

На правах рукописи

Емельянов Олег Анатольевич

**РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МЕТАЛЛОПЛЕНОЧНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ
В ФОРСИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ РЕЖИМАХ**

Специальность 05.09.02 – Электротехнические материалы и изделия

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2004

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научные руководители:

доктор физико-математических наук,
профессор Койков Сергей Николаевич

доктор физико-математических наук,
профессор Сажин Борис Иванович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор Кучинский Георгий Станиславович

доктор физико-математических наук,
профессор Слуцкер Александр Ильич

Ведущая организация:

ОАО «НИИ «Гириконд»
(г. Санкт-Петербург)

Защита состоится «2 » апреля 2004 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета К 212.229.03 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Главное здание, ауд. 284 .

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургского государственного политехнического университета».

Отзывы на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просим направлять по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. Электромеханический факультет. Диссертационный совет К 212.229.03.

Автореферат разослан « 19 » февраля 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.т.н., доцент

Гумерова Н.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В технических условиях (ТУ) на серийно-выпускаемые конденсаторы указываются режимы нагрузок, соответствующие срокам службы ($\tau_{\text{сл}}$) на уровне 5–10 тыс. часов. Вместе с тем, определенные разновидности электронной и электротехнической аппаратуры в ряде случаев эксплуатируются в течение относительно коротких сроков службы. Металлопленочные электрические конденсаторы (МПК), входящие в состав указанной аппаратуры, используются в однократных или повторно-кратковременных режимах работы, длительность которых может исчисляться десятками–сотнями секунд. Исходя из практических соображений, за счет существенного сокращения $\tau_{\text{сл}}$ можно резко увеличить (форсировать) нагрузку на конденсатор относительно режимов, предусмотренных ТУ. Основным механизмом выхода конденсаторов из строя в некоторых ФР может являться развитие тепловой неустойчивости (ТНУ), заканчивающейся тепловым пробоем (ТП). Поскольку этот существенно нестационарный процесс в конденсаторах протекает не мгновенно, а составляет величины порядка десятков секунд–часов, срок службы в этом случае может быть ограничен временем развития ТП: $\tau_{\text{сл}} \leq \tau_{\text{ТП}}$. Оптимальный выбор конденсаторов для работы в форсированных режимах (ФР) с учетом малых $\tau_{\text{сл}}$ позволяет существенно повысить технико-экономические и снизить массо-габаритные характеристики конденсаторов и аппаратуры в целом.

В связи с невозможностью использования ТУ для прогнозирования работоспособности МПК в форсированных режимах в условиях развивающейся тепловой неустойчивости необходимо привлекать дополнительные оценки и методы расчета. В силу специфики рассматриваемых ФР в литературе практически отсутствуют системные данные экспериментальных исследований. Большинство расчетных методов электротеплового состояния конденсаторов используется при анализе стационарных режимов нагрузки. Нестационарные методы расчета, как правило, применимы в регулярных температурных режимах, при которых длительность воздействия нагрузки значительно превышает тепловую постоянную времени конденсаторов τ_T , в то время, как в рассматриваемых ФР $\tau_{\text{сл}} \sim \tau_{\text{ТП}} \sim \tau_T$. Наиболее полное исследование теплового состояния конденсаторов возможно на основе применения численных методов расчета с использованием ЭВМ. Однако в известных литературных источниках подобные исследования работоспособности МПК в ФР не проводились. Таким образом, для оценки работоспособности конденсатора необходимы методы теплового расчета, учитывающие существенную нестационарность развития ТНУ в условия интенсивных электротепловых нагрузок. Сложность анализа электротеплового состояния конденсаторов в указанных режимах обусловлена, в первую очередь, трудностью решения базовой системы уравнений нестационарной теплопроводности. Как известно, развитие ТП связано с резкой зависимостью роста тепловыделения (мощности диэлектрических потерь q_V)

от температуры. Кроме того, для ряда диэлектриков характерна немонотонность указанного тепловыделения, связанная с температурным максимумом диэлектрических потерь (полярные диэлектрики, сегнетокерамика). Таким образом, нестационарное уравнение теплопроводности содержит существенно нелинейный источник тепла. Общих методов решения подобных систем на сегодняшний день не существует, однако за последние 15 лет в нелинейной физике и синергетике были найдены некоторые частные классы решений нелинейных систем, отражающие определенные фундаментальные процессы природы. С этой, синергетической точки зрения, диэлектрик конденсатора представляет собой температурную активную среду (АС), где тепловые поля обусловлены диссипацией энергии электромагнитного поля. Для активных сред найдено множество универсальных процессов: существование диссипативных структур (ДС) стационарного и нестационарного характера, явления локализации тепла, бифуркаций, хаоса, фрактальности в самых широких областях исследования: от физики горения и взрыва до биологии. Общим во многих указанных случаях является идентичность нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих различные эволюционные процессы. Важность дальнейшего изучения процессов ТНУ и ТП в диэлектриках подтверждается также рядом публикаций последних лет (работы Ю.Н. Вершинина, М.Д. Носкова, В.Ф. Хирного, Y. Muramoto, L. Dissado и др.).

В связи со сказанным представляется актуальным дальнейшее экспериментальное и теоретическое изучение электротеплового состояния конденсаторов в нестационарных условиях воздействия интенсивных электротепловых нагрузок.

Цель работы: Разработка научно-технических основ определения работоспособности и оптимального выбора электрических конденсаторов для их использования в форсированных электротепловых режимах эксплуатации.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

1. Дальнейшее развитие теоретических представлений о состоянии конденсаторных структур, находящихся в условиях интенсивного электротеплового разогрева.
2. Разработка испытательного стенда и соответствующих методик для экспериментального изучения работоспособности МПК в ФР.
3. Экспериментальное исследование работоспособности МПК в ФР и сравнение полученных результатов с данными расчетов.
4. Разработка на основе полученных экспериментальных и теоретических результатов инженерной методики определения работоспособности и оптимального выбора МПК в ФР.

Методы исследования. Экспериментальные исследования работоспособности конденсаторов в ФР проводились на серийно-выпускаемых конденсаторах марки К73 с полиэтилентерефталатным (ПЭТФ) диэлектриком. При проведении испытаний использовалась специально разработанная аппаратура и ряд методических подходов, направленных на оптимизацию эксперимента. Теоретические оценки электротеплового состояния конденсатора выполнены на основе аналитических решений

соответствующих модельных задач. Для проверки и оценки точности полученных аналитических решений проводились контрольные численные расчеты на ЭВМ. Результаты экспериментальных исследований подвергались статистической обработке и сравнивались с результатами расчетов.

