.
- 27 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.
- 28 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.
- 29 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.
- 30 Belko, V. Current pulse polarity effect on metalized film capacitors failure / Belko V., Glivenko D., Emelyanov O., Ivanov I., Plotnikov A. // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2017. – Vol. 45, №6. – P. 1020-1025.
- 31 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.
- 32 Емельянов, О.А. Частотная дисперсия импеданса конденсаторных структур при несимметричном подключении электродов / О.А. Емельянов, И.О.Иванов // ЖТФ. - 2018. - Вып.1.- с.113-116.