Научная новизна

1. В результате ресурсных испытаний металлопленочных конденсаторов на основе ПЭТФ диэлектрика получен комплекс экспериментальных данных, определяющий работоспособность конденсаторов в форсированных режимах эксплуатации, соответствующих срокам службы на уровне 50-350 секунд.

2. На основе точных решений ряда нелинейных модельных задач электротеплового состояния конденсаторного диэлектрика рассмотрен общий случай стационарной теории теплового пробоя диэлектрика с учетом релаксационных и джоулевых потерь.

3. Предложен новый метод осреднения нестационарной нелинейной задачи теплопроводности для оценки температурной динамики электротеплового состояния диэлектрика.

4. Впервые экспериментально обнаружен и теоретически обоснован автоволновой механизм переноса тепла в протяженных конденсаторных структурах на основе диэлектриков, обладающих температурным максимумом фактора диэлектрических потерь.

Практическая значимость

1. Результаты экспериментальных исследований могут быть использованы для прогнозирования работоспособности и оптимального выбора МПК с целью их применения в форсированных режимах эксплуатации (ФР).

2. Ряд результатов теоретических исследований имеет общий характер и применим к анализу динамики электротеплового состояния конденсаторов и изоляции на основе оксидных, керамических и других типов рабочего диэлектрика.

3. На основе проведенных исследований разработана инженерная методика расчета электротеплового состояния МПК и их оптимального выбора для эксплуатации в ФР.

4. Полученные результаты могут использоваться для оценки устойчивости работы конденсаторов, находящихся при обычных условиях эксплуатации, в случае возникновения кратковременных электротепловых перегрузок.

5. На основе обнаруженного автоволнового эффекта переноса тепла и явления ограниченной тепловой неустойчивости в диэлектриках возможно создание специальных приборов и устройств, использующих эффекты теплового переключения.

Реализация результатов работы. Диссертационная работа является частью работ по научно-техническим договорам с предприятиями отечественной промышленности, экспериментальные установки использовались при проведении учебных лабораторий на кафедре ЭИКК СПбГПУ. Ряд результатов внедрен на 3 отечественных предприятиях: ОАО “НИИ Гириконд” и ФГУП “ЦНИИ Гидроприбор” (г. Санкт-Петербург); АОЗТ “Амфи-Лаконд” (г. Новая Ладога), о чем прилагаются соответствующие акты о внедрении.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Работоспособность и срок службы конденсаторов в исследованных форсированных режимах эксплуатации обусловлены процессом развития теплового пробоя.
2. Время развития теплового пробоя в ПЭТФ конденсаторах в основном определяется характером температурной зависимости фактора релаксационных потерь в рабочем диэлектрике.
3. Предложенные аналитические оценки и инженерная методика расчета динамики электротеплового состояния конденсаторов позволяют осуществить их оптимальный выбор с целью использования в форсированных режимах эксплуатации.
4. Дальнейшая разработка положений теории теплового пробоя в диэлектриках позволяет количественно оценить электротепловые эффекты ограниченной тепловой неустойчивости и динамику развития теплового пробоя в электрических конденсаторах.
5. В конденсаторных структурах с диэлектриком, обладающим немонотонной температурной зависимостью фактора потерь, возможно существование автоволнового процесса переноса тепла.

Достоверность полученных результатов подтверждается хорошим соответствием данных эксперимента, численных и аналитических расчетов, большим количеством испытанных конденсаторов и корректной статистической обработкой опытных данных, а также сравнением результатов исследований с результатами, полученными другими авторами как в России, так и за рубежом.

Личный вклад автора определяется участием в постановке задачи исследований, самостоятельной разработке и создании экспериментальных установок, проведении экспериментальных и теоретических исследований; их обработке и анализе полученных результатов. Основные результаты работы получены автором лично. В процессе работы автор пользовался научными консультациями к.т.н. Бондаренко П.Н. и к.ф.-м.н. Лопуляка С.Г.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Всесоюзных научных конференциях «Физика диэлектриков» (г. Баку, 1982 г., г. Томск, 1988 г.); V Всесоюзном научно-техническом совещании «Повышение качества и улучшение технико-экономических показателей силовых конденсаторов» (г. Серпухов, 1983 г.), III Всесоюзной научно-технической конференции «Совершенствование экспериментальных методов исследования физических процессов» (г. Ленинград, 1989г.), IV Международной конференции ICEMC-2001 (г. Москва, 2001 г.), III Международной конференции «Электрическая изоляция – 2002» (г. Санкт-Петербург, 2002 г.), Международной конференции 2003 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (USA, New Mexico, 2003).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 отчетов по НИОКР и 15 печатных работ.

Структура и объем диссертационной работы

Работа состоит из списка основных сокращений и обозначений, введения, пяти глав, заключения, списка литературы (175 наименований) и четырех приложений. Диссертация изложена на 224 страницах машинописного текста, содержит 72 рисунка и 14 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определена цель диссертационной работы, приведены основные научные и практические результаты исследований.

В первой главе определяется область форсированных режимов (ФР) эксплуатации конденсаторов. На рис.1 приведена ориентировочная зависимость предельно допустимого значения рабочего напряжения $U_{пр.д}$ МПК от частоты в соответствии с ТУ. Область ФР (заштрихована)

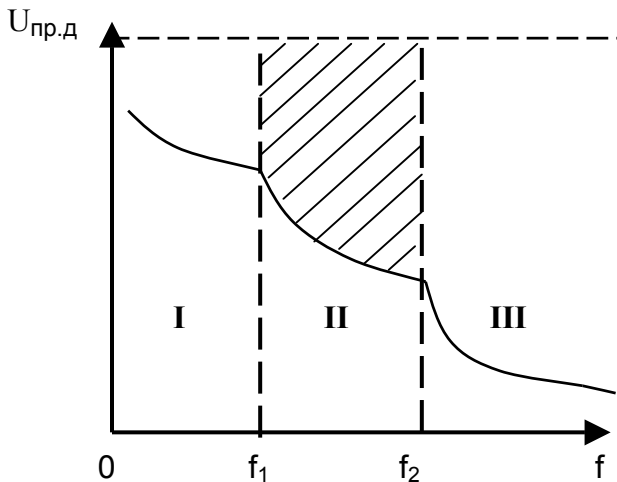


Рис.1. Область ФР

находится выше указанной зависимости и ограничена сверху электрической прочностью диэлектрика и частотным диапазоном, определяемым слева работоспособностью в условиях электрического старения (I), а справа – максимальным значением тока через электроды и контактные узлы конденсатора (III). Далее проведен литературный обзор основных методов расчета теплового состояния конденсатора и анализ современных представлений о развитии тепловой неустойчивости

в активных средах. В заключении главы поставлены задачи дальнейшего исследования.

Во второй главе изложены методические подходы, применявшиеся при экспериментальном изучении работоспособности конденсаторов в ФР, обработке опытных данных и проведении численных расчетов. В качестве объектов испытаний использовались серийно выпускаемые конденсаторы марки К73 цилиндрической формы на основе ПЭТФ диэлектрика. Испытания конденсаторов проводились в специальных камерах, обеспечивавших режимы свободного и вынужденного теплоотведения. 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 $\sim 3,9$ кВт в диапазоне испытательных напряжений $U=130\div 950$ В и частот $f=100\div 5000$ 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. Измерение динамики температуры корпуса и центра исследованных конденсаторов проводилось с помощью температурных датчиков специальной конструкции. В качестве температурных датчиков использовались термопары, изготовленные методом напыления Cu–Ni слоев на полиимидную подложку. Площадь зоны контакта термопары составляла величину

порядка $\sim 0,15 \text{ мм}^2$ и толщиной $\sim 0.04 \text{ мкм}$. Такая конструкция термопары имеет весьма малую инерционность (менее 100 мкс), а погрешность измерения не превышает 0,2 %, так что при максимальных уровнях температуры абсолютная погрешность измерения составляла $\pm 0,4 \text{ }^\circ\text{C}$. Для измерения температуры центра испытуемого конденсатора в нем просверливалось отверстие в радиальном направлении диаметром 0,5 мм. Глубина отверстия равнялась радиусу конденсатора. Во избежании замыкания металлизированных обкладок конденсатора проводилась его тренировка путем разряда на испытуемый конденсатор второго конденсатора, заряженного до U_n , при этом изменение емкости C и тангенса угла потерь $\text{tg}\delta$ практически не наблюдалось. Помещаемая в центр конденсатора термопара с помощью аппликатора была изолирована от слоев диэлектрика слоем кремнийорганического лака, запеченного при $250 \text{ }^\circ\text{C}$. Температурные зависимости напряжения электрического пробоя конденсаторов $U_{кр}$ на частоте 1000 Гц изучались с помощью аппаратуры испытательного стенда, а C и $\text{tg}\delta$ – с помощью стандартных методик. На моделях конденсаторной изоляции изучалась зависимость среднего воздушного зазора от давлений, характерных для конструкции реального конденсатора, что позволило в дальнейшем уточнить влияние воздушных прослоек на теплофизические параметры конденсаторной секции. Для определения величины напряжения теплового пробоя $U_{т.пр}$ использовалась методика и аппаратура квазистационарного режима теплового состояния конденсатора, обеспечивавшая линейный временной рост температуры поверхности объекта испытания вплоть до наступления теплового пробоя. В главе приведены численные схемы решений уравнения теплопроводности в плоском и цилиндрическом случаях, применявшихся для проверки и оценки точности полученных аналитических результатов. При анализе экспериментальных данных сроков службы конденсаторов применялись стандартные методы обработки с использованием известных статистических критериев.

Третья глава посвящена развитию теоретических представлений о состоянии конденсаторного диэлектрика в условиях интенсивных электротепловых нагрузок. Математическая постановка задачи электротеплового состояния конденсатора включала в себя следующую связанную систему уравнений :

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

определяющуюся уравнениями электродинамики; уравнением теплопроводности с соответствующими граничными условиями I (III) рода на поверхности конденсатора Ω , где ρ , C_p и λ – плотность, теплоемкость и коэффициент теплопроводности активного объема конденсатора ; критериальной зависимостью коэффициента теплоотдачи α и частотно-температурной зависимостью комплексного значения диэлектрической проницаемости $\dot{\epsilon}(\omega, T)$.

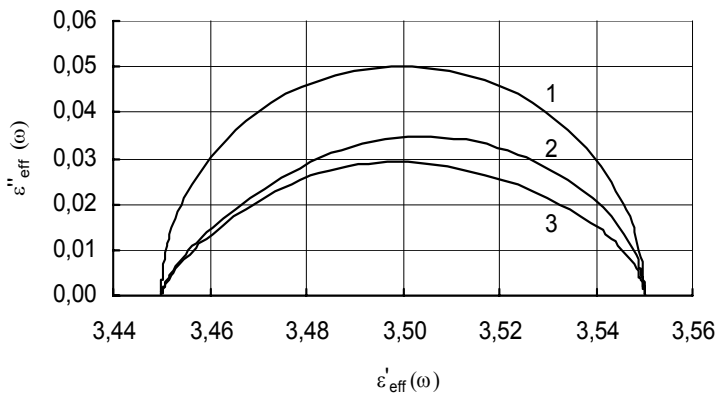


Рис.2. Диаграмма Коул-Коула

Комплексные величины общепринятых обозначений полевых характеристик отмечены сверху точкой. В первом разделе главы проведен анализ теплового состояния плоского конденсатора с диэлектриком, характеризующимся дебаевской релаксацией. Рассмотрены случаи больших градиентов температур, которые могут быть обусловлены как внешним источником тепла, так и собственным разогревом диэлектрика вследствие релаксационных потерь. В обоих случаях зависимости $\epsilon'' = f(\epsilon')$ для такого конденсатора отличаются от известных полуокружностей диаграммы Коул-Коула. Отмеченные обстоятельства в случае электротеплового разогрева, обусловленного диэлектрическими потерями, приведены на рис.2, где значение перегрева центр – поверхность соответственно: 1 – 0 К, 2 – 100 К и 3 – 150 К. При этом диэлектрик характеризуется одним релаксационным процессом модели Дебая. Полученные различия могут быть формально истолкованы появлением спектра времен релаксации, хотя они проявляются исключительно благодаря внутренней температурной неоднородности распределения поля и основных электрофизических характеристик среды ϵ'' и ϵ' . Далее, на основе соотношения Кирквуда, удовлетворительно описывающего зависимость $\epsilon''(T)$ для широкого класса полярных диэлектриков (например, полимеры ПЭТФ, ПВА и др.), получены точные решения нелинейной модельной задачи тепловой устойчивости диэлектрика толщиной $2h$ в однородном переменном электрическом поле. С учетом безразмерных параметров задачи :

$$\beta = \frac{\omega \epsilon_0 \epsilon''_{\max} \cdot (E \cdot h)^2}{\lambda} \cdot \frac{\beta_p W}{k T_c^2} ; \quad \vartheta = \frac{T - T_c}{k T_c^2} \beta_p W ,$$

где ω – частота приложенного поля E , β_p – параметр распределения времен релаксации, W – энергия активации, T_0 и T_c – температуры окружающей среды и максимума фактора потерь ϵ'' , k – постоянная Больцмана, λ – коэффициент теплопроводности диэлектрика, точное аналитическое решение для максимальной температуры $\vartheta_m = \vartheta_m(\beta, V_0)$ является многозначной функцией параметров нагрузки β и безразмерной температуры поверхности V_0 (рис. 3). Восходящие ветви сечения ϑ_m отвечают устойчивым температурным состояниям системы, а нисходящая – неустойчивому. При плавном увеличении нагрузки β , например, за счет увеличения рабочего напряжения $U = E \cdot 2h$, система из состояния (2) скачком переходит в состояние (3), при уменьшении нагрузки осуществляется обратный переход из состояния (4) в (1), что определяется явлением ограниченной тепловой неустойчивости (ОТНУ).

При значении параметра $V_0 \geq 0$ ($T_0 \geq T_c$) многозначность ϑ_m исчезает. В пространстве указанных параметров температура в центре диэлектрика ϑ_m характеризуется многозначной поверхностью $\vartheta_m(V_0, \beta)$, имеющей топологическую особенность типа «сборка», что является определенной «универсальностью», характеризующей некоторые нелинейные процессы. Учитывая решения для температурного поля в условиях релаксационных потерь и используя известные решения в области

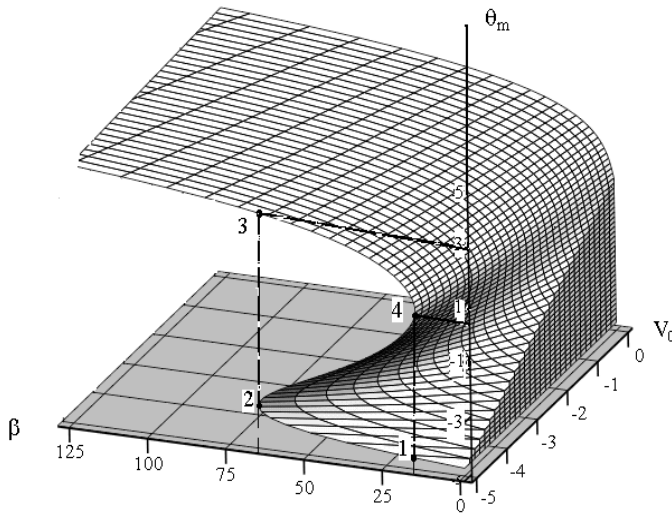


Рис.3. Поверхность стационарных состояний

высоких температур для джоулевых потерь (Фок В.А., Койков С.Н., Харитонов Е.В. и др.) рассмотрен общий случай теплового состояния конденсатора. На рис. 4 представлена зависимость значения максимальной температуры центра ϑ_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 потерями на проводимость (II). Спадающие ветви отвечают неустойчивому состоянию, при этом верхняя ветвь характеризует развитие

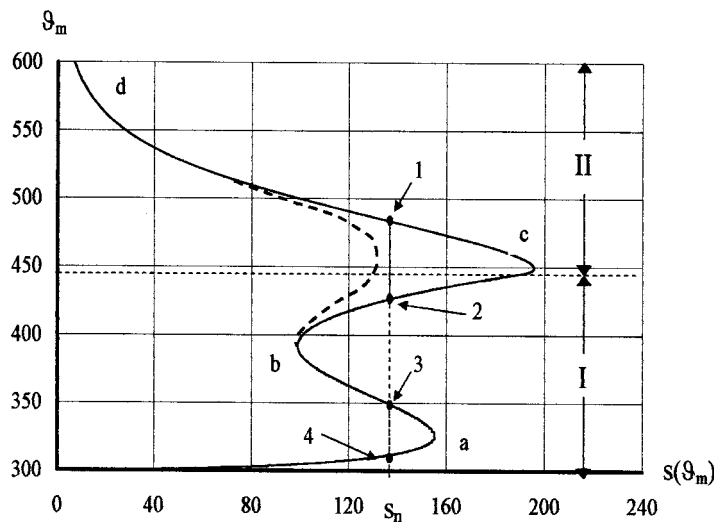


Рис.4. Зависимость температуры центра от параметра нагрузки

неограниченной тепловой неустойчивости — теплового пробы (ветвь $c-d$), а нижняя отражает явление ограниченной тепловой неустойчивости (ОТНУ), (ветвь $b-a$). В зависимости от соотношения температурных диапазонов I и II зависимость может иметь в верхней части вид, показанный штриховой кривой. Этот случай соответствует сдвигу максимума $\varepsilon''(T)$ в сторону более высоких температур. Возможные стационарные состояния отмечены цифрами 1–4 при одной и той же величине нагрузки S_n . Максимальное число стационарных состояний в системе равно 4, при этом все они могут быть устойчивыми в случае ограничения подводимой мощности за счет внешней цепи. Для конденсаторных структур, в которых толщина диэлектрика значительно меньше длины и ширины, применимо одномерное безразмерное уравнение теплопроводности :

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + q_v(\vartheta) - q_s(\vartheta) = \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} \quad (1)$$

и используя известные решения в области неограниченной тепловой неустойчивости — теплового пробы (ветвь $c-d$), а нижняя отражает явление ограниченной тепловой неустойчивости (ОТНУ), (ветвь $b-a$). В зависимости от соотношения температурных диапазонов I и II зависимость может иметь в верхней части вид, показанный штриховой кривой. Этот случай соответствует сдвигу максимума $\varepsilon''(T)$ в сторону более высоких температур. Возможные стационарные состояния отмечены цифрами 1–4 при одной и той же величине нагрузки S_n .

где $q_v = \beta \cdot \varepsilon''(\vartheta)$ и $q_s = Bi \cdot \vartheta$ – плотности тепловыделения и теплоотвода, $y = x / h$ – безразмерная координата; $\vartheta = (T - T_0)$ – температура перегрева; $Bi = \alpha h / \lambda$ – критерий Био;

$$\beta = \frac{\omega \varepsilon_0 \varepsilon''_{\max} E^2 h^2}{\lambda} \text{ – параметр нагрузки; } \tau = \frac{t}{\tau_0}; \tau_0 = \frac{h^2 \rho C_p}{\lambda} \text{ – масштаб времени. Уравнение (1)}$$

допускает 4 пространственно - однородных решения в случае $q_s = q_v$, 2 из которых ϑ_1 и ϑ_3 являются устойчивыми. Сосуществование этих решений возможно в виде движущегося фронта – автоволны температуры (АВТ) с амплитудой $(\vartheta_3 - \vartheta_1)$ и постоянной скоростью V , являющейся собственным значением нелинейной задачи. Экспериментальное изучение этого явления проводилось на пленке поливинилацетата (ПВА). Исследуемая пленка получалась методом отлива из раствора ПВА в ацетоне на подложку, представлявшую собой алюминиевую фольгу толщиной 3 мкм. Толщина пленки составляла 25 мкм, длина – 45 мм, ширина – 8 мм. Верхняя поверхность пленки металлизировалась алюминием, обеспечивая второй электрод протяженного плоского конденсатора. Над левым краем образца на высоте ~1 мм размещалась тонкая нихромовая нить, которая разогревалась импульсом тока от генератора Г5-54. Разогрев нити обеспечивал начальный прогрев края пленки до $T \approx 50 \div 80$ °С, что создавало своеобразную тепловую флуктуацию в образце. Измерение начального скачка температуры осуществлялось 1-й термопарой, остальные 7 термопар размещались по центру вдоль пленки с шагом 1 мм. В момент начального импульса “поджига” запускалась схема многоканального считывания температуры и результаты температурного

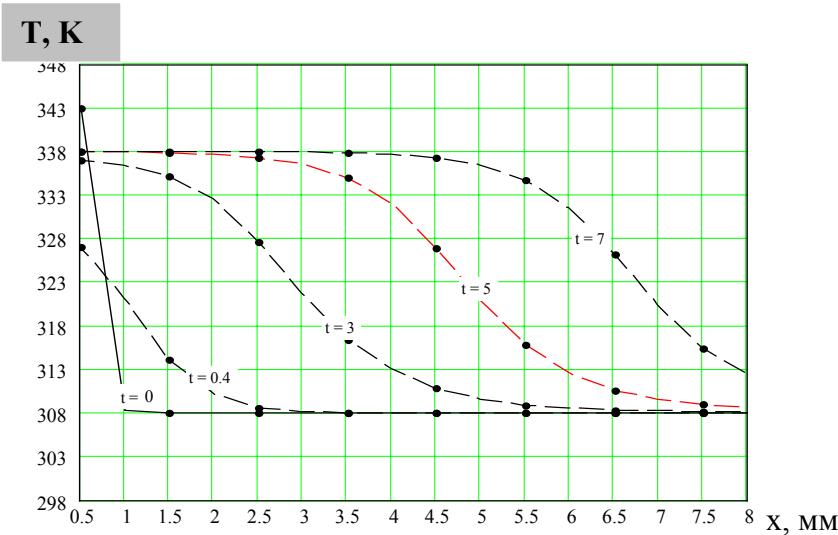


Рис.5. Автоволна температуры в пленке ПВА

распределения фиксировались с выбранным шагом по времени. На рис. 5 представлены экспериментальные данные распространения разогрева вдоль пленки. Точки соответствуют выбранным местам расположения термопар. Интерполяция данных (штриховые кривые) наглядно свидетельствует о распространении автоволнового фронта температуры со скоростью $V \approx 1$ мм/с. Точки устойчивых стационарных тепловых состояний соответственно

равны $T_1 \approx 308$ К и $T_3 \approx 338$ К. При величине испытательного напряжения $U = 140$ В, частоте $f = 100$ кГц и указанных температурах величина $q_v \sim q_s \sim 10$ МВт / м³. Рассчитанные значения $V = 0,74$ мм/с, длина фронта $\Delta = 4$ мм и экспериментальные значения $V_{\text{эсп}} \approx 1$ мм/с, $\Delta \approx 5$ мм находятся по порядку величины в хорошем соответствии друг с другом. Экспериментальные данные подтверждают существование автоволнового процесса переноса тепла в пленке ПВА в условиях электротеплового разогрева.

Полученные аналитические решения зависимости температуры в центре конденсатора ϑ_m от безразмерных параметров нагрузки β и температуры поверхности V_0 строго обосновывают возможность существования нескольких стационарных тепловых состояний слева и справа от максимума $\varepsilon''(\vartheta)$. 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 :

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

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

числа λ_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 :

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

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 источника тепла для максимальной температуры производится с

учетом $\beta(U_m) \cdot \overline{q(U_m)} = \lambda_0 U_m$, где параметр $\beta(U_m)$ и время развития тепловой неустойчивости τ :

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

Срок службы (время теплового пробоя) определяется как $\tau_{сл} = \tau(U_m = \vartheta_{кр})$, а температурная динамика центра – из анализа функции, обратной к $\tau(U_m)$. 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 содержит основные результаты экспериментальных исследований работоспособности конденсаторов в ФР. Отсутствие детальных справочных данных по температурным зависимостям $C(T)$ и $\operatorname{tg}\delta(T)$ конкретных типов конденсаторов в заданном температурном диапазоне обусловили проведение соответствующих экспериментальных исследований.

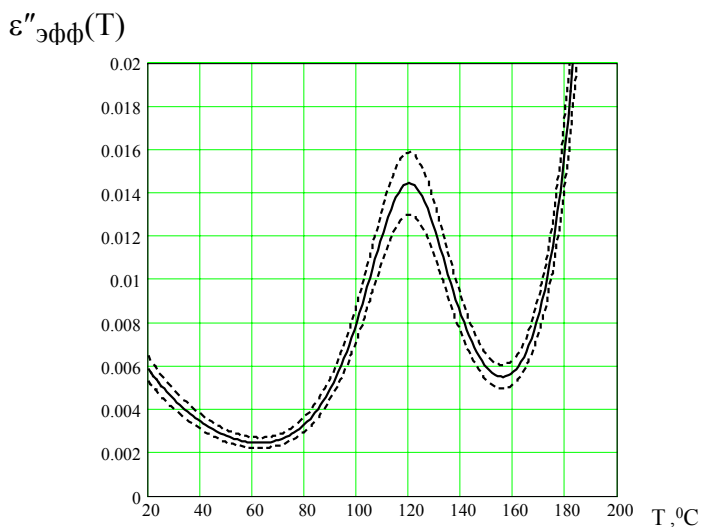
На основе этих результатов рассчитывалось эффективное значение фактора потерь :

$$\varepsilon''_{эфф}(T) = \frac{C(T)}{C_{20}} \operatorname{tg}\delta(T),$$

где C_{20} – емкость конденсатора при 20°C .

На рис.6 штриховкой приведены зоны разброса и сплошной линией – среднее значение полученных экспериментальных зависимостей $\varepsilon''_{эфф}$ для различных типоминалов конденсаторов К73-11 в диапазоне $20 \div 190^{\circ}\text{C}$. При дальнейшем нагреве наблюдалось тепловое разрушение конденсаторов, начинавшееся, как правило, с отслаивания изоляционных крышек выводов и контактных узлов ($T \sim 190 \div 195^{\circ}\text{C}$) и заканчивающееся плавлением корпуса ($T \sim 195 \div 220^{\circ}\text{C}$).

Рис.6. Температурная зависимость $\varepsilon''_{эфф}$



Зависимость пробивного напряжения от температуры изучалась в диапазоне $20 \div 190^{\circ}\text{C}$ при частоте 50 Гц и 1000 Гц. Экспериментально установлено, что электрическая прочность ПЭТФ диэлектрика конденсаторов К73 существенно снижается в области температур, превышающих $185 \div 190^{\circ}\text{C}$. Таким образом, за температуру

начала теплового разрушения (с некоторым запасом) следует принять $T_{кр} \sim 185^{\circ}\text{C}$. Разброс экспериментальных значений в указанных случаях подчиняется вейбулловскому закону распределения (коэффициент вариации 18 % в диапазоне $20 \div 175^{\circ}\text{C}$ и 25 % в области более высоких температур). При экспериментальном изучении работы конденсаторов диапазон нагрузок составлял по действующему значению напряжения $\Delta U = 120 \div 930\text{ В}$, по частоте $\Delta f = 0,2 \div 5\text{ кГц}$. Сроки службы составляли $50 \div 350\text{ с}$. В ходе эксперимента регистрировалась динамика роста температуры

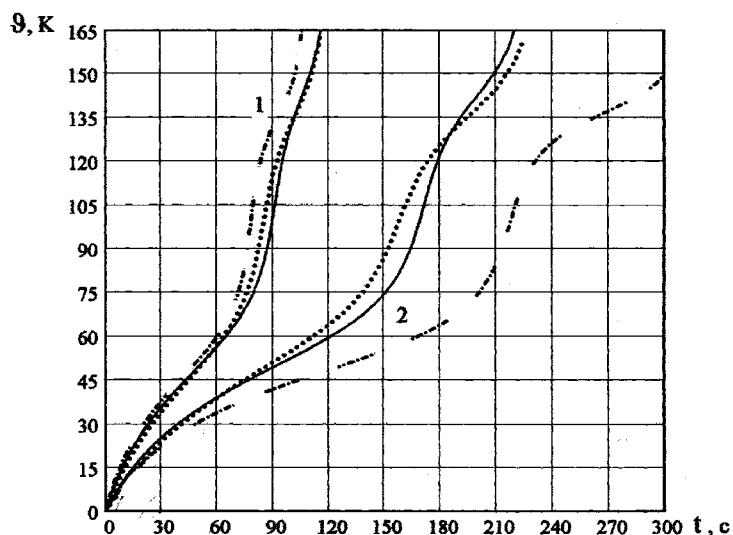


Рис.7. Динамика перегрева центра

температуры перегрева Θ центра или корпуса конденсатора относительно окружающей среды вплоть до наступления теплового пробоя, который и определял величину срока службы. На рис.7 приведены типичные опытные данные (точки) для конденсаторов К73-11-0,47-400В : 1 - $U = 700\text{ В}$, 2 - $U = 550\text{ В}$, частота $f = 1000\text{ Гц}$. Значительная доля времени роста температуры обусловлена диапазоном релаксационных потерь ($\Delta\Theta = 0 \div 140^{\circ}\text{C}$)

и составляет 85-90% от общего времени пробоя. Анализ экспериментальных данных свидетельствует о корреляционной зависимости времени теплового пробоя от произведения $f \cdot U^2$ в области частот $\Delta f = 0,4-2$ кГц; распределение сроков службы конденсаторов соответствует лагарифмически-нормальному закону. Ряд экспериментов показал, что для случая $f > 3$ кГц наблюдается как развитие теплового пробоя, так и параметрический отказ конденсаторов, вследствие разрушения контактных узлов (потеря емкости). Причем в ~ 30% случаев теплового пробоя наблюдается зона его развития в непосредственной близости от области контактного узла конденсатора. В области частот $f < 0,2$ кГц форсирование нагрузок ограничено величиной кратковременной электрической прочности. Испытания проводились в условиях свободно-конвективного и вынужденного теплообмена. Максимальное увеличение срока службы конденсаторов в условиях вынужденного воздушного и масляного охлаждения при значительном увеличении коэффициента теплоотдачи (с 20-30 до 120-130 Вт/м²К) составило ~ 17%, отмечено возрастание коэффициента вариации с 18% до 26%. Получены экспериментальные данные для различных типоминалов, уровней испытательного напряжения и частот с целью практического выбора конденсаторов для использования в ФР. На основе экспериментально изученных зависимостей срока службы конденсаторов от величины воздействующего напряжения были рассчитаны функциональные зависимости величины удельной реактивной мощности Q_v от срока службы для каждого типоминала (для области одномоментных сроков службы данные приведены на рис.8.):

$$Q_v(\tau) = \frac{\omega C_{20} U^2(\tau)}{V},$$

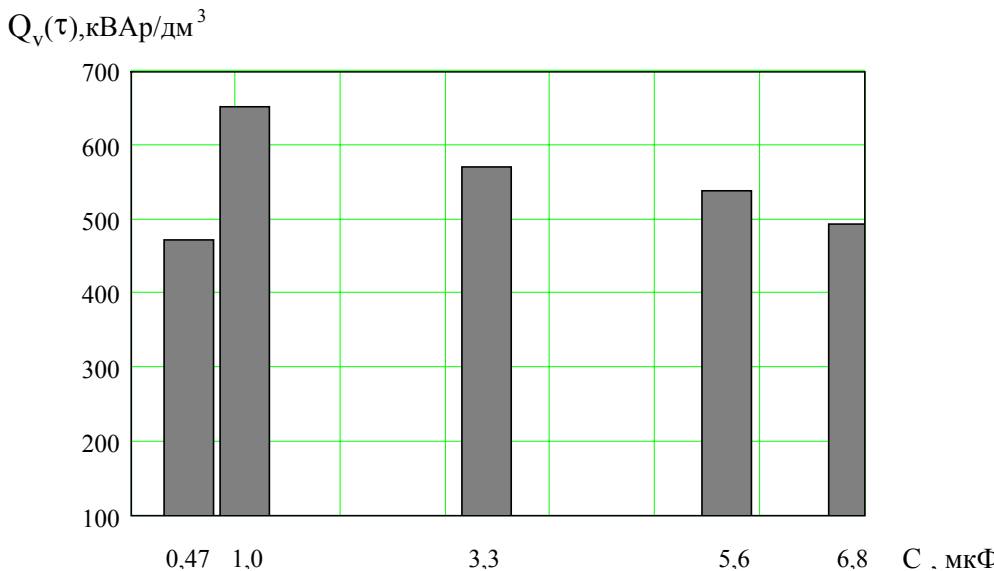


Рис.8. Максимальные значения удельной реактивной мощности

где $U(\tau)$ – функция, обратная к регрессионной зависимости $\tau(U)$ экспериментальных данных. Кривые $Q_v(\tau)$ характеризуются монотонным спадом для различных типоминалов. Вместе с тем, скорость спада этих кривых для различных типоминалов имеет разные значения, что обуславливает экстремальность зависимости $Q_v(C)$. Для оптимального выбора

конденсатора по максимальному значению удельной реактивной мощности предложен следующий критерий :

$$K_q = \frac{\rho C_p K_v}{\tau_T \left(1 - e^{-\frac{\tau_{сл}}{\tau_T}} \right)} \rightarrow \max ,$$

где K_v – коэффициент использования активного объема, ρ и C_p – среднеобъемные плотность и теплоемкость конденсатора, τ_T – тепловая постоянная. Для типонминала $C = 1$ мкФ величина K_q имеет максимальное значение, что согласуется с приведенными выше данными .

В пятой главе дано сопоставление экспериментальных и расчетных данных, обоснована инженерная методика расчета температуры центра и срока службы конденсатора, $U_{т.пр}$, критерия выбора K_q и приведена соответствующая программа примера расчета. Результаты расчета температурной динамики по формуле (2) (см. сплошные кривые на рис.7) свидетельствуют о применимости предложенного метода для оценки работоспособности конденсаторов в условиях больших электротепловых нагрузок. Вместе с тем, как показывает анализ, возможна более простая оценка для времени развития тепловой неустойчивости :

$$\tau = \tau_0 \int_0^{\vartheta(\tau)} \frac{du}{\beta \varepsilon''_{эфф}(u) - \lambda_0 u} , \quad (3)$$

где τ_0 – масштаб времени, связанный с геометрическими и теплофизическими параметрами конденсатора, $\beta = f (U, f, C, \lambda, \varepsilon''_{max} \dots)$ – известный параметр нагрузки. Однако, простое применение (3) для расчета приводит к весьма грубым результатам (см. штриховые линии на рис.7), поскольку при этом не учитывается пространственное распределение температуры по объему конденсатора. Интегральный учет этого обстоятельства возможен на основе введения коэффициента расщепления k уравнения теплопроводности и учете соотношения между осредненной u и максимальной ϑ_m температурами. Тогда, при подходящей аппроксимации $\varepsilon''_{эфф}(T)$, появляется возможность аналитического расчета тепловой динамики , что и используется в разработанной инженерной методике расчета. Методика учитывает также влияние воздушного зазора в объеме конденсатора на теплофизические параметры конденсаторной секции, условия охлаждения и расчет собственных чисел λ_0 . В работе получены сравнительно простые аналитические соотношения, позволяющие производить расчет динамики температуры центра и срока службы конденсаторов в зависимости от параметра нагрузки β , температур окружающей среды и критической температуры в диэлектрике $T_{кр}$. Существенным обстоятельством является также возможность пересчета $\tau_{сл}$ от одного конденсатора к другому с новыми значениями нагрузки , емкости и условиями охлаждения при сохранении вида зависимости $\varepsilon''_{эфф}(T)$. В этом случае меняются параметры $k \rightarrow k_1, \lambda_0 \rightarrow \lambda_1, \tau_0 \rightarrow \tau_1$ и $\beta \rightarrow \beta_1$ и срок службы в новых условиях :

$$\tau_{сл1}(\beta_1) = \frac{k_1 \tau_1 \lambda_0}{k \tau_0 \lambda_1} \tau_{сл}(\bar{\beta}),$$

где $\bar{\beta} = \frac{k_1 \beta_1 \lambda_0}{\lambda_1 k}$ - приведенный параметр нагрузки нового режима.

Основные выводы и результаты работы:

1. На основе точных решений ряда нелинейных модельных задач развиты теоретические представления о состоянии конденсаторных структур, находящихся в условиях интенсивного электротеплового разогрева. Для диэлектриков, обладающих температурным максимумом диэлектрических потерь, зависимость температуры центра от параметра нагрузки и температуры поверхности диэлектрика образует топологическую особенность типа “сборка”, которая характерна для широкого класса нелинейных динамических систем.

2. Рассмотрен общий случай стационарной теории теплового пробоя диэлектрика с учетом релаксационных и джоулевых потерь. Показанная множественность стационарных тепловых состояний обосновывает существование ряда нелинейных температурных эффектов, в том числе — явление ограниченной тепловой неустойчивости (ОТНУ).

3. Предложен метод осреднения нелинейного уравнения теплопроводности, позволяющий упростить анализ тепловой динамики максимальной температуры и времени развития теплового пробоя конденсаторов. Применимость метода обоснована удовлетворительным согласием полученных по нему решений с известными аналитическими решениями, результатами контрольных численных расчетов на ЭВМ, а также с результатами экспериментальных исследований.

4. Ряд результатов теоретических исследований имеет общий характер и применим к исследованию динамики электротеплового состояния конденсаторов на основе оксидных, керамических, пленочных типов рабочего диэлектрика.

5. С помощью разработанного испытательного стенда и соответствующих методик получен комплекс экспериментальных данных по работоспособности металлопленочных конденсаторов в форсированных режимах эксплуатации. Экспериментально изучена работоспособность конденсаторов К73 с ПЭТФ диэлектриком в диапазоне емкостей $\Delta C = 0,47\text{--}6,8$ мкФ, рабочих частот $\Delta f = 0,2\text{--}5$ кГц и сроков службы $\Delta t \sim 50\text{--}350$ с. Диапазон действующего значения синусоидального напряжения составлял $\Delta U = 130\text{--}950$ В, верхняя граница которого определяла максимальные величины напряженности электрического поля в диэлектрике на уровне $E_p = 90\text{--}110$ кВ/мм.

6. Экспериментально установлено, что электрическая прочность ПЭТФ диэлектрика конденсаторов К73 существенно снижается в области температур, превышающих 185–190 °С, что позволяет принять, с некоторым запасом, в качестве критической температуры для них $T_{кр} = 185$ °С. В условиях развития теплового пробоя, определяющего срок службы конденсаторов, значительная доля времени роста температуры до $T_{кр}$ обусловлена температурным диапазоном релаксационных потерь и составляет 85–90 % от общего времени пробоя.

7. Оптимальный выбор конденсаторов по величине максимального значения удельной реактивной мощности можно проводить на основе предложенного критерия K_q , который в существенно нестационарных условиях ФР отличается от соответствующего стационарного критерия. Кроме отношения площади поверхности S к объему конденсатора V , необходимо учитывать значение тепловых постоянных сравниваемых конденсаторов, их среднеобъемные плотность, теплоемкость и коэффициент использования активного объема. В области одноминутных сроков службы испытываемых конденсаторов значения достигнутой удельной реактивной мощности Q_v составили величину 500–650 кВАр/дм³, при этом максимальное значение $Q_v = 650$ кВАр/дм³ наблюдалось для типоминимала $C = 1,0$ мкФ. Коэффициент увеличения нагрузки по реактивной мощности в этих случаях может превышать обычные эксплуатационные значения ТУ АДПК.673633.013 в 300–500 раз и зависит от типоминимала конденсатора.

8. Незначительное увеличение срока службы в условиях вынужденного воздушного и масляного охлаждений, увеличивающийся разброс экспериментальных данных делают неэффективным применение методов вынужденного охлаждения для улучшения работоспособности конденсаторов при значениях срока службы $\tau_{сл} \sim 50 \div 350$ с.

В области увеличенных сроков службы, исчисляемых десятками минут, проявляется влияние тепловой дефектности конденсаторов, в том числе — тепловая неоднородность конденсаторной секции и развитие процессов самовосстановления. Локальное развитие тепловой неустойчивости в ряде случаев носит ограниченный характер (ОТНУ).

9. На основе проведенных исследований разработана инженерная методика расчета динамики электротеплового состояния и оптимального выбора конденсаторов для их эксплуатации в форсированных режимах. Различия между расчетными данными $\tau_{сл}$ и среднестатистическими опытными значениями не превышают 15 %. Получены сравнительно простые формулы расчета, которые позволяют выполнять пересчет $\tau_{сл}$ от одного режима нагрузки к другому для конденсаторов на основе одного типа диэлектрика.

10. Впервые экспериментально обнаружен и теоретически обоснован автоволновой процесс переноса тепла (АВП) при распространении фронта электротеплового разогрева в конденсаторной структуре с ПВА диэлектриком. На основе обнаруженного эффекта, обусловленного пространственным развитием ОТНУ, возможно создание специальных датчиков температуры, генераторов тепловых колебаний, структур тепловой памяти, использующих диэлектрик, обладающий температурным максимумом потерь, характерным не только для ряда полярных полимеров, но и для некоторых видов керамики, например, сегнетоэлектрического типа.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Бондаренко П.Н., Емельянов О.А. Электрическая прочность газообразных и жидких диэлектриков в тонких слоях // Докл. Всесоюз. науч. конф. «Физика диэлектриков».- Баку, 1982. -Т.1. - С. 106-107.
2. Бондаренко П.Н., Емельянов О.А., Метельков А.И. Определение допустимых электрических нагрузок конденсаторов по тепловой устойчивости //В кн. «Повышение качества и улучшение технико - экономических показателей силовых конденсаторов».V Всес.н.-т. совещание. - М.:Информэлектро,1983.- С. 67-69.
3. Бондаренко П.Н., Емельянов О.А., Койков С.Н. Оценка активных и реактивных составляющих мощности в конденсаторах // В кн. «Совершенствование электрооборудования и средств автоматизации технологических процессов». - К-на-Амуре.: Изд-во КНАПИ, 1986.-С. 79-81.
4. Емельянов О.А. Нелинейные электрические эффекты и тепловая неустойчивость в диэлектриках //Докл. Всесоюз. науч. конф. «Физика диэлектриков».- Томск, 1988 .-Т. 4. – С. 42.
5. Бондаренко П.Н., Емельянов О.А., Метельков А.И. Определение воздушных зазоров в намотанных полимерных конденсаторах //«Электронная техника». - Сер. 5: Радиодетали и компоненты. -1989.- В.3.- С. 45-49.
6. Бондаренко П.Н., Емельянов О.А., Койков С.Н. Распространение волнового фронта электротеплового разогрева в диэлектриках // Письма в ЖТФ.-1989.-Т.15. -Вып.16.-С. 45-48.
7. Емельянов О.А. Исследование тепловой устойчивости полимеров под воздействием электрического поля // Докл. 3 Всесоюз. н.-т. конференции «Совершенствование экспериментальных методов исследования физических процессов». -Л.: «Судостроение»,1989.- С. 78-81.
8. Емельянов О.А. Электротепловая неустойчивость полярного полимерного диэлектрика за областью температуры стеклования // Письма в ЖТФ.- 2001.-Т. 27. -Вып.16. - С. 32-39.
9. Емельянов О.А. Особенности электротепловой кинетики в электрических конденсаторах с полярным диэлектриком // Докл. IV Междун. конф. ICEMC-2001.- Москва, 2001.- С. 30-31.
10. Емельянов О.А. Особенности релаксационной поляризации полярного диэлектрика в области больших электротепловых нагрузок // Письма в ЖТФ.-2001.-Т.28. -Вып.22. - С. 32-38.
11. 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.
12. Емельянов О.А. Особенности работоспособности металлопленочных конденсаторов в форсированных режимах // Электротехника.-2002.-.№ 4.- С. 6-10.
13. Емельянов О.А. Появление спектра времен релаксации диэлектрика в области больших градиентов температур // Тр.III Междун. конф. «Электрическая изоляция-2002»(ICEI 2002).- СПб., 2002.- С. 185-186.
14. Емельянов О.А. Оценка динамики температуры в конденсаторах при больших электротепловых нагрузках //Тр.III Междун. конф. «Электрическая изоляция-2002» (ICEI 2002). - СПб., 2002. - С. 187-189.
15. O.A.Emelyanov. 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